



DZIEDZINA: Nauki inżyneryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Testowanie wybranych funkcji jazdy autonomicznej samochodu
w warunkach laboratoryjnych, na przykładzie stanowiska dla
czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire*

Autor: mgr inż. Michał Pietruch

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Młyniec, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Andrzej Wetula, prof. AGH

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Merit Poland Sp. z o.o.

Kraków, 2023



FIELD OF SCIENCE: Engineering and Technology

Scientific Discipline: Automation, Electronics, Electrical Engineering and Space Technologies

DOCTORAL THESIS

*Testing of selected autonomous driving functions of a car in
laboratory conditions, on the example of a test stand for
Steer-by-Wire steering angle sensor*

Author: mgr inż. Michał Pietruch

First supervisor: dr hab. inż. Andrzej Młyniec, prof. AGH
Assisting supervisor: dr hab. inż. Andrzej Wetula, prof. AGH

Completed in: AGH University of Krakow
Merit Poland Sp. z o.o.

Krakow, 2023

*Chciałbym serdecznie podziękować:
Profesorowi dr hab. inż. Andrzejowi Młyńcowi za
umożliwienie mi pracy nad doktoratem pod jego
skrzydłami,
dr hab. inż. Andrzejowi Wetuli za codzienną opieką
naukową, cenne wskazówki i poświęcony czas,
firmie Merit Poland za możliwość realizacji doktoratu
w trybie wdrożeniowym oraz
mojej żonie Marcie za wyrozumiałość, cierpliwość i
wsparcie w tym czasie.*

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska porusza problem ograniczonej możliwości testów i walidacji funkcji automatyzacji jazdy kompletnego samochodu w ruchu drogowym. Walidacja tego typu, oprócz olbrzymiej zalety, jaką jest testowanie w docelowym środowisku, nie jest w stanie stworzyć wszystkich wymaganych przypadków testowych. Nie ma też możliwości odtworzenia identycznych warunków w celu np. potwierdzenia, że błędy zostały naprawione. Ponadto ze względu na ryzyko spowodowania wypadku, coraz więcej państw ogranicza lub całkowicie zabrania testowania systemów automatyzacji jazdy w ruchu drogowym. Dlatego jako etap pośredni zaproponowano testy i walidację kompletnego pojazdu w laboratorium. Do tego celu wymagana jest symulacja świata zewnętrznego w taki sposób, aby samochód miał wrażenie jazdy w rzeczywistych warunkach.

W związku z tym pojawia się pytanie – czy jest możliwe wierne zasymulowanie świata rzeczywistego w laboratorium w celu całkowitego przetestowania i zwalidowania funkcji jazdy autonomicznej samochodu? Aby to osiągnąć, przeprowadzono kompleksowy i systematyczny przegląd czujników i systemów samochodu, w celu zidentyfikowania, które z nich i w jakim stopniu biorą udział w automatyzacji jazdy. Przeanalizowano takie systemy jak: kamery światła widzialnego, kamery bliskiej podczerwieni, kamery termowizyjne, kamery czasu przelotu, kamery stereowizyjne, kamery strukturalne, lidary mechaniczne i półprzewodnikowe, radary, czujniki ultradźwiękowe, globalny system nawigacji satelitarnej GNSS, inercyjną jednostkę pomiarową IMU, odometrię, mapy wysokiej definicji, V2X /C-V2X oraz systemy Drive-by-Wire. Dodatkowo zostały zbadane zjawiska fizyczne wykorzystywane przez powyższe czujniki i systemy, w celu ewentualnego zaproponowania zasady działania urządzeń stymulujących. Został również wykonany przegląd typów i odmian czujników oraz określono, które z nich faktycznie są obecnie wykorzystywane w samochodach masowej produkcji.

Następnie został wykonany przegląd dostępnych na rynku urządzeń oraz oprogramowania wykorzystywanego do bezprzewodowego stymulowania wyżej wymienionych czujników i systemów, w celu określenia aktualnego stanu wiedzy, możliwości technicznych i luki technologicznej, będącej przeszkodą w stworzeniu laboratoryjnego stanowiska testowego do jazdy autonomicznej. W przypadku braku tego typu urządzeń zostały przeanalizowane obecnie wykorzystywane metody i techniki testowe, aby określić lukę pomiędzy stanem obecnym a wymaganym do testów pojazdu w pętli. Ponadto został dokonany krytyczny przegląd publikacji naukowych oraz patentów, w celu zidentyfikowania trwających prac rozwojowych w tej dziedzinie. Bazując na wykonanej analizie, zaproponowano pomysły ulepszenia używanych metod testowych oraz koncepcję działania brakujących symulatorów.

Zidentyfikowano najważniejsze składowe laboratoryjne stanowiska testowego do pojazdu w pętli i opisano zasadę jego działania. Dodatkowo wykonano przegląd rodzajów i typów hamowni dynamometrycznych, pod kątem wybrania najlepszego rozwiązania do symulowania oporów ruchu, podczas wirtualnych jazd testowych. W ostatnim etapie zostały zidentyfikowane komercyjne stanowiska testowe do fuzji czujników oraz pojazdu w pętli. Określono zakres testów, które są w stanie wykonać, zidentyfikowano braki i potencjalne problemy oraz zaproponowano rozwiązania ulepszenia obecnych konstrukcji.

W części praktycznej, w oparciu o wirtualne jazdy testowe, zaprojektowano, stworzono i zweryfikowano, pierwsze tego typu stanowisko testowe, działające w pętli zamkniętej, do weryfikacji czujnika kąta kierownicy. Zbadano wpływ czujnika na samochód z układem kierowniczym typu Steer-by-Wire (SbW). Wyznaczano błędy wprowadzane przez system testowy, w celu oceny jego stabilności, wydajności i przydatności do testów. Następnie przetestowano i porównano trzy komercyjne czujniki kąta kierownicy podczas wirtualnego przejazdu testowego i zweryfikowano

ich wydajność w systemie SbW. Określono błędy czujników oraz spójność parametrów względem parametrów deklarowanych przez producenta. W ostatnim etapie zbadano wpływ dokładności czujnika i okresu wysyłania danych na magistralę CAN na trajektorię samochodu z układem kierowniczym typu Steer-by-Wire.

Abstract

This doctoral dissertation addresses the problem of the limited ability to test and validate the driving automation function of a complete car in traffic. Such validation, in addition to the huge advantage of testing in the target environment, is not able to create all the required test cases. Nor is it possible to reproduce identical conditions in order, for example, to confirm that bugs have been fixed. In addition, due to the risk of causing an accident, more and more countries are restricting or completely prohibiting the testing driving automation systems in road traffic. Therefore, testing and validation of a complete vehicle in the laboratory has been proposed as an intermediate step. For this purpose, simulation of the outside world in the laboratory is required in such a way that the car has the impression of driving in real conditions.

This raises the question - is it possible to accurately simulate the real world in the laboratory to completely test and validate the car's autonomous driving functions? To achieve this goal, a comprehensive and systematic review of the car's sensors and systems was conducted to identify which of them are involved in driving automation and to what extent. Such systems as visible light cameras, near-infrared cameras, thermal imaging cameras, time-of-flight cameras, stereo vision cameras, structural cameras, mechanical and solid-state lidar, radar, ultrasonic sensors, GNSS global navigation satellite system, IMU inertial measurement unit, odometry, high-definition maps, V2X /C-V2X and drive-by-wire systems were analyzed. In addition, the physical phenomena used by the above sensors and systems have been studied to propose a principle for stimulating devices. A review of the sensor types was also made, and it was determined which of them are currently used in mass production cars.

Next, a review of commercially available devices and software used for wireless stimulation of the sensors and systems was made, to determine the current state of knowledge, technical capabilities and the technological gap that is an obstacle to the creation of a laboratory test bed for autonomous driving. In the absence of such equipment, the currently used test methods and techniques were analyzed to determine the gap between the current state and the required state for testing a vehicle in the loop. In addition, a critical review of scientific publications and patents was conducted to identify ongoing development work in the field. Based on the analysis performed, ideas for improving the test methods in use were proposed, as well as a concept for the operation of missing stimulators.

The most important components of a laboratory test bed for a vehicle-in-the-loop were identified and the principle of its operation was described. In addition, a review of dynamometer types was performed to select the best solution for simulating motion resistance during virtual test drives. In the final stage, commercial test stands for sensor fusion and vehicle-in-the-loop were identified. The scope of tests they can perform was determined, shortcomings and potential problems were identified, and solutions for improving current designs were proposed.

In the practical part, based on virtual test drives, a first-of-its-kind closed-loop test stand was designed, created and verified for verification of the steering angle sensor. The effect of the sensor on a Steer-by-Wire (SbW) car was investigated. The errors introduced by the test system were determined to evaluate its stability, performance and suitability for testing. Three commercial steering angle sensors were tested and compared during a virtual test run, and their performance in the SbW system was verified. Sensor errors and consistency against manufacturer-declared parameters were determined. In the final step, the effect of sensor accuracy and the period of sending data to the CAN bus on the trajectory of a Steer-by-Wire car was studied.

Spis treści

Streszczenie	4
Abstract	6
Spis treści	7
Indeks Skrótów	10
Wykaz artykułów naukowych opublikowanych w trakcie realizacji pracy doktorskiej	14
1 Wstęp	15
1.1 Systemy pasywnego bezpieczeństwa, zaawansowane systemy wsparcia kierowcy oraz systemy aktywnego bezpieczeństwa	16
1.2 Poziomy zautomatyzowanej jazdy	18
2 Cel i zakres pracy	22
3 Przegląd czujników i systemów wykorzystywanych do jazdy autonomicznej	25
3.1 Czujniki ultradźwiękowe	26
3.2 Określanie położenia GNSS / IMU / Odometria / Mapy	28
3.2.1 Globalny System Nawigacji Satelitarnej GNSS	28
3.2.2 Inercyjna jednostka pomiarowa IMU	41
3.2.3 Odometria	44
3.2.4 Mapy wysokiej definicji	46
3.3 Kamery	48
3.3.1 Kamery światła widzialnego	48
3.3.2 Kamery podczerwone	50
3.3.3 Kamery 3D	52
3.4 Radar	57
3.4.1 Typy radarów	58
3.4.2 Wykrywanie wielu obiektów i formowanie wiązki	61
3.4.3 Skuteczna powierzchnia odbicia	64
3.5 Lidar	64
3.5.1 Budowa lidarów	68
3.5.2 Rodzaje lidarów	71
3.6 Komunikacja pojazd do wszystkiego V2X	79

3.6.1	Warstwa fizyczna.....	82
3.6.2	Warstwa łącza danych	82
3.6.3	Warstwa sieciowa i transportowa	83
3.6.4	Warstwa aplikacji	83
3.6.5	C-V2X.....	88
3.7	Podsumowanie rozdziału	89
4	Testowanie, weryfikacja i walidacja czujników i systemów używanych w automatyzacji jazdy.....	91
4.1	Wstęp	91
4.2	Czujniki ultradźwiękowe.....	92
4.3	Kamery	94
4.3.1	Kamery światła widzialnego.....	94
4.3.2	Kamery termowizyjne	95
4.3.3	Kamery bliskiej podczerwieni	100
4.4	GNSS	101
4.5	IMU.....	102
4.5.1	Stoły obrotowe.....	103
4.5.2	Wibratory.....	103
4.5.3	Wirówki	104
4.6	Radar.....	105
4.7	Lidar.....	109
4.8	V2X.....	114
4.9	Podsumowanie rozdziału	115
5	Testowanie i walidacja samochodu w warunkach laboratoryjnych	119
5.1	Stanowiska HIL do fuzji czujników	119
5.2	Testy pojazdu w pętli.....	120
5.2.1	Symulator środowiska	121
5.2.2	Stymulatory czujników	121
5.2.3	Stymulator oporów ruchu wraz z układami pomiarowymi	122
5.2.4	Zasada działania stanowiska.....	126

5.2.5	Obecne projekty stanowisk	126
5.3	Podsumowanie rozdziału.....	127
6	Projekt stanowiska do testów czujnika kąta kierownicy	128
6.1	Wstęp.....	128
6.2	Budowa stanowiska testowego.....	131
6.2.1	CarMaker i CANoe	133
6.2.2	VTSystem.....	134
6.2.3	Sterownik silnika krokowego.....	134
6.2.4	Silnik krokowy	135
6.2.5	Mocowanie silnika ze sprzęgłem	135
6.2.6	Interfejs FMI	136
6.2.7	Zasada działania i mapowanie zmiennych	137
6.2.8	Weryfikacja wydajności stanowiska testowego	140
6.3	Metodologia testowania	142
6.3.1	Procedura testowa dla rzeczywistych czujników kąta kierownicy	142
6.3.2	Procedura testowa do zbadania wpływu dokładności i okresu danych.....	142
6.4	Analiza wyników.....	145
6.4.1	Testy komercyjnych czujników kąta kierownicy	145
6.4.2	Wpływ dokładności i okresu wysyłania danych	149
6.4.3	Podsumowanie	153
7	Wnioski i dalsze kierunki prac	155
8	Bibliografia.....	159

Indeks Skrótów

ABC - Active Body Control
ABS - Anti-lock Braking System
ACC - Adaptive Cruise Control
AD - Autonomous Driving
ADAS - Advanced Driver Assistance System
AEB - Automatic Emergency Braking
AIFS - Arbitrary Inter Frame Spacing
C/A - Coarse Acquisition
AM - Amplitude Modulation
AMCW - Amplitude Modulation Continuous Wave
APD - Avalanche Photodiode
ARIB - Association of Radio Industries and Businesses
AS - Active Steering
BAS – Brake Assist System
BbW – Brake-by-Wire
BSM - Basic Safety Message
C-ACC - Cooperative Adaptive Cruise Control
C-V2X - Cellular-Vehicle to Everything
CA - Collision Avoidance
CAM - Cooperative Awareness Message
CAN – Controller Area Network
CCD - Charge-Coupled Device
CCH - Control Channel
CCM - Cooperative Control Message
CMOS - Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CP-OFDM - Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CPM - Collective Perception Message
CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSR - Common Safety Request
CTL – Control
CUM - Certificate Updating Message
CVM - Closing Velocity Module
CW - Continuous Wave
DARTS - Dspace Automotive Radar Test Systems
DbW - Drive-by-Wire
DCC - Decentralised Congestion Control
DDT - Dynamic Driving Task
DENM - Decentralized Environmental Notification Message
DOF - Degree of Freedom
DOP - Dilution of Precision
DSAP - Destination Service Access Point
DSRC - Dedicated Short-Range Communications
dToF - direct Time of Flight
eCall – Emergency Call
EBA - Emergency Braking Assist
EBD – Electronic Brakeforce Distribution
EDCA - Enhanced Distributed Channel Access
EEL - Edge-Emitting Laser
EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay Service
EHPS - Electro- Hydraulic Power Steering
EMB – Electromechanical Brakes
EMS – Electromechanical Steering
EPS - Electrical Power Steering

ESC - Electronic Stability Control
ESP - Electronic Stability Program
ETC - Electronic Traction Control
ETSI - European Telecommunications Standards Institute
EVA - Emergency Vehicle Alert
FCW - Forward Collision Warning
FIR – Far Infrared
FM - Frequency Modulation
FMCW - Frequency Modulation Continuous Wave
FMI - Functional Mock-Up Interface
GAGAN - GPS Aided Geo Augmented Navigation System
GBAS - Ground Based Augmentation System
GCM - GNSS Correction Message
GNSS - Global Navigation Satellite System
GPS - Global Positioning System
HARA - Hazard Analysis and Risk Assessment
HD - High Definition
HIL – Hardware-in-The-Loop
HPS - Hydraulic Power Steering
HWM - Hand-Wheel Motor
ICA - Intersection Collision Alert/Avoidance
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIHS - Insurance Institute for Highway Safety
IMU – Inertial Measurement Unit
IMZM - Interference Management Zone Message
INS - Inertial Navigation System
IR - Infrared
ISA - Inertial Sensor Assembly
iToF - indirect Time of Flight
iTPMS - Indirect Tire Pressure Monitoring System
ITS - Intelligent Transport Systems
IVIM - Infrastructure to Vehicle Information Message
LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCA - Lane Change Assist
LCA - Lane Centering Assist
LDW - Lane Departure Warning
LFM - Linear Frequency Modulation
LIDAR - Light Detection and Ranging
LKA - Lane Keeping Assist
LLC - Logical Link Control
LRR - Long Range Radar
LTS - Lidar Target Simulator
LWIR – Long Wave Infrared
MAC - Medium Access Control
MAPEM - Map Extended Message
MCC - Mission Control Centre
MCM - Manoeuvre Coordination Message
MEMS - Micro Electro-Mechanical Systems
MIMO - Multi Input Multi Output
MMT - Micro-Motion Technology
MPPC - Multi-Pixel Photon Counter
MRR - Medium Range Radar
MSAS - Multi-Functional Satellite Augmentation System
MSCM - Maneuver Sharing and Coordination Message
MWIR – Mid Wave Infrared

NCAP - New Car Assessment Programme
NLES - Navigation Land Earth Station
NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration
NIR – Near Infrared
NTRIP - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
ODD - Operational Object Design
OEDR - Object and Event Detection and Response
PAM - Platooning Awareness Message
PCM - Platooning Control Message
PDC - Park Distance Control
PDCM - Probe Data Config Message
PDM - Probe Data Management
PDRM - Probe Data Report Message
PPS - Precise Positioning System
PRN - Pseudo Random Noise
PSM - Personal Safety Message
PSM2 - Personal Safety Message 2
PVD - Probe Vehicle Data
RADAR - Radio Detection and Ranging
RB - Resource Blocks
RCS - Radar Cross Section
RE - Resource Elements
RGA - Road Geometry and Attributes
RIMS - Ranging and Integrity Monitoring Station
RRM - Roadside Ranging Message
RSA - Road Side Alert
RSM - Road Safety Message
RTK - Real Time Kinematic
RTS - Radar Target Simulator
RWM - Road Weather Message / Road-Wheel Motor
SAE - Society of Automotive Engineers
SAEM/SAM - Service Announcement Essential Message
SAS - Steering Angle Sensor
SBAS - Satellite Based Augmentation System
SBW – Steer-by-Wire
SCH - Service Channel
SCPR - Signal Control and Prioritization Request
SCPS - Signal Control and Prioritization Status
SDSM - Sensor Data Sharing Message
SIL – Software-in-The-Loop
SIMO - Single Input Multiple Output
SIPM - Silicon Photomultiplier
SNAP - Subnetwork Access Protocol
SPAD - Single Photon Avalanche Diode
SPAT - Signal Phase and Timing Message
SPATEM - Signal Phase and Timing Extended Message
SPS - Standard Positioning Service
SREM - Signal Request Extended Message
SRR - Short Range Radar
SSAP - Source Service Access Point
SSEM - Signal Status Extended Message
SSM - Signal Status Message
SWIR – Short Wave Infrared
TAM - Toll Advertisement Message
TCS - Traction Control System

TEC - Total Electron Content
TIM - Traveler Information Message
ToF - Time of Flight
TSPaT - Traffic Signal Phase and Timing
TUAM - Toll Usage Ack Message
UERE - User Equivalent Range Error
UWB - Ultra-Wide Band
V2X - Vehicle-to-everything
VAM - Vulnerable Road Users Awareness Message
VCSEL - Vertical-cavity surface-emitting laser
VDG - Variable Delay Generator
VIL - Vehicle-in-the-loop
VRTS - Vehicle Radar Test System
VRU - Vulnerable Road Users
VST - Vector Signal Transceiver
WSA - WAVE Service Advertisement Message
WSM - WAVE Short Message
WSMP - WAVE Short Message Protocol
WWAS - Wide Area Augmentation System
YAG - Yttrium Aluminum Garnet
ZHD - Zenith Hydrostatic Delay

Wykaz artykułów naukowych opublikowanych w trakcie realizacji pracy doktorskiej

Podczas pracy nad doktoratem zostały opublikowane trzy artykuły naukowe, w których zaprezentowano rezultaty prac. Dwa z nich znajdują się w czasopismach naukowych z listy Ministerstwa Edukacji i Nauki (MEiN):

1. Publikacja [1]
M. Pietruch, A. Wetula, and A. Młyniec, "Influence of the Accuracy and CAN Frame Period of the Steering Wheel Angle Sensor (SAS) on the Trajectory of a Steer-by-Wire-Equipped Car," *IEEE Access*, vol. 10, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3211942. (lista MEiN, **100 pkt.**, IF = 3,476).
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9910150>
2. Publikacja [2]
M. Pietruch, A. Wetula, and A. Młyniec, "Verification of Hardware-In-The-Loop Test Bench for Evaluating Steering Wheel Angle Sensor Performance for Steer-By-Wire System," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 29, no. 4, 2022, doi: 10.24425/mms.2022.143065. (lista MEiN, **100 pkt.**, IF = 1,009).
<https://metrology.wat.edu.pl/earlyaccess/29/4/MMS-01304-2022-02-Early-Access.pdf>
3. Publikacja [3]
M. Pietruch, A. Młyniec, A. Wetula, "An overview and review of testing methods for the verification and validation of ADAS, active safety systems, and autonomous driving," *Min. - Informatics, Autom. Electr. Eng.*, vol. 1 (541), no. 1, 2020, doi: 10.7494/miag.2020.1.541.19.
http://www.miag.agh.edu.pl/wp-content/uploads/MIAG_01-2020-2.pdf
(5 pkt.).

1 Wstęp

Rozwój przemysłu motoryzacyjnego w XXI wieku znacznie przyspieszył. Jest to spowodowane szeregiem czynników, z których najważniejszym z pewnością jest rozwój elektroniki oraz oprogramowania. Początkowo samochody były praktycznie w całości urządzeniami mechanicznymi, natomiast obecnie, szczególnie w kontekście samochodów elektrycznych, można bardziej je uważać za urządzenia elektroniczne niż mechaniczne. Samochody służące kiedyś tylko do przemieszczania, w dzisiejszych czasach są centrami rozrywki oraz relaksu. Ponadto zapewniają duży poziom bezpieczeństwa nie tylko dzięki udoskonaleniu budowy podwozia czy nadwozia, ale również dzięki systemom pasywnego oraz aktywnego bezpieczeństwa. Dzięki temu wskaźnik ofiar śmiertelnych w USA spadł trzykrotnie w ciągu ostatnich kilku dekad z 3,35 osoby/100 mln mil w 1975 roku do 1,37 osoby/100 mln mil w 2021 roku [4].

Niemniej wypadki nadal się zdarzają. Z danych zebranych przez Amerykański urząd ds. bezpieczeństwa ruchu drogowego NHTSA (ang. National Highway Traffic Safety Administration) wynika, że 2% wypadków jest spowodowanych z winy samochodu, 2% z winy środowiska i aż 94% z winy kierowcy [5]. Z tego powodu kolejnym etapem redukcji liczby wypadków jest ograniczenie lub wyeliminowanie kierowcy z prowadzenia samochodu. W ostatnich latach prace nad zaawansowanymi systemami wspomaganie kierowcy ADAS (ang. Advanced Driver Assistance System) oraz autonomiczną jazdą AD (ang. Autonomous Driving) znacznie przyspieszyły. Samochody zostały wyposażone w szereg dodatkowych czujników oraz zaawansowane oprogramowanie, dzięki którym rola kierowcy w pojeździe jest coraz mniejsza, a w niektórych przypadkach zbędna. Obecnie oficjalnie żaden producent samochodu nie określa swojego samochodu jako w pełni autonomicznego i prawdopodobnie długo jeszcze tego nie zrobi, nie z powodu technicznego, lecz raczej z przyczyn biznesowo-prawnych. Określenie samochodu jako w pełni autonomicznego w sytuacji wypadku powodowałoby wzięcie całej odpowiedzialności przez producenta samochodu, co mogłoby doprowadzić go do poważnych problemów.

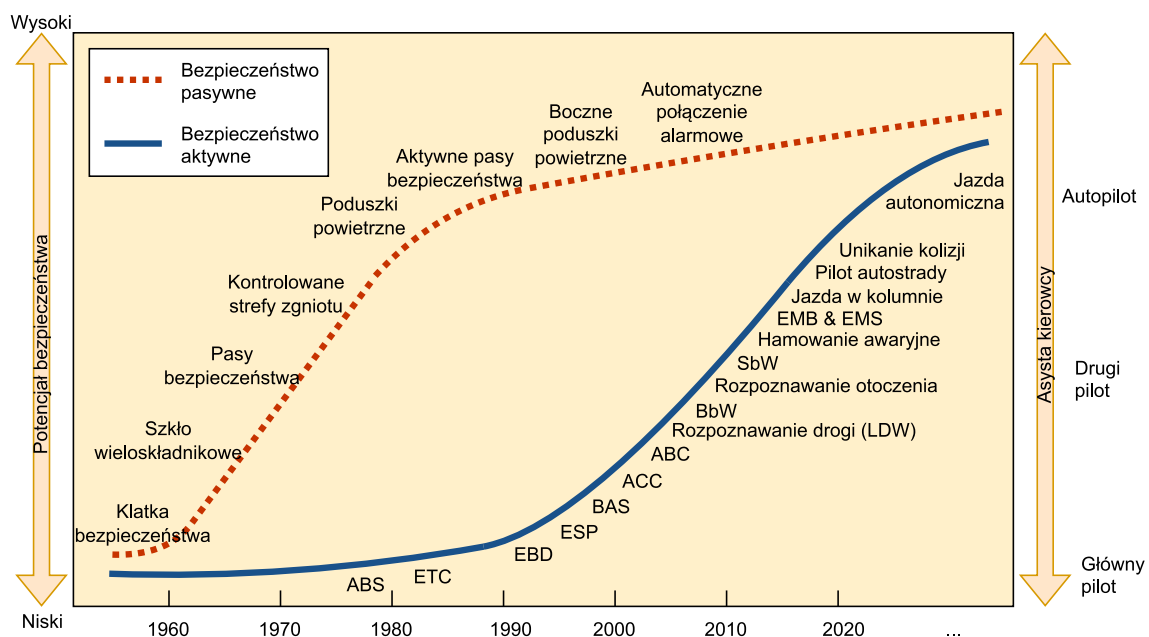
Jednym z największych wyzwań pojawiających się wraz z automatyzacją jazdy oraz samochodami autonomicznymi jest weryfikacja i walidacja systemów biorących udział w automatyzacji jazdy. Weryfikacja jest to sprawdzenie, czy system spełnia wcześniej zdefiniowane wymagania, standardy i normy, natomiast walidacja dostarcza dowodów, że system spełnia swoją funkcję w prawdziwym zastosowaniu, w docelowym środowisku [6]. Jako że samochód ma być pozbawiony kierowcy, systemy muszą być przetestowane gruntownie. Jak wiadomo z podstaw teorii testowania oprogramowania, testowanie gruntowne jest w zasadzie niemożliwe. Prowadzi do konkluzji, że niezależnie jak długo i szczegółowo dany system jest testowany, zawsze zostaje pewna doza niepewności co do prawidłowego funkcjonowania urządzenia w każdych możliwych warunkach. Obecnie testowanie jest przeprowadzane na wielu poziomach: modelu, oprogramowaniu, hardware'u czy pojazdu. Ostateczna walidacja pojazdu jest wykonywana przez kierowców testowych najpierw na torach testowych czy w sztucznych miastach, a na końcu w rzeczywistym ruchu drogowym. Taka walidacja oprócz olbrzymiej zalety, jaką jest testowanie w docelowym środowisku, ma wiele wad. Po pierwsze brak możliwości spreparowania wszystkich wymaganych przypadków testowych, które mogą być w przyszłości napotkane przez samochód, po drugie problem z odtworzeniem identycznych warunków testowych w celu np. potwierdzenia, że błędy zostały naprawione, a przede wszystkim konieczność obecności kierowcy w samochodzie podczas testów, co stwarza zagrożenie dla niego w momencie nieprawidłowego działania systemu. Ponadto ze względu na powodowane wypadki coraz więcej państw ogranicza lub całkiem zabrania testowania samochodów autonomicznych w ruchu drogowym. Dlatego należy się zastanowić co zrobić dodatkowo, aby samochody wyjeżdżające na testy w ruchu drogowym nie powodowały zagrożenia dla kierowcy oraz innych uczestników ruchu niezależnie od napotkanej sytuacji na drodze czy warunków atmosferycznych [3].

Etapem pośrednim przed wyjechaniem samochodu na testy drogowe jest testowanie kompletnego samochodu w laboratorium, określane jako testowanie pojazdu w pętli VIL (ang. Vehicle-in-the-loop). Jak pokazano w przeglądzie literatury zawartym w rozdziale piątym, obecnie testy VIL ograniczają się do testów pojedynczych systemów takich jak kamera czy radar. Ośrodki badawcze uniwersytetów, producentów samochodów oraz dostawców systemów testowych od wielu lat próbują stworzyć stanowisko, które będzie w stanie walidować kilka systemów równocześnie. Pomimo wielu prób i ciągłego rozwoju stworzonych systemów nadal nie zostało ono w pełni zrealizowane. W związku z tym pojawia się pytanie – czy jest możliwe zasymulowanie świata rzeczywistego w laboratorium w celu całkowitego przetestowania i zweryfikowania funkcji jazdy autonomicznej samochodu? Dodatkowo jak wykazano w przeglądzie literatury zawartym w rozdziale trzecim, dynamicznie rozwijane są nowe czujniki i systemy, a obecnie wykorzystywane są stale udoskonalane. To prowadzi do tego, że nowe technologie wypierają i zastępują dotychczas stosowane rozwiązania. Powoduje to, że na rynku funkcjonuje wiele samochodów wyposażonych w bardzo różne systemy i czujniki, różniące się budową czy konfiguracją. To znacząco utrudnia i komplikuje stworzenie uniwersalnego stanowiska testowego.

1.1 Systemy pasywnego bezpieczeństwa, zaawansowane systemy wsparcia kierowcy oraz systemy aktywnego bezpieczeństwa

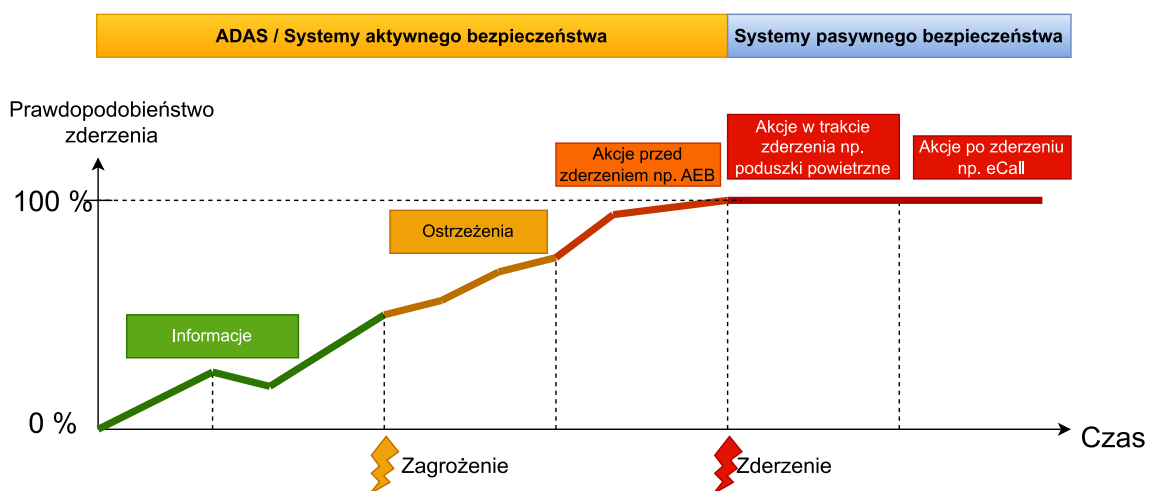
Jak już wspomniano liczba ofiar śmiertelnych na drodze znacznie spadła w ostatnich kilku dekadach. W znacznym stopniu przyczyniły się do tego systemy pasywnego i aktywnego bezpieczeństwa oraz zaawansowane systemy wsparcia kierowcy.

Systemy pasywnego bezpieczeństwa to systemy mechaniczne i elektromechaniczne aktywujące się tylko w sytuacji wypadku, łagodząc i zmniejszając jego skutki dla kierowcy i pasażerów. W przeciwieństwie do systemów aktywnego bezpieczeństwa nie są w stanie zapewnić całkowitego uniknięcia wypadku. Do systemów pasywnego bezpieczeństwa zalicza się pasy bezpieczeństwa, poduszki i kurtyny powietrzne, ale również ulepszenia konstrukcyjne samochodu np. kontrolowane strefy zgniotu, łamaną kolumnę kierowniczą, chowające się pedały. Jednak pozytywny wpływ tych systemów zaczyna osiągać swój maksymalny poziom, jak pokazano na Rys. 1. Aby kontynuować trend poprawy bezpieczeństwa i osiągnąć cel, jakim jest brak wypadków i ofiar śmiertelnych, samochody muszą wspomagać kierowców w unikaniu niebezpiecznych sytuacji na drodze. Do tego właśnie służą systemy zaawansowanego wsparcia kierowcy oraz funkcje aktywnego bezpieczeństwa [7].



Rys. 1. Potencjal systemów pasywnego i aktywnego bezpieczeństwa. Rysunek przygotowany w oparciu o [8].

Systemy aktywnego bezpieczeństwa są systemami elektromechanicznymi, które dzięki odpowiednim czujnikom potrafią wykrywać potencjalne niebezpieczeństwo oraz interweniować zanim dojdzie do wypadku. Dzięki tym systemom można całkowicie uniknąć wypadku, a nie tylko go złagodzić, jak to ma miejsce w systemach pasywnych. Na przykład pojazd wyposażony w system aktywnego bezpieczeństwa może wykrywać zbyt szybkie zbliżanie się do przeszkody, następnie może ostrzec kierowcę, a ostatecznie automatycznie uruchomić hamulce. Funkcje zapewniane w każdej fazie zderzenia pokazano na Rys. 2. Systemy aktywnego bezpieczeństwa można podzielić na systemy działające wzdłużnie i poprzecznie. Wzdłużne odpowiadają za bezpieczeństwo podczas poruszania się pojazdu na wprost np. automatyczne hamowanie awaryjne, natomiast poprzeczne za poruszanie się samochodu poprzecznie, czyli np. utrzymanie pasa ruchu czy wykrywanie martwego pola [7].



Rys. 2. Funkcje realizowane przez systemy aktywnego i pasywnego bezpieczeństwa w poszczególnych fazach zderzenia. Rysunek przygotowany w oparciu o [9].



















Zaawansowane systemy wsparcia kierowcy ADAS to systemy elektroniczne, które wykorzystują zaawansowane technologie do wspierania kierowcy podczas jazdy. Termin ADAS i systemy aktywnego bezpieczeństwa są często stosowane zamiennie, choć nie jest to do końca poprawne. ADAS może ograniczyć się tylko do wykrywania i ostrzegania kierowcy o potencjalnym zagrożeniu i nie musi zawierać funkcji aktywnego bezpieczeństwa. Kiedy wykrywanie zostanie połączone z technologią wykraczającą poza zwykłe ostrzeżenie, ADAS staje się aktywnym systemem bezpieczeństwa [10].

Instytut Ubezpieczeniowy Bezpieczeństwa Drogowego IIHS (ang. Insurance Institute for Highway Safety) stwierdził, że systemy ostrzegania przed kolizją zmniejszają liczbę zderzeń czołowych o 27%, a gdy system obejmuje również automatyczne hamowanie awaryjne, liczba ta rośnie do 50% [11]. W przypadku cofania same czujniki cofania zmniejszają liczbę kolizji o 28%, w połączeniu z kamerą o 42%, a z automatycznym hamowaniem aż o 78% [12]. Z tego powodu coraz więcej samochodów jest wyposażonych w systemy ADAS oraz aktywnego bezpieczeństwa. Dodatkowo agencje ratingowe takie jak Euro NCAP (ang. European New Car Assessment Programme) umieściły aktywne technologie bezpieczeństwa w swoich planach testowania, co jeszcze wzmocniło trend instalowania takich systemów pojazdach [13].

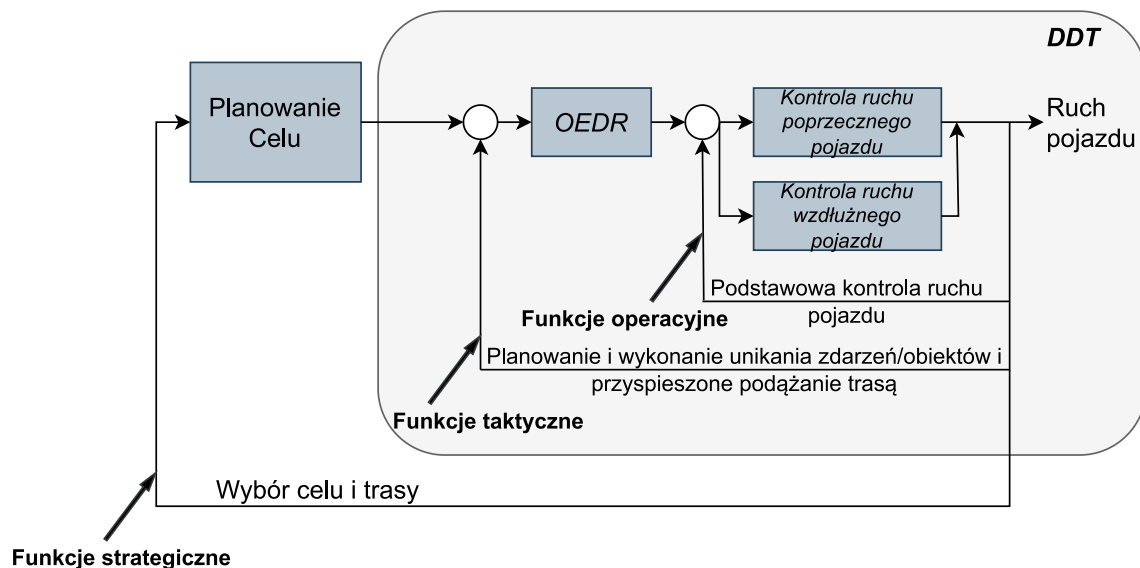
1.2 Poziomy zautomatyzowanej jazdy

Obecnie automatyzację jazdy można podzielić na sześć poziomów, gdzie najniższy poziom to całkowity brak automatyzacji, natomiast najwyższy to pełna automatyzacja jazdy – pojazd autonomiczny. Poziomy od zerowego do drugiego to samochód wyposażony w systemy wspomagające kierowcę, z kolei poziomy od trzeciego do piątego to samochód wyposażony w funkcje automatyzacji jazdy, jak pokazano w Tab. 1 [14]. Do dziś większość głównych producentów samochodów opanowała technologie zapewniające automatyzację jazdy na poziomie drugim np. Autopilot Tesli czy Super Cruise General Motors [15], natomiast pojawiają się pojedyncze modele samochodów z automatyzacją jazdy na poziomie trzecim. Pierwszym samochodem, który oficjalnie osiągnął poziom trzeci była Honda Legend w 2021 roku [16]. Uzyskała ona certyfikację poziomu trzeciego dla automatyzacji jazdy w korku na terenie Japonii przez tamtejsze Ministerstwo Transportu [17]. W 2022 roku kolejnym samochodem został Mercedes-Benz Klasy S, a dokładnie jego system Drive Pilot [16], [18]. Mercedes-Benz spełniając normy prawne UN R157, uzyskał homologację dla automatyzacji jazdy na autostradzie w Niemczech oraz w USA, a dokładnie w stanie Nevada [19]. Pomimo że inne samochody jak np. Audi A8 już w 2017 roku teoretycznie posiadało systemy automatyzacji jazdy na poziomie trzecim, to ze względów prawno-biznesowych grupa Volkswagena do dziś nie zdecydowała się na jego certyfikowanie [20], [21]. Automatyzacja jazdy bardzo dynamicznie się rozwija i kolejni producenci samochodów planują wyposażać swoje najwyższe modele samochodów w elektronikę i oprogramowanie pozwalające uzyskać poziom trzeci.

Tab. 1. Poziomy automatyzacji jazdy [14].

		DDT				
	Poziom	Nazwa	Kontrola wzdłużna i poprzeczna	OEDR	Awaryjne DDT	ODD
Wsparcie kierowcy	0	Brak automatyzacji jazdy				Ograniczony
	1	Asysta kierowcy				
	2	Częściowa automatyzacja jazdy				
Zautomatyzowana jazda	3	Warunkowa automatyzacja jazdy				Pełny
	4	Wysoka automatyzacja jazdy				
	5	Pełna automatyzacja jazdy				

Podczas określania poziomu automatyzacji jazdy pod uwagę brane są cztery parametry. Pierwszym parametrem jest zadanie dynamicznej jazdy DDT (ang. Dynamic Driving Task), jak pokazano na Rys. 3. DDT określa, kto odpowiada za kontrolę wzdłużną i poprzeczną samochodu oraz kto odpowiada za monitorowanie otoczenia i podejmowanie decyzji podczas jazdy - OEDR (ang. Object and Event Detection and Response). Kolejnym parametrem jest awaria DDT (ang. DDT Fallback) określająca, kto przejmuje kontrolę w momencie, gdy system ulegnie awarii lub opuszcza zdefiniowane ramy pracy, do których został zaprojektowany - ODD (ang. Operational Object Design).



Rys. 3. Schemat dynamicznego zadania jazdy DDT. Rysunek przygotowany w oparciu o [14].

Poziom 0. to brak jakiejkolwiek automatyzacji. Kierowca jest odpowiedzialny za kontrolowanie samochodu wzdłużnie, jak i poprzecznie. Wzdłużnie, czyli wszystkie manewry wykonywane podczas jazdy na wprost tj. przyspieszanie, hamowanie, utrzymywanie odległości przed pojazdem oraz poprzecznie, czyli zmiana pasa, pokonywanie zakrętów, wyprzedzanie, omijanie itd. Samochód poziomu zerowego może być wyposażony w takie systemy jak: zapobieganie blokowania kół podczas hamowania ABS (ang. Anti-lock Braking Systems), kontrola trakcji TCS (ang. Traction Control System), kontrola parkowania PDC (ang. Park Distance Control), asystent zmiany pasa ruchu LCA (ang. Lane Change Assist), ostrzeżenie o niezamierzonej zmianie pasa ruchu LDW (ang. Lane Departure Warning), ostrzeżenie przed kolizją FCW (ang. Forward Collision Warning). Ale również takie systemy jak elektroniczna kontrola stabilności ESC (ang. Electronic Stability Control), automatyczne hamowanie awaryjne AEB (ang. Automatic Emergency Braking) oraz asystent utrzymania pasa ruchu LKA (ang. Lane Keeping Assist) nie podnoszą poziomu automatyzacji, ponieważ nie wykonują one w sposób ciągły części lub całości DDT, lecz raczej zapewniają chwilową interwencję w potencjalnie niebezpiecznych sytuacjach [14].

Poziom 1. jest nazywany asystą kierowcy. Samochody tego poziomu są w stanie kontrolować samochód tylko wzdłużnie lub tylko poprzecznie w określonych warunkach. Warunki mogą być ograniczone do określonych prędkości pojazdu, typów dróg czy warunków pogodowych. Samochody poziomu pierwszego są wyposażone w co najmniej w jeden z przykładowych systemów: adaptacyjny tempomat ACC (ang. Adaptive Cruise Control) czy asystent pasa ruchu LCA (ang. Lane Centering Assist) [14].

Poziom 2. to częściowa automatyzacja jazdy, gdzie samochód równocześnie kontroluje wzdłużnie i poprzecznie swój ruch, ale również tylko w określonych warunkach. Kierowca jest zobowiązany do ciągłego monitorowania drogi i nadzoru manewrów wykonywanych przez pojazd. W momencie wykrycia przez kierowcę, że samochód nie radzi sobie na drodze, ma on obowiązek przejść nad nim kontrolę [14]. Kierowca jest w pełni odpowiedzialny za ewentualne kolizje spowodowane przez samochód podczas używania systemów ADAS. Najprostszym przykładem samochodu spełniającego definicję poziomu drugiego jest samochód, który posiada adaptacyjny tempomat i jednocześnie zapewnia utrzymanie pasa ruchu. Poziom drugi jest nazywany „wolnymi rękami”, gdyż nie jest wymagane kierowanie pojazdem.

Poziom 2+ jest to poziom niezdefiniowany przez standard [14] SAE (ang. Society of Automotive Engineers). Został on wprowadzony przez branżę motoryzacyjną jako poziom pośredni pomiędzy poziomem drugim i trzecim, ponieważ osiągnięcie poziomu trzeciego wymaga znaczącego skoku zaawansowania technologicznego pojazdu [22]. Powodem tego jest bardzo duża luka pomiędzy poziomem drugim należącym do grupy systemów wsparcia kierowcy a poziomem trzecim, który należy do grupy poziomów zautomatyzowanej jazdy [14]. Dodatkowo poziom drugi jest zdefiniowany bardzo szeroko. Mieszczą się w nim zarówno samochody, które mogą jedynie przyspieszać/hamować i utrzymywać pas ruchu, jak i samochody, które są w stanie wykonywać skomplikowane manewry np. wyprzedzanie czy zmiana pasa ruchu. Ten drugi typ samochodu jest klasyfikowany jako poziom 2+. W tym systemie kierowca nadal jest zobowiązany do ciągłego monitorowania drogi, nadzoru manewrów wykonywanych przez pojazd oraz ewentualnego przejęcia kontroli nad samochodem [23].

Poziom 3. to warunkowa automatyzacja jazdy, gdzie samochód jest w stanie przejąć pełną kontrolę prowadzenia, ale również tylko w określonych warunkach. Kierowca nie musi monitorować drogi oraz manewrów samochodu, dlatego ten poziom określany jest jako „oczy wyłączone”. Natomiast w przypadku awarii lub opuszczenia dopuszczalnych ram działania systemu samochód musi to wykryć i następnie poprosić kierowcę o przejęcie kontroli. Kierowca musi bezwzględnie przejąć prowadzenie pojazdu, gdyż w przeciwnym razie może dojść do wypadku. Niektóre samochody w momencie, kiedy kierowca nie przejmuje nad nimi kontroli, są w stanie bezpiecznie się zatrzymać [18], aby osiągnąć stan minimalnego ryzyka.

Poziom 4. to wysoka automatyzacja jazdy, gdzie samochód jest w pełni autonomiczny w określonych warunkach. Gdy samochód osiąga swoje granice operacyjności np. gdy zjeżdża z autostrady, musi poprosić kierowcę o przejęcie kontroli, natomiast jeśli kierowca tego nie zrobi, samochód musi być w stanie zatrzymać się w bezpiecznym miejscu. Z tego powodu ten poziom jest nazywany jako „umysł wyłączony” (ang. mind off). W samochodzie poziomu czwartego można teoretycznie zasnąć, gdyż nawet po opuszczeniu ram działania systemu lub jego awarii samochód nie stwarza zagrożenia dla kierowcy [23].

Najwyższy poziom 5. to pełna automatyzacja jazdy, gdzie samochód odpowiada za wszystkie zadania podczas kierowania pojazdem w dowolnym miejscu i we wszystkich warunkach drogowych, w których konwencjonalny pojazd może być racjonalnie obsługiwany przez typowo wykwalifikowanego ludzkiego kierowcę. Dzięki temu kierowca w ogóle nie jest wymagany w samochodzie, a samochody nie muszą nawet być wyposażane w kierownicę i pedały. Mogą jednak wystąpić warunki niemożliwe do opanowania nawet przez ludzkiego kierowcę, w których samochód poziomu piątego również nie będzie w stanie ukończyć danej podróży (np. burza śnieżna, zalane drogi, lód itp.). W przypadku napotkania takiej sytuacji pojazd wykonuje awaryjne DDT, aby osiągnąć stan minimalnego ryzyka np. zjeżdżając na pobocze i czekając na polepszenie warunków. Również, jeśli pojazd z powodów prawnych lub biznesowych nie może być użytkowany za granicą danego kraju to nadal może być uznawany za pojazd poziomu piątego, gdyż ograniczenie nie wynika z ograniczeń technologicznych.

2 Cel i zakres pracy

Celem niniejszego doktoratu wdrożeniowego jest zbadanie możliwości stworzenia za pomocą obecnie dostępnych technologii laboratoryjnego stanowiska testowego, które byłoby w stanie zasymulować wiernie świat zewnętrzny, aby w pełni przetestować i zwalidować funkcje jazdy autonomicznej kompletnego samochodu. Na podstawie przeglądu literatury zdefiniowano obszar badawczy i sformułowano następującą tezę:

Możliwe jest zbudowanie laboratoryjnego stanowiska testowego dla kompletnego samochodu, przeznaczonego do testowania głównych systemów jazdy autonomicznej.

W celu udowodnienia tej tezy postanowiono przygotować wymagania dla stanowiska testowego i przeprowadzić przegląd rozwiązań pod kątem możliwości jego zbudowania, a następnie zbudować stanowisko do badania czujników kąta kierownicy działające w pętli zamkniętej i wykorzystujące wirtualne jazdy testowe, stanowiące dowód koncepcji (*ang. proof of concept*). Wymagania dla stanowiska testowego przedstawiają się następująco:

1. Stanowisko testowe musi być przeznaczone do testowania kompletnego samochodu.

Uzasadnienie: Istnieje duża luka w procesie rozwoju i testowania samochodu pomiędzy testami HIL i testami samochodu w terenie (tory testowe, ruch drogowy itp.), dlatego jako krok pośredni proponuje się testy kompletnego samochodu w laboratorium.

2. Stanowisko testowe musi być niezależne od zastosowanej jednostki napędowej (silnik spalinowy, elektryczny itd.).

Uzasadnienie: Obecnie nowe konstrukcje samochodów oprócz silników spalinowych coraz częściej wykorzystują również silniki hybrydowe oraz elektryczne, dlatego stanowisko testowe powinno być uniwersalne i przystosowane do nowego typu jednostek napędowych. Pomimo że samochody z silnikami spalinowymi mają być wycofane ze sprzedaży w UE po 2035 roku, na rynkach światowych nadal będą stosowane, dlatego również muszą być uwzględnione podczas projektowania stanowiska.

3. Stanowisko testowe musi być przystosowane do testów samochodu z napędem na dowolną kombinację osi.

Uzasadnienie: Samochody z silnikami spalinowymi w większości są napędzane na przednią oś, natomiast samochody elektryczne na tylną oś. Również w jednej, jak i drugiej grupie występują samochody napędzane na wszystkie koła. Z tego powodu stanowisko powinno uwzględniać najczęściej występujące typy napędów.

4. Stanowisko testowe musi być zdolne do generowania dowolnego scenariusza testowego.

Uzasadnienie: W testach w ruchu drogowym scenariusze testowe są ograniczone do aktualnie napotkanych warunków i sytuacji na drodze, co powoduje, że wiele przypadków testowych jest niepokrytych.

5. Stanowisko testowe musi być wyposażone w możliwość bezprzewodowej stymulacji głównych czujników używanych do jazdy autonomicznej i nie może używać ruchomych obiektów do stymulacji czujników (z wyłączeniem stymulatora oporów ruchu).

Uzasadnienie: Obecnie testy wykrywania przeszkód są wykonywane za pomocą ruchomych fizycznych obiektów umieszczanych i przesuwanym w polu widzenia czujnika. Stworzenie tego typu stanowiska wymaga sporych nakładów finansowych, dużej przestrzeni, jest nieelastyczne (ograniczona liczba/typ obiektów i trudność w modyfikowaniu)

oraz stwarza zagrożenie dla osób pozostających w pobliżu. Jako alternatywę dla fizycznych obiektów wybiera się bezprzewodową stymulację, która jest znacznie bardziej elastyczna, jest w stanie wygenerować więcej przypadków testowych i nie stwarza zagrożenia dla badanego samochodu i osób w pomieszczeniu.

6. Wszystkie testy muszą być przeprowadzone bez ingerencji w strukturę pojazdu tzn. nie można wyjmować i/lub odłączać czujników i sterowników, wstrzykiwać danych na magistralę z pominięciem czujników itp.

Uzasadnienie: Obecnie podczas testów HIL często omija się czujnik i wstrzykuje się dane z jego pominięciem, gdyż to jest znacznie prostsze i szybsze w realizacji, ale powoduje to, że system nie jest przetestowany jako całość. W celu przetestowania kompletnych systemów samochodu takie rozwiązania są niedopuszczalne i samochód musi być testowany jako integralna całość.

7. Stanowisko testowe musi zapewniać rzeczywistą symulację oporów ruchu działających na pojazd.

Uzasadnienie: W celu symulacji środowiska zewnętrznego w laboratorium również opory ruchu muszą być symulowane. Dzięki temu funkcje jazdy autonomicznej są testowane w środowisku zbliżonym do rzeczywistego.

8. Testowany samochód musi być traktowany jako czarna skrzynka tzn. brak wiedzy o algorytmach oraz zasadach działania funkcji autonomicznej w danej marce/modelu pojazdu (dopuszczalna jest wiedza jedynie o typach czujników użytych w danym samochodzie).

Uzasadnienie: Istnieje bardzo wielu producentów samochodów, którzy stosują różne czujniki i algorytmy sterowania, których zasady działania nie są udostępniane. Dlatego stanowisko musi być w stanie testować samochody różnych producentów bez tej wiedzy. Nieopłacalne byłoby tworzenie osobnego stanowiska testowego dla każdego producenta/marki/modelu samochodu.

9. Wszystkie czujniki powinny być stymulowane synchronicznie.

Uzasadnienie: Czujniki muszą być stymulowane synchronicznie, aby pojazd miał spójną percepcję otoczenia. W przeciwnym razie samochód może wykryć, że czujniki są oszukiwane i przeprowadzenie testów może być niemożliwe.

10. Testy muszą być wykonywane w pętli zamkniętej tzn. reakcja samochodu musi być rejestrowana i zwracana do symulacji.

Uzasadnienie: Dzięki sprzężeniu zwrotnemu w symulacji widoczna jest reakcja samochodu na napotkaną sytuację i nie następuje utrata synchronizacji pomiędzy rzeczywistym pojazdem a pojazdem ego.

11. Podczas testów wybrane parametry samochodu muszą być rejestrowane i zapisywane na nośniku pamięci masowej.

Uzasadnienie: Dzięki zapisanym danym nie następuje ich utrata po zakończeniu testu i jest możliwość analizowania i przetwarzania tych danych w trybie off-line.

Aby osiągnąć ten cel, w rozdziale 3. przeprowadzono gruntowny, systematyczny przegląd czujników i systemów samochodu w celu zidentyfikowania, które z nich i w jakim stopniu biorą udział w automatyzacji jazdy. Dodatkowo zostały przeanalizowane zjawiska fizyczne wykorzystywane przez czujniki w celu późniejszego zaproponowania odpowiednich technologii stymulujących. Został również wykonany przegląd typów i odmian czujników oraz określono, które z nich faktycznie są obecnie wykorzystywane w samochodach masowej produkcji, a które już nie są dłużej stosowane.

W rozdziale 4. w celu zidentyfikowania urządzeń do bezprzewodowej stymulacji oraz zidentyfikowania ewentualnej luki technologicznej przeprowadzono przegląd i porównanie dostępnych na rynku urządzeń do bezprzewodowego stymulowania czujników w testach HIL. W przypadku braku tego typu urządzeń na rynku zostały przeanalizowane obecnie wykorzystywane metody i technik testowe w celu określenia luki pomiędzy stanem obecnym a wymaganym do testów pojazdu w pętli. Dodatkowo został dokonany krytyczny przegląd publikacji naukowych oraz patentów w celu zidentyfikowania obecnych prac rozwojowych w tej dziedzinie. Bazując na wykonanej analizie, zaproponowano pomysły ulepszenia lub rozszerzenia obecnych metod testowych oraz koncepcję działania brakujących stymulatorów celu.

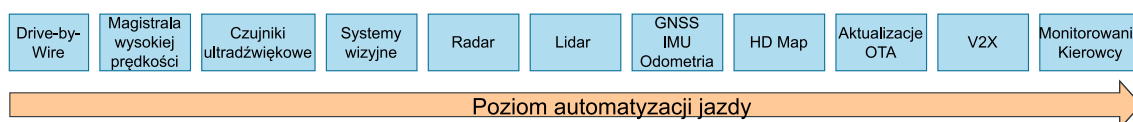
W rozdziale 5. przeanalizowano dostępne komercyjne stanowiska testowe wykorzystywane w testach fuzji czujników oraz stanowiska testowe dla pojazdu w pętli w celu zidentyfikowania obecnego stanu rzeczy, istniejących braków oraz ograniczeń w funkcjonujących już rozwiązaniach. Zaproponowano także kilka możliwych rozwiązań i ulepszeń obecnych konstrukcji, które pozwoliłyby spełnić wymienione wymagania dla stanowiska testowego. Zidentyfikowano i opisano najważniejsze składowe stanowiska testowego do pojazdu w pętli oraz opisano zasadę działania. Dodatkowo wykonano autorski przegląd rodzajów i typów hamowni dynamometrycznych pod kątem wybrania najlepszego rozwiązania do stymulowania oporów ruchu podczas wirtualnych jazd testowych.

W rozdziale 6. zaprezentowano autorskie rozwiązanie, w ramach którego, w oparciu o wirtualne jazdy testowe, zaprojektowano, stworzono i zweryfikowano pierwsze tego typu stanowisko testowe działające w pętli zamkniętej do weryfikacji czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire. Rozwiązanie to zostało wdrożone w firmie Merit Poland i w oparciu o nie zostały opublikowane dwa artykuły naukowe w wysoko punktowanych czasopismach.

W ostatnim rozdziale 7. podsumowano wykonane prace, określono brakujące technologie, zaproponowano możliwe dalsze kierunki badań oraz odpowiedziano na pytanie, czy jest możliwe wierne zasymulowanie świata w laboratorium do testów funkcji jazdy autonomicznej.

3 Przegląd czujników i systemów wykorzystywanych do jazdy autonomicznej

Samochód autonomiczny musi kontrolować każdy aspekt prowadzenia samochodu, a do tego robić to precyzyjnie i niezawodnie. Z tego powodu jest wyposażony w szereg wyspospecjalistycznych czujników i systemów, pokazanych na Rys. 4. Warunkiem podstawowym do automatyzacji jazdy jest to, aby samochód był wyposażony w systemy Drive-By-Wire, jak np. elektroniczna przepustnica (ang. Throttle-By-Wire), elektryczne sterowanie hamulcami (ang. Brake-By-Wire) czy układem kierowniczym (ang. Steer-By-Wire). Architektura Drive-By-Wire pozwala na sterowanie pojazdem za pomocą odpowiednich układów wykonawczych, bez potrzeby interakcji kierowcy. Kolejnym niezbędnym aspektem jest wyposażenie samochodu w magistralę komunikacyjną o wysokiej szybkości i niezawodności, aby systemy mogły się komunikować ze sobą w czasie rzeczywistym. Podstawowym czujnikiem automatyzacji jazdy są systemy wizyjne, czyli wszelkiego rodzaju kamery. Dzięki nim pojazd jest w stanie wykrywać i rozpoznawać obiekty np. pasy jezdni czy ludzi. W kolejnym kroku niezbędnym urządzeniem jest radar, dzięki któremu można ustalać dokładną odległość oraz prędkość obiektów, co jest kluczowe np. w aktywnym tempomacie. W celu dodatkowego usprawnienia wizualizacji otoczenia oraz klasyfikacji obiektów używa się lidarów odpowiedzialnego za trójwymiarową mapę otoczenia pojazdu. Uzupełnieniem percepcji otoczenia, są czujniki ultradźwiękowe wykrywające przeszkody w najbliższej odległości. Jako system uzupełniający, używana jest inercyjna jednostka pomiarowa IMU oraz odometria do korekcji błędów lokalizacji w momencie, kiedy nie ma dostępu do sygnału globalnej nawigacji satelitarnej GNSS. W celu uzyskania precyzyjnej lokalizacji obiektu i osadzenia go w rzeczywistości, używane są mapy wysokiej definicji. Wymagana jest również stała i bezprzewodowa łączność z internetem, w celu aktualizacji map wysokiej definicji czy aktualizacji oprogramowania. W przypadku inteligentnych systemów transportowych np. jazdy w kolumnie używana jest technologia V2X / C-V2X do komunikacji pomiędzy samochodami lub infrastrukturą. Ostatnim systemem, jest kamera odpowiedzialna za monitorowanie kierowcy i wnętrza pojazdu, która sprawdza, czy np. kierowca nie jest rozproszony w momencie, kiedy powinien nadzorować manewry wykonywane przez samochód.



Rys. 4. Czujniki i systemy wymagane do jazdy autonomicznej.

Dzięki tym wszystkim systemom oraz wykorzystaniu fuzji czujników samochód jest w stanie jednoznacznie i niezawodnie określić zarówno swoją pozycję, jak i pozycje oraz prędkości otaczających obiektów. Każdy z czujników biorących udział w jeździe autonomicznej wykorzystuje różne zjawiska fizyczne np. fale elektromagnetyczne o określonej długości czy fale dźwiękowe. W celu zbadania możliwości symulowania świata zewnętrznego w laboratorium niezbędne jest dokładne rozpoznanie używanych typów czujników oraz praw fizyki, które wykorzystują. Dzięki temu będzie można zidentyfikować potencjalne problemy oraz zaproponować odpowiednie symulatory.

3.1 Czujniki ultradźwiękowe

Czujniki ultradźwiękowe już od bardzo dawna są stosowane w motoryzacji, głównie w systemach wspomagania parkowania. Obecnie są również wykorzystywane w zaawansowanych systemach wsparcia kierowcy, takich jak: asystent utrzymania pasa ruchu (ang. Lane Keeping Assist), asystent unikania kolizji (ang. Collision Avoidance Assist), oraz w systemach jazdy autonomicznej bez kierowcy np. zdalnego parkowania czy funkcji przywołania w Tesli [24]. Ich ważną rolę w jeździe autonomicznej udowodniono, stymulując bezprzewodowo czujniki ultradźwiękowe w Tesli Model S. Doprowadzono do zatrzymywania samochodu w momencie, kiedy przeszkody nie było oraz kontynuowania jazdy, gdy fizyczna przeszkoda faktycznie istniała [25]. Jest to szczególnie interesujące, biorąc pod uwagę fakt, że na pokładzie samochodu było wiele innych czujników np. kamer, które w tym czasie nie były w żaden sposób oszukiwane. W samochodach o wysokiej automatyzacji, oprócz czujników ultradźwiękowych klasycznie skierowanych na wprost, są dodatkowe czujniki obserwujące boki samochodu zamontowane nadal na zderzakach, ale blisko błotników samochodu. Tego typu samochody mają sumarycznie nawet do 12 czujników ultradźwiękowych jak np. Audi A8 [26], Audi E-tron [27], czy Tesla Model S [24].

Czujniki ultradźwiękowe wykorzystują falę dźwiękową o częstotliwościach znajdujących się w paśmie ultradźwiękowym, czyli powyżej 20 kHz. Dzięki temu działanie czujników ultradźwiękowych jest niesłyszalne dla ludzi. Zasada działania czujników ultradźwiękowych polega na pomiarze czasu przelotu (dToF) fali dźwiękowej, od wysłania do jej odebrania i na tej podstawie obliczana jest odległość do obiektu s zgodnie ze wzorem (1).

$$s = \frac{t * v_{dźwięku}}{2} \quad (1)$$

gdzie:

t – czas przelotu,

$v_{dźwięku}$ – prędkość dźwięku.

Prędkość dźwięku zależy od temperatury gazu, w którym się rozchodzi [28] zgodnie z równaniem (2).

$$v_{dźwięku} = \sqrt{\kappa RT} \quad (2)$$

gdzie:

κ – wykładnik adiabaty (dla powietrza $\kappa = 1,402$),

R – stała gazowa (dla powietrza $R = 287,05 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$),

T – absolutna temperatura powietrza.

W przypadku powietrza powyższe równanie można przybliżyć do formy (3), które mówi, że wzrost temperatury T o 1°C powoduje zwiększenie prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej o około $0,6 \text{ m/s}$ [29].

$$v_{dźwięku} = 331,5 + 0,6T \quad (3)$$

gdzie:

T – temperatura w stopniach Celsjusza.

W motoryzacji używa się czujników o topologii monostatycznej [30] z niskimi częstotliwościami od około 40 do 60 kHz [31], ponieważ wraz ze wzrostem częstotliwości fali dźwiękowej zmniejsza się zasięg oraz pole widzenia czujnika [30]. Zasięg typowych czujników ultradźwiękowych wynosi około 6 metrów, a pole widzenia 140° w poziomie i 70° w pionie [31], [32]. Nieduże pionowe pole widzenia jest ograniczane celowo, aby czujnik nie wykrywał odbić od gruntu [33]. Niestety niższa częstotliwość pogarsza rozdzielczość r pomiaru zgodnie z równaniem (4), co np. dla 43 kHz daje około 8 mm rozdzielczości.

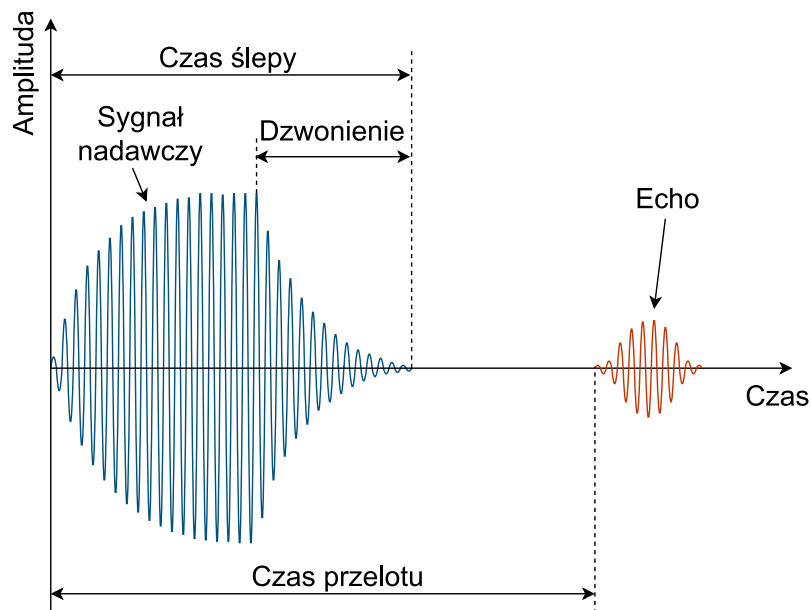
$$r = \frac{v_{\text{dźwięku}}}{f} \quad (4)$$

gdzie:

$v_{\text{dźwięku}}$ – prędkość dźwięku,

f – częstotliwość fali.

Czujniki ultradźwiękowe mają minimalną odległość, od której są w stanie wykrywać objekty. Jest to spowodowane tym, że czujnik ultradźwiękowy nie jest w stanie zmierzyć odległości podczas wysyłania fali dźwiękowej. Dodatkowo przetwornik, nawet po wyłączeniu impulsu wyzwalającego, jeszcze przez krótki czas drga (dzwoni), wysyłając falę (ang. ringing), co dodatkowo wydłuża tzw. ślepy czas, jak pokazano na Rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi sygnału nadawanego (przebieg niebieski) i odbieranego (przebieg czerwony). Rysunek przygotowany w oparciu o [34].

Typowe czujniki motoryzacyjne są w stanie określać odległość od około 10 cm [32], natomiast poniżej tej odległości są w stanie wykrywać objekty już nawet od 3 cm [31], wykorzystując zjawisko wielokrotnego odbicia fali pomiędzy czujnikiem i obiektem [29], [35].

W celu uzyskania dokładniejszych pomiarów odległości oraz określenia lokalizacji przeszkody, czujniki rejestrują również krzyżowe echa fal wygenerowanych przez sąsiednie czujniki [36].

Dzięki temu dodatkowo można określić przybliżony kształt i wymiary geometryczne przeszkody [37].

3.2 Określanie położenia GNSS / IMU / Odometria / Mapy

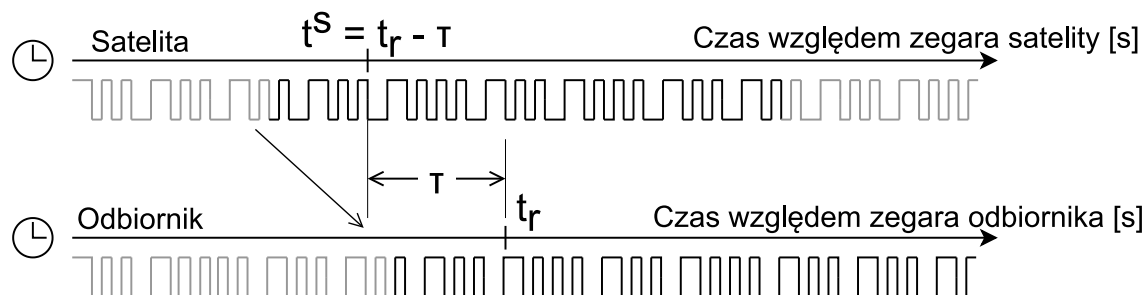
Jednym z kluczowych systemów niezbędnych do jazdy autonomicznej jest system globalnej nawigacji satelitarnej GNSS (ang. Global Navigation Satellite System). W oparciu o GNSS samochód wyznacza swoje położenie (współrzędne geograficzne) oraz prędkość. Dzięki temu jest w stanie precyzyjnie określić swoje położenie w obrębie drogi (np. na którym jest pasie) oraz rzeczywistą prędkość, która jest niezbędna np. do bezpiecznego pokonywania zakrętów.

3.2.1 Globalny System Nawigacji Satelitarnej GNSS

GNSS jest to system globalnego pozycjonowania wyznaczający położenie obiektów na kuli ziemskiej w oparciu o sygnały wysyłane przez satelity rozmieszczone wokół ziemi. GNSS to ogólna zasada działania tej technologii, natomiast globalny system pozycjonowania GPS (ang. Global Positioning System) jest to implementacja GNSS za pomocą satelitów amerykańskich. Obecnie kilka krajów ma własne konstelacje satelitów przeznaczonych do określania lokalizacji. Oprócz amerykańskiego GPS'a, Rosja posiada system nawigacyjny GLONASS, Europa Galileo, a Chiny Beidou / BDS. Każdy z tych systemów jest niezależny i choć generalnie zasada działania jest praktycznie taka sama, występują pomiędzy nimi subtelne różnice. To powoduje, że odbiorniki wyposażone w GPS działają tylko w oparciu o satelity amerykańskie i nie są w stanie korzystać z satelitów innych konstelacji. Amerykański system nawigacyjny posiada dwa poziomy dokładności: standardowy SPS (ang. Standard Positioning Service) oraz precyzyjny PPS (ang. Precise Positioning System). Standard precyzyjny, który jest o wiele dokładniejszy od standardowego, jest dostępny tylko dla wojsk USA i NATO.

Wyznaczanie położenia

Do wyznaczania położenia używa się satelitów GNSS rozmieszczonych na średniej orbicie okołoziemskiej. Samochód, aby wyznaczyć swoją pozycję geograficzną, bazując na kodzie C/A, najpierw wyznacza czas podróży wiadomości wysłanej z satelity, jak pokazano na Rys. 6.



Rys. 6. Wyznaczenie czasu podróży sygnału z satelity do odbiornika. Rysunek przygotowany w oparciu o [38].

Następnie wyznacza pseudoodległość zgodnie ze wzorem (5).

$$P^S = c (t_r - t^S) \quad (5)$$

gdzie:

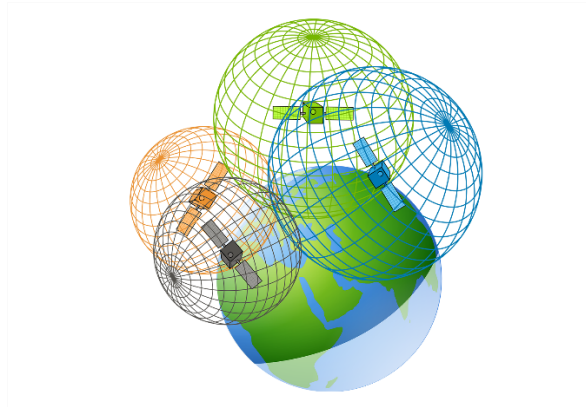
P^s – pseudoodległość od satelity s , $s = 1, 2, 3, \dots$,

t_r – czas odbioru sygnału przez odbiornik wzgl. zegara odbiornika,

t^s – czas wysłania sygnału przez satelitę s wzgl. zegara satelity,

c – prędkość światła.

Równocześnie to samo powtarza dla wszystkich widzianych satelitów GNSS na niebie. Posiadając wyznaczone pseudoodległości za pomocą metody trilateracji zaprezentowanej na Rys. 7, samochód wyznacza swoją przybliżoną pozycję zgodnie ze wzorem (6).



Rys. 7. Wizualizacja metody trilateracji w oparciu o cztery satelity [39].

$$\begin{aligned}P^1 &= \sqrt{(x^1 - x)^2 + (y^1 - y)^2 + (z^1 - z)^2} + ct_u \\P^2 &= \sqrt{(x^2 - x)^2 + (y^2 - y)^2 + (z^2 - z)^2} + ct_u \\P^3 &= \sqrt{(x^3 - x)^2 + (y^3 - y)^2 + (z^3 - z)^2} + ct_u \\P^4 &= \sqrt{(x^4 - x)^2 + (y^4 - y)^2 + (z^4 - z)^2} + ct_u\end{aligned}\tag{6}$$

gdzie:

P^s – pseudoodległość od satelity s , $s = 1, 2, 3, \dots$,

x^s, y^s, z^s – współrzędne satelity s ,

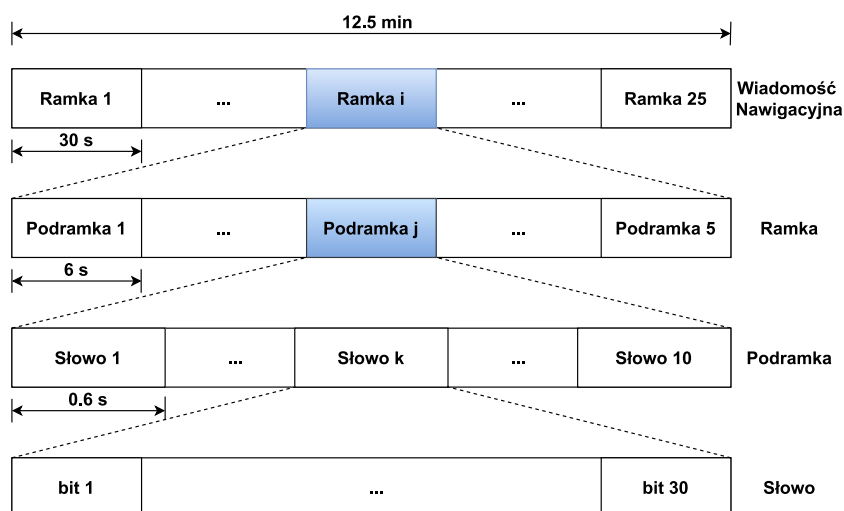
x, y, z – współrzędne odbiornika,

c – prędkość światła,

t_u – przesunięcie czasowe zegara odbiornika względem zegara satelity.

Minimalnie samochód potrzebuje czterech satelitów do wyznaczenia precyzyjnej pozycji: trzech satelitów do określenia zgrubnej pozycji, natomiast czwartej do zniwelowania błędów pochodzących od niedokładnego zegara kwarcowego i dzięki temu do zwiększenia precyzji wyznaczenia położenia.

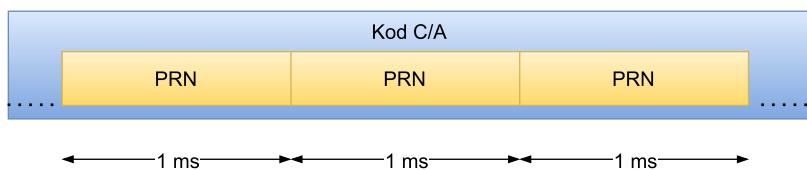
Wszystkie satelity są zsynchronizowane tzn. nadają wiadomości dokładnie w tym samym momencie [40]. Każdy satelita przesyła wiadomości nawigacyjne, co 12.5 minuty. Wiadomość nawigacyjna zawiera m.in. takie informacje jak czas wysłania wiadomości względem lokalnego zegara atomowego, dokładne informacje orbitalne – efemerydy czy przewidywane orbity – almanach. Każda wiadomość nawigacyjna składa się z 25 ramek, z których każda składa się z 5 podramek, a każda podramka z dziesięciu 30-bitowych słów, jak pokazano na Rys. 8.



Rys. 8. Elementy wiadomości nawigacyjnej GNSS. Rysunek przygotowany w oparciu o [41].

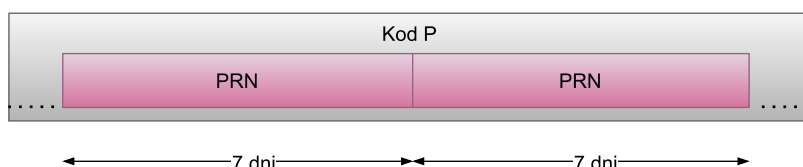
Każdy z satelitów przesyła dane nawigacyjne, wykorzystując dwie sinusoidalne fale radiowe o różnych częstotliwościach. Odpowiednie częstotliwości fal są generowane w oparciu o częstotliwość podstawowa $f_0 = 10,23$ MHz, która jest generowana przez zegar atomowy obecny na każdej satelicie. Pierwsza fala radiowa nazywana L1 ma częstotliwość 1575,42 MHz, czyli jest dokładnie 154 razy większa od częstotliwości podstawowej. Druga fala radiowa L2 ma częstotliwość 1227,6 MHz, czyli jest dokładnie 120 razy większa od częstotliwości podstawowej. Satelity wystrzelone po 2010 roku mają również trzeci sygnał radiowy L5 o częstotliwości 1176,45 MHz, czyli 115 krotności częstotliwości podstawowej. Częstotliwości tego rzędu zostały wybrane w celu ograniczenia wpływu atmosfery na przesyłane sygnały [42].

Oprócz wysokopoziomowej wiadomości nawigacyjnej, na nośne L1 i L2 nakładane są dwie dodatkowe informacje. Na nośną L1 nakładany jest kod zgrubej akwizycji C/A (ang. Coarse Acquisition), który jest powtarzającym się pseudolosowym szumem PRN (ang. Pseudo Random Noise) służącym do identyfikacji satelity przez odbiornik. PRN składa się z 1023 bitów wysyłanych z częstotliwością 1 MHz, co powoduje, że PRN jest powtarzany z okresem 1 ms, jak pokazano na Rys. 9.



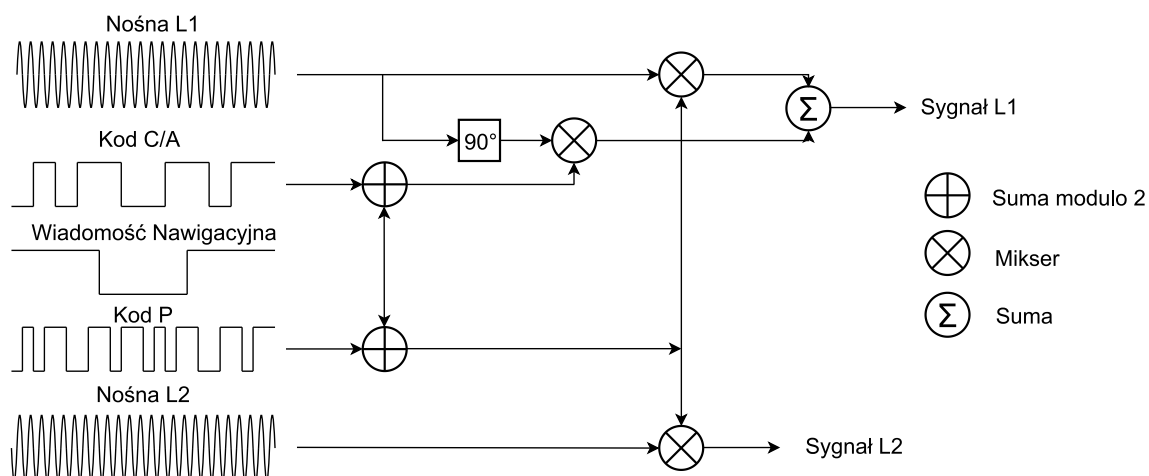
Rys. 9. Kod zgrubej akwizycji C/A składający się z powtarzającego pseudolosowego szumu PRN.

Oprócz kodu zgrubnej akwizycji C/A zarówno na nośną L1, jak i L2 jest nakładany kod P nazywany kodem precyzyjnym. Kod P jest powtarzającym się kolejnym pseudolosowym szumem PRN składającym się z 6187100 mln bitów [42]. Z powodu tak dużej liczby bitów, pomimo że jest on wysyłany z częstotliwością 10 razy większą niż kod C/A, czyli z 10 MHz wysłanie trwa 7 dni, jak pokazano na Rys. 10. Jako że nośna L2 jest wykorzystywana do celów wojskowych, kod P jest szyfrowany za pomocą specjalnego kodu W.



Rys. 10. Kod P składający się z powtarzającego pseudolosowego szumu PRN.

Schemat modulacji wiadomości nawigacyjnej, kodów C/A oraz P na nośne L1 i L2 został zaprezentowany na Rys. 11.



Rys. 11. Schemat modulacji wiadomości nawigacyjnej, kodów C/A oraz P oraz nośnych L1 i L2. Rysunek przygotowany w oparciu o [43].

Wyznaczanie prędkości

Oprócz współrzędnych geograficznych, system GNSS jest używany również do wyznaczania prędkości samochodu. Warto tutaj podkreślić jeden zasadniczy błąd, który jest często powielany przez osoby niemające zasadniczej wiedzy o systemie GNSS. Prędkość nie jest obliczana jako pochodna położenia w czasie, a jest obliczana w oparciu o przesunięcie Dopplera. Obliczanie prędkości w oparciu o pochodną położenia byłoby bardzo niedokładne, gdyż błędy położenia zwiokrotniałyby błędy prędkości, tym samym prędkość obliczona w ten sposób byłaby nieprzydatna.

Sygnal radiowy odbierany z satelity jest sygnałem sinusoidalnym o stałej częstotliwości (przy założeniu, że satelita i samochód się nie poruszają). W momencie, gdy samochód zmienia swoje położenie względem satelity, odbierany sygnał zmienia swoją częstotliwość. Częstotliwość zwiększa się, gdy samochód zbliża się do satelity i zmniejsza się, gdy się od niej oddala. Dzięki temu zjawisku jest wyznaczana dokładna prędkość samochodu [44]. Satelity GNSS nie są satelitami geostacjonarnymi i cały czas się przemieszczają. Z tego powodu, nawet jeśli samochód się nie porusza, to i tak z jego perspektywy częstotliwość się zmienia. Uwzględniając te czynniki częstotliwość f obserwowana przez samochód jest równa (7) [44]. Do wyznaczania prędkości samochód używa wszystkich widzianych satelitów, dzięki temu dokładność wyznaczenia prędkości jest zwielokrotniona.

$$f = f_s \left(1 - \frac{V_r \cdot e}{c} \right) \quad (7)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość sygnału wysyłanego przez satelitę,

$V_r \cdot e$ – iloczyn skalarny wektorów prędkości względnej pomiędzy samochodem i satelitą,

c – prędkość światła.

Błędy

Sygnal GNSS podróżując przez wiele kilometrów, jest narażony na wiele czynników powodujących błędy. Takimi czynnikami są czynniki atmosferyczne, wielościeżkowość, błędy orbitalne czy niedokładność zegara atomowego satelity oraz zegara odbiornika [45]. Błędy te wpływają na pseudoodległość i wtedy przyjmuje ona formę (8).

$$\begin{aligned} P^s &= c((t_r + dt_r) - (t^s + dt^s)) + \epsilon \\ &= c(t_r - t^s) + c(dt_r - dt^s) + \epsilon \\ &= p^s + c(dt_r - dt^s) + I^s + T^s + \epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

P^s – pseudoodległość,

p^s – rzeczywista odległość od odbiornika do satelity,

c – prędkość światła,

t_r – czas odbioru sygnału przez odbiornik wzgl. zegara odbiornika,

dt_r – przesunięcie zegara odbiornika względem czasu GNSS,

t^s – czas wysłania sygnału przez satelitę s wzgl. zegara satelity,

dt^s – przesunięcie zegara satelity względem czasu GNSS,

I^s – opóźnienie jonosferyczne,

T^s – opóźnienie troposferyczne,

ϵ – pozostałe błędy np. błędy orbitalne satelitów, błąd wielościeżkowości, błędy przetwarzania odbiornika i satelity.

Dwa najważniejsze wskaźniki określające jakość wyznaczonej pozycji to UERE (ang. User Equivalent Range Error) oraz DOP (ang. Dilution of precision). UERE określa rzeczywistą dokładność pomiarów pseudoodległości, natomiast DOP błędy wynikające z geometrycznego ustawienia widocznych satelitów. Całkowity błąd ϵ może być zgrubnie określony jako iloczyn UERE oraz DOP (9) [46].

$$\epsilon = DOP \cdot UERE \quad (9)$$

gdzie:

UERE – rzeczywista dokładność pseudoodległości,

DOP – błędy geometrycznego ustawienia satelitów.

Jonosfera

Największe błędy w pozycjonowaniu powoduje jonosfera [47], [48]. Jonosfera zawiera zjonizowane gazy składające się z jonów i wolnych elektronów, powstałe w wyniku promieniowania ultrafioletowego oraz rentgenowskiego pochodzącego ze Słońca. Jonosfera powoduje zmianę częstotliwości i prędkości fal elektromagnetycznych [49]. Ta zmiana prędkości jest zależna od częstotliwości fali elektromagnetycznej, co oznacza, że w zależności od częstotliwości, fale w różnym tempie przechodzą przez tę część atmosfery. Zjawisko zależności prędkości fali od częstotliwości jest nazywane dyspersją [50], [51]. Prędkość fali można obliczyć, korzystając z równania (10).

$$v_f = \frac{\omega}{k} \quad (10)$$

gdzie:

ω – częstość kątowna, $\omega = 2\pi f$,

f – częstotliwość fali,

k – liczba falowa $k = 2\pi/\lambda$,

λ – długość fali.

Opóźnienie fali Δt_f w jonosferze jest wprost proporcjonalne do liczby swobodnych elektronów i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu częstotliwości fali nośnej, zgodnie ze wzorem (11) [48].

$$\Delta t_f = \frac{40,3 \cdot TEC}{c \cdot f^2} \quad (11)$$

gdzie:

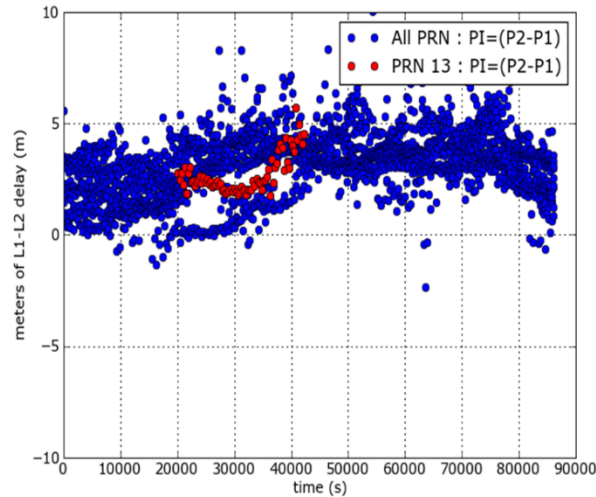
TEC - (ang. Total Electron Content) – liczba swobodnych elektronów w prostopadłości o jednostkowej powierzchni podstawy, łączącym satelitę z odbiornikiem,

f – częstotliwość fali,

c – prędkość światła w próżni.

Błędy jonosfery są zależne od pory dnia. W nocy są mniejsze, gdyż jony i wolne elektrony zaczynają rekombinować. Błędy jonosfery wynoszą od kilku metrów [46], [47], [49] do dziesiątek

metrów w zenicie [52]. Rys. 12 pokazuje różne składowe błędy jonosfery w różnych porach dnia. Niebieski kolor wskazuje składową błędą jonosferycznego przy aktywacji wszystkich kodów szumu pseudolosowego (PRN), a czerwony kolor wskazuje składową błędą przy aktywacji tylko PRN-13. Składowa błędą jonosferycznego jest obecna cały czas, więc jest to bardzo ważny składnik, który należy złągodzić, aby precyzyjnie określić pozycję samochodu. W celu eliminacji błędów jonosfery używa się wielu nośnych L1, L2, L5 o różnych częstotliwościach.



Rys. 12. Składowe błędą jonosfery w różnych porach dnia [49].

Troposfera

Troposfera jest to najniższa warstwa atmosfery rozciągająca się od powierzchni Ziemi do wysokości około 50 km [48]. W tej warstwie występują chmury, deszcz oraz para wodna. Opóźnienie troposferyczne jest zależne od wilgotności, temperatury, ciśnienia [53] oraz gęstości powietrza, która zależy od wysokości [48]. Fale GNSS, tak jak i inne sygnały radiowe o częstotliwościach poniżej 30 GHz, nie podlegają zjawisku dyspersji przy przejściu przez troposferę, co oznacza, iż wielkość opóźnienia nie jest zależna od częstotliwości fali radiowej [54]. Z tego powodu nie da się tego błędą usunąć, korzystając z nośnych o różnych częstotliwościach. Niemniej błędą troposfery spowodowane składową suchą troposfery mogą być skutecznie modelowane np. za pomocą modeli Hopfield i Saastamoinen. Natomiast najskuteczniejszą metodą eliminacji błędów troposferycznych, ze względu na ich lokalny charakter, jest korekcja różnicowa [48]. Wyznaczona poprawka troposferyczna jest odejmowana od rejestrowanej pseudoodległości lub fazy. Błędą troposferyczne wynoszą typowo poniżej jednego metra [46], [47], [49] do maksymalnie trzech metrów w zenicie [52].

Opóźnienie sygnału części hydrostatycznej ZHD_{Hop} (ang. Zenith Hydrostatic Delay) w modelu Hopfielda jest określone zależnością (12) [55].

$$ZHD_{Hop} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot N_{hyd} \cdot H_d \quad (12)$$

gdzie:

$$N_{hyd} = k_1 \cdot \frac{P}{T_K}, k_1 = 77,6 \frac{K}{hPa}, \text{współczynnik refrakcji,}$$

P – ciśnienie atmosferyczne na wysokości stacji referencyjnej,
 T_K – temperatura na wysokości stacji referencyjnej,
 $H_d = 40136 + 148,72 \cdot T_c$, T_c – temperatura na wysokości stacji referencyjnej [$^{\circ}\text{C}$].

Z powodu błędów atmosferycznych, ale również błędów wielośćkowości czy parametrów samych czujników dokładność systemu GNSS pozostawia wiele do życzenia. Dlatego technologia GNSS od dziesiątek lat jest ciągle udoskonalana, poprzez dodawanie różnych technik i metod obliczeniowych. To skutkuje, że wspomagany GNSS potrafi określać położenie rzędu pojedynczych centymetrów.

Jak już wspomniano, technologia GNSS ma kluczowe zadanie w systemie jazdy autonomicznej, a im jest bardziej precyzyjna, tym samochód lepiej potrafi realizować postawione przed nim cele. Dlatego poniżej pokrótce omówiono metody i techniki wykorzystywane do zwiększenia precyzji wyznaczania lokalizacji i prędkości samochodu.

Metody wspomagające GNSS

Moduł GNSS z lepszymi parametrami metrologicznymi

Istnieje wiele metod, które można zastosować do zwiększenia dokładności przy wyznaczaniu położenia i prędkości. Najprostszą metodą jest użycie bardziej zaawansowanego modułu GNSS, który będzie charakteryzował się większą liczbą kanałów, wyższą częstotliwością odświeżania, szerszym pasmem przenoszenia, mniejszym opóźnieniem czy mniejszym szumem.

Standardowy moduł GNSS wbudowany w telefon komórkowy jest tanim czujnikiem z anteną o niskich parametrach. Większość tego typu modułów aktualizuje zarówno pozycję, jak i prędkość z częstotliwością tylko 1 Hz, co powoduje, że całkowicie nie nadają się do pomiarów przyspieszeń oraz w ograniczonym stopniu do pomiarów położenia. Natomiast stosunkowo dokładnie może dokonywać pomiarów prędkości, gdyż jest obliczana w oparciu o zjawisko Dopplera. Dokładność prędkości jest tym większa im jest ona bardziej stabilna. Błędy prędkości osiągają typowo od 0,2 do 0,5 km/h [56], [57].

Przykładem urządzenia wyposażonego w moduł GNSS o lepszych parametrach jest urządzenie firmy Racelogic o nazwie Performance Box, który służy głównie do pomiarów przyspieszeń. Pracuje on z częstotliwością 10 Hz, dzięki czemu rozdzielczość prędkości wynosi 0,1 km/h, a dokładność przyspieszenia 1%, pomimo korzystania tylko z satelitów konstelacji GPS [58].

Moduł GNSS korzystający z satelitów różnych konstelacji

Kolejną metodą zwiększenia precyzji jest równoczesne użycie satelitów różnych konstelacji. Obecnie większość modułów GNSS używa wyłącznie satelitów GPS. Bardziej zaawansowane konstrukcje równocześnie wykorzystują satelity wielu konstelacji np. GPS + GLONASS + Galileo. Dzięki temu samochód ma dostęp do większej ilości satelitów, co skutkuje lepszą dokładnością [59]. Ponadto różne konstelacje używają innych częstotliwości fal radiowych, co pozwala na lepsze zniwelowanie błędów atmosferycznych [60]. Przykładem urządzenia korzystającego z satelitów różnych konstelacji jest Dragy GPS Performance Meter, który oprócz satelitów GPS używa satelitów GLONASS [61].

Moduł GNSS wykorzystujący jednocześnie różne częstotliwości nośnych

Każdy satelita niezależnie od generacji oraz konstelacji wysyła równocześnie dwie fale radiowe o różnych częstotliwościach L1 i L2. Jeszcze do niedawna cywilne odbiorniki działały tylko

w oparciu o falę L1, gdyż fala L2 była szyfrowana i przeznaczona tylko do zastosowań militarnych. W 2005 i w 2010 roku zostały dodane kolejne nieszyfrowane sygnały L2C i L5 dostępne dla odbiorników cywilnych. Uwzględniając fakt, że każda z tych fal ma inną częstotliwość, a wpływ jonosfery jest zależny od częstotliwości, jest możliwe obliczenie odpowiednich poprawek zwiększających precyzję lokalizacji [48], [62].

Mając pseudoodległości zmierzone w oparciu o nośne L1 i L2, opóźnienie jonosferyczne Δt_j można obliczyć ze wzoru (13) [48]. Zastosowanie tej metody zwiększa dokładność pozycji od 2 metrów [48] do nawet 1 m [62].

$$\Delta t_j = \frac{1}{c} \cdot (P_{L1} - P_{L2}) \cdot \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \quad (13)$$

gdzie:

c – prędkość światła,

P_{L1} – pseudoodległość zmierzona w oparciu o nośną L1,

P_{L2} – pseudoodległość zmierzona w oparciu o nośną L2,

f_{L1} – częstotliwość nośnej L1,

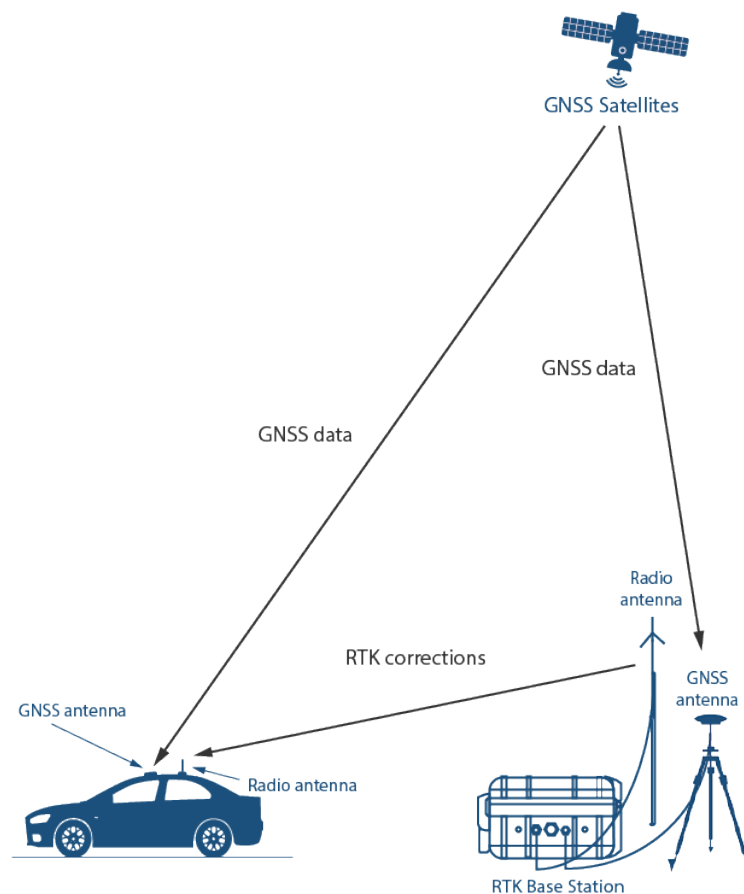
f_{L2} – częstotliwość nośnej L2.

Wspomagany GNSS (ang. Assisted GNSS)

Technika wspomagania nie zwiększa precyzji wyznaczania pozycji i prędkości, a jedynie skraca czas inicjalizacji, czyli czasu potrzebnego do pierwszego określenia położenia. Do działania GNSS jest niezbędna m.in. informacja o liczbie i pozycjach satelitów na niebie. Efemerydy są transmitowane przez każdą satelitę, co 30 s. Z tego powodu czas na zebranie wszystkich informacji o satelitach potrzebnych do obliczenia położenia może wynosić od około minuty do nawet kilku minut w przypadku słabego sygnału, a w skrajnych przypadkach GNSS może w ogóle się nie uruchomić. W A-GNSS informacje o satelitach i ich położeniach są odbierane przez samochód z sieci komórkowej, a nie poprzez bezpośrednią komunikację z satelitami. Dzięki temu czas inicjalizacji w trybie tzw. gorącego startu może skrócić się do nawet 1 s [63].

Różnicowy system GNSS (DGNSS)

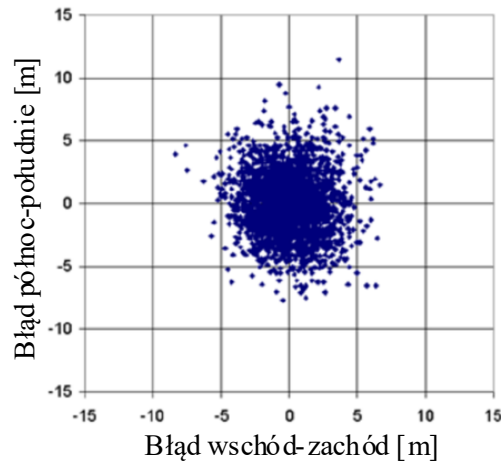
Metody różnicowe zapewniają dodatkowe poprawki, które następnie samochód może aplikować do swoich obliczeń, aby usunąć błędy i tym samym polepszyć precyzję wyznaczania położenia. Techniki różnicowe nie wpływają na dokładność pomiaru prędkości, gdyż wyznaczanie prędkości wykorzystuje zjawisko Dopplera [62]. Metody różnicowe pozwalają na eliminację różnych rodzajów błędów w różnym stopniu, natomiast szczególnie są one skuteczne przy usuwaniu lokalnych błędów troposferycznych [48]. W metodach różnicowych oprócz odbiornika i satelitów również są potrzebne dodatkowe elementy systemu np. stacja referencyjna, jak pokazano na Rys. 13. W uproszczeniu jest to stacjonarny odbiornik sygnału GNSS, którego pozycja jest precyzyjnie określona. Dzięki temu jest w stanie obliczać poprawki poprzez porównanie jej dokładnej pozycji z pozycją aktualnie obliczoną. Pozwala to na oszacowanie jaki jest poziom błędów na bliskim jej obszarze. W ostatnim etapie te poprawki za pomocą różnych metod mogą zostać bezprzewodowo rozesłane do odbiorników. Ze względu na sposób dystrybucji tych poprawek można wydzielić dwa rodzaje systemów: GBAS (ang. Ground Based Augmentation System) oraz SBAS (ang. Satellite Based Augmentation System). W przypadku pierwszego systemu wyznaczone poprawki są przekazywane użytkownikom z wykorzystaniem łączy radiowych lub internetu, a w przypadku systemu SBAS poprawki są transmitowane do użytkowników poprzez satelity geostacjonarne.



Rys. 13. Elementy systemu i droga komunikacji przy wykorzystaniu techniki różnicowej [64].

Przenośna stacja referencyjna (bez RTK)

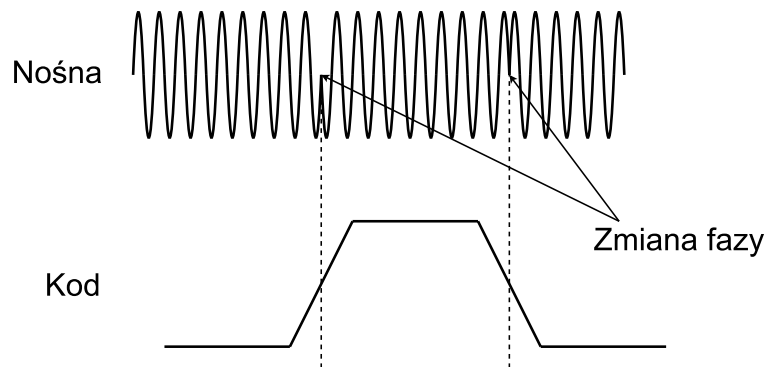
Przenośna stacja referencyjna jest szczególnie przydatna, kiedy istnieje potrzeba dokładnej lokalizacji samochodu np. podczas testów samochodu na torze testowym. W przypadku wykorzystania przenośnej stacji referencyjnej jej lokalizacja jest nieznana. Aby wyznaczyć pozycję stacji referencyjnej, należy ją przez dłuższy okres np. 24 godzin pozostawić w jednym miejscu. W tym czasie stacja wyznacza swoją pozycję na podstawie komunikacji z satelitami i metody trilateracji. Jako że błędy są losowe, to po odpowiednio długim czasie, kolejne pomiary przyjmują kształt koła, jak pokazano na Rys. 14. Rzeczywista lokalizacja stacji jest w jego geometrycznym środku, którą można obliczyć, uśredniając kolejne pomiary. W momencie, kiedy pozycja stacji referencyjnej jest już dokładnie znana, jest ona w stanie obliczać poprawki poprzez porównanie jej dokładnej pozycji z pozycją aktualnie obliczoną, bazując na pomiarze zboczy otrzymywanych sygnałów lub na pomiarze fazy w przypadku stacji wyposażonej w RTK. Następnie te poprawki są wysyłane sygnałem radiowym do samochodu i aplikowane do obliczeń. Dokładność GNSS przy wykorzystaniu stacji referencyjnej bez RTK to około 1 metr [62], [65]. Aby korzystać z tej metody, samochód musi mieć bezpośrednie połączenie radiowe ze stacją referencyjną, dlatego ta metoda może być wykorzystywana jedynie na niewielkich odległościach do linii widoczności [48].



Rys. 14. Wyznaczona pozycja stacji referencyjnej przez 24 godziny [62].

Kinematyka w czasie rzeczywistym RTK (ang. Real Time Kinematic)

Kinematyka w czasie rzeczywistym to technika wykorzystywana przez odbiorniki oraz stacje referencyjne do jeszcze bardziej precyzyjnego wyznaczenia odległości do satelitów i tym samym swojej pozycji, a co za tym idzie do wyznaczania dokładniejszych poprawek dla innych odbiorników. W tej metodzie pseudoodległość wyznacza się rozszerzając pomiary zboczy sygnałów o pomiary fazy fali nośnej, jak pokazano na Rys. 15. Dzięki temu można o wiele precyzyjniej znaleźć punkt zmiany sygnału, a tym samym dokładniej wyznaczyć opóźnienie fali i pseudoodległość [62]. Następnie te poprawki są transmitowane radiowo do samochodów, dokładnie tak samo, jak w przypadku normalnej stacji referencyjnej. Wymagana jest komunikacja radiowa o dużej szybkości, gdyż ta technika działa w czasie rzeczywistym. Obecnie RTK jest jedną z najlepszych technik poprawiających dokładność GNSS, gdzie dokładność wynosi od pojedynczych centymetrów [65] do nawet milimetrów [48].

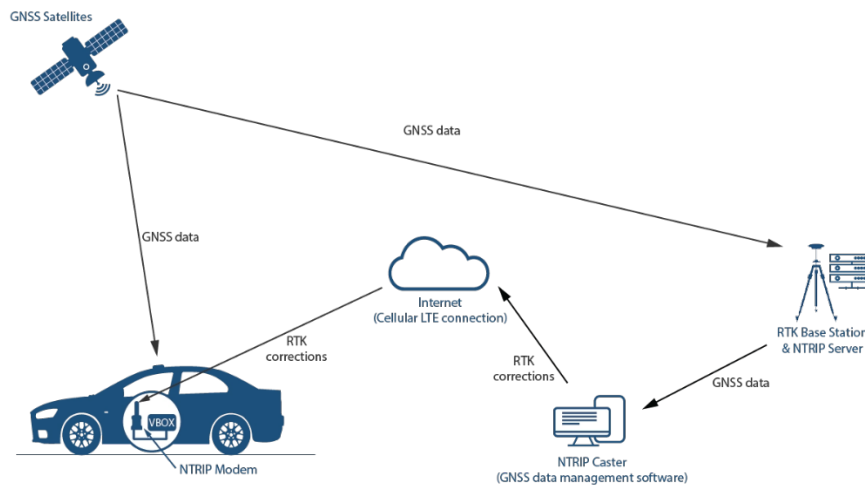


Rys. 15. Pomiar fazy nośnej wykorzystany do dokładniejszego określenia punktu zmiany bitu w kodzie. Rysunek przygotowany w oparciu o [66].

Kinematyka w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem sieci (ang. Network RTK)

W przypadku, kiedy nie ma możliwości użycia stacji referencyjnej lub samochód musi poruszać się na większym obszarze poza bezpośrednim jej zasięgiem, używa się techniki Network RTK. Polega ona na tym, że wiele stacji referencyjnych wysyła poprawki do głównego serwera, a ten

następnie siecią komórkową z użyciem protokołu NTRIP (ang. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) przesyła poprawki do samochodu, jak pokazano na Rys. 16. Procedura wyznaczania pozycji jest w skrócie następująca. Najpierw standardowo samochód wyznacza swoją pozycję w oparciu o kontakt z satelitami i metodę trilateracji. Następnie obliczoną pozycję wysyła siecią komórkową do serwera usług Network RTK. Dostawca usług sprawdza, w jakim obszarze samochód się znajduje, wybiera odpowiednie poprawki przeznaczone dla tego obszaru i odsyła je siecią komórkową do samochodu. W ostatnim kroku samochód aplikuje otrzymane poprawki do swoich obliczeń. Nie należy mylić Network RTK ze wspomaganym GNSS, gdyż w metodzie A-GNSS sygnał komórkowy jest używany tylko do odebrania danych o pozycjach satelitów podczas jego uruchamiania, natomiast później pozycję wyznacza całkowicie samodzielnie bez używania żadnych poprawek [67], [68].

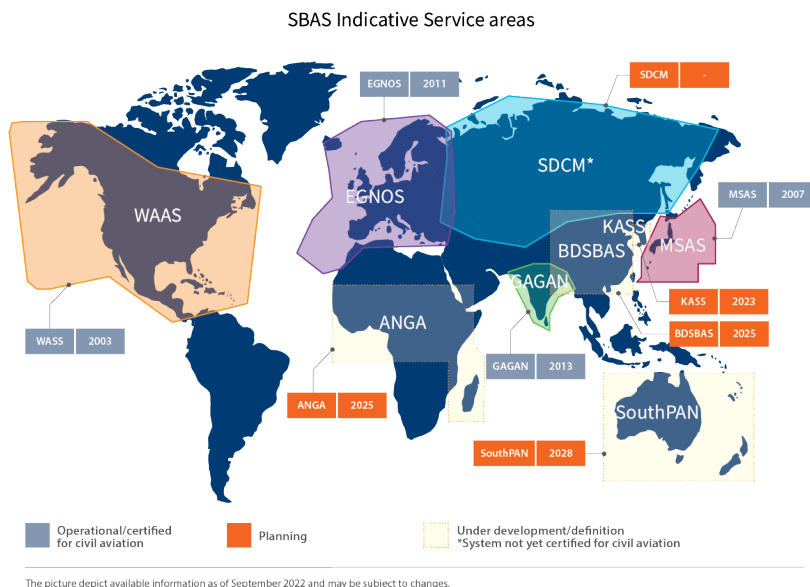


Rys. 16. Elementy systemu i droga komunikacji przy wykorzystaniu sieci [64].

Satelitarny system wspomagający SBAS

Kolejną techniką zwiększającą precyzję systemu GNSS jest SBAS (ang. Satellite Based Augmentation System). Jest to technika, która do swojego działania oprócz standardowych satelitów GNSS wykorzystuje również satelity geostacjonarne oraz naziemne stacje referencyjne. SBAS wykorzystuje pomiary wykonane przez dokładnie zlokalizowane, nieruchome stacje referencyjne rozmieszczone na całym kontynencie. Wszystkie zmierzone błędy GNSS są przesyłane do centralnego centrum obliczeniowego, gdzie obliczane są poprawki różnicowe i komunikaty o wiarygodności. Dane te są następnie transmitowane do satelitów geostacjonarnych, które rozsyłają poprawki do odbiorników.

Kilka krajów wdrożyło własny system SBAS. W Europie nazywa się on EGNOS (ang. European Geostationary Navigation Overlay Service), w USA WWAS (ang. Wide Area Augmentation System), w Japonii MSAS (ang. Multi-Functional Satellite Augmentation System), a w Indiach GAGAN (ang. GPS Aided Geo Augmented Navigation System). Ponadto wiele krajów oraz regionów pracuje nad własnymi systemami SBAS, co można zobaczyć na Rys. 17.



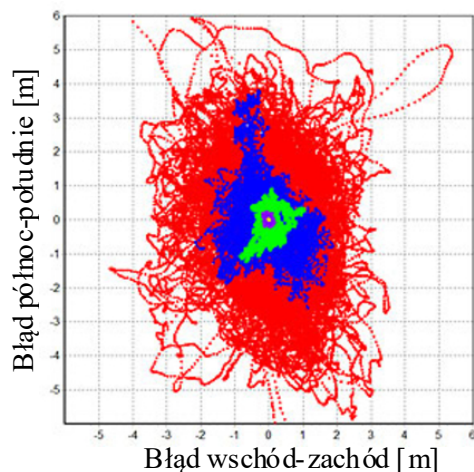
Rys. 17. Obszar działania systemów SBAS [69].

Usługa SBAS jest bezpłatna, a jedynym wymogiem jest odbiornik wyposażony w funkcję odbioru sygnału SBAS.

Dla przykładu europejski system EGNOS składa się z 40 stacji referencyjnych RIMS (ang. Ranging and Integrity Monitoring Station) zlokalizowanych na obszarze głównie Europy i północnej Afryki, dwóch centrów MCC (ang. Mission Control Centre) obliczających poprawki, dwóch centrów NLES (ang. Navigation Land Earth Station) przesyłających poprawki do satelitów geostacjonarnych oraz trzech satelitów geostacjonarnych [70]. Dokładność GNSS wspomaganego o SBAS jest zależna od ilości rozmieszczonych stacji referencyjnych oraz położenia satelitów geostacjonarnych na orbicie. Jako że stacje referencyjne zasadniczo są dość rzadko rozmieszczone i odpowiadają za poprawki na dużym obszarze, to średnia dokładność SBAS to około 1 m [62], [71]. W Polsce znajduje się tylko jedna stacja referencyjna i z tego powodu ogólna dokładność SBAS jest niska, a szczególnie niska we wschodniej części Polski [72].

Podsumowanie

System GNSS odgrywa nieocenioną rolę w samochodzie, dlatego jego dokładność ma kolosalne znaczenie. Istnieje wiele technik polepszających dokładność z różnym skutkiem. Najgorsze wyniki uzyskuje się korzystając z tanich, nieprofesjonalnych modułów GNSS np. wbudowanych w telefon. Lepsze wyniki osiąga się poprzez użycie profesjonalnego modułu GNSS o lepszych parametrach metrologicznych. Rozszerzając dany moduł GNSS o kolejne techniki, można uzyskać rozdzielczość pojedynczych centymetrów, jak pokazano na Rys. 18.



Rys. 18. Rozrzut pozycji zbieranej przez 24 h. Czerwony – komercyjny moduł GNSS, Niebieski – profesjonalny (niewspomagany) moduł GNSS, Zielony – profesjonalny moduł GNSS z SBAS, Fioletowy - profesjonalny moduł GNSS z poprawkami różnicowymi, Żółty - profesjonalny moduł GNSS z RTK [62].

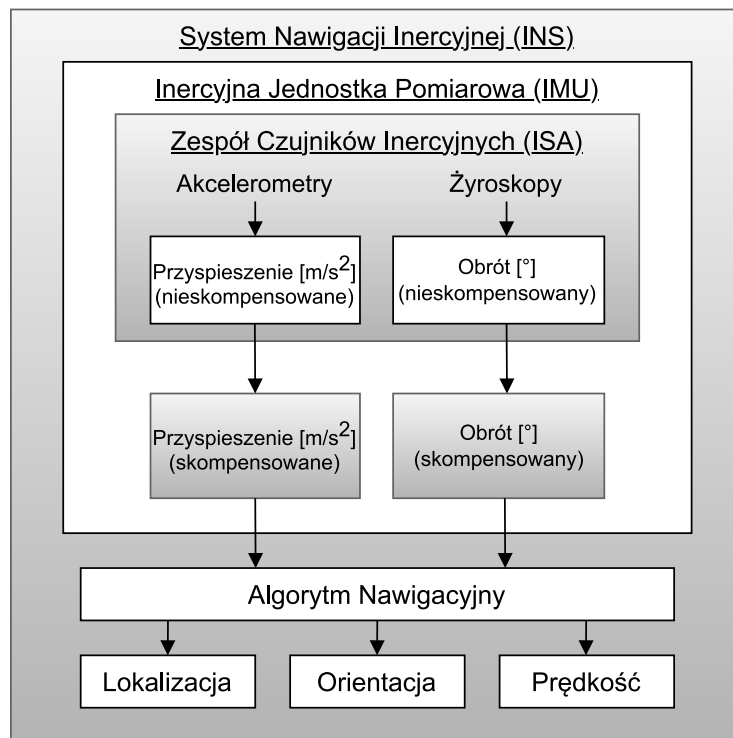
3.2.2 Inercyjna jednostka pomiarowa IMU

Globalny system nawigacji satelitarnej ma wiele ograniczeń. Przede wszystkim jest tylko dostępny na otwartym terenie i dodatkowo zależny od warunków atmosferycznych. W momencie dużego zachmurzenia lub w obecności wysokich budynków czy drzew sygnał może być za słaby, aby precyzyjnie określić lokalizację. Przypadkiem skrajnym jest wjazd samochodu do tunelu. Wtedy samochód całkowicie traci sygnał GNSS i nie jest w stanie wyznaczyć ani pozycji, ani prędkości. Z tego powodu nieodłącznym systemem współpracującym z GNSS jest inercyjna jednostka pomiarowa IMU (ang. Inertial Measurement Unit) pokazana na Rys. 19. Jest używana do weryfikowania poprawności zmian lokalizacji i prędkości wyznaczonych przez moduł GNSS oraz do korekcji błędów lokalizacji i prędkości w momencie, kiedy sygnał GNSS jest słaby lub niedostępny. Dzięki IMU samochód wjeżdżając do tunelu, jest w stanie określić swoją pozycję i prędkość. Dodatkowo samochód z dużą częstotliwością może monitorować kierunek jazdy, co zabezpiecza przed niekontrolowaną zmianą pasa ruchu. Ponadto IMU monitorując m.in. przechyły samochodu, jest źródłem danych do wielu systemów bezpieczeństwa takich jak zmiana pasa ruchu czy kontrola stabilności ESC. IMU jest szczególnie przydatne w samochodach o wysokiej automatyzacji jazdy, niewykorzystujących lidarów. W takim przypadku dane z IMU są podstawowymi danymi do matematycznego obliczania pozycji i orientacji. Wyróżniającą cechą IMU w porównaniu do innych czujników wykorzystywanych w jeździe autonomicznej jest to, że do skutecznego działania nie potrzebuje kompletnie wiedzy o otaczającym świecie.



Rys. 19. Przykładowe IMU [73].

Inercyjna jednostka pomiarowa to urządzenie, które składa się z zespołu czujników inercyjnych ISA (ang. Inertial Sensor Assembly) oraz odpowiednich algorytmów przetwarzania. Zespół czujników inercyjnych składa się z trójosiowego akcelerometru i trójosiowego żyroskopu. Akcelerometr odpowiada za pomiar trzech składowych przyspieszenia liniowego pojazdu a_x , a_y , a_z , a żyroskop za pomiar trzech składowych prędkości kątowych pojazdu ω_x , ω_y , ω_z . Obroty wokół tych osi są nazywane odpowiednio roll, pitch i yaw. Algorytm przetwarzania, który najczęściej wykorzystuje kilka filtrów równocześnie, jest odpowiedzialny za odpowiednie odfiltrowanie szumów pomiarowych oraz usunięcie błędów. Jednym z najczęściej stosowanych filtrów są różnego rodzaju filtry Kalmana [74], [75]. Jednostka IMU może wchodzić w system nawigacji inercyjnej INS (ang. Inertial Navigation System), która razem z algorytmem nawigacyjnym oblicza względną lokalizację, orientację oraz prędkość, jak pokazano na Rys. 20 [74].



Rys. 20. Klasyfikacja systemów inercyjnych. Rysunek przygotowany w oparciu o [74].

W pojazdach najczęściej wykorzystuje się jednostkę IMU o sześciu stopniach swobody DOF (ang. Degree of Freedom), zawierającą trójosiowy akcelerometr oraz trójosiowy żyroskop. Istnieją również IMU o dziewięciu stopniach swobody z dodatkowym magnetometrem, określającym kierunek oraz siłę pola magnetycznego ziemi. Tego typu IMU nie są wykorzystywane w pojazdach ze względu na wpływ lokalnych pól magnetycznych oraz pól pobliskich pojazdów. Przykładowymi producentami IMU w motoryzacji są Bosch, Continental, Honeywell, Murata Manufacturing, Texas Instruments, ZF Friedrichshafen [76]. Jednostki IMU stosowane w motoryzacji zwykle charakteryzują się niepewnością pomiaru znacznie mniejszą niż 1 mG dla przyspieszenia i $10^\circ/h$ dla prędkości kątowej [77]. Przykładowo czujnik OpenIMU335RI charakteryzuje się niepewnością pomiaru przyspieszenia wynoszącą 0,02 mG oraz niepewnością prędkości kątowej wynoszącej $1,3^\circ/h$ [78].

Akcelerometr

Akcelerometr jest czujnikiem odpowiedzialnym za pomiar przyspieszenia. Najczęściej akcelerometry są zbudowane w technologii MEMS. Akcelerometr MEMS jest zasadniczo zbudowany z masy zawieszonyj na sprężynie, która jednocześnie jest jedną z okładek kondensatora oraz pojemnościowego układu pomiarowego, jak pokazano na Rys. 21. Masa jest określana jako masa próbna a kierunek, w którym może się poruszać, jako oś czułości. Kiedy akcelerometr jest poddawany liniowemu przyspieszeniu wzdłuż osi czułości, przyspieszenie powoduje przesunięcie masy próbnej w jedną stronę. Wielkość ugięcia x jest proporcjonalna do przyspieszenia a_{ext} zgodnie ze wzorem (14). Następnie to przesunięcie jest mierzone jako zmiana pojemności kondensatora i na tej podstawie wyznaczane przyspieszenie a_{ext} [48].

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + K_{eff}x = -Ma_{ext} \quad (14)$$

gdzie:

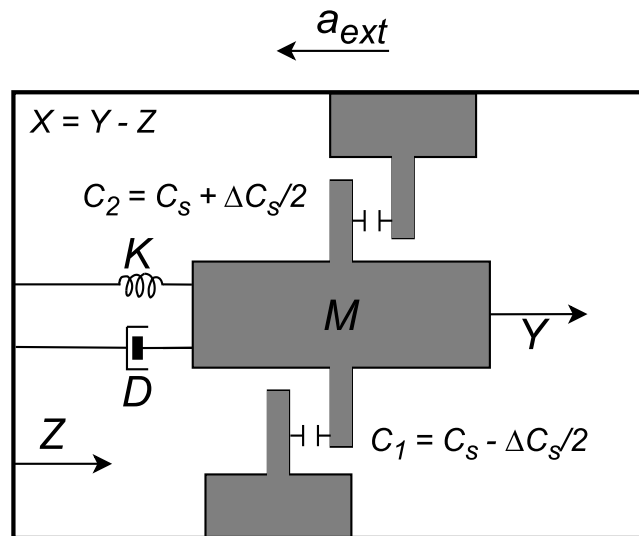
M – masa próbna,

D – tłumienie wynikające z tłumienia powietrza otaczającego masę próbną,

K_{eff} – stała sprężystości uwzględniająca sprężystość sprężyn oraz sprężystość elektryczną kondensatorów,

x – przesunięcie,

a_{ext} – przyspieszenie zewnętrzne działające na akcelerometr.



Rys. 21. Uproszczony schemat akcelerometru MEMS. Rysunek przygotowany w oparciu o [79].

Żyroskop

Żyroskopy MEMS mierzą prędkość kątową, wykorzystując efekt Coriolisa. Podobnie jak akcelerometr jest zbudowany z masy zawieszonyj na sprężynie, która jednocześnie jest jedną z okładek kondensatora oraz pojemnościowego układu pomiarowego. Różnicą jest to, że masa na sprężynie jest dodatkowo napędzana przez układ solenoidów i z tego powodu oscyluje cały czas z dużą częstotliwością wzdłuż jednej osi. W momencie obrotu na poruszającą się masę oddziałuje siła Coriolisa powodująca przemieszczenie masy w kierunku prostopadłym do kierunku oscylacji.

Następnie to przemieszczenie jest mierzone przez układ pomiarowy jako zmiana pojemności kondensatora i na tej podstawie wyznaczana jest prędkość kąтова.

Zazwyczaj żyroskopy MEMS wykorzystują konfigurację kamertonową, aby odróżnić prędkość kątową spowodowaną obrotem, od przyspieszeń spowodowanych przemieszczeniem liniowym wzdłuż osi pomiarowej. W tym układzie występują dwie masy oscylujące w przeciwnych kierunkach. Dzięki temu w momencie obrotu powstałe siły są do siebie przeciwnie skierowane, a wynikająca z tego zmiana pojemności, jest wprost proporcjonalna do prędkości kątowej. Konfiguracja kamertonowa minimalizuje czułość żyroskopu na przyspieszenie liniowe spowodowane przechyleniem, wstrząsami i wibracjami [80].

3.2.3 Odometria

Obok GNSS i IMU dodatkowymi czujnikami są odometry. Odometr mierzy przebytą drogę oraz prędkość samochodu w oparciu o czujniki zamontowane najczęściej w kołach samochodu, jak pokazano na Rys. 22.



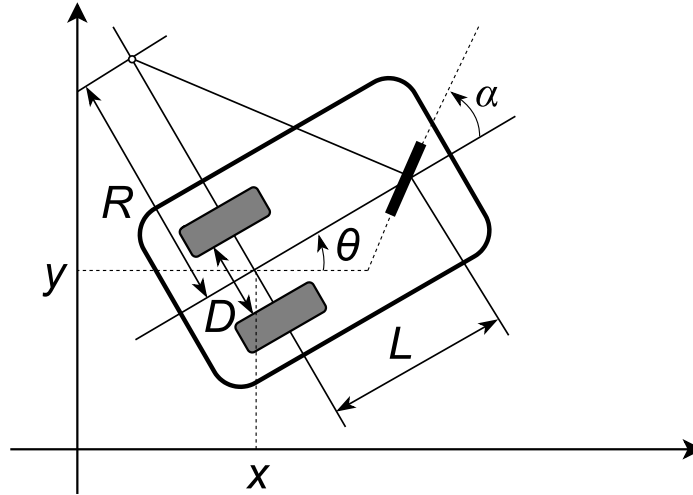
Rys. 22. Czujnik prędkości obrotowej koła [81].

Surowe dane wyjściowe z enkodera to impulsy, których liczba jest proporcjonalna do przebytej drogi. Liczba impulsów wygenerowanych na dystansie jednego metra jest nazywana współczynnikiem skali odometru [82]. Mierząc liczbę impulsów w czasie, uzyskuje się prędkość kątową koła, a następnie wykorzystując znany promień koła, uzyskuje się prędkość liniową samochodu. Dodanie odometru do IMU pozwala na dokładniejsze wyznaczenie względnej pozycji oraz prędkości, w momencie słabego zasięgu GNSS [83]. Dodatkowo odometr jest źródłem wykorzystywanym do określania przebiegu pojazdu. Czujniki prędkości obrotowej kół dzielą się na czujniki pasywne - niewymagające zasilania oraz aktywne, które go wymagają.

Czujnik prędkości obrotowej zamontowany w kołach jest również wykorzystywany w działaniu takich systemów jak: zapobieganie blokowania kół podczas hamowania ABS, elektroniczna kontrola stabilności ESC, kontrola trakcji TC czy pośrednie monitorowanie ciśnienia w oponach iT-PMS (ang. Indirect Tire Pressure Monitoring System) [84].

W przypadku jazdy po łuku każde z kół mierzy inną drogę, co powoduje skomplikowanie pomiarów i wymusza zastosowanie odpowiedniego modelu napędu. Najczęściej używanymi modelami w przypadku pojazdów czterokołowych jest model roweru lub trójkołowca. W modelu trójkołowca dwa przednie koła skrętne są zastąpione jednym kołem umieszczonym na środku osi je

łączących. W takim modelu, jeśli koło jest skręcone o kąt α względem lokalnego układu współrzędnych związanego z pojazdem, pojazd obraca się po łuku, którego środek znajduje się w odległości R na przecięciu przedłużenia osi tylnych kół oraz osi skręconego przedniego koła, jak pokazano na Rys. 23 [85].



Rys. 23. Reprezentacja modelu trójkołowca we współrzędnych globalnych. Rysunek przygotowany w oparciu o [85].

Pozycja pojazdu określona jako $S_k = [x_k, y_k, \theta_k]$, gdzie $[x_k, y_k]$ są współrzędnymi kartezjańskimi, a θ_k jest kątem określającym orientację względem globalnego układu współrzędnych. Bazując na odczytach enkoderów, pozycja pojazdu może być obliczona w oparciu o wzór (15).

$$S_{k+1} = S_k + \begin{bmatrix} -R\sin(\theta_k) + R\sin\left(\theta_k + \frac{U_k dt}{R}\right) \\ R\sin(\theta_k) - R\cos\left(\theta_k + \frac{U_k dt}{R}\right) \\ \frac{U_k dt}{R} \end{bmatrix} \quad (15)$$

gdzie:

R – promień łuku, $R = \frac{D}{2} \frac{U_{kL} + U_{kR}}{U_{kL} - U_{kR}}$,

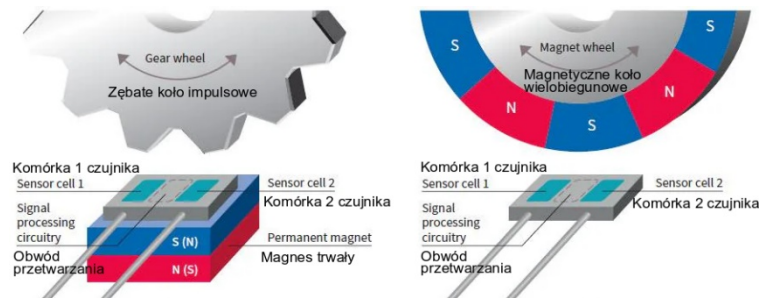
U_k – przyrostowa odległość dwóch obciążonych kół przeliczona na środek osi robota $U_k(t) = \frac{U_{kL} + U_{kR}}{2}$,

U_{kR}, U_{kL} – przyrostowe odległości odpowiednio w prawym i lewym kole,

D – rozstaw kół.

Czujniki prędkości obrotowych kół są przeważnie aktywnymi czujnikami magnetorezystancyjnymi lub czujnikami Halla [86], [87]. Czujniki Halla mogą współpracować zarówno z zębatym kołem impulsowym, jak i magnetycznym kołem wielobiegunowym. W przypadku koła zębatego czujnik Halla musi mieć wewnątrz dodatkowy magnes, jak pokazano na Rys. 24. Czujniki ma-

gnetorezystancyjne działają wyłącznie z magnetycznym kołem wielobiegunowym, gdyż wymagane jest zewnętrzne pole magnetyczne, które zmienia rezystancję czujnika. Czujniki aktywne są w stanie wykrywać kierunek i mierzyć prędkość już od 0,1 km/h, dlatego nadają się do takich systemów jak ESC czy TCS. W zależności od producenta czujniki Halla występują w odmianach dwu-, trój- lub czteroprzewodowych, a magnetorezystancyjne najczęściej w dwu- i trójprzewodowych, a liczba przewodów jest głównie determinowana sposobem przesyłu danych.



Rys. 24. Porównanie różnic w budowie czujników Halla dla pracy z kołem impulsowym i magnetycznym kołem wielobiegunowym [88].

Wyznaczanie położenia i prędkości w oparciu o pomiary odometrów mogą być sklasyfikowane jako systematyczne lub niesystematyczne. Systematyczne błędy odometrii kumulują się w czasie i wynikają najczęściej z niepoprawnej średnicy kół lub ich niewspółosiowości czy ograniczonych możliwości przetwarzania enkodera. Niepoprawna średnica kół może być spowodowana zastosowaniem niezalecanych wielkości felg lub opon, zużyciem opon, obciążeniem pojazdu lub nieprawidłowym ciśnieniem w oponach. Błędy niesystematyczne są spowodowane głównie nieregularnościami powierzchni, po której porusza się samochód oraz wszelkiego rodzaju utratami przyczepności spowodowanymi śliską nawierzchnią, nadmiernym przyspieszeniem, poślizgiem w zakręcie czy interakcjami z ciałami zewnętrznymi [74].

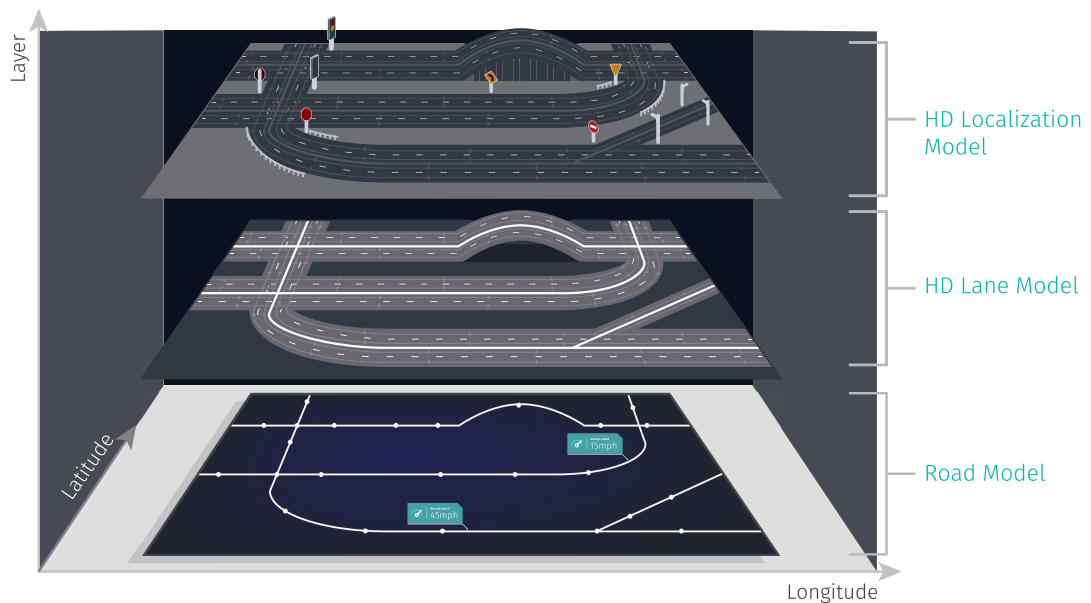
3.2.4 Mapy wysokiej definicji

Samo precyzyjne określenie długości, szerokości i wysokości geograficznej jest bezużyteczne, jeśli tego nie osadzimy w otoczeniu. Do tego celu wykorzystuje się mapy łączące te dwie rzeczy. W jeździe autonomicznej dokładne i aktualne mapy są niezbędne, gdyż są używane do planowania trasy, trajektorii [89] oraz misji przejazdu [90]. Standardowe mapy, z których korzystają popularne nawigacje samochodowe, posiadają podstawowe informacje, których dokładność i szczegółowość jest niewystarczająca do jazdy autonomicznej. W tym celu w 2010 roku pierwszy raz stworzono koncepcję mapy wysokiej definicji HD Map (ang. High Definition Map), którą w 2013 roku Mercedes Benz wraz z firmą HERE Technologies wdrożył do modelu Mercedes S500 [91]. Mapa wysokiej definicji jest wysokoszczegółową i wysokoprecyzyjną mapą, która zawiera wszystkie krytyczne właściwości drogi oraz otoczenia, niezbędne do autonomicznej jazdy. Dzięki niej pojazd posiada informacje o obiektach otaczających pojazd, również tych będących poza zasięgiem czujników samochodu. Dokładność takiej mapy jest przeważnie rzędu pojedynczych centymetrów [89], [91].

Mapa wysokiej definicji jest oparta na chmurze internetowej, która jest na bieżąco aktualizowana za pomocą odczytów z czujników samochodów [91]. W przypadku map firmy HERE dane są pozyskiwane za pomocą pojazdów o nazwie HERE True Vehicles wyposażonych w lidar, które

codziennie zbierają około 28 TB danych z centymetrową dokładnością. Zważywszy na to, że pojazdy HERE True Vehicles różnią się wielkością oraz umiejscowieniem czujników, zbierane dane są agregowane za pomocą uczenia maszynowego w celu stworzenia dokładnej mapy [92].

Mapy wysokiej definicji składają się typowo z trzech [91] lub czterech warstw [89], z których każda warstwa zawiera inne informacje. Mapy firmy HERE składają się z trzech warstw, jak można zobaczyć na Rys. 25. Podstawowa warstwa nazywana modelem drogi opisuje drogę na niskim poziomie szczegółowości. Definiuje topologię, wysokość, nachylenie i krawędzie drogi, kierunek jazdy oraz skrzyżowania i tunele. Ta warstwa jest przydatna do planowania trasy oraz nawigacji w skali makro i jest wystarczająca dla samochodów na zerowym i pierwszym poziomie automatyzacji jazdy [92]. Druga warstwa nazywana jest modelem pasa ruchu (ang. HD Lane Model). Określa poszczególne pasy ruchu, ich geometrię (szerokość i kształt), rodzaje linii pomiędzy pasami, obszary zatrzymania i ograniczenia prędkości. Dzięki tej warstwie jest możliwe planowanie dokładnej trajektorii z uwzględnieniem pasów ruchu na drodze. Szczegółowość tej warstwy jest wystarczająca dla samochodów na pierwszym i drugim poziomie automatyzacji jazdy. Ostatnią warstwą jest warstwa modelu lokalizacji (ang. HD Localization Model), która zawiera takie informacje jak poziome i pionowe znaki drogowe, bariery wokół drogi, latarnie, słupy czy budynki [93].



Rys. 25. Warstwy w mapach wysokiej definicji firmy HERE [93].

Dodatkowym parametrem zapewnionym przez mapy wysokiej definicji jest indeks jakości określający dokładność odzwierciedlenia danego obiektu przez mapę, jak zaprezentowano na Rys. 26. Jeśli dany fragment mapy był niedawno aktualizowany przez przejeżdżający tam samochód, istnieje duże prawdopodobieństwo, że mapa wiernie oddaje aktualny stan drogi. Wtedy indeks jakości przyjmuje wysokie wartości. Jeśli zaś fragment mapy przez dłuższy czas nie był aktualizowany, istnieje prawdopodobieństwo, że mapa jest przestarzała i nie odzwierciedla aktualnego stanu. W takim przypadku indeks przyjmuje niskie wartości liczbowe. Dzięki tym informacjom pojazdy są lepiej przygotowane do oceny otoczenia i podejmowania decyzji [94].



Rys. 26. Indeksy jakości w mapach wysokiej definicji firmy HERE [95].

Oprócz omówionej Here Technologies na rynku istnieje kilka firm, które również są dostawcami map wysokiej definicji. Przykładem jest firma Ushr, która jest dostawcą map wysokiej definicji dla General Motors, które są wykorzystywane w systemie Super Cruise [96]. Pozostałymi firmami posiadającymi mapy wysokiej definicji są: TomTom, Zenrin, Sanborn, Mapbox, MapMyIndia, Autonavi czy Agroverse.

3.3 Kamery

Jednym z podstawowych systemów biorących udział w jeździe autonomicznej jest kamera, która głównie służy do wykrywania i klasyfikacji obiektów np. ludzi, samochodów, linii czy znaków drogowych. Występuje wiele rodzajów kamer różniących się technologią, którą wykorzystują. Przede wszystkim można rozróżnić kamery dwuwymiarowe - 2D oraz trójwymiarowe - 3D. Kamery 2D to standardowe kamery, które rejestrują obraz w dwóch wymiarach x, y , czyli rejestrują szerokość i wysokość obiektu, natomiast kamery 3D potrafią również mierzyć odległość. Innym podziałem może być rozróżnienie ze względu na rodzaj rejestrowanego światła np. światła widzialnego lub podczerwonego. Również istnieje podział na kamery aktywne i pasywne. Kamery pasywne wykorzystują istniejące promieniowanie świetlne, natomiast aktywne sztucznie oświetlają obiekt przed zarejestrowaniem obrazu. Jeśli chodzi o kamery 3D, to istnieją różne techniki wyznaczania odległości do obiektu i tutaj można wyróżnić stereowizję, światło strukturalne oraz czas przelotu.

3.3.1 Kamery światła widzialnego

Kamera światła widzialnego służy do rejestrowania dwuwymiarowych, kolorowych obrazów poprzez przechwytywanie odbitego od obiektów światła widzialnego o długości fali od 400 do 700 nm. Kamery tego typu są już od bardzo dawna wykorzystywane w motoryzacji, początkowo głównie jako kamery cofania, a obecnie również w zaawansowanych systemach wsparcia kierowcy (ADAS). Pomimo że kamera rejestruje obraz tylko w dwóch wymiarach, za pomocą badania perspektywy i odpowiednich algorytmów również jest możliwe wyznaczenie odległości do zarejestrowanych obiektów [97]. Kamery głównie wykorzystują jedną z dwóch typów matryc światłoczułych: CCD (ang. Charge-Coupled Device) lub CMOS (ang. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) [98]. Obie technologie wykorzystują wewnętrzny efekt fotoelektryczny polegający na zamianie padającego fotonu na elektron oraz dziurę. Padający foton na matrycę światłoczułą zamienia się w elektron powodujący powstanie napięcia elektrycznego, które określa jasność piksela [99], [100]. Liczba elektronów na piksel n_{sig} jest równa w przybliżeniu (16) [101].

$$n_{sig} \sim \frac{\pi}{4F^2} AK I t_{EXP} \quad (16)$$

gdzie:

F – współczynnik ogniskowej,

A – pole powierzchni piksela,

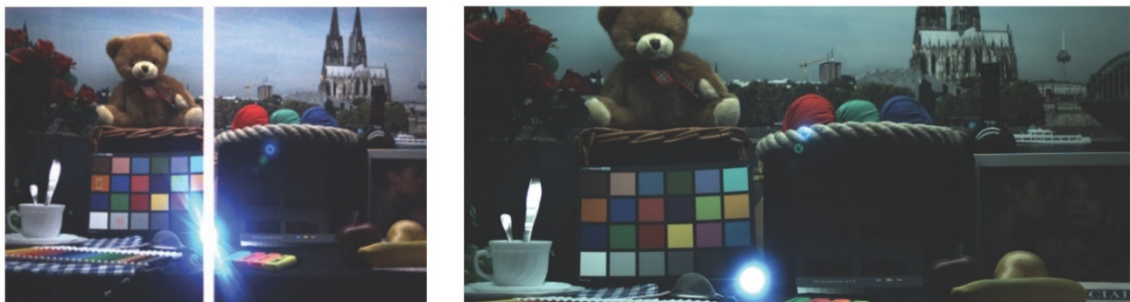
K – responsywność piksela,

I – wartość luminancji,

t_{EXP} – czas ekspozycji.

Początkowo w kamerach wykorzystywane były głównie matryce CCD ze względu na lepszą jakość obrazu. Natomiast od wielu lat matryce CMOS są rozwijane i ulepszone, dzięki temu obecnie jakość obrazu jest porównywalna, a czasami nawet lepsza niż w CCD. Dodatkowo matryce CMOS są tańsze, co spowodowało, że praktycznie wyparły z rynku matryce CCD i obecnie zajmują 99% rynku elektroniki konsumenckiej [102]. Również w motoryzacji używane są głównie matryce CMOS ze względu na wiele zalet, które posiadają. Przede wszystkim są tańsze, co jest czynnikiem istotnym w momencie, gdy samochody często są wyposażone w wiele kamer i mogą one wpłynąć na cenę samochodu. Dodatkowo są bardziej energooszczędne, co jest ważnym czynnikiem szczególnie w przypadku samochodów elektrycznych, które są zasilane bateryjnie [102]. Jedną z największych różnic i przewag CMOS nad CCD jest szybkość przetwarzania obrazu (większa liczba klatek na sekundę). Spowodowane jest to faktem, że każdy piksel ma własny układ przetwarzania napięcia, co powoduje łatwiejsze i szybsze przetwarzanie pikseli i całego obrazu [100], [103]. Jako że każdy piksel ma własny układ konwersji napięcia, to CMOS ma mniejszą światłoczułość niż CCD, gdyż przy takim samym rozmiarze piksela mniejszą część zajmuje element światłoczuły. Ten problem kompensuje się użyciem soczewki skupiającej więcej światła na elemencie światłoczułym [100].

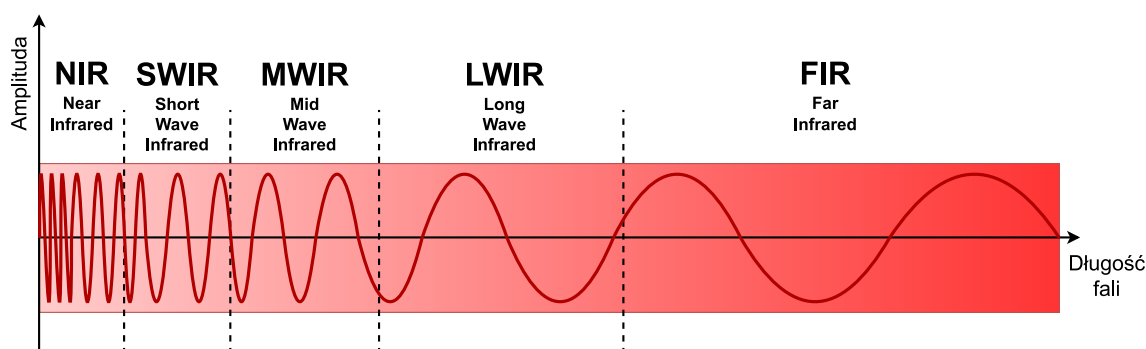
Obecnie jakość obrazu jest na porównywalnym poziomie pomiędzy CMOS i CCD [98]. Jednym z parametrów jakościowych będących na podobnym poziomie jest zakres dynamiczny DR (ang. Dynamic Range), czyli zakres minimalnego do maksymalnego natężenia światła, który matryca może zarejestrować. Dzięki temu jest możliwa akwizycja obrazów o wysokim kontraście, czyli obrazów jednocześnie będących bardzo jasnymi oraz bardzo ciemnymi [99]. Dodatkowo w matrycach CMOS nie występuje efekt rozkwitania (ang. blooming) oraz smużenia (ang. smearing) występujący w matrycach CCD. Rozkwitanie oraz smużenie pojawiają się, gdy ilość padającego światła przekracza dopuszczalną wartość, którą dany piksel może zarejestrować. Objawia się to podświetleniem ciemnych pikseli przez sąsiadujące jasne piksele, tworząc efekt rozkwitania oraz pojawieniem się pionowego paska na obrazie – smużenia [98], [103], jak można zaobserwować na Rys. 27.



Rys. 27. Po lewej obraz zarejestrowany przez matrycę CCD z widocznym smużeniem oraz rozkwitaniem oraz po prawej zarejestrowany przez CMOS pozbawiony tych efektów [103].

3.3.2 Kamery podczerwone

Kamery podczerwone rejestrują promieniowanie w zakresie fal podczerwonych. Kamery te, jako że nie rejestrują światła widzialnego, prezentują obrazy monochromatyczne (w odcieniach szarości) [104]. Kamery podczerwone są wykorzystywane w nocy oraz warunkach słabego oświetlenia [105]. Promieniowanie podczerwone jest niewidoczne dla człowieka, dlatego nawet w nocy nie jest dostrzegalne źródło światła ani jego przebieg. Podział pasma podczerwonego obecnie nie jest ustandaryzowany, dlatego przeglądając publikacje, można spotkać wiele różnych podziałów [106]. Jednym z przykładowych podziałów jest zaprezentowany na Rys. 28, który wyróżnia pięć zakresów: bliską podczerwień NIR (ang. Near Infrared), krótkofalową podczerwień SWIR (ang. Short Wave Infrared), średnifalową podczerwień MWIR (ang. Mid Wave Infrared), długofalową podczerwień LWIR (ang. Long Wave Infrared) i daleką podczerwień FIR (ang. Far Infrared), natomiast często pasmo jest dzielone tylko na trzy zakresy: pasmo bliskiej NIR, średniej MIR (ang. Medium Infrared) i dalekiej podczerwieni FIR [107]. W motoryzacji najczęściej kamery wykorzystują podczerwień NIR, SWIR oraz LWIR [108].



Rys. 28. Podział pasma podczerwonego. Rysunek przygotowany w oparciu o [109].

Kamera bliskiej podczerwieni (NIR / SWIR)

Kamery bliskiej podczerwieni rejestrują odbite światło podczerwone na matrycy światłoczułej i mogą występować w odmianie pasywnej lub aktywnej. Kamery pasywne wykorzystują promieniowanie podczerwone, którego źródłem jest słońce lub inne sztuczne źródła światła. Natomiast kamery aktywne wymagają wcześniejszego oświetlenia obiektu światłem podczerwonym, które najczęściej jest realizowane poprzez dodatkowe urządzenie wbudowane w kamerę. Kamery bliskiej podczerwieni wykorzystują fale podczerwone o długości typowo od 700 do 1400 nm dla kamer NIR [108], [110] do nawet do 3000 nm w przypadku kamer SWIR [104]. Dzięki zastosowaniu światła podczerwonego kamera z łatwością penetruje lekką mgłę czy dym, co ułatwia akwizycję obrazów w złych warunkach pogodowych [110]. Jak już wcześniej powiedziano, kamery podczerwone są głównie używane w scenariach nocnych, natomiast również mogą być używane w dzień. Kamera podczerwona przy oświetleniu dziennym rejestruje obraz monochromatyczny podobnej jakości do normalnej kamery rejestrującej światło widzialne, jak pokazano na Rys. 29, co jest jej dużym atutem [104], [105]. W nocy kamera rejestruje obraz z widocznymi krawędziami obiektów, co ułatwia przetwarzanie obrazu [104]. Temperatura otoczenia nie wpływa na jakość rejestrowanego obrazu, ponieważ kamera rejestruje światło odbite. Do podstawowych wad tych kamer należy zaliczyć podatność na olśnienie, rozkwitanie i smugi spowodowane światłem pochodzącym od innych pojazdów, latarni ulicznych czy sygnalizacji świetlnej. Mimo że światło podczerwone jest niewidoczne dla człowieka, to oświetlacze podczerwone mogą powodować zmęczenie oczu, a w skrajnych przypadkach nawet uszkodzenie [105].



Rys. 29. Porównanie obrazów zarejestrowanych w dzień przez kamerę kolorową po lewej i kamerę bliskiej podczerwieni po prawej [113].

Jednym z producentów, który korzystał z podczerwieni do wspomaganie jazdy w nocy jest Mercedes-Benz. Wykorzystał on aktywną kamerę podczerwieni w systemach Night View Assist oraz Night View Assist PLUS. System składa się z pojedynczej kamery podczerwonej zamontowanej za przednią szybą oraz dwóch źródeł światła podczerwonego umiejscowionych w każdym z przednich reflektorów [111]. Podobny system był stosowany w samochodach marki Lexus, gdzie system składał się z pojedynczej kamery podczerwonej oraz pojedynczego oświetlacza podczerwonego umieszczonego w przednim zderzaku [112].

Obecnie technologie bliskiej podczerwieni nie są już praktycznie stosowane w samochodach do percepcji otoczenia. Zostały zastąpione przez nowsze technologie takie jak obrazowanie termowizyjne i kamery światła widzialnego o wysokiej rozdzielczości z zaawansowanymi algorytmami przetwarzania obrazu. Technologie te oferują lepszą wydajność i cenę, a dodatkowo nie wymagają źródeł światła podczerwonego, które muszą być dodatkowo wkomponowane w nadwozie samochodu.

Kamery termowizyjne

Kamery termowizyjne są kamerami pasywnymi, które do swojego działania nie potrzebują zewnętrznego oświetlenia, gdyż mierzą energię promieniowania podczerwonego emitowanego przez każdy obiekt mający temperaturę powyżej zera bezwzględnego. Kamery termowizyjne w motoryzacji typowo rejestrują długość światła podczerwonego o długościach od 8000 do 14000 nm [108], a czasami nawet do 30000 nm [104]. Na obrazach zarejestrowanych przez kamerę termowizyjną można rozróżnić tylko obiekty o różnych temperaturach i z tego powodu niewidoczne jest poziome oznakowanie drogi, co utrudnia np. określenie liczby pasów czy nawet szerokość drogi, jak można zauważyć na Rys. 30 [104], [105].

Z drugiej strony kamery termowizyjne z łatwością wykrywają istoty żywe, dlatego są używane w systemach wczesnego wykrywania pieszych i zwierząt [114]. Szczególnie ich przydatność jest zauważalna w nocy, gdzie zasięg widoczności kierowcy jest ograniczony przez zasięg świateł reflektorów. Obecnie wielu producentów samochodów używa kamer termowizyjnych w systemach wspomagających jazdę w nocy, które potrafią wykryć człowieka nawet do 300 m [115]. Przykładowymi systemami wspomagającymi jazdę w nocy wykorzystującymi kamery termowizyjne są: Night Vision System w Cadillacu [116], Night View Assist Plus w Mercedesie [111], Night Vision w BWM [117] oraz Rolls Royce [115], Night Vision w Hondzie [118], Night Vision w DS [119] oraz Peugeot [120] czy Night Vision Assist w Audi [121] i Bentley [122].



Rys. 30. Porównanie obrazów zarejestrowanych w nocy przez kamerę bliskiej podczerwieni po lewej oraz przez kamerę termowizyjną po prawej [104].

3.3.3 Kamery 3D

Kamery 3D mają możliwość dodatkowo wyznaczenia odległości do obiektu. Dzięki temu samochód posiada informacje, w jakiej odległości jest od obiektu. Dodatkowo podczas przetwarzania obrazu łatwiej jest usunąć tło, pozostawiając pod analizę tylko elementy interesujące. Istnieją trzy główne technologie obrazowania 3D: stereowizja, światło strukturalne oraz czas przelotu (ToF). Każdy z tych typów korzysta z różnych metod wyznaczania odległości do obiektu, które zostaną omówione.

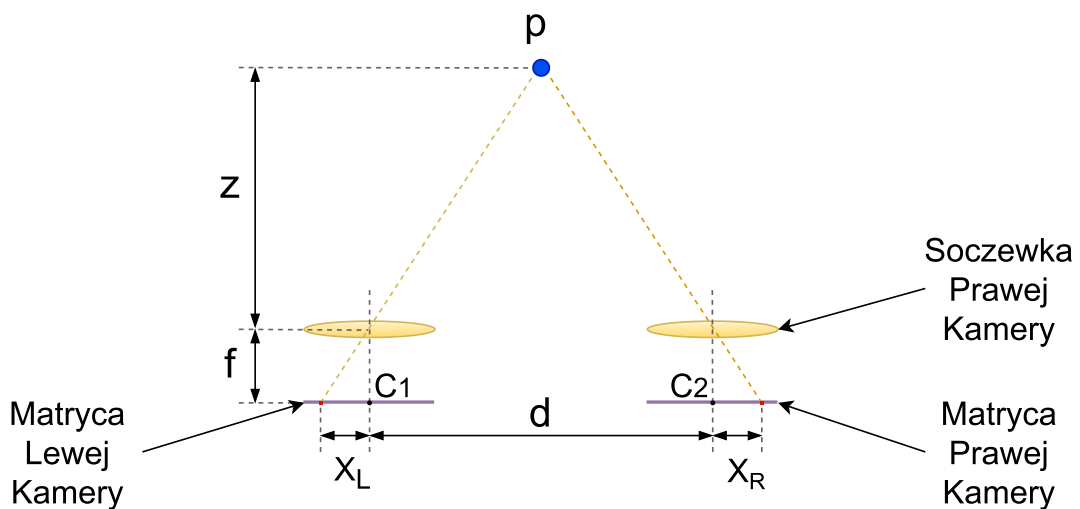
Kamery Stereowizyjne

Stereowizja używa dwóch lub więcej kamer [123] zlokalizowanych na wspólnej osi poziomej i rozsuniętych od siebie na pewną odległość [124], jak zaprezentowano na Rys. 31. Dzięki temu jest możliwe oszacowanie odległości od obiektu, podobnie jak to robi ludzki mózg we współpracy z oczami [110]. Wyznaczenie odległości polega na odnalezieniu odpowiadających sobie pikseli w obrazach zarejestrowanych przez kamery. Odpowiadające piksele są znajdowane na podstawie ich koloru oraz intensywności [124]. To powoduje problem wyznaczania odległości od elementów jednokolorowych np. od ściany jednolitego koloru. Z tego powodu stereowizja występuje również w formie aktywnej z dodatkowym oświetlaczem, który emituje podczerwone światło strukturalne, a kamera rejestruje dystorsje wzoru [125]. Dzięki wykorzystaniu światła podczerwonego stereowizja jest w pełni funkcjonalna również w nocy i przy słabym oświetleniu [126].



Rys. 31. Kamera stereo wchodząca w skład systemu Eyesight firmy Subaru [127].

Graficzna interpretacja obliczenia odległości dla jednego punktu jest pokazana na Rys. 32. Punkt c_1 jest środkiem matrycy lewej kamery, a c_2 środkiem matrycy prawej kamery. Odległość z można obliczyć korzystając ze wzoru (1) [128].



Rys. 32. Graficzna prezentacja zasady obliczania odległości w oparciu o stereowizję.

$$z = \frac{df}{x_L - x_R} \quad (17)$$

gdzie:

d – odległość pomiędzy środkami matrycy lewej i prawej kamery,

f – ogniskowa kamery,

x_L – odległość szukanego piksela od środka matrycy lewej kamery,

x_R – odległość szukanego piksela od środka matrycy prawej kamery.

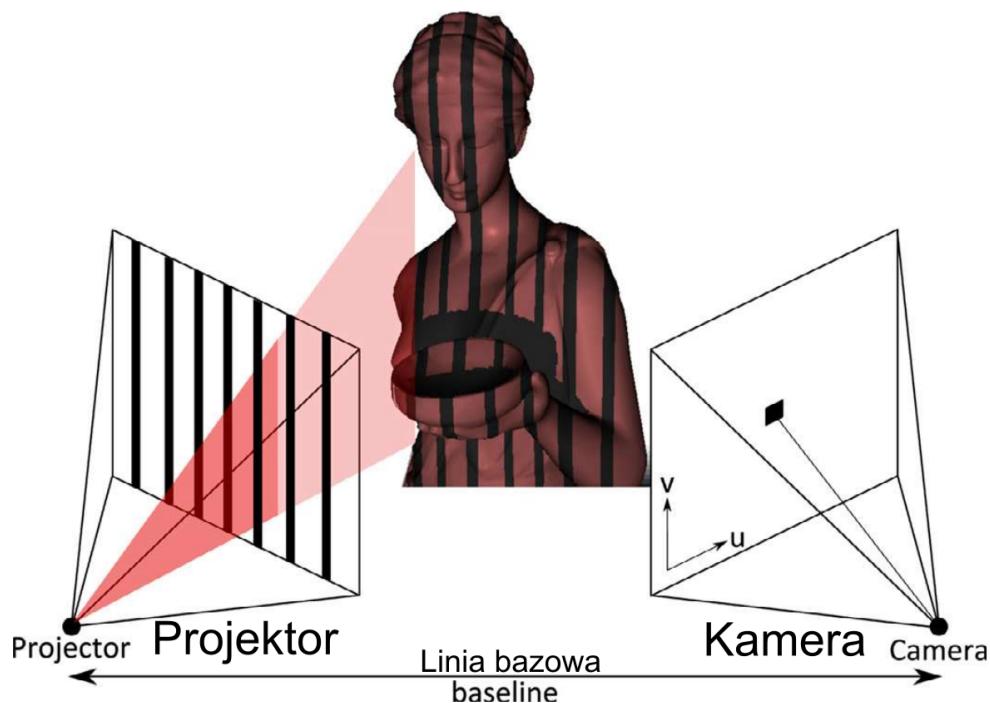
Błąd oszacowanej odległości rośnie proporcjonalnie do odległości od obiektu, czyli im obiekt znajduje się dalej, tym wyznaczona odległość jest mniej dokładna [129]. Dokładność można poprawić przede wszystkim poprzez użycie kamer o lepszej rozdzielczości, ale również poprzez jak najdalsze rozsuniecie kamer od siebie np. umieszczenie kamer w reflektorach samochodu czy

nawet lusterkach bocznych. Z tego samego zjawiska korzysta np. ryba młot, która ma oczy wyraźnie wychodzące poza obrys głowy. Obecnie większość kamer stereo używa niewielkich odległości od 8 cm do 35 cm [130], gdyż zbyt odległe rozmieszczenie może spowodować wypadnięcie kamer z osiowości z powodu drgań pochodzących od podłoża oraz zmiany geometrii zawieszenia. Z uwagi na to, że kamery muszą zachować wyrównanie z dokładnością do $0,01^\circ$ [131], obecnie rozsuniecie kamer na większą odległość w samochodach jest w fazie badań i rozwoju.

Z powodu wielu zalet opisanych powyżej oraz niskich cen stereowizja jest szeroko wykorzystywana przez różnych producentów samochodów takich jak: Subaru (EyeSight) [132], Suzuki (Dual Camera Brake Support) [133], Daihatsu (Smart Assist) [134] czy Mercedes (Drive Pilot) [18]. Jeśli chodzi o samochody Tesli, mimo że samochody mają trzy przednie kamery [24] oraz zgłoszone patenty uwzględniające stereowizję [135], nie można jednoznacznie określić, czy używają stereowizji, gdyż nie ma oficjalnego potwierdzenia tego faktu przez firmę Tesla. Dodatkowym problemem jest to, że każda z tych trzech kamer ma inne pole widzenia 35° , 50° i 120° [136], [137], co utrudnia, ale nie uniemożliwia zastosowanie techniki stereowizji [138], [139].

Kamery wykorzystujące światło ustrukturyzowane

Kolejną metodą do wyznaczania odległości jest wykorzystanie światła ustrukturyzowanego. Jest to kamera, która oprócz sensora światłoczułego posiada projektor odsunięty na pewną odległość. Projektor oświetla badany obiekt światłem specjalnego wzoru, który przyjmuje pewny kształt na oświetlanym obiekcie, jak pokazano na Rys. 33. Sensor znając oryginał wzoru, mierzy jego dyktorsje wyznaczając na tej podstawie odległość od obiektu. Jest wiele używanych wzorów np. paski [140] czy siatka punktów. Światło strukturalne, jak już wcześniej wspomniano, jest często używane w aktywnej stereowizji, aby rozwiązać problem wyznaczania odległości od jednokolorowych obiektów. Dodatkowo jest używane światło podczerwone, aby wyświetlany wzór nie był widoczny.



Rys. 33. Zasada działania kamery wykorzystującej światło strukturalne [140].

Znając parametry wewnętrzne kamery można obliczyć głębokość d piksela (x, y) za pomocą (18).

$$d = \frac{b \cdot f}{m(x, y)} \quad (18)$$

gdzie:

b – odległość między kamerą i projektorem,

f – ogniskowa,

$m(x, y)$ – wartość rozbieżności piksela (x, y) .

Ponieważ rozbieżność $m(x, y)$ jest zazwyczaj podawana w jednostkach pikselowych, ogniskowa f jest również przeliczana na jednostki pikselowe zgodnie z (19).

$$f = \frac{f_x^{metric}}{s_{px}} \quad (19)$$

gdzie:

f_x^{metric} – ogniskowa w jednostkach metrycznych,

s_{px} – rozmiar piksela.

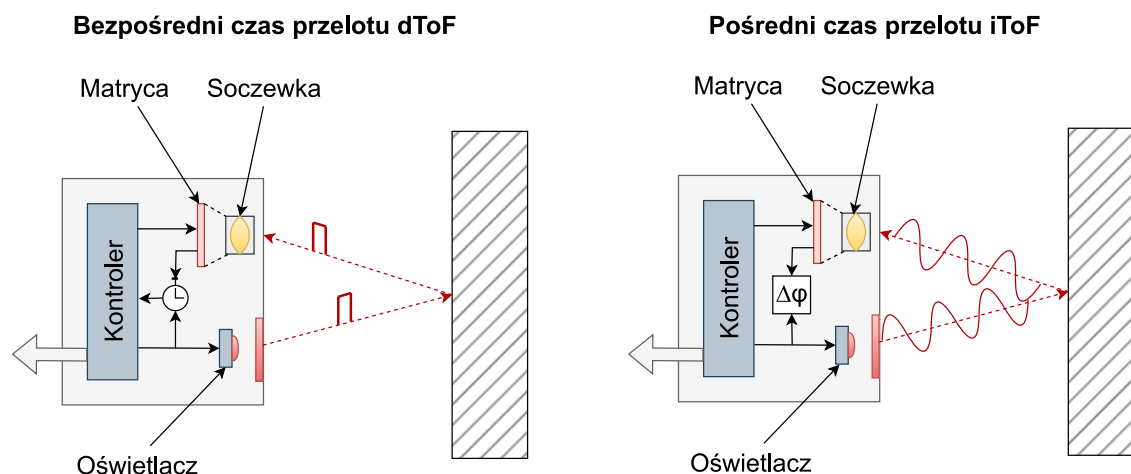
W większości przypadków kamera i projektor są rozsunięte tylko w poziomie, dlatego wartości rozbieżności są podawane jako odległości poziome. W tym przypadku s_{px} jest poziomą wielkością piksela. Zakres głębokości i jej dokładność jest zależna od odległości pomiędzy kamerą a projektorem tzn. im większa odległość tym zarówno zasięg, jak i dokładność jest większa [140].

Przykładem tego typu kamery jest pierwsza generacja Microsoft Kinect. Projektorem jest laser emitujący światło podczerwone o długości 850 nm, które następnie przechodzi przez siatkę dyfrakcyjną, zamieniając się w siatkę punktów. Jako że znana jest odległość pomiędzy projektorem a sensorem, która wynosi 7,5 cm oraz oryginalny wzór punktów, metodą triangulacji jest wyznaczana odległość [140]. Dopasowywanie zmierzonych punktów do oryginalnych jest wykonywane za pomocą znormalizowanej korelacji krzyżowej [141]. W motoryzacji tego typu kamery nie są wykorzystywane do obserwowania otoczenia samochodu, a głównie do monitorowania jego wnętrza.

Kamery czasu przelotu TOF (ang. Time of Flight)

Ostatnim typem kamer są kamery czasu przelotu ToF (ang. Time of Flight) zaliczające się do kamer aktywnych. Technika czasu przelotu jest stosowana nie tylko w kamerach, ale również w innego rodzaju czujnikach np. czujnikach ultradźwiękowych czy lidarach. W przypadku kamer ToF polega na oświetlaniu sceny modulowanym światłem i następnie rejestrowaniu światła odbitego. Źródłem światła może być fala ciągła CW (ang. Continuous Wave) lub impulsowa, jak pokazano na Rys. 34. Kamery ToF typowo wykorzystują falę ciągłą z modulowaną amplitudą AMCW (ang. Amplitude Modulation Continuous Wave) w paśmie blisko podczerwonym 850 nm, aby było one niewidoczne dla człowieka [140], [142].

Metodę czasu przelotu możemy podzielić na dwie grupy: bezpośredni czas przelotu dToF (ang. direct Time of Flight), który jest typowo wykorzystywany w lidarach i czujnikach ultradźwiękowych oraz pośredni czas przelotu iToF (ang. indirect Time of Flight), który jest wykorzystywany w kamerach ToF i radarach.



Rys. 34. Po lewej stronie uproszczona zasada działania bezpośredniego czasu przelotu, a po prawej pośredniego czasu przelotu. Rysunek przygotowany w oparciu o [143].

Bezpośredni czas przelotu oparty jest na metodzie impulsowej i polega na pomiarze czasu od wyemitowania impulsu do czasu jego powrotu. Dzięki temu korzystając ze wzoru (20), można wyznaczyć odległość d do obiektu. Bezpośredni czas przelotu, dzięki wysokiej mocy szczytowej lasera, umożliwia pomiar dużych odległości oraz jest bezpieczny dla oczu ze względu na niską średnią moc optyczną [144].

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (20)$$

gdzie:

c - prędkość światła w próżni,

t - czas przelotu.

Pośredni czas przelotu nie opiera się na pomiarze czasu, dlatego jest nazywany metodą pośrednią. W tej metodzie jest mierzone przesunięcie fazowe pomiędzy falą wysłaną a odebraną. To przesunięcie fazowe jest proporcjonalne do dystansu do obiektu oraz użytej częstotliwości światła zgodnie ze wzorem (21) [144]. W przeciwieństwie do dToF ta metoda wykorzystuje falę ciągłą, która może być modulowana na różne sposoby. Najczęściej wykorzystywanymi rodzajami modulacji jest modulacja amplitudowa AM (ang. Amplitude Modulation) wykorzystywana w kamerach ToF oraz częstotliwościowa FM (ang. Frequency Modulation) wykorzystywana w radarach. W metodzie amplitudowej jest wysyłana sinusoidalna fala ciągła o zmiennej amplitudzie i stałej częstotliwości, natomiast w metodzie częstotliwościowej jest wysyłana fala o zmiennej częstotliwości, ale stałej amplitudzie.

Fala ciągła z modulowaną amplitudą jest odpowiednia do pomiarów na krótkich dystansach w zakresie kilkudziesięciu metrów. W przypadku dużych odległości obliczony wynik byłby niejednoznaczny ze względu na okresowość sygnału emitera. Ze względu na ograniczenia sprzętowe najczęściej jest wykorzystywana fala niesinusoidalna, która najczęściej jest falą prostokątną [145].

$$d = \frac{c \cdot \varphi}{4 \cdot \pi \cdot f} \quad (21)$$

gdzie:

c – prędkość światła w próżni,

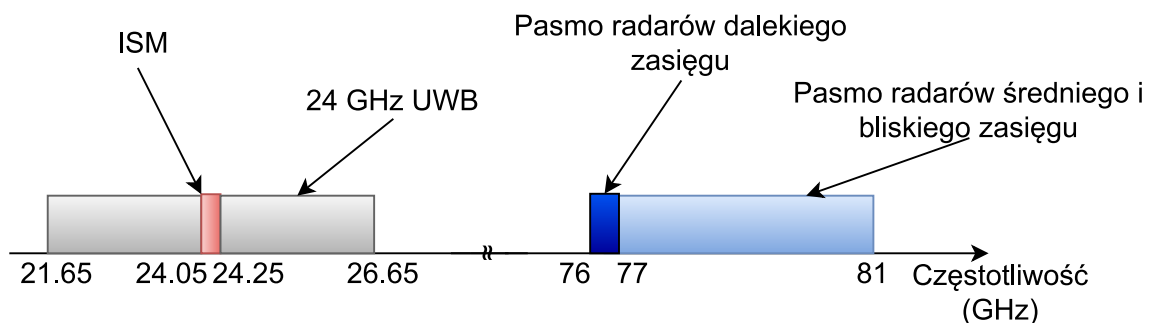
φ – przesunięcie fazowe,

f – częstotliwość.

Wyższa częstotliwość polepsza rozdzielczość pomiaru, dlatego buduje się przetworniki o jak największej możliwej częstotliwości. W jeden z najlepszych przetworników o częstotliwości 120 MHz jest wyposażona druga generacja Microsoft Kinect [146]. Jedną z największych zalet techniki czasu przelotu jest dobra dokładność poniżej 1 cm, a używając techniki Cascaded Time of Flight nawet rzędu mikrometrów [146]. Dodatkowo jest odporna na zewnętrzne oświetlenie oraz jest w stanie wykonywać pomiar nawet przez mgłę, gdyż używa światła podczerwonego. Największą wadą jest ograniczony zasięg, dlatego kamery ToF głównie są używane do monitorowania wnętrza samochodu np. wykrywania osób w samochodzie, monitorowania ich stanu i zachowania. Przykładami zastosowań są wykrywanie zmęczenia kierowcy, zajętości fotelika dziecięcego w celu kontrolowania poduszki powietrznej, rozpoznawania gestów do obsługi szyberdachu czy radia, wykrywanie przedmiotów zostawionych w samochodzie np. telefonu czy rozpoznawania twarzy w celu identyfikacji zaufanego kierowcy [147].

3.4 Radar

Radar to nazwa utworzona od angielskiego akronimu RADAR (ang. Radio Detection and Ranging). Radar to urządzenie, które służy do wykrywania obiektów, określania ich pozycji oraz prędkości. Do tego celu używa fal elektromagnetycznych w paśmie mikrofalowym. Obecnie wszystkie radary samochodowe działają w paśmie częstotliwości od 76 do 81 GHz, ale wykorzystują różne szerokości pasma, jak pokazano na Rys. 35. Do 1 Stycznia 2022 roku radary bliskiego zasięgu wykorzystywały pasmo 24 GHz UWB (ang. Ultra-Wide Band), ale zostało ono wycofane z użycia [148]–[150]. W paśmie 24 GHz zostało jedynie wąskie pasmo nazywane (ISM), natomiast jest ono niewystarczające dla nowych implementacji radarów.



Rys. 35. Pasma częstotliwości wykorzystywane przez radary.

Istnieją dwa rodzaje radarów ze względu na sposób transmisji fali: radary impulsowe oraz radary ciągłe. Radary ciągłe wysyłają falę ciągłą bez żadnych przerw w transmisji, natomiast w radarach impulsowych fala jest przerywana w momencie nasłuchu fali odbitej. Radar impulsowy wykorzystuje pomiar czasu potrzebnego na przebycie przez sygnał drogi nadajnik-cel-odbiornik do wyznaczenia odległości pomiędzy anteną a celem. Nadajnik wysyła fale w postaci paczek krótkich impulsów, dzięki czemu fala nadawana nie nakłada się fale odbite. Również korzystając z efektu Dopplera, jest w stanie określić prędkość wykrytych obiektów. Radary impulsowe są coraz mniej wykorzystywane ze względu na wynalezienie technologii fali ciągłej oraz wyłączenie z użytku częstotliwości 24 GHz [151].

3.4.1 Typy radarów

Radary fali ciągłej występują w dwóch rodzajach: z niemodulowaną oraz modulowaną falą ciągłą.

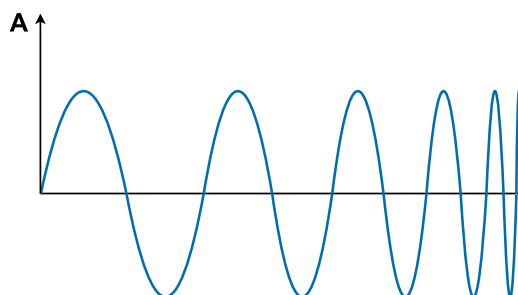
Radary z niemodulowaną falą ciągłą

Radary z niemodulowaną falą wykorzystują falę o stałej częstotliwości. Są w stanie wykrywać jedynie ruchome obiekty oraz określać ich prędkość, ale nie są w stanie określić ich pozycji [152]. Tylko ruchome cele są wykrywane, ponieważ częstotliwość fali odbitej jest inna niż fali nadanej (efekt Dopplera). Stacjonarne cele lub wolno poruszające się są niewykrywalne, gdyż ze względu na jednakową częstotliwość fala odbita jest maskowana przez falę nadawczą.

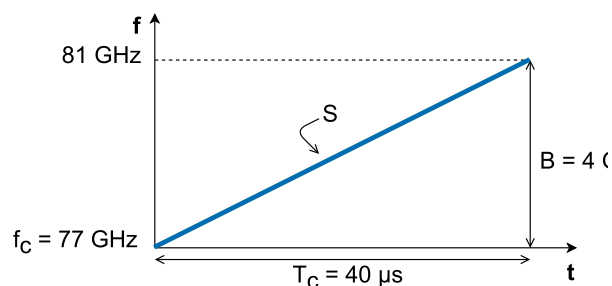
Radary z częstotliwościowo modulowaną falą ciągłą (FMCW)

Radary z częstotliwościowo modulowaną falą FMCW (ang. Frequency Modulation Continuous Wave) wykorzystują falę o zmiennej częstotliwości. Dzięki temu są w stanie wykrywać obiekty zarówno ruchome, jak i stacjonarne, określać ich prędkość oraz odległość [153].

W tym typie radaru jest stała częstotliwość bazowa, która jest powtarzalnie zmieniana według pewnego schematu przez sygnał modulujący (chirp), jak pokazano na Rys. 36 i Rys. 37. Najczęściej używanymi są liniowe modulacje częstotliwości LFM (ang. Linear Frequency Modulation) [154], a szczególnie modulacja trójkątna oraz piłokształtna [155]. Standardowy okres modulacji w motoryzacji wynosi od 1 do 10 ms, niemniej w celu poprawienia rozdzielczości radaru stosuje się okres nawet 100 μ s i mniejsze [156].

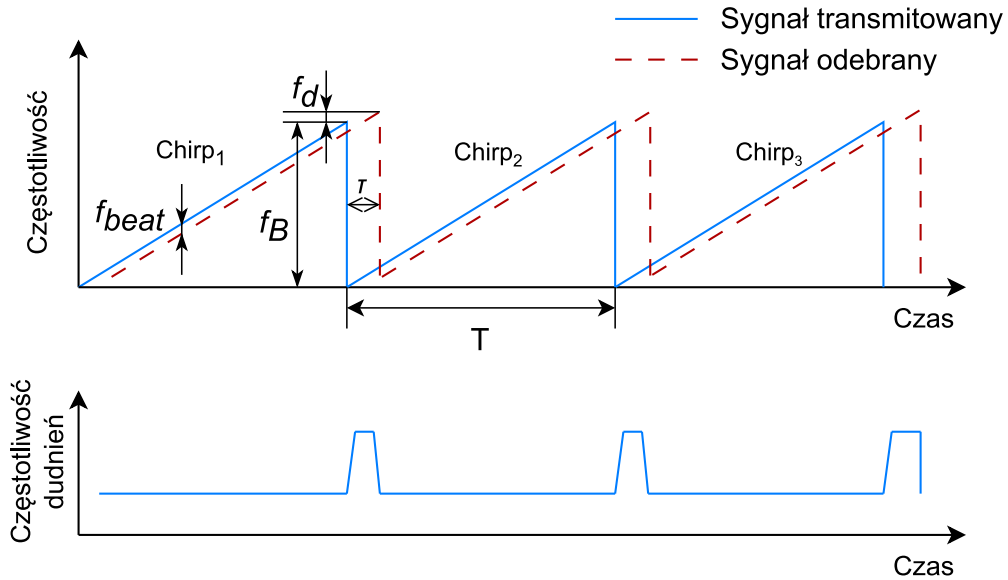


Rys. 36. Sygnał chirp ze zmieniającą się częstotliwością. Rysunek przygotowany w oparciu o [157].



Rys. 37. Chirp pokazany jako częstotliwość w funkcji czasu, gdzie f_c – częstotliwość bazowa, B – szerokość pasma, T_c – okres modulacji, S – zmiana – szybkość zmiany częstotliwości. Rysunek przygotowany w oparciu o [157].

Jako że radar transmituje falę ciągle, fala odbita nakłada się na falę transmitowaną, wytwarzając dudnienie, co można zobaczyć na Rys. 38. Na podstawie tego dudnienia po demodulacji określana jest odległość od obiektu.



Rys. 38. Na górze przesunięte przebiegi sygnału transmitowanego i odebranego, na dole częstotliwość dudnień. Rysunek przygotowany w oparciu o [154].

Maksymalny zasięg radaru R_{max} jest określony wzorem (22) [158].

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G_{tx} \cdot G_{rx} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{rmin} \cdot (4\pi)^3}} \quad (22)$$

gdzie:

P_{rmin} – minimalna moc sygnału odebranego (czułość odbiornika),

P_t – moc sygnału nadawanego,

G_{tx} – wzmacnienie anteny nadawczej,

G_{rx} – wzmacnienie anteny odbiorczej,

λ – długość fali emitowanej przez radar,

σ – skuteczna powierzchnia odbicia (ang. radar cross section).

Rozdzielczość zasięgu radaru definiuje zdolność rozróżniania różnych celów umieszczonych w tym samym kierunku kątowym, ale w różnych odległościach od radaru. Rozdzielczość d_{res} jest zależna od szerokości pasma zgodnie ze wzorem (23) [159].

$$d_{res} = \frac{c}{2 \cdot B} \quad (23)$$

gdzie:

c – prędkość światła w próżni,

B – szerokość pasma (ang. bandwidth).

Duża rozdzielczość jest wymagana np. w radarach bliskiego zasięgu, dlatego wykorzystują one najczęściej maksymalne dostępne pasmo 4 GHz. Natomiast radary dalekiego zasięgu wykorzystują węższe pasmo od 250 MHz do 1 GHz [151]. Jest to spowodowane tym, że maksymalny zasięg radaru R_{max} jest odwrotnie proporcjonalny do szerokości pasma B [160] zgodnie ze wzorem (24).

$$R_{max} = \frac{F_s \cdot c}{2 \cdot B} \quad (24)$$

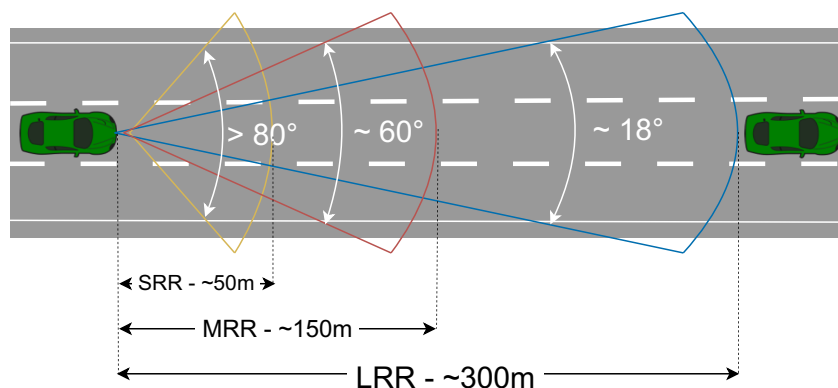
gdzie:

F_s – częstotliwość próbkowania,

c – prędkość światła w próżni,

B – szerokość pasma (ang. bandwidth).

Ze względu na zakres pomiarowy rozróżniamy najczęściej trzy grupy radarów: radary bliskiego, średniego i dalekiego zasięgu. Różnią się one zakresem pomiarowym oraz polem widzenia, jak pokazano na Rys. 39. W oparciu o te czujniki działa wiele systemów takich jak aktywny tempomat czy monitorowanie martwego pola, natomiast do działania danego systemu można często użyć zamiennie dwóch typów radarów np. bliskiego lub średniego zasięgu, lub wykorzystać fuzję czujników.



Rys. 39. Typowy zasięg i pole widzenia poszczególnych typów radarów.

Równocześnie, aby zapewnić zasięg 360° wokół samochodu, umieszcza się w różnych miejscach samochodu wiele różnego typu radarów. Z tego powodu wyróżniamy radary przednie, boczne, tylne i narożne. Czujniki radarowe można łatwo zamontować za typowymi elementami samochodu, takimi jak zderzaki czy emblematy firmowe, dzięki czemu są niewidoczne i nie wpływają na estetykę pojazdu. Ta integracja staje się łatwiejsza przy wyższych częstotliwościach pracy radaru, ponieważ rozmiar anten, który określa rozmiar modułu, jest liniowo proporcjonalny do długości fali, a więc odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości roboczej.

Radary bliskiego zasięgu

Radary bliskiego zasięgu SRR (ang. Short Range Radar) są wykorzystywane do wykrywania obiektów w bezpośrednim, bliskim otoczeniu samochodu. Wymagają sterowalnej anteny o dużym kącie skanowania, tworząc szerokie, ale bliskie pole widzenia. Na podstawie jego odczytów działają takie systemy jak: wspomaganie parkowania (PA), wykrywanie martwego pola (ang. Blind Spot Monitoring), asystent zmiany pasa ruchu LCA (ang. Lane Change Assist) oraz automatyczne hamowanie awaryjne AEB (ang. Automatic Emergency Braking) przy niskiej prędkości [161], [162]. Do 2021 roku radary bliskiego zasięgu głównie wykorzystywały częstotliwość 24 GHz [163], natomiast najnowsze konstrukcje korzystają z częstotliwości w paśmie 76-81 GHz [164].

Radary średniego zasięgu

Radary średniego zasięgu MRR (ang. Medium Range Radar) są używane do wykrywania obiektów w średniej odległości. Mogą używać pasma przeznaczonego dla radarów bliskiego zasięgu (77 do 81 GHz) albo pasma dla radarów dalekiego zasięgu (76-77 GHz) [165]. W oparciu o radar średniego zasięgu mogą działać systemy wymagające większego zasięgu np. tempomat adaptacyjny niskich prędkości [166].

Radary dalekiego zasięgu

Radary dalekiego zasięgu LRR (ang. Long Range Radar) służą do wykrywania obiektów w dalekiej odległości nawet do 300 m [167] i charakteryzują się węższym polem widzenia, mogącym wynosić tylko 18° [168]. Wykorzystują wąskie pasmo 76-77 GHz. W oparciu o niego działają takie systemy jak: unikanie kolizji CA (ang. Collision Avoidance), adaptacyjny tempomat wysokich prędkości, ostrzeganie przed kolizją FCW (ang. Forward Collision Warning) czy asystent awaryjnego hamowania EBA (ang. Emergency Braking Assist).

3.4.2 Wykrywanie wielu obiektów i formowanie wiązki

Pomiar kąta

Używając pojedynczej anteny nadawczej, możliwe jest tylko określenie prędkości oraz odległości, natomiast nie jest możliwe określenie kąta do obiektu. Brak określenia kąta w poziomie powoduje, że samochód posiada informacji, czy obiekt znajduje się na jego pasie, czy na pasie sąsiednim. To prowadzioby w przypadku aktywnego tempomatu do wyhamowywania samochodu, mimo że pas przed samochodem byłby wolny. Natomiast brak określenia kąta w pionie powodowałoby brak rozróżnienia, czy obiekt jest na pasie czy powyżej pasa. To prowadzioby do zatrzymywania się samochodu w momencie zbliżania się do wiaduktu.

W celu wykrywania kąta należy dodać drugą antenę odbiorczą, jak pokazano na Rys. 40. Jako że anteny są od siebie odsunięte, to ta sama fala dociera do anten w różnym czasie i dzięki temu monitorując fazę φ tej fali, jest możliwe określenie kąta θ do obiektu [157] zgodnie ze wzorem (25).

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda \varphi}{2\pi l} \right) \quad (25)$$

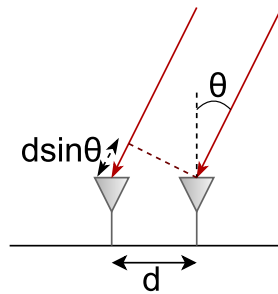
gdzie:

λ – długość fali radaru,

φ – przesunięcie fazowe,

l – odległość pomiędzy antenami.

Anteny muszą być oddalone, co najmniej o długość połowy fali radaru $\lambda/2$ ze względu na kryterium Nyquista o próbkowaniu [169]. Przykładowo dla radaru o częstotliwości 79 GHz długość fali wynosi 3,8 mm, z tego powodu anteny muszą być oddalone o 1,9 mm. Jak widać wymagana odległość jest bardzo mała, dzięki temu w jednym układzie można użyć wielu anten. Im większa liczba anten odbiorczych tym radar ma lepszą rozdzielczość, co oznacza, że jest w stanie rozróżniać obiekty położone blisko siebie.

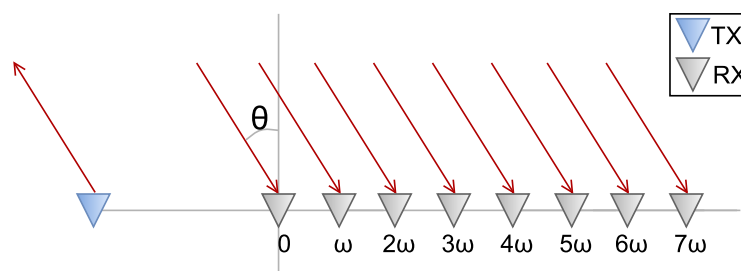


Rys. 40. Dwie anteny odbiorcze i graficzna reprezentacja określania kąta do obiektu. Rysunek przygotowany w oparciu o [160].

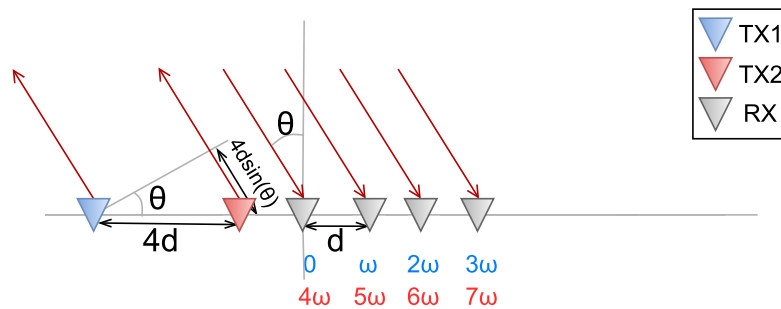
MIMO (Multi Input Multi Output) Radar

W klasycznym układzie SIMO (ang. Single Input Multiple Output) jest pojedyncza antena nadawcza oraz wiele anten odbiorczych. W układzie MIMO (ang. Multiple Input Multiple Output) dodając dodatkowe anteny nadawcze, uzyskuje się wielokrotnie większą rozdzielczość kątową radaru, niż można by było to uzyskać, dodając taką samą liczbę anten odbiorczych do układu SIMO. Jeśli zaś aktualna rozdzielczość kątowa jest wystarczająca, to dzięki MIMO można zachować rozdzielczość radaru przy mniejszej sumarycznej ilości anten [170].

Założmy, że używamy układu SIMO składającego się sumarycznie z dziewięciu anten – jednej anteny nadawczej i ośmiu anten odbiorczych, jak pokazano na Rys. 41. W układzie MIMO taką samą rozdzielczość radaru uzyskuje się za pomocą tylko sześciu anten – dwóch anten nadawczych i czterech odbiorczych, jak pokazano na Rys. 42.



Rys. 41. Anteny w układzie SIMO.



Rys. 42. Anteny w układzie MIMO.

Z tego wynika równanie (26), które musi być spełnione, aby rozdzielczość radaru była zachowana [171].

$$M_{TX} \cdot M_{RX} = S_{TX} \cdot S_{RX} \quad (26)$$

gdzie:

M_{TX} – liczba anten nadawczych w MIMO,

M_{RX} – liczba anten odbiorczych w MIMO,

S_{TX} – liczba anten nadawczych w SIMO,

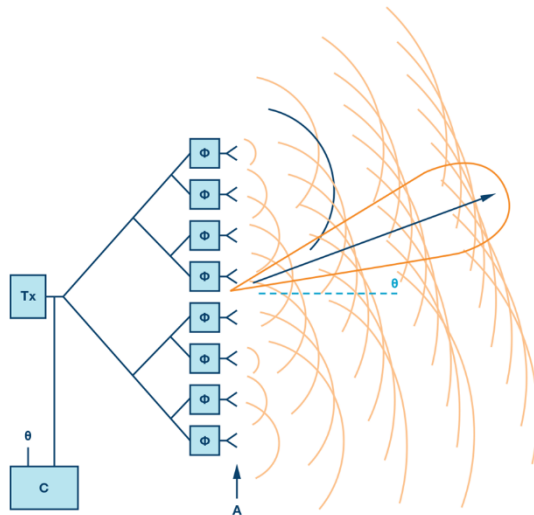
S_{RX} – liczba anten odbiorczych w SIMO.

Formowanie wiązki

Formowanie wiązki radaru polega na kształtowaniu jej geometrii tak, aby radar był w stanie skutecznie realizować swoje funkcje. Funkcje te mogą się różnić w zależności czy jest to radar bliskiego, średniego czy dalekiego zasięgu. W uproszczeniu polega to na wzmacnianiu wiązki w kierunku, który jest interesujący przy jednoczesnym osłabianiu wiązki w pozostałych kierunkach. Na przykład w radarze dalekiego zasięgu wiązka powinna być skupiona i zdolna do wykrywania jak najdalszych obiektów przed samochodem. Na początku stosowano głównie anteny sterowane mechanicznie, a obecnie stosuje się matryce anten z elektronicznym formowaniem wiązki lub cyfrowym sterowaniem wiązki [151].

Wiązka może być formowana statycznie lub dynamicznie. W metodzie statycznej wzór wiązki (ang. array pattern) ma stały, niezmienny kształt będący iloczynem współczynnika elementu (ang. element factor) oraz matrycy (ang. array factor) [159]. Współczynnik elementu jest wzorem wiązki pojedynczej anteny, natomiast współczynnik matrycy jest zależny m.in. od liczby i odległości pomiędzy antenami oraz ich geometrycznym rozmieszczeniem [172].

Wiązka formowana dynamicznie ma zmienny kształt, który może być zmieniany w czasie rzeczywistym zgodnie z zapotrzebowaniem, tym samym zmieniając kierunek wiązki, jak pokazano na Rys. 43. Realizuje się to poprzez użycie wcześniej stworzonej wiązki statycznej a następnie odpowiednie sterowanie antenami. Sterowanie antenami polega na kontrolowaniu fazy oraz wzmacnieniu sygnałów wysyłanych przez kolejne anteny nadawcze [173]. Jedną z adaptacyjnych metod formowania wiązki za pomocą matryc fazowych, która na bieżąco oblicza wzmacnienia oraz przesunięcia fazowe dla anten jest metoda MVDR (ang. Minimum Variance Distortionless - Response) [174].



Rys. 43. Wizualizacja zmiany kierunku wiązki za pomocą sterowania fazami anten [175].

3.4.3 Skuteczna powierzchnia odbicia

Bardzo ważnym zagadnieniem związanym z radarami jest skuteczna powierzchnia odbicia RCS (ang. Radar Cross Section). Jest to parametr, który określa zdolność obiektu do odbijania fal radarowych. Jest on zależny m.in. od wielkości oraz kształtu obiektu, materiału, z jakiego jest wykonany lub jakim został pokryty oraz długości fali radaru [153], [169]. Im ten parametr jest większy, tym lepiej obiekt odbija fale, dzięki czemu radar jest w stanie łatwiej go wykryć. Przykłady RCS dla częstotliwości fal 77-81 GHz zaprezentowano w Tab. 2 [176].

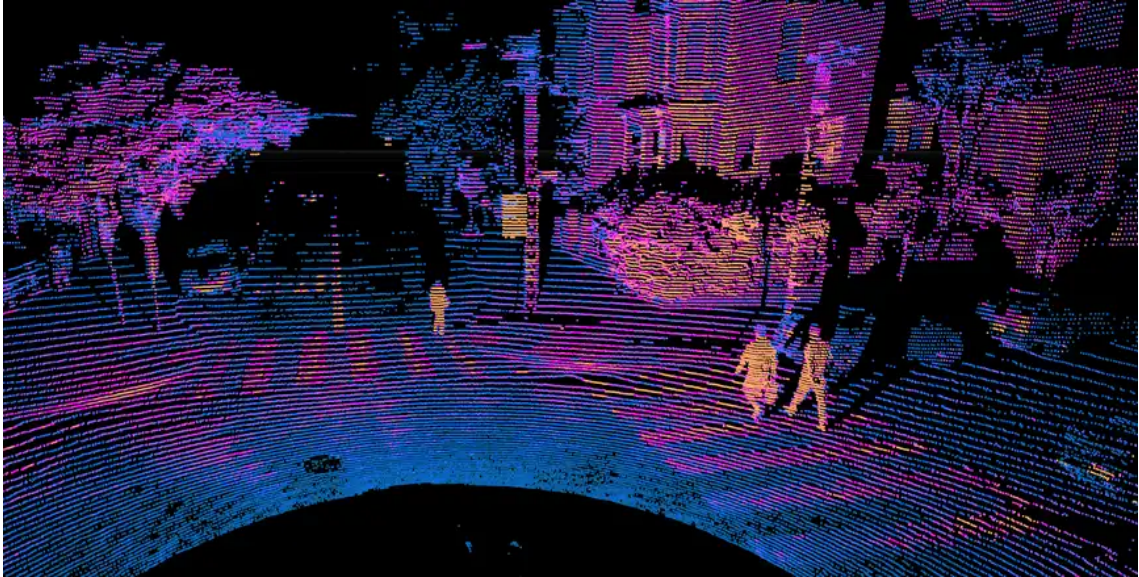
Tab. 2. Przykładowe wartości RCS różnych obiektów dla radaru 77-81 GHz.

Obiekt	dBsqm	m ²
Dziecko	-13	0,05
Pieszy	-10	0,1
Rower	-5	0,4
Motocykl	0	1
Samochód	10	10

3.5 Lidar

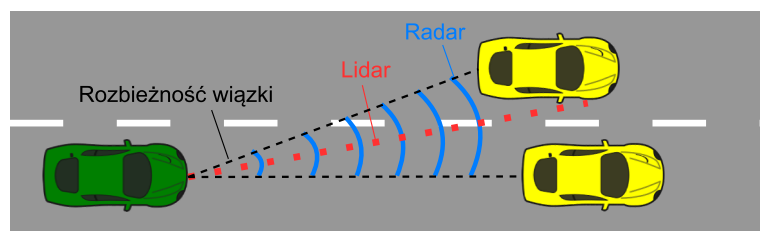
Lidar jest to nazwa utworzona od angielskiego akronimu LIDAR (ang. Light Detection and Ranging). Lidar tworzy precyzyjną oraz trójwymiarową reprezentację otaczającego świata za pomocą chmury punktów, jak pokazano na Rys. 44. Lidar wypełnia lukę pomiędzy radarem a kamerą do obrazowania otoczenia. W porównaniu z radarem zapewnia obrazy o wyższej rozdzielczości kątowej dzięki mniejszej rozbieżności wiązki [177], jak pokazano na Rys. 45. Wyższa rozdzielczość kątowa pozwala na rozróżnianie obiektów na dalekich dystansach, co jest szczególnie ważne przy dużych prędkościach samochodu. Technologia lidarowa do tej pory nie była stosowana w motoryzacji w masowej produkcji ze względu na jej wysoki koszt, natomiast obecnie jest coraz tańsza i dlatego producenci samochodów coraz częściej decydują się na jej wykorzystanie. Obecnie produkowanymi samochodami wyposażonymi w lidary są Audi A8 [178], [179], Honda Legend oraz

Mercedes-Benz Klasy S [14]. Innymi przykładami nadchodzących samochodów, które będą wyposażone w lidar są: Mercedes EQS [180], Volvo EX90 [181], Polestar 3 [182], Kia EV9 [183], Genesis G90 [180], Lotus Eletre [184] czy Lucid Air [185].



Rys. 44. Przykładowy obraz rejestrowany przez lidar [186].

Znacząca większość lidarów działa impulsowo i wykorzystuje zasadę bezpośredniego czasu przelotu (dTOF), którą omówiono w rozdziale o kamerach. Istnieją również lidary o fali ciągłej, które podobnie jak radary wykorzystują modulację częstotliwościową FMCW, natomiast te lidary są o wiele mniej popularne. Najmniejszą zaś grupą są lidary działające impulsowo, ale wykorzystujące modulowane światło, gdzie pomiar odległości jest wyznaczany za pomocą pomiaru przesunięcia fazy [187].



Rys. 45. Uproszczona wizualizacja rozbieżności wiązki lidar oraz radaru.

W największym uproszczeniu lidar celuje w konkretny punkt, następnie wysyła krótki impuls lasera i czeka na jego powrót. W momencie emisji aktywuje wewnętrzny zegar w obwodzie czasowym, a podczas odbioru ten zegar zatrzymuje. Zmierzony czas t umożliwia obliczenie odległości R do obiektu, korzystając ze wzoru (27). Następnie cała procedura się powtarza, ale z tym wyjątkiem, że celem jest kolejny punkt. Rozróżniamy lidary 2D skanujące tylko w jednej płaszczyźnie (najczęściej poziomej) oraz lidary 3D, które skanują w wielu płaszczyznach poziomych, czyli tym samym w pionie.

$$R = \frac{1}{2n} ct \quad (27)$$

gdzie:

c - prędkość światła w próżni,

n - współczynnik załamania ośrodka propagacji (dla powietrza około 1),

t – czas przelotu.

Częstotliwość wysyłania impulsów przez lidar jest z góry określona przez producenta. Ta częstotliwość definiuje maksymalny zakres pomiarowy lidar. Im większa odległość tym trzeba dłużej czekać na powrót odbitego sygnału, więc w tym czasie lidar nie może generować impulsów. Maksymalny zasięg R_{MAX} lidar jest odwrotnie proporcjonalny do użytej częstotliwości zgodnie ze wzorem (28).

$$R_{MAX} = \frac{c}{2f} \quad (28)$$

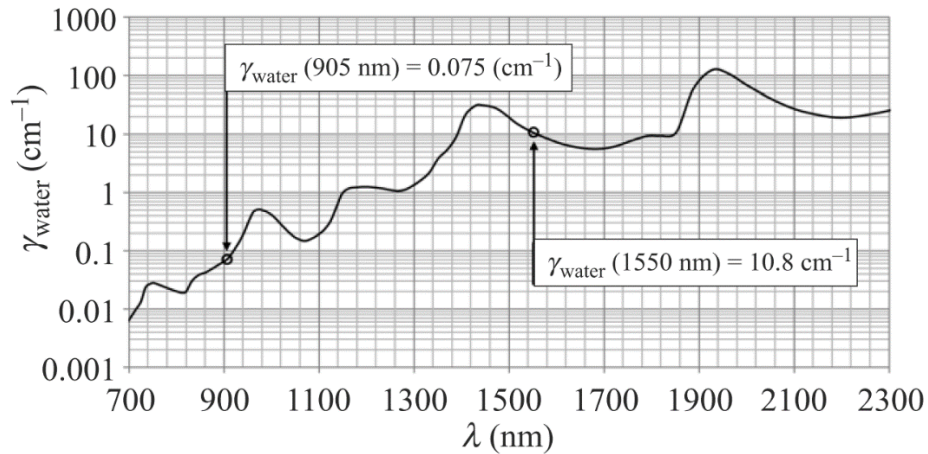
gdzie:

f - częstotliwość wysyłania impulsów / częstotliwość próbkowania,

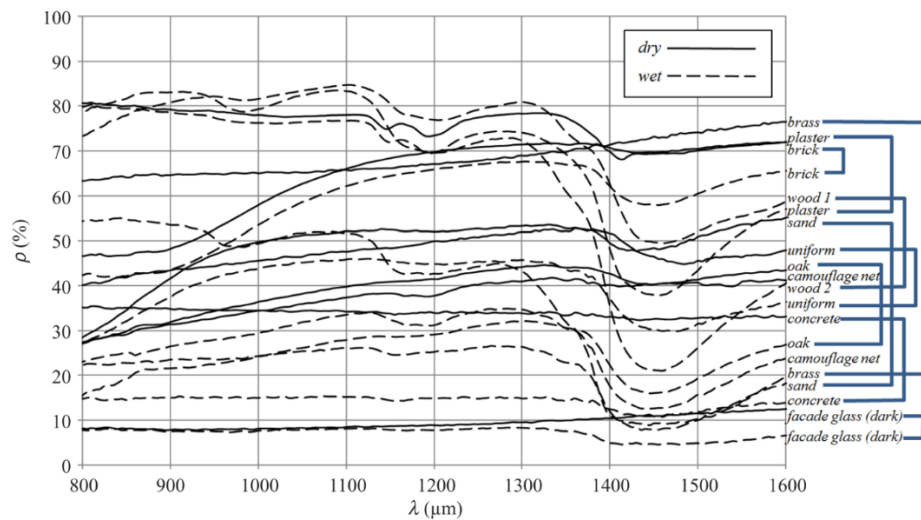
c - prędkość światła w próżni.

Lidar w zależności od zastosowania używa fal podczerwonych, widzialnych lub ultrafioletowych. Jest to spowodowane faktem, że w zależności od wykorzystanej długości fali światło ma różne właściwości. Na przykład do obrazowania dna płytkich zbiorników wodnych używa się światła zielonego o długości 532 nm, gdyż ono łatwiej przenika przez wodę [188].

W motoryzacji używa się głównie światła podczerwonego. Dwie najpopularniejsze długości używanych fal to 905 nm i 1550 nm [189]. Fala 905 nm ma o wiele lepsze właściwości penetracji atmosfery, gdyż o wiele słabiej jest absorbowana przez wodę, jak pokazano na Rys. 46. Dzięki temu jest bardziej odporna na mgłę oraz deszcz, ale równocześnie jest mniej bezpieczna dla ludzkich oczu, gdyż z łatwością przenika do siatkówki oka [190]. Dodatkowo długość 905 nm charakteryzuje się stabilną refleksyjnością, mało zależną od warunków pogodowych tzn. światło jest podobnie odbijane od suchych, jak i mokrych obiektów, jak pokazano na Rys. 47. Ponadto w tej technologii mogą być wykorzystywane fotodetektory krzemowe, które są znacznie tańsze niż fotodetektory InGaAs dla fali 1550 nm [190]. Pomimo tych wszystkich zalet, częściej jest wykorzystywana fala 1550 nm, gdyż zapewnia wyższe bezpieczeństwo ludzkiego wzroku oraz jest bardziej odporna na promieniowanie tła, czyli promieniowanie słoneczne [177], [191]. Dzięki temu można stosować lasery o większej energii promieniowania, co pozwala na skuteczniejsze wykrywanie obiektów [190].



Rys. 46. Wykres pokazujący absorpcję wody przez fale podczerwone [192]. Fala 905 nm jest 100 razy bardziej odporna na wodę niż 1550 nm.



Rys. 47. Wykres pokazujący refleksyjność dla różnych materiałów w zależności od długości światła podczerwonego [192]. Fala 905 nm pomimo że w niektórych przypadkach jest gorsza od 1550 nm to charakteryzuje się stabilną refleksyjnością mało zależną od wilgotności.

Skuteczność lidar zależy również od tego, jak obiekty dobrze odbijają światło w kierunku odbiornika. To jest zależne od kształtu obiektu oraz jego refleksyjności. Refleksyjność zależy od materiału, z którego obiekt został wykonany oraz od chropowatości jego powierzchni. Można rozróżnić dwa typy odbić: odbicie Lambertowskie polegające na jednakowym rozproszeniu światła we wszystkich kierunkach oraz odbicie lustrzane, które polega na odbiciu wiązki światła tylko w jednym kierunku zgodnie z zasadami optyki [193]. Niestety większość obiektów nie wykazuje ani czystego odbicia Lambertowskiego, ani czystego odbicia lustrzanego, a jest mieszaniną tych odbić w różnych proporcjach [194]. Przykładowo, jeśli wiązka pada na lustro pod pewnym kątem, to bardzo mało fotonów wróci do odbiornika i wtedy lustro może zostać niewykryte przez lidar. Jeśli zaś wiązka pada na lustro pod kątem prostym, to wiązka wróci prawie w całości do odbiornika i zostanie z łatwością wykryta.

Oprócz tego parametru również dystans do obiektu gra zasadniczą rolę, gdyż im większy dystans do obiektu, tym mniej fotonów wraca do odbiornika. Jest to spowodowane głównie rozpraszaniem i absorpcją fotonów przez cząstki w powietrzu [189], [195]. Jest to bardzo ważne, ponieważ gdy do detektora wróci niewystarczająca liczba fotonów, to taka wiązka w ogóle nie zostanie zarejestrowana. Zależność otrzymanej mocy wiązki P w zależności od dystansu R jest wyrażona wzorem (29) [192].

$$P(R) = P_0 \rho \frac{A_0}{\pi R^2} \eta_0 \exp(-2\gamma R) \quad (29)$$

gdzie:

R - odległość do obiektu,

P_0 - szczytowa moc optyczna emitowanego impulsu laserowego,

ρ - współczynnik odbicia / refleksyjność obiektu,

A_0 - pole powierzchni apertury odbiornika,

η_0 - transmisja widmowa optyki detekcyjnej,

γ - współczynnik ekstynkcji atmosferycznej (zmiana energii promieniowania przechodzącej przez atmosferę).

Kolejnym czynnikiem determinującym skuteczność wykrywania jest długość impulsu, który jest bezpośrednio związany z budżetem fotonów. Im dłuższy czas trwania impulsu, tym więcej fotonów wyjdzie z nadajnika i tym więcej fotonów po odbiciu wróci do odbiornika. Zbyt krótki impuls może powodować, że liczba fotonów wracających do fotodetektora może być niewystarczająca do wykrycia obiektu.

3.5.1 Budowa lidarów

Istnieją dwa zasadnicze typy lidarów. Pierwszym jest lidar mechaniczny zawierający w sobie ruchome elementy skanujące. Z tego powodu jest on dość drogi oraz teoretycznie bardziej zawodny. Ponadto jest większych rozmiarów, co utrudnia wmontowanie w karoserię samochodu tak, żeby był niewidoczny.

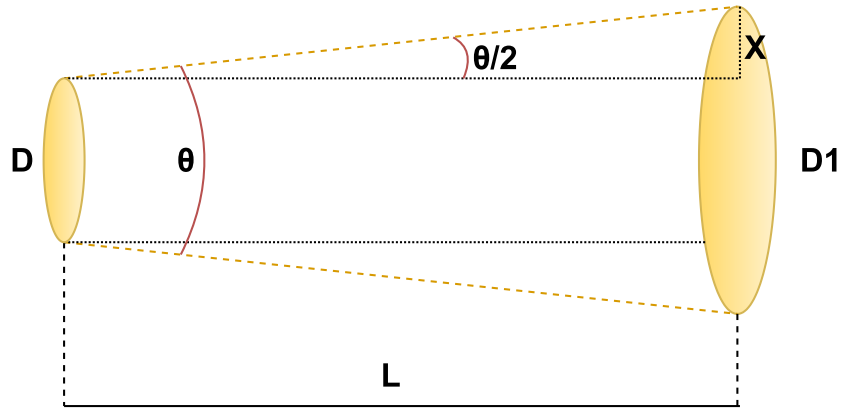
Drugim rodzajem lidarów jest lidar półprzewodnikowy, który nie ma żadnych ruchomych elementów i składa się tylko z podzespołów elektronicznych. Dzięki temu jest on tańszy w budowie, bardziej niezawodny oraz łatwiejszy w integracji w nadwozie samochodu. Niestety jest to nowsza technologia, która jest nadal rozwijana i udoskonalana, przez to jest słabiej przetestowana w rzeczywistych warunkach. Również tego typu lidar nie jest w stanie skanować w 360° , dlatego wymagane jest równoczesne użycie kilku lidarów w różnych częściach samochodu.

Niezależnie czy jest to lidar mechaniczny, czy półprzewodnikowy, każdy z nich zawiera dwa podstawowe elementy: element nadawczy oraz element odbiorczy. Są to dwa najważniejsze elementy, które w dużej mierze determinują skuteczność wykrywania obiektów.

Element nadawczy

Element nadawczy jest odpowiedzialny za generowanie wiązki światła i najczęściej jest to laser (ang. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Laser jest to uporządkowany strumień światła o konkretnej długości fali. Fale światła są koherentne tzn. biegną równolegle do siebie, nie przecinają się, mają jednakową amplitudę oraz są zgodne w fazie, tworząc skupioną wiązkę. Dzięki skupionej wiązce lidar jest w stanie precyzyjnie oświetlić nawet bardzo odległy

punkt. Oczywiście w ośrodku, jakim jest powietrze, również występuje dyfrakcja fal elektromagnetycznych co powoduje, że skupiona wiązka wraz z odległością się rozszerza, jak pokazano na Rys. 48.



Rys. 48. Geometryczna reprezentacja rozbieżności wiązki.

Dla przykładowego radaru wykorzystującego częstotliwość 77 GHz, czyli falę o długości $\lambda = 0,3$ cm i rozmiar anteny wynoszący $D = 20$ cm to korzystając z kryterium Rayleigha (30) kąt rozbieżności wiązki wynosi $\theta = 0,0183$ [rad].

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (30)$$

gdzie:

λ - długość fali,

D - średnica anteny.

Następnie wykorzystując wzór (31) na tangens kąta połówkowego zakładając, że dla małych kątów $\text{tg}\theta = \theta$ i korzystając ze wzoru (32) szerokość wiązki D_1 na dystansie 100 m wyniesie 2,03 m co oznacza, że wiązka rozszerzyła się ponad 10 krotnie.

$$\text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{L}{X} \quad (31)$$

gdzie:

θ - kąt rozszerzenia wiązki,

L - odległość,

X - połowa rozszerzenia wiązki.

$$D_1 = D + 2X \quad (32)$$

gdzie:

D_1 - średnica rozszerzonej wiązki,

D - rozmiar anteny,

X - połowa rozszerzenia wiązki.

W przypadku analogicznych obliczeń dla lidar wykorzystującego falę o długości $\lambda = 1550$ nm i źródło światła o średnicy $D = 5$ mm wiązka na dystansie 100 metrów rozszerzy się tylko do 3,7 cm, a nie do 2 metrów jak w przykładzie dla radaru.

Lasery emitują różne długości fali w zależności od zastosowanej technologii wytwarzania. Dla przykładu lasery typu YAG (ang. Yttrium Aluminum Garnet) oparte są na ciele stałym, którym jest syntetyczny granat itrowo – glinowy. W zależności od domieszki laser YAG emituje inną długość światła np. laser neodymowy Nd:YAG 1064 nm, a laser erbowy Yb:YAG 2940 nm [196]. Do generowania długości fal 905 nm lub 1550 nm używa się laserów półprzewodnikowych inaczej nazywanych diodami laserowymi. Działają one na zasadzie wielokrotnego wewnętrznego odbicia światła, które po przekroczeniu odpowiedniego poziomu zostaje wyemitowane [196].

W lidarach najczęściej używane są dwa typy laserów półprzewodnikowych: lasery o emisji krawędziowej EEL (ang. Edge-Emitting Laser) oraz lasery o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową VCSEL (ang. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). Lasery VCSEL wyróżnia mała rozbieżność wiązki [197] oraz symetryczność jej profilu [189], natomiast lasery EEL charakteryzują się wysoką mocą [189]. W większości przypadków z tego powodu są stosowane lasery EEL, natomiast VCSEL są stosowane w radarach bliskiego zasięgu [189] oraz radarach typu błyskowego [125].

Element odbiorczy

Elementem odbiorczym w lidarze jest fotodetektor, którego zadaniem jest rejestrowanie odbitego światła. Najczęściej używanym fotodetektorem jest fotodioda lawinowa APD (ang. Avalanche Photodiode) [198]. W zależności od zastosowanego materiału może wykrywać różne długości fal, dlatego krzemowa dioda APD jest używana w lidarach 905 nm, a dioda APD InGaS w 1550 nm [195]. Fotodioda lawinowa charakteryzuje się wysoką światłoczułością oraz dużym wzmocnieniem [191], [192], ale niestety posiada wysoki współczynnik excess noise szczególnie w wersji InGaS, co jest jej dużą wadą [191]. Jednym z rodzajów diody APD jest fotodioda jednofotonowa - SPAD (ang. Single Photon Avalanche Diode) mająca jeszcze wyższą czułość i wykrywająca nawet pojedyncze fotony [190], [199]. W takim przypadku stosunek sygnału do szumu SNR wyraża się wzorem (33) [192]:

$$SNR(R) = \frac{P(R)S_\lambda M}{\sqrt{2eB[(P(R) + P_B)S_\lambda + I_d] M^{2+x} + \frac{4kTBF}{R_0}}} \quad (33)$$

gdzie:

$P(R)$ – moc odebranego sygnału,

S_λ – czułość detektora,

M – wzmocnienie detektora,

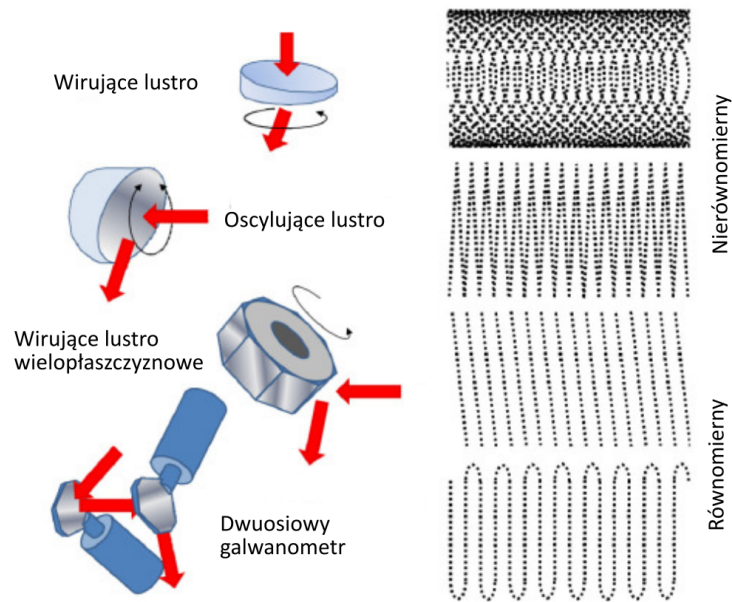
e – ładunek elektronu,

B – pasmo przenoszenia,
 P_B – moc tła,
 I_d – prąd ciemny detektora,
 x – współczynnik excess noise detektora,
 k – stała Boltzmana,
 T – temperatura bezwzględna,
 F – współczynnik szumu wzmacniacza,
 R_0 – rezystancja obciążenia.

Również coraz częściej zamiast pojedynczych diod APD są wykorzystywane fotopowielacze krzemowe SIPM (ang. Silicon Photomultiplier), nazywane również multipikselowym licznikiem fotonów MPPC (ang. Multi-Pixel Photon Counter) [195]. Oparte są na równolegle połączonych jednofotonowych diodach lawinowych SPAD pracujących w trybie Geigera oraz rezystorów gaszących [200]. Charakteryzują się jeszcze większą światłoczułością, gdyż są w stanie wykrywać pojedyncze fotony oraz jeszcze wyższym wzmocnieniem (typowo 1 milion) [200]. Natomiast największą zaletą w porównaniu do pojedynczych diod APD to niski współczynnik excess noise, który może wynosić tylko 1,03 przy wzmocnieniu ponad 1 miliona [201].

3.5.2 Rodzaje lidarów

Jak już wspomniano w poprzednim rozdziale, występują dwa zasadnicze rodzaje lidarów: mechaniczne i półprzewodnikowe. W każdej z tych grup występują różne typy lidarów różniące się technologiami pomiaru odległości czy technologiami skanowania, co przekłada się na m.in. ścieżkę skanowania i wzór punktów, jak pokazano na Rys. 49.



Rys. 49. Ścieżki skanowania różnych typów lidarów [202].

Lidar Mechaniczny

Lidary mechaniczne są zbudowane z ruchomych elementów, które odpowiadają za skanowanie i sterowanie wiązką. Znacząca większość tego typu lidarów działa na zasadzie impulsowej, choć zdarzają się również wykorzystujące falę ciągłą i modulację częstotliwościową. Przykładowymi

producentami mechanicznych lidarów impulsowych są: Valeo, Velodyne, Robosense, Ouster, Hesai, Huawei, Waymo, Konica Minolta, SureStar, natomiast FMCW: Aurora, SILC [187].

Lidar Wirujący

Pierwszym szeroko stosowanym rodzajem lidar w motoryzacji był wirujący lidar mechaniczny nazywany również wrzecionowym lub wirnikowym. Jest to lidar składający się z szybko obracającej głowicy skanującej (typowo od 5 do 20 Hz [203]), która jest w stanie skanować przestrzeń 360° wokół samochodu [190]. Głowica składa się z wielu par dioda-fotodetektor tworzących kanały określające liczbę linii skanowania w pionie. Standardowo lidary tego typu mają 16, 32 [204], 64 lub 128 [205] kanałów. Ten rodzaj lidarów jest stosowany już od dawna, dlatego jest to dojrzała technologia. Niestety z powodu obecności elementów mechanicznych jest on dość drogi, ciężki i nieenergooszczędny [190]. Ponadto, jako że składa się z elementów ruchomych, jest również teoretycznie bardziej zawodny [195]. Dodatkowo z uwagi na to, że skanuje w 360°, można go jedynie zamontować na dachu samochodu, jak pokazano na Rys. 50, co zaburza estetykę oraz zwiększa współczynnik oporu aerodynamicznego.



Rys. 50. Samojedna wersja elektrycznego Jaguara I-Pace wyposażona w lidar mechaniczny umieszczony na dachu [206].

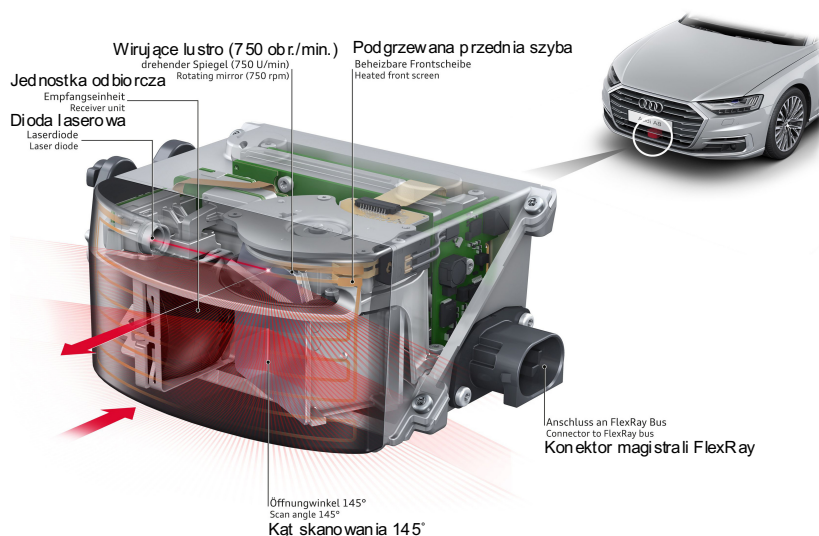
Lidar z wirującym lustrem

Innym rodzajem lidar mechanicznego jest lidar z wirującymi lustrami. Jest to lidar, który sam się nie obraca, a wszystkie ruchome elementy znajdują się w jego wnętrzu [189]. Z tego też powodu często jest nazywany hybrydowym lidarem półprzewodnikowym, gdyż ma cechy lidar mechanicznego, jak i półprzewodnikowego. Elementami ruchomymi są lustra, które służą do kierowania wiązki w odpowiednim kierunku. Występują różne rodzaje tego typu lidar różniące się użytymi lustrami i ich napędami.

Lidar z wirującym lustrem jednopłaszczyznowym

Ten typ lidar wykorzystuje pojedyncze lustro jednopłaszczyznowe obracające się wokół własnej osi ze stałą prędkością. Ruch obrotowy lustra jest realizowany za pomocą silnika elektrycznego [207]. Światło emitowane przez elementy nadawcze uderza w powierzchnię lustra i jest wypromieniowywane na zewnątrz lidar, jak pokazano na Rys. 51. Po odbiciu od obiektu światło wraca do lidar i odbijając się ponownie od lustra, jest rejestrowane przez fotodetektory [178]. Taki typ skanowania zapewnia skanowanie w poziomie w szerokim polu widzenia, co jest jego dużą zaletą [208], [209]. Natomiast skanowanie w pionie jest realizowane poprzez ustawione pionowo kanały

nadawczo-odbiorcze podobnie jak to ma miejsce w lidarze wirującym. Ten typ lidaru charakteryzuje się średnimi częstotliwościami skanowania oraz stałym kątem skanowania w pionie [208]. Skanery tego typu mają nieliniową szybkość skanowania, co oznacza, że prędkość skanowania jest największa w środku, a najwolniejsza po bokach. Z tego powodu obraz w środku ma niższą rozdzielczość [210]. Ten typ lidaru jest szeroko stosowany w produkcji seryjnej samochodów. Od 2017 roku w Audi A8 jest stosowany lidar Valeo SCALA Gen 1. Charakteryzuje się on poziomym polem widzenia wynoszącym 145° oraz pionowym wynoszącym tylko 3,2°. Wykorzystuje falę 905 nm i skanuje z częstotliwością 25 Hz [178], [179], [211].

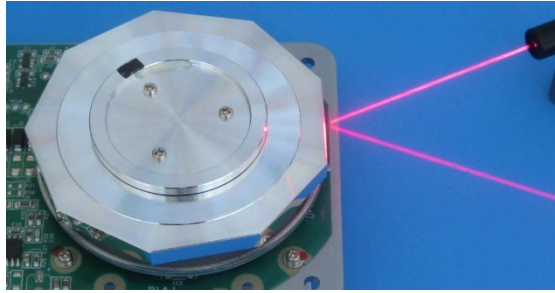


Rys. 51. Lidar z wirującym lustrem SCALA Gen1 montowany w Audi A8 [212].

Od 2021 roku kolejna generacja (Gen 2) lidaru Valeo SCALA jest stosowana w Hondzie Legend, a od 2022 roku również w Mercedesie-Benz Klasy S [16]. W porównaniu do poprzedniej generacji charakteryzuje się mniejszym poziomym polem widzenia wynoszącym 133°, ale trzy razy większym pionowym polem widzenia wynoszącym 10°. Wykorzystywane światło oraz częstotliwość skanowania nie uległa zmianie. [213]

Lidar z wirującym lustrem wielopłaszczyznowym (ang. Polygon Lidar)

Polygon lidar działa podobnie jak powyżej omawiany lidar z tą różnicą, że zamiast obrotowego lustra jednopłaszczyznowego używa lustra wielopłaszczyznowego opartego na wielokącie, jak pokazano na Rys. 52. Skanery mogą pracować z prędkościami od kilkuset obrotów do 50 000 obr./min., przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej stabilności prędkości [208]. Pozwala to jednostkom lidar na przechwytywanie obrazów o wysokiej rozdzielczości przy szerokim polu widzenia, również w przypadku pomiarów na duże odległości [208], [210]. W zależności od dobrego wielokąta można zmieniać pole widzenia oraz prędkość skanowania.



Rys. 52. Przykład kierowania wiązki za pomocą lustra wielopłaszczyznowego [214].

Lidar Galwanometryczny (ang. Galvo Lidar)

Lidar galwanometryczny jest zbudowany przeważnie z dwóch lusterek jednopłaszczyznowych ustawionych pod kątem 90° [215], z których każde jest napędzane przez napęd galwanometryczny [216], [217]. Dzięki temu lustro może się wychylać o zadany kąt i kierować wiązkę lasera w konkretnym kierunku skanowania. Z powodu nieliniowej zależności kąta obrotu lustra od napięcia przyłożonego do silnika, obraz skanowania zawiera dystorsje [216].

Galvo + Polygon Lidar

Ten typ lidarów wykorzystuje dwa różnego rodzaju lustra, aby sterować pojedynczą wiązką światła pod różnymi kątami w pionie i poziomie. Jedno lustro jest jednopłaszczyznowym lustrem sterowanym galwanometrycznie, które wychyla się w niewielkim zakresie i jest odpowiedzialne za skanowanie w pionie. Drugim lustrem jest wielopłaszczyznowe lustro (polygon) zbudowane na graniastosłupie prawidłowym obracającym się z dużą szybkością. Ono odpowiada za skanowanie w poziomie. W porównaniu do lidarów z obracającymi się lustrami w tym przypadku występuje tylko pojedynczy kanał nadawczy [215].

Lidary półprzewodnikowe

Lidary półprzewodnikowe nie mają ruchomych elementów w skali makro. Również w tej grupie lidarów występują różne technologie skanowania oraz pomiaru odległości.

Dalmierz laserowy

Najprostszym typem lidarów półprzewodnikowych jest dalmierz laserowy, który od dawna jest stosowany do pomiaru odległości w różnych gałęziach przemysłu. Typowo składa się z jednego elementu nadawczego i jednego elementu odbiorczego. Nie ma żadnych elementów skanujących, a jego pole widzenia jest stałe i zdeterminowane przez użytą soczewkę. Mierząc czas przelotu, wyznacza odległość do obiektu. Pierwszy raz dalmierz laserowy został wykorzystany w 1992 roku w Mitsubishi Debonair do ostrzegania o niebezpiecznej odległości [215], natomiast w 1995 roku pierwszy raz w historii w systemie aktywnego tempomatu w Mitsubishi Diamante [218]. W następnych latach również były wykorzystywane przez innych producentów samochodów jak Toyota czy Nissan [218], [219], [220].

Dzisiaj dalmierze laserowe są nadal używane jako budżetowe zamienniki lidarów czy radarów. Jednym z przykładów wykorzystujących dalmierz laserowy jest moduł szybkości zbliżania CVM (ang. Closing Velocity Module) stosowany w samochodach Volvo w systemach hamowania awaryjnego. Składa się z trzech diod laserowych 905 nm oraz trzech fotodiod odbiorczych zapewniających pole widzenia 27° [221].

Lidar wykorzystujący lustro MEMS (ang. Micro Electro-Mechanical Systems)

Kolejnym rodzajem jest lidar typu MEMS, który wykorzystuje niewielkie lustro zbudowane w technologii MEMS. Ten typ lidar, pomimo że ma elementy ruchome, jest już przeważnie zaliczany do grupy lidarów półprzewodnikowych [209]. Lustro służy podobnie jak wcześniej do kierowania pojedynczej wiązki lub wielu wiązek w konkretnym kierunku. Lidary tego typu wykorzystują pojedyncze lustro wychylające się w dwóch osiach lub dwóch osobnych luster wychylających się w jednej osi. Niestety ruchome lustro są narażone na wibracje i wstrząsy pochodzące od samochodu, co może teoretycznie prowadzić do ich uszkodzenia i mniejszej niezawodności [190]. Ponadto geometria zwierciadła ogranicza jego amplitudę oscylacji, co przekłada się na ograniczone pole widzenia [195]. Również moc lasera musi być ograniczona, gdyż może doprowadzić do uszkodzenia powierzchni lustro, co ogranicza jego wykorzystanie w radarach dalekiego zasięgu [208]. Rozdzielczość N definiowana jako liczba rozróżnialnych punktów jest funkcją rozbieżności wiązki $\delta\theta$ oraz zakresu skanowania θ_{max} zgodnie z (34), jak pokazano na Rys. 53 [222]. Niemniej jednak lidary typu MEMS są często stosowane ze względu na sprawdzoną technologię i niski koszt. Znacząca większość lidarów MEMS działa na zasadzie impulsowej, choć pojawiają się również wykorzystujące inne technologie jak FMCW czy pomiar przesunięcia fazy. Przykładowymi producentami impulsowych lidarów MEMS są Blickfield, Innoviz, RoboSense, ZVISION, Aeye, Draper, Pioneer, LeddarTech, Valeo, MicroVision, Velodyne [187].

$$N = \frac{\theta_{max}}{\delta\theta} = \frac{\theta_{max}D}{a\lambda} \quad (34)$$

gdzie:

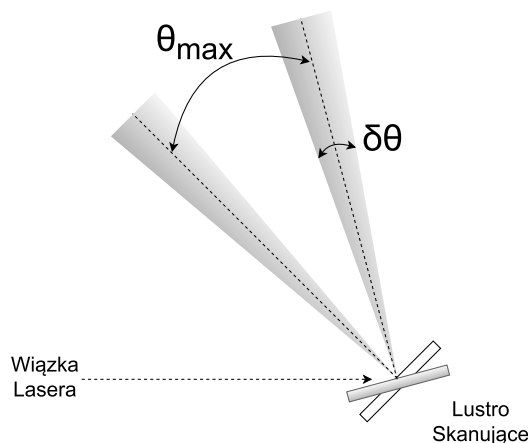
θ_{max} – maksymalny kąt skanowania,

$\delta\theta$ – rozbieżność wiązki,

D – średnica lustro,

λ – długość fali,

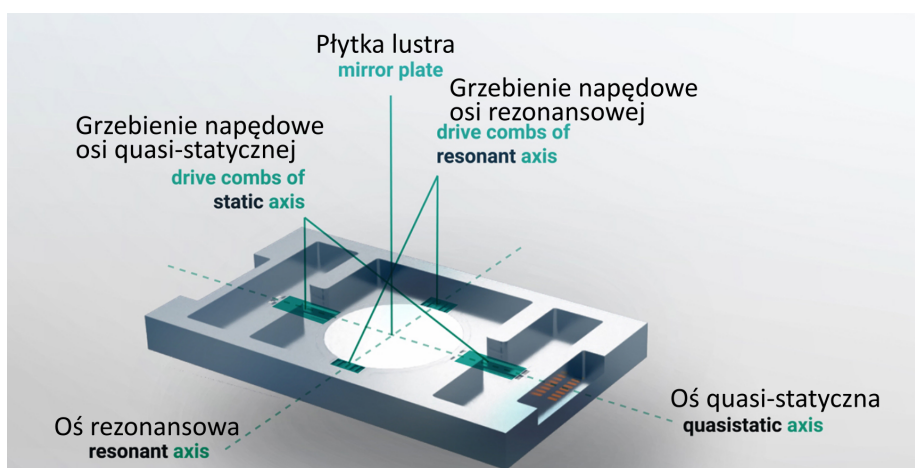
a – współczynnik kształtu przysłony.



Rys. 53. Wizualizacja rozdzielczości jako funkcja rozbieżności wiązki i zakresu skanowania. Rysunek przygotowany w oparciu o [222].

Kluczowymi elementami tego typu lidarów są lustra wykonane w technologii MEMS. Są zbudowane z pojedynczego monokryształu krzemu i mają średnicę kilku milimetrów [223]. W zależności od wykorzystanej technologii mogą być sterowane elektromagnetycznie, elektrostatycznie lub piezoelektrycznie [209]. Mówiąc w skrócie, wychylenie lustra o kąt następuje po podaniu odpowiedniego napięcia na elektrody układu MEMS [208].

Lustra MEMS można podzielić na dwa rodzaje. Jednowymiarowe - 1D wychylające się tylko w jednej osi oraz dwuwymiarowe - 2D, które wychylają się w dwóch niezależnych osiach [208]. Każda z osi może działać w jednym z dwóch trybów: liniowym (kwasi statycznym / nierezonansowym) lub nieliniowym (rezonansowym) [208], [209], jak pokazano na Rys. 54.



Rys. 54. Lustro MEMS z zaznaczonymi osiami rezonansowymi i kwasi statycznymi [224].

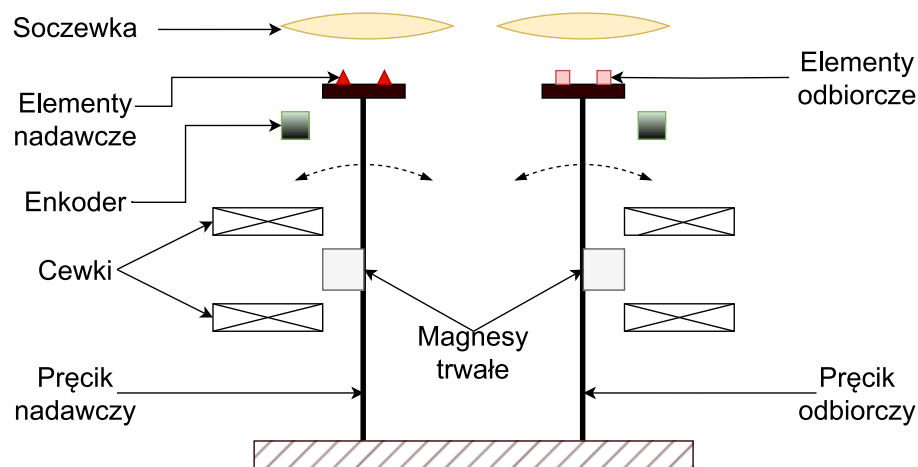
Oś rezonansowa charakteryzuje się dużą częstotliwością oscylacji (do kilkudziesięciu kHz) oraz dużym kątem wychylenia. Zapewnia to szerokie pole widzenia oraz wysoką częstotliwość skanowania. Z tego powodu oś jest nazywana osią szybką i jest przeważnie używana do skanowania w poziomie. Niestety trajektoria skanowania jest nieliniowa, co prowadzi do niestabilnych prędkości skanowania. Za skanowanie w pionie odpowiada oś kwasi statyczna działająca w trybie liniowym. Charakteryzuje się mniejszą częstotliwością oscylacji (do kilkudziesięciu Hz) oraz mniejszym kątem wychylenia. Powoduje to ograniczone pole widzenia i niższą częstotliwość skanowania. Z tego powodu ta oś jest nazywana osią wolną. W porównaniu do osi rezonansowej prędkość skanowania jest o wiele stabilniejsza, co jest dużą zaletą [208]. W zależności od wykorzystanych osi same lustra również mogą być nazywane rezonansowymi lub kwasi statycznymi. Natomiast w przypadku, gdy lustro korzysta z dwóch różnych typów osi, to takie określenie nie jest możliwe.

Lidar wykorzystujący technikę mikroruchów MMT (ang. Micro-Motion Technology)

Technologia mikroruchów jest to technologia opatentowana przez firmę Cepton. Jest to nieobrotowy, bezlusterkowy i bez tarcioy lidar, który wykorzystuje odkształcalne elementy do kierowania wiązki światła [190]. Z tego powodu ten typ lidarów nie jest pełnoprawnym lidarem półprzewodnikowym.

Technologia ta nie wykorzystuje sterowanych mikroluster MEMS ani innych mechanizmów, które powodowałyby tarcie i w konsekwencji straty i zużywanie się elementów. Do kierowania wiązki nadawczej oraz odbiorczej wykorzystuje się elastyczny pręcik (ang. flexure) z magnesem trwałym oraz cewki (ang. voice coil). Najprostszy układ wykorzystuje dwa pręciki z magnesami,

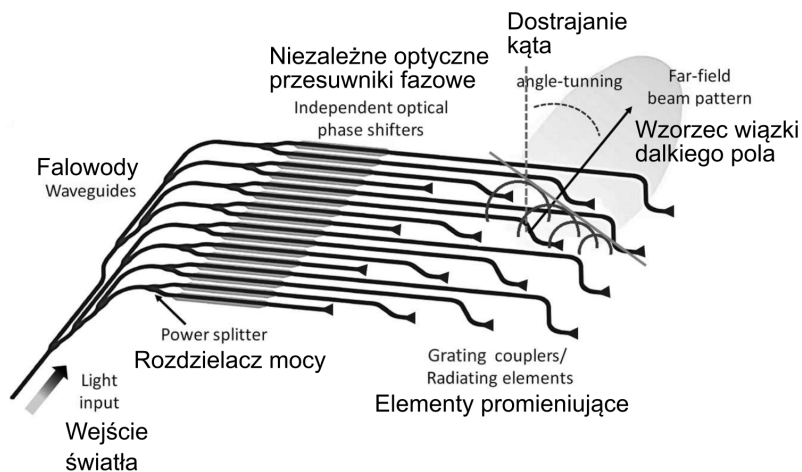
z których każdy ma własną cewkę oraz własny enkoder, jak pokazano na Rys. 55. Na końcu jednego pręcika są zamontowane lasery, a na końcu drugiego pręcika fotodetektory. Podanie napięcia na uzwojenia cewki powoduje przyciągnięcie lub odepchnięcie magnesu trwałego tym samym powodując odchylenie pręcika. Odkształcenie pręcika powoduje, że zlokalizowane na jego końcu lasery lub fotodetektory są przesunięte oraz obrócone o pewien kąt, dzięki temu wiązka jest sterowana w odpowiednim kierunku. Również na końcu pręcika umieszczone są enkodery mierzące jego pozycję względem pozycji referencyjnej i dające sprzężenie zwrotne do sterownika. Dzięki temu mikrokontroler jest w stanie precyzyjnie sterować odchyleniem pręcików i wiązką lasera [225]. Czujniki tego typu charakteryzują się kompaktową budową, niską wagą, energooszczędnością, szerokim polem widzenia oraz przystępnością cenową [190]. Niska cena jest wynikiem braku ruchomych elementów oraz wykorzystaniem tanich laserów 905 nm [226]. Kompaktowa budowa pozwala na montaż lidarów np. w reflektorach czy za szybą czołową samochodu [227].



Rys. 55. Elementy i uproszczony schemat działania jednej z odmian technologii MMT. Rysunek przygotowany w oparciu o [225].

Lidar półprzewodnikowy wykorzystujący optyczne macierze fazowe

Kolejnym typem jest lidar wykorzystujący optyczne macierze fazowe OPA (ang. Optical Phased Array) do sterowania kierunkiem wiązki. Jest to technika od dawna stosowana w radarach, natomiast w przypadku lidarów wykorzystywana od niedawna. W tym rodzaju lidarów nie ma już żadnych ruchomych części, dlatego jest on zaliczany do lidarów w pełni półprzewodnikowych [195]. Jego głównym elementem jest matryca anten optycznych, do których jest krzemowymi falowodami doprowadzone światło z pojedynczego źródła lasera, jak pokazano na Rys. 56.



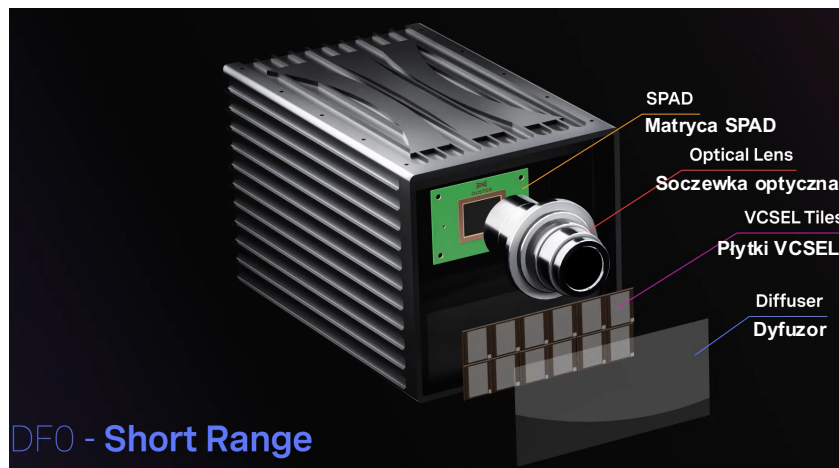
Rys. 56. Schemat działania optycznych macierzy fazowych wykorzystujących pojedyncze źródło światła, falowody i przesuwniki fazowe [208].

Sterowanie wiązką uzyskuje się poprzez niezależne sterowanie fazą i amplitudą światła przez każdy piksel z osobna. Interferencja w dalekim polu daje pożądany wzór oświetlenia. Podczas odbierania odbitego światła odbiornik jest w stanie filtrować światło z kierunków niepożądanych, tym samym redukując zjawisko odbicia wielościeżkowego. Dzięki temu uzyskuje się wysokie częstotliwości skanowania nawet do 100 KHz [190]. Niestety, straty światła w różnych elementach ograniczają zasięg użytkowy, dlatego są stosowane w aplikacjach krótkiego i średniego zasięgu. Niemniej najnowsze realizacje czujników są w stanie działać nawet do 250 m [228]. Największą zaletą tego lidar jest brak ruchomych części, dzięki czemu lidar jest niezawodny i może być stosowany w transporcie o dużym natężeniu wibracji takich jak: ciężarówki, górnictwo, budownictwo czy rolnictwo [229]. Lidary tego typu mogą działać zarówno na zasadzie impulsowej, jak i wykorzystując FMCW. Przykładowi producenci impulsowych lidarów OPA to: Quanregy, Robosense, Baraja, Huawei, Lumotive, natomiast FMCW OPA: Abax Sensing, Analog Photonics, Huawei, Aurora, Silc, Kyber Photonics, Insiqt Lidar [187].

Lidar błyskowy (ang. Flash Lidar)

Lidar błyskowy jest zaliczany do lidarów w pełni półprzewodnikowych, gdyż nie ma żadnych ruchomych części potrzebnych do sterowania wiązką. Praktycznie wszystkie działają na zasadzie impulsowej oświetlając w jednym momencie całą scenę światłem, podobnie jak lampa błyskowa w aparatach fotograficznych. Następnie mierzą czas odbioru światła na każdym pikselu z osobna [190]. W porównaniu do większości innych typów lidarów używa przeważnie wielu źródeł światła, którymi w tym przypadku są lasery VCSEL. Detektor to macierz pikseli składających się z diod typu APD lub SPAD [195]. Każdy piksel matrycy mierzy niezależnie czas przelotu do obiektu, który jest na niej obrazowany. Rozdzielczość lidar jest definiowana wielkością oraz liczbą pikseli w matrycy.

Główną wadą lidar błyskowego jest budżet fotonów. Wynika to z faktu, że w lidarze błyskowym źródło światła oświetla jednocześnie całą scenę, a nie tylko mały pojedynczy punkt jak to ma miejsce w lidarach skanujących. Gdy odległość przekracza kilkadziesiąt metrów, ilość powracającego światła jest zbyt mała, aby umożliwić niezawodną detekcję. Budżet fotonów można poprawić, stosując źródła światła dużej mocy, dodając kolejne źródła światła lub stosując światło strukturalne np. siatkę punktów. To ostatnie niestety, powoduje pogorszenie rozdzielczości stycznej lidar. Ze względu na budżet fotonów ten typ lidar jest przeważnie stosowany w bliskim i średnim zasięgu, choć najnowsze realizacje są w stanie pracować na większych dystansach. Przykładowy lidar tego typu wraz z najważniejszymi podzespołami pokazano na Rys. 57. Producentami tego typu lidarów są: Continental, ZF, ASC, LeddarTech, Tetravue, Ouster, Fastree 3D, SureStar, Sense Photonics, XAOS, Ibeo, ARGO i Xenomatics [187].



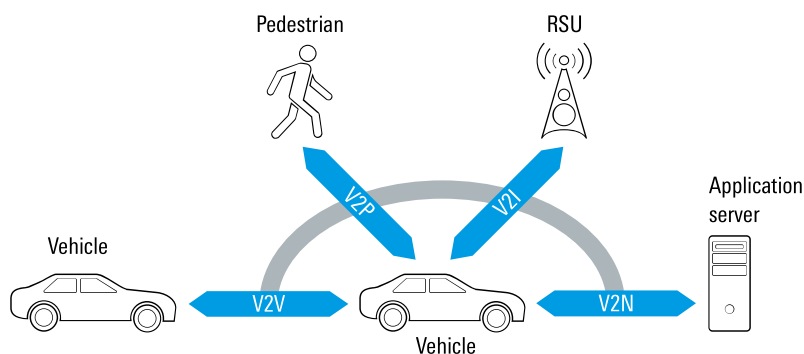
Rys. 57. Podstawowe elementy lidarów błyskowych [230].

Lidar wykorzystujący modulowaną częstotliwościowo falę ciągłą (ang. FMCW Lidar)

Jak już wspomniano wcześniej znacząca większość lidarów niezależnie czy są to lidary mechaniczne, czy półprzewodnikowe działają na zasadzie bezpośredniego czasu przelotu dToF. Ta metoda, mimo iż ma wiele zalet, ma również wady, z których największą jest budżet fotonów. Z tego powodu niektórzy producenci lidarów zarówno mechanicznych, jak i półprzewodnikowych zaczęli stosować metodę FMCW, która do tej pory była stosowana głównie w radarach. W tym przypadku modulacji częstotliwościowej podlega światło, a nie fala mikrofalowa, jak to miało miejsce w radarach. Światło powracające jest wykrywane przez fotodetektor i następnie miksowane z lokalnym oscylatorem, umożliwiając pomiar przesunięcia częstotliwości i na tej podstawie obliczenie odległości i prędkości celu. Ponadto jest bardziej odporny na zakłócenia pochodzące ze światła słonecznego oraz zapewnia lepszy stosunek sygnału do szumu SNR. Dodatkowo jest bezpieczniejszy dla oczu, gdyż fala ciągła nie musi mieć wysokich mocy szczytowych [190]. Lidar FMCW posiada też pewne ograniczenia. W porównaniu z lidarem czasu przelotu wymaga większej mocy obliczeniowej i dlatego wolniej generuje pełny widok przestrzenny 3D (około 10 Hz) [231]. Ponadto wymaga drogiego lasera ze zmienną częstotliwością [195]. Przykładowymi producentami tego typu lidarów, o których nie wspomniano wcześniej są: Aeva, MobilEye, Intel, Scan TInel Phonic, Infoworks czy LSLidar (LeiShen Intelligence) [187].

3.6 Komunikacja pojazd do wszystkiego V2X

Komunikacja pojazd do wszystkiego V2X (ang. Vehicle-to-everything) to system bezprzewodowej komunikacji pomiędzy pojazdem a dowolnym obiektem. Takimi obiektami mogą być: pojazd (V2V), infrastruktura (V2I), pieszy (V2P) oraz sieć (V2N) [232], jak pokazano na Rys. 58. Dzięki wymianie komunikatów pomiędzy samochodami oraz innymi uczestnikami ruchu mogą sobie przekazywać informacje o swoim położeniu czy potencjalnym zagrożeniu na drodze np. wypadku. Ponadto komunikacja V2X jest podstawą do działania wielu nowoczesnych systemów automatyzacji jazdy czy inteligentnych systemów transportowych ITS (ang. Intelligent Transport Systems) takich jak: kooperacyjny, adaptacyjny tempomat C-ACC (ang. Cooperative-Adaptive Cruise Control) czy jazda w kolumnie (ang. platooning) [233]. W przypadku komunikacji z infrastrukturą samochód może np. komunikować się z sygnalizacją świetlną i tym samym mieć informację, jaki jest kolor światła lub poprosić o jego zmianę.



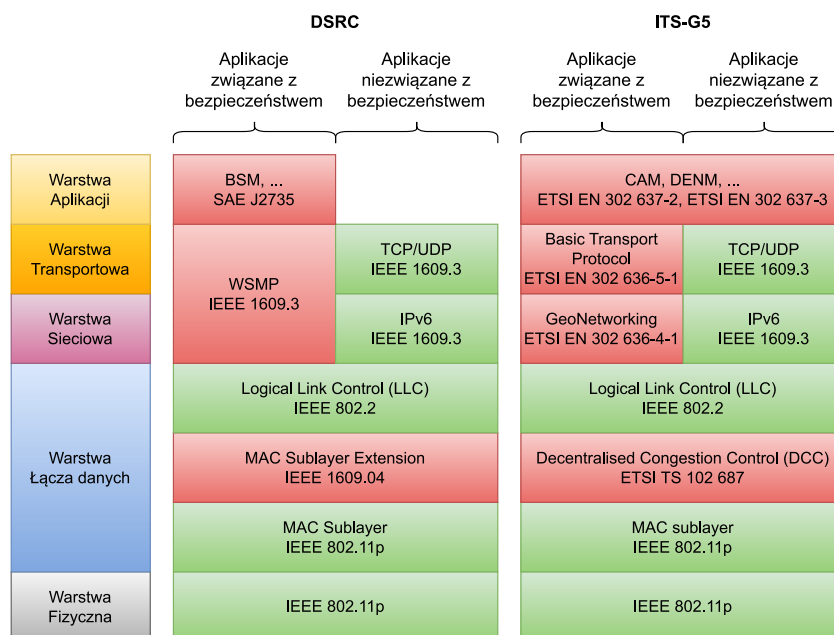
Rys. 58. Drogi komunikacji w V2X [234].

Obecnie są wykorzystywane dwa standardy bezprzewodowej komunikacji. Bezpośrednia komunikacja krótkiego zasięgu pomiędzy samochodami, nazywana ogólnie V2X lub alternatywnie WAVE, DSRC, ITS-G5, 802.11p oraz pośrednia wykorzystująca sieć komórkową nazywana C-V2X (ang. Cellular-V2X). Te dwa rodzaje komunikacji, pomimo że współdzielą to samo pasmo częstotliwości, najczęściej są wykorzystywane osobno, choć obecnie są prowadzone prace nad współistnieniem tych standardów [235].

V2X to dedykowana, bezpośrednia komunikacja krótkiego zasięgu pomiędzy samochodami, ale również infrastrukturą czy pieszymi bez żadnych urządzeń pośredniczących. V2X jest nazwą ogólną, mającą dwie podobne, choć różniące się implementacje DSRC oraz ITS-G5. Technologia DSRC jest głównie stosowana w USA, natomiast w Europie stosowana jest ITS-G5. Dzięki V2X samochody są w stanie komunikować się, nawet jeśli w pobliżu nie ma żadnej infrastruktury komunikacyjnej. Połączenie pomiędzy samochodami następuje spontanicznie zgodnie z zasadą ad-hoc, jak tylko znajdą się w swoim zasięgu komunikacyjnym [236], [237]. Jako że jest to technologia oparta na standardzie 802.11p, zasięg takiej komunikacji jest nieduży i wynosi od 300 m [238] do 1000 m [239]. Pomimo że DSRC, jak i ITS-G5 łączy wiele wspólnych cech to różnią się pomiędzy sobą. Samochód wyposażony w DSRC nie jest w stanie komunikować się z ITS-G5, gdyż używają m.in. różnych wiadomości aplikacyjnych. Zarówno DSRC, jak i ITS-G5 definiuje dwa główne rodzaje komunikatów bezpieczeństwa, których transmisja może być okresowa lub wyzwalana zdarzeniem.

C-V2X nazywany również 3GPP jest metodą działającą w oparciu o standardy telefonii komórkowej. W zależności od potrzeb może wykorzystywać bezpośrednią komunikację z wykorzystaniem interfejsu Sidelink/PC5 lub komunikację z wykorzystaniem infrastruktury sieci komórkowej i interfejsu LTE-Uu [235], [237]. W zależności od użytej technologii C-V2X może bazować na standardzie LTE lub 5G [232].

Standardy V2X są opracowywane przez różne organy normalizacyjne: ETSI (ang. European Telecommunications Standards Institute) w Europie, IEEE (ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers) w USA oraz ARIB (ang. Association of Radio Industries and Businesses) w Japonii [240]. Z tego powodu standard ITS-G5 definiowany przez ETSI pomimo wielu podobieństw różni się od DSRC definiowanego przez IEEE. Warstwy stosu DSRC i ITS-G5 z zaznaczonymi na czerwono różniącymi się warstwami pokazano na Rys. 59.

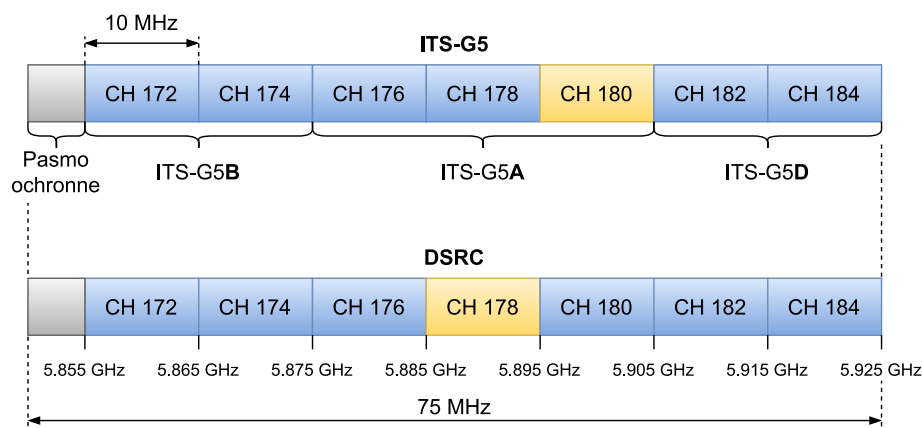


Rys. 59. Warstwy stosu DSRC po lewej i ITS-G5 po prawej z zaznaczonymi na czerwono warstwami różniącymi się w obu standardach.

Obydwie technologie korzystają z częstotliwości 5,9 GHz, a dokładnie z pasma o szerokości 75 MHz od 5,850 do 5,925 GHz. Ten zakres częstotliwości jest podzielony na siedem kanałów o szerokości 10 MHz oraz dodatkowe ochronne pasmo o szerokości 5 MHz [241]. Sześć kanałów jest kanałami usługowymi SCH (ang. Service Channel), a jeden jest kanałem sterującym CCH (ang. Control Channel) [238]. Różnicą jest to, że w DSRC kanał sterujący jest na kanale o numerze 178 [240], [242], a w ITS-G5 na kanale 180 [243], [244], jak pokazano na Rys. 60. Kanał sterujący jest wykorzystywany do zarządzania łącznością, natomiast kanały usługowe są przeznaczone do typowych zastosowań V2X. Standard ITS-G5 definiuje trzy typy kanałów usługowych [241]:

- ITS-G5A - usługi związane z bezpieczeństwem drogowym,
- ITS-G5B – usługi niezwiązane z bezpieczeństwem drogowym,
- ITS-G5D – usługi zarezerwowane dla przyszłych aplikacji ITS.

Dodatkowo istnieje usługa ITS-G5C, która leży w innym paśmie częstotliwości 5,6 GHz [243].



Rys. 60. Rozkład kanałów usługowych i sterujących w ITS-G5 oraz DSRC.

3.6.1 Warstwa fizyczna

IEEE 802.11p jest zasadniczo standardem opartym na 802.11 przystosowanym dla V2X. Zarówno DSRC, jak i ITS-G5 wykorzystują standard IEEE 802.11p dla warstwy fizycznej. W porównaniu do 802.11a standard 802.11p wprowadza zmniejszenie szerokości pasma z 20 MHz do 10 MHz, a tym samym zmniejszenie o połowę szybkości transmisji danych z 6-54 Mb/s do 3-27 Mb/s. Szybkość transmisji dodatkowo jest zależna od użytego rodzaju modulacji i szybkości kodowania. Zależnie od jakości sygnału są stosowane modulacje BPSK, QPSK, 16-QAM lub 64-QAM [243]. Zależności pomiędzy szybkością transmisji, rodzajem modulacji i szybkością kodowania pokazane są w Tab. 3.

Tab. 3. Zależność pomiędzy szybkością transmisji, rodzajem modulacji i szybkością kodowania w 802.11p [243].

Szybkość transmisji [Mbit/s]	Schemat modulacji	Szybkość kodowania
3	BPSK	1/2
4,5	BPSK	3/4
6	QPSK	1/2
9	QPSK	3/4
12	16-QAM	1/2
18	16-QAM	3/4
24	64-QAM	2/3
27	64-QAM	3/4

3.6.2 Warstwa łącza danych

Warstwa Łącza Danych podzielona jest na trzy warstwy. Dolną warstwę MAC (ang. Medium Access Control), która jest odpowiedzialna za dostęp do kanału, górną warstwę MAC odpowiedzialną za koordynację pomiędzy kanałami oraz warstwę LLC (ang. Logical Link Control) działającą, jako interfejs pomiędzy warstwą MAC a warstwą sieciową.

Warstwa dolna MAC

Zarówno DSRC, jak i ITS-G5 wykorzystują mechanizm dostępu wielokrotnego z unikaniem kolizji CSMA/CA (ang. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Polega on na tym, że każdy węzeł przed wysłaniem swojego pakietu danych nasłuchuje i sprawdza sieć czy jest wolna. ITS-G5 MAC stosuje również specjalną procedurę backoff do planowania tranzytów poprzez ulepszony rozproszony dostęp do kanałów EDCA (ang. Enhanced Distributed Channel Access). EDCA jest potrzebna do obsługi wielu rodzajów usług o różnych poziomach priorytetów. W EDCA każdy węzeł utrzymuje kolejki z różnymi wartościami AIFS (ang. Arbitrary InterFrame Spacing) i rozmiarami okna przeciążenia w celu nadania wyższego priorytetu ruchowi danych. Zwiększa to prawdopodobieństwo, że pakiet danych o wyższym priorytecie uzyska dostęp do kanału przed ruchem danych o niższym priorytecie [237].

Warstwa górna MAC

W DSRC koordynacja kanałów jest określona przez standard [245], który definiuje współrzędne pomiędzy kanałami sterującymi (CCH) oraz usługowymi (SCH), trasowanie kanałów poprzez wybór odpowiedniego kanału i kolejki, synchronizację czasu oraz usługi zarządzania przełączaniem kanałów.

ITS-G5 stosuje metody zdecentralizowanej kontroli przeciążenia DCC (ang. Decentralised Congestion Control) w celu ograniczenia obciążenia kanału i umożliwienia odbioru wiadomości o wysokim priorytecie z rozsądnym prawdopodobieństwem [246].

Warstwa kontroli łącza logicznego LLC (ang. Logical Link Control Layer)

Warstwa LLC działa jako interfejs pomiędzy warstwą MAC a warstwą sieciową. Składa się z nagłówka LLC, po którym następuje nagłówek protokołu dostępu do podsieci SNAP (ang. SubNetwork Access Protocol), jak pokazano na Rys. 61. Nagłówek LLC składa się z trzech bajtów: punktu dostępu do usługi docelowej DSAP (ang. Destination Service Access Point), punktu dostępu do usługi źródłowej SSAP (ang. Source Service Access Point) oraz bajtu kontrolnego CTL (ang. Control). Nagłówek SNAP składa się z pięciu bajtów: trzech bajtów unikalnego identyfikatora organizacji (OUI) oraz dwubajtowego pola EtherType, które określa protokół sieciowy [247]. W DSRC EtherType może przyjmować dwie wartości: 0x86DD (IPv6) lub 0x88DC (WAVE Short Message Protocol) [240].



Rys. 61. Ramka składająca się z nagłówka LLC oraz następującego po nim nagłówka SNAP.

3.6.3 Warstwa sieciowa i transportowa

Warstwa sieciowa i transportowa jest definiowana różnymi standardami w zależności czy wysyłane są komunikaty związane z bezpieczeństwem czy nie. W przypadku wysyłania komunikatów niezwiązanych z bezpieczeństwem zarówno DSRC, jak i ITS-G5 korzysta z tych samych standardów: TCP/UDP w warstwie transportowej i IPv6 w warstwie sieciowej. W DSRC wiadomości związane z bezpieczeństwem używają specjalnie stworzonego protokołu o nazwie WSMP (ang. WAVE Short Message Protocol), który definiuje zarówno warstwę sieciową, jak i transportową. W tym protokole występują dwa rodzaje komunikatów: WSM (ang. WAVE Short Message) oraz WSA (ang. WAVE Service Advertisement Message) [248].

ITS-G5 w warstwie sieciowej wykorzystuje protokół GeoNetworking. GeoNetworking jest protokołem routingu zapewniającym routing pakietów w sieci ad hoc. GeoNetworking zapewnia komunikację pomiędzy samochodami, ale również przesyłanie pakietów do docelowego obszaru geograficznego [249]. W warstwie transportowej używa się podstawowego protokołu transportowego, którego głównym zadaniem jest multipleksowanie komunikatów np. CAM i DENM z różnych procesów oraz demultipleksowanie komunikatów w miejscu przeznaczenia [250].

3.6.4 Warstwa aplikacji

Warstwa aplikacji definiuje wiadomości wysokiego poziomu, które będą przysyłały już informacje docelowe. Zestaw wiadomości jest już odgórnie zdefiniowany i różni się w zależności czy korzysta się z DSRC czy z ITS-G5. Zarówno w DSRC, jak i ITS-G5 można podzielić wiadomości na dwa rodzaje: wiadomości związane z bezpieczeństwem oraz niezwiązane z bezpieczeństwem. Wiadomości związane z bezpieczeństwem koordynują współpracę w ruchu drogowym, natomiast komunikaty niezwiązane z bezpieczeństwem niosą takie dane, jak informacje drogowe oraz turystyczne, opłaty za przejazd czy multimedia.

DSRC

W DSRC jest określonych około 31 wiadomości, natomiast ich definicja jest na różnym stopniu zaawansowania. Część wiadomości jest bardzo obszernie zdefiniowana, część jest częściowo, a dziesięć wiadomości ogranicza się tylko do określenia nazwy. Najważniejszą wiadomością w DSRC jest podstawowa wiadomość bezpieczeństwa BSM (ang. Basic Safety Message).

Podstawowa wiadomość bezpieczeństwa BSM (ang. Basic Safety Message)

Podstawowa wiadomość bezpieczeństwa to podstawowa ramka w DSRC. Przesyła głównie informacje kinematyczne o pojeździe, ale również szereg dodatkowych informacji. Wiadomość dzieli się na dwie części: część pierwszą, która jest obligatoryjna dla wszystkich typów pojazdów oraz część drugą - opcjonalną. Pierwsza część zawiera takie dane jak: pozycja, szybkość, kierunek jazdy, kąt skręcenia kierownicy, przyspieszenie, rozmiar pojazdu czy status hamulców. Druga część wiadomości jest wysyłana tylko przez pojazdy specjalne, których manewry mogą być niestandardowe. Takimi pojazdami mogą być np. policja, która w tej ramce informuje o swoim dodatkowym oświetleniu, śmieciarka, która co jakiś czas się zatrzymuje czy ciężarówka informująca o ciągniętych przyczepach. Również opcjonalna część ramki ma elementy zdarzeniowości z tym wyjątkiem, że tutaj zdarzenia są raportowane za pomocą odpowiednich flag, przy zachowaniu bazowej częstotliwości, która wynosi 10 Hz. Zdarzenia w ramce BSM odwołują się tylko do zdarzeń/czynności wykonanych przez wysyłający samochód. Takimi zdarzeniami mogą być: włączenie świateł awaryjnych, aktywacja systemów bezpieczeństwa (ABS, TCS, ESC), awaryjne hamowanie czy wystrzelenie poduszki powietrznej [239].

Dodatkowo jest wiele innych wiadomości, które mogą być wysyłane przez pojazdy, infrastrukturę czy pieszych. Wiadomość danych o mapie MAP (ang. Map Data) opisuje topologię skrzyżowania, geometrię oraz liczbę pasów; wiadomość o fazie i czasie sygnału SPAT (ang. Signal Phase and Timing Message) niesie informacje o statusie sygnalizacji świetlnej; wiadomość dotycząca wspólnego bezpieczeństwa CSR (ang. Common Safety Request) jest to prośba o przesyłanie w ramce BSM części opcjonalnej; wiadomość/ostrzeżenie pojazdów ratunkowych EVA (ang. Emergency Vehicle Alert) jest wysyłana przez nadjeżdżającą karetkę, żeby uczestnicy ruchu zwiększyli czujność i ostrożność; wiadomość ostrzegania o kolizji na skrzyżowaniu ICA (Intersection Collision Alert/Avoidance) jest wysyłana przez dowolny samochód lub infrastrukturę w momencie, gdy istnieje prawdopodobieństwo, że na skrzyżowanie wjedzie pojazd powodując kolizję; wiadomość korekcji NMEA (ang. NMEA Corrections) przesyłająca korekcje różnicowe dla GNSS; wiadomość dotycząca zarządzania danymi sond PDM (ang. Probe Data Management), która ustala co OBU (ang. On Board Unit) ma wysyłać do RSU (ang. Road Side Unit); wiadomość/dane pojazdu sondującego PVD (ang. Probe Vehicle Data), która służy do wysyłania zdjęć o innym uczestniku ruchu przez samochody do RSU, żeby RSU mogło określić jego zachowanie na danym odcinku drogi; wiadomość/ostrzeżenie drogowe RSA (Road Side Alert), które jest wysyłane przez samochód o zagrożeniach na drodze np. lodzie na drodze, nadjeżdżającym pociągu czy ambulansie; wiadomość korekcji RTCM (RTCM Corrections) przesyłająca korekcje różnicowe dla GNSS; wiadomość żądania sygnału SRM (Signal Request Message), która jest wysyłana przez samochód do sygnalizacji świetlnej z prośbą o zmianę światła; wiadomość statusu sygnału SSM (Signal Status Message), która jest wysyłana przez sygnalizację świetlną, w której odpowiada na żądanie zmiany światła; wiadomość informacji dla podróżnych TIM (Traveler Information Message), która niesie informacje dla podróżnych; wiadomość dotycząca bezpieczeństwa osobistego PSM (Personal Safety Message), która służy do rozesłania danych kinematycznych o pieszych, rowerzystach czy pracownikach robót drogowych; wiadomość/raport o danych z sondy PDRM (Probe Data Report Message) służąca do wysyłania danych z czujników do RSU; wiadomość/ogłoszenie o opłatach drogowych TAM (Toll Advertisement Message) oraz potwierdzenie opłat drogowych TUAM (Toll Usage Ack Message), które służą do transakcji finansowych np. pobierania opłat za autostrady; wiadomość o warunkach pogodowych na drodze RWM

(Road Weather Message) zawierająca informacje o złych warunkach pogodowych np. słabej widoczności, mokrej czy oblodzonej nawierzchni, które są wysyłane od samochodów do RSU.

Istnieje również 10 wiadomości, których definicja na ten moment ogranicza się tylko do definicji nazwy, skrótu oraz identyfikatora (ID). Takimi wiadomościami są: wiadomość bezpieczeństwa drogowego RSM (Road Safety Message), wiadomość konfiguracji danych sondy PDC (Probe Data Config Message), wiadomość kontroli kooperacyjnej CCM (Cooperative Control Message), wiadomość o udostępnianiu danych z czujników SDSM (Sensor Data Sharing Message), wiadomość o współdzieleniu i koordynacji manewrów MSCM (Maneuver Sharing and Coordination Message), wiadomość o geometrii i atrybutach drogi RGA (Road Geometry and Attributes), druga wiadomość dotycząca bezpieczeństwa osobistego PSM2 (Personal Safety Message 2), wiadomość dotycząca fazy i czasu sygnalizacji świetlnej TSPaT (Traffic Signal Phase and Timing), wiadomość/wniosek o kontrolę sygnału i ustalenie priorytetów SCPR (Signal Control and Prioritization Request), wiadomość statusu kontroli i priorytetyzacji sygnału SCPS (Signal Control and Prioritization Status) [239].

ITS-G5

ITS-G5 definiuje około 17 wiadomości na różnym poziomie zaawansowania, jeśli chodzi o ich kompletność. Wiadomości te różnią się od tych używanych w DSRC. W niektórych przypadkach w DSRC i ITS-G5 można znaleźć bliskie odpowiedniki, natomiast nigdy nie są one identyczne i zawsze posiadają różnice. Dwoma najważniejszymi wiadomościami w ITS-G5 są: wiadomość świadomości kooperacyjnej CAM (ang. Cooperative Awareness Message) oraz zdecentralizowana wiadomość powiadomienia o środowisku DENM (ang. Decentralized Environmental Notification Message).

Wiadomość świadomości kooperacyjnej CAM (ang. Cooperative Awareness Message)

Wiadomość świadomości kooperacyjnej CAM jest krótką wiadomością nadawaną cyklicznie przez samochód do innych uczestników ruchu w jego bezpośrednim zasięgu komunikacyjnym. Użytkownicy dróg i infrastruktura przydrożna informują się wzajemnie o swojej pozycji, dynamice oraz wielu innych parametrach. Dzięki temu są świadomi swojej pozycji, kierunku jazdy i na tej podstawie mogą przewidywać i koordynować manewry. W celu ograniczenia zbiorowej świadomości do niezbędnych uczestników ruchu zasięg komunikacji można dostosowywać m.in. poprzez zmianę mocy nadawania. Wiadomość CAM zawiera takie informacje jak określenie typu pojazdu (transport publiczny, samochód robót drogowych czy pojazd uprzywilejowany), informacje o długości i szerokości pojazdu, kierunku jazdy, szybkości, przyspieszeniu, kącie skręcenia kierownicy, zajmowanym pasie ruchu czy statusie oświetlenia zewnętrznego pojazdu. Częstotliwość wysyłania wiadomości wynosi od 1 do 10 Hz i jest określana na podstawie szybkości zmian parametrów własnych pojazdu takich jak zmiana pozycji, prędkości czy obciążenia kanału radiowego [251]. Drugą najważniejszą wiadomością jest zdecentralizowany komunikat powiadomienia o środowisku - DENM.

Zdecentralizowany komunikat powiadomienia o środowisku DENM (ang. Decentralized Environmental Notification Message)

Zdecentralizowany komunikat powiadomienia o środowisku DENM jest nadawany w celu ostrzeżenia innych użytkowników dróg o niebezpiecznym zdarzeniu czy niestandardowych warunkach na drodze. Komunikaty wyzwalane są zdarzeniem, ale wiadomość może być powtarzana cyklicznie tak długo, jak występuje dane zagrożenie. Standard definiuje wiele takich zdarzeń jak np. informacje o korkach, wypadkach, robotach drogowych, zwierzętach i ludziach na drodze, warunkach pogodowych, zatrzymanych oraz zepsutych pojazdach czy o zbliżającym się pojeździe uprzywilejowanym. Dzięki takiej strukturze zdarzenie jest łatwo interpretowalne przez sa-

mochody, natomiast wadą jest to, że wszystkie zdarzenia muszą być z góry przewidziane i zdefiniowane przez standard. Wiadomość DENM nie jest ograniczona do bezpośredniego zasięgu komunikacyjnego i może być rozsyłana do pojazdów na większym obszarze geograficznym. W takim przypadku kolejne samochody przesyłają tę wiadomość do dalszych uczestników ruchu. Wielkość tego obszaru jest określana w oparciu o przewidywanie, które samochody mogą być potencjalnie zainteresowane danym zdarzeniem [252].

Wiadomość zbiorowej percepcji CPM (ang. Collective Perception Message)

Wiadomość zbiorowej percepcji CPM jest cyklicznie wysyłana przez samochód o napotkanych przeszkodach. Wykrywanie jest realizowane w oparciu o czujniki zamontowane w samochodzie takie jak radary, lidary czy kamery. Dzięki temu w sieci V2X również są obecne samochody, które nie są wyposażone w tę technologię. Pozwala to technologii V2X być w pełni funkcjonalną, pomimo niewyposażenia wszystkich samochodów w technologię V2X. Wiadomość zawiera dwa typy informacji. Pierwszym typem są możliwości sensoryczne samochodu, czyli informacje, jakie czujniki posiada samochód. Drugim typem są informacje o wykrytych obiektach na drodze (np. samochodach, gałęziach) oraz wokół drogi, które łatwo mogą się przemieszczać (np. kosz na śmieci czy piłka). Ramka jest wysyłana cyklicznie w zakresie od 10 Hz do 1 Hz, natomiast okres ramki jest zależny od występowania zmian w środowisku drogowym. Nawet jeśli samochód nie wykrywa żadnych obiektów, to wiadomość jest wysyłana w celu potwierdzenia, że pojazd jest w stanie wykrywać obiekty i informować o nich. Ponadto wiadomość jest przystosowana do przesyłania surowych danych otrzymanych z czujników, natomiast nie jest to zalecane, gdyż intensywnie obciąża sieć i wymaga dużej przepustowości [253].

Wiadomość koordynowania manewrów MCM (ang. Manoeuvre Coordination Message)

Wiadomość koordynowania manewrów MCM służy do koordynowania manewrów pomiędzy samochodami jak np. wyprzedzanie, zmiana pasa ruchu. W tej ramce samochody informują jakie manewry zamierzają przeprowadzić w ciągu najbliższych 10 s. Dzięki temu samochody mogą się skoordynować w przypadku, kiedy zamierzone manewry mogłyby doprowadzić do kolizji. Ramka poprawia przewidywanie przyszłych lokalizacji pobliskich pojazdów, natomiast przydrożna infrastruktura może wspomagać samochody sugerując określone manewry czy parametry jazdy jak zmiana prędkości czy pasa ruchu. Wiadomość powinna zawierać równocześnie kilka alternatywnych trajektorii. Są rozróżniane dwa rodzaje trajektorii: trajektoria planowana - do określania przyszłych lokalizacji i wykrywania potencjalnych kolizji oraz trajektoria pożądana - do żądania koordynacji między pojazdami. Format wiadomości jeszcze nie jest ustandaryzowany, gdyż standard nie jest jeszcze oficjalnie zatwierdzony, ale prawdopodobnie będzie wysyłana okresowo z częstotliwością od 1 do 10 Hz. Wiadomości MCM prawdopodobnie będą wysyłane również przez infrastrukturę w trybie rozgłoszeniowym z niższą częstotliwością do wszystkich uczestników ruchu [236].

Wiadomość świadomości niechronionych użytkowników dróg VAM (ang. Vulnerable Road Users Awareness Message)

Wiadomość świadomości niechronionych użytkowników dróg VAM służy do zwiększenia bezpieczeństwa niechronionych użytkowników dróg VRU (ang. Vulnerable Road Users) takich jak: piesi, rowerzyści, motocykliści czy zwierzęta. Jest wysyłana przez VRU i zawiera informacje o typie użytkownika oraz jego wymiarach, ale również o czasie, pozycji czy stanie ruchu. Dzięki temu samochody odbierające tę ramkę dowiadują się o obecności, rodzaju i statusie przechodzącego. Dzięki temu samochód może oszacować ryzyko kolizji i poinformować VRU o niebezpieczeństwie za pośrednictwem np. telefonu komórkowego. Wiadomość jest wysyłana rozgłoszeniowo z częstotliwością od 10 Hz do 0.2 Hz [254] i jest w przybliżeniu odpowiednikiem wiadomości CAM dla VRU.

Wiadomość ogłoszeniowa o usłudze SAEM/SAM (ang. Service Announcement Essential Message)

Wiadomość ogłoszeniowa o usłudze SAM jest wysyłana na początku komunikacji do poinformowania innych uczestników ruchu, jakich wiadomości używa urządzenie [236], [255].

Wiadomość o aktualizacji certyfikatu CUM (ang. Certificate Updating Message)

Wiadomość o aktualizacji certyfikatu jest częścią systemu bezpieczeństwa w V2X. Służy do pobierania i aktualizowania certyfikatów przez samochody. Jest realizowana na kanale niezwiązanym z bezpieczeństwem. Nie jest jeszcze w pełni zdefiniowana [236].

Wiadomość o strefie zarządzania interferencjami IMZM (ang. Interference Management Zone Message)

Wiadomość o strefie zarządzania interferencjami jest używana do identyfikacji obszaru zarządzania interferencjami w celu optymalizacji współdzielenia widma zarezerwowanego dla V2X z innymi systemami działającymi na tym samym paśmie np. kolei miejskiej czy stacjonarnymi usługami satelitarnymi [256].

Wiadomość świadomości jazdy w kolumnie PAM (ang. Platooning Awareness Message)

Wiadomość świadomości jazdy w kolumnie jest drugą wiadomością zbiorowej świadomości oprócz CAM. Jest używana do komunikowania się ciężarówek podczas jazdy w kolumnie. Jest wysyłana z częstotliwością od 10 do 20 Hz, czyli znacznie częściej niż wiadomość CAM [236].

Wiadomość kontroli jazdy w kolumnie PCM (ang. Platooning Control Message)

Wiadomość kontroli jazdy w kolumnie jest używana do kontrolowania jazdy ciężarówek poruszających się w kolumnie. Jest drugą ramką obok PAM używaną w komunikacji ciężarówek jadących w kolumnie. Jest wysyłana w trybie unicast lub broadcast z częstotliwością o 1 Hz do 50 Hz [236].

Wiadomość rozszerzonej mapy MAPEM (ang. Map Extended Message)

Wiadomość MAPEM jest również określana, jako wiadomość topologii drogi i pasów ruchu RLTM. Przesyła informacje o topologii drogi i pasów ruchu w obrębie skrzyżowania. Zawiera takie informacje, jak ilości pasów ruchu w danych kierunkach czy informacje, który pas służy do jazdy, w którym kierunku [257].

Rozszerzona wiadomość fazy i czasu sygnału SPATEM (ang. Signal Phase and Timing Extended Message)

Rozszerzona wiadomość fazy i czasu sygnału SPATEM jest również nazywana wiadomością manewru z sygnalizacją świetlną. Przesyła informacje o statusie sygnalizacji świetlnej oraz wskazówki podczas pokonywania skrzyżowania. Zawiera informacje o aktualnym kolorze światła oraz czasie pozostałym do jego zmiany, informacje o zielonej fali, dozwolonych i zalecanych manewrach dla danego samochodu na skrzyżowaniu [257].

Wiadomość informacji infrastruktury do pojazdu IVIM (ang. Infrastructure to Vehicle Information Message)

Wiadomość informacji infrastruktury do pojazdu jest wysyłana dynamicznie przez infrastrukturę do samochodów o obowiązujących znakach drogowych. Ponadto zawiera dodatkowe informacje

np. godziny obowiązujące dla danego znaku (np. od 8 do 20), informacje o ograniczeniach prędkości na danych odcinkach oraz zalecanych prędkościach podczas np. złych warunków pogodowych [257].

Wiadomość sterowania sygnalizacją świetlną SREM, SSEM (ang. Signal Request/Status Extended Message)

Wiadomość sterowania sygnalizacją świetlną jest wymieniana pomiędzy samochodami uprzywilejowanymi lub transportu publicznego w celu zmiany aktualnie panującego światła na sygnalizacji. Dzięki temu transport publiczny czy karetka pogotowia może szybciej przejechać przez skrzyżowanie. Takie żądanie może być wysyłane do wszystkich sygnalizatorów wzdłuż zaplanowanej trasy. Każdy sygnalizator w odpowiedzi odsyła wiadomość czy żądanie zostało zaakceptowane, odrzucone lub częściowo zaakceptowane [257].

Wiadomość korekcji pozycji GNSS GCM (ang. GNSS Correction Message), RRM (Roadside Ranging Message)

Wiadomość korekcji pozycji GNSS służy do wysyłania przez infrastrukturę korekt różnicowych D-GNSS, RTK, NRTK and PPP w celu dokładniejszego wyznaczenia lokalizacji samochodu [236], [257].

3.6.5 C-V2X

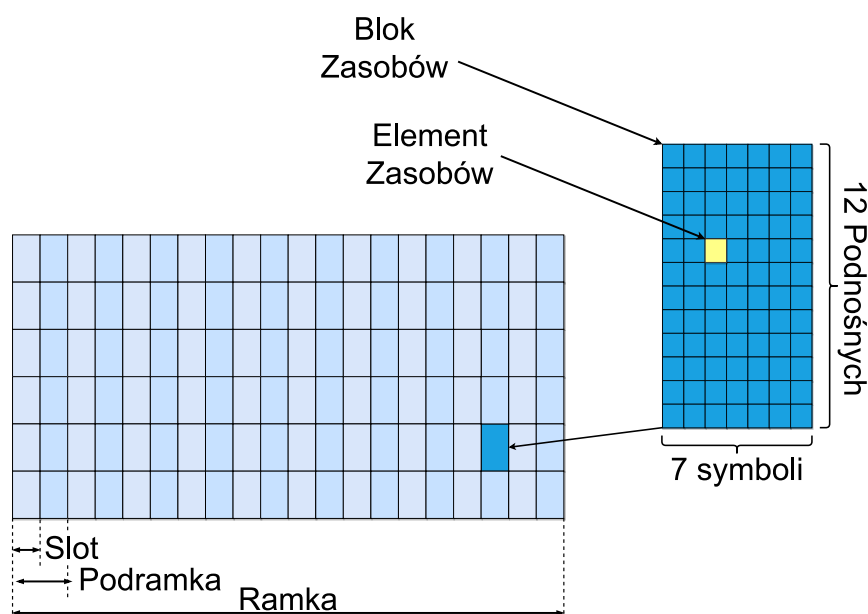
W celu umożliwienia komunikacji pomiędzy samochodami na większe odległości poza ich bezpośrednim zasięgiem stworzono technologię C-V2X. Wykorzystuje ona dostępną sieć komórkową do przesyłania komunikatów na większe odległości za pomocą interfejsu LTE-Uu. Jest to tzw. Tryb 3. Natomiast w przypadku, gdy samochody są w niewielkiej odległości lub poza zasięgiem sieci komórkowej mogą się bezpośrednio ze sobą komunikować z pominięciem stacji bazowej za pomocą interfejsu PC5. Ten autonomiczny tryb komunikacji jest nazywany trybem 4 lub czasami trybem bezpośrednim LTE (ang. LTE-direct) lub bezpośrednim C-V2X (ang. direct C-V2X). Komunikacja w trybie 4 działa w paśmie 5,9 GHz, czyli takim samym jak V2X [258].

LTE-Uu działa w dwóch trybach: rozgłoszeniowym, a dokładniej MBMS (ang. Multimedia Broadcast Multicast Service), w którym stacja bazowa rozsyła w jednym momencie tę samą wiadomość do wszystkich obiektów naraz lub w trybie unicast, gdzie jest już bezpośrednia komunikacja jeden do jeden. Standard przewiduje dopuszczalne opóźnienia do 100 ms, a w specyficznych przypadkach tylko 20 ms. Wiadomości typowo są wysyłane z częstotliwością do 10 Hz, natomiast w niektórych przypadkach mogą osiągnąć częstotliwość 50 Hz. Standard 3GPP przewiduje poprawne działanie do względnej prędkości pojazdu 500 km/h. Standard C-V2X może korzystać z wiadomości aplikacyjnych zdefiniowanych przez dowolny standard.

LTE-V2X wykorzystuje dostęp wielokrotny z podziałem częstotliwości na jedną nośną SC-FDMA (ang. Single-Carrier FDMA) i obsługuje kanały 10 MHz i 20 MHz, natomiast 5G-V2X wykorzystuje ortogonalne multipleksowanie z podziałem częstotliwości CP-OFDM (ang. Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) i może zajmować kanały do 100 MHz w przypadku działania na częstotliwościach poniżej 6 GHz [259]. Standard LTE-V2X określa maksymalną moc nadawczą na poziomie 23 dBm, a czułość odbiornika na poziomie -90,4 dBm [237]. Zasoby w obu standardach są oparte na strukturze macierzy czasowo-częstotliwościowej, gdzie dziedzina czasu jest podzielona na odstępy czasu TTI (ang. Transmission Time Interval) o długości 1 ms dla LTE i 0,25/0,5/1 ms dla 5G [259].

W dziedzinie częstotliwości zasoby radiowe są zorganizowane w elementy zasobów RE (ang. Resource Elements), które tworzą bloki zasobów RB (ang. Resource Blocks), jak pokazano na Rys. 62. Element zasobu jest najmniejszą dyskretną częścią ramki i jest tworzony przez jedną podnośną. Blok zasobów to najmniejsza jednostka, którą można przydzielić użytkownikowi.

Składa się najczęściej z 12 podnośnych, które mogą być rozmieszczone w LTE co 15 kHz, a w 5G co 15 / 30 / 60 kHz, co daje odpowiednio szerokość bloku zasobów w przypadku LTE 180 kHz, w przypadku 5G 180/360/720 kHz [259].



Rys. 62. Organizacja zasobów w LTE.

3.7 Podsumowanie rozdziału

W tym rozdziale przeanalizowano różne czujniki i systemy samochodu w celu zidentyfikowania, które z nich i w jakim stopniu biorą udział w jeździe autonomicznej. Dodatkowo zostały przeanalizowane zjawiska fizyczne wykorzystywane przez czujniki, w celu późniejszego zaproponowania odpowiednich technologii stymulujących. Został również wykonany przegląd typów i odmian czujników oraz określono, które z nich faktycznie są wykorzystywane w samochodach masowej produkcji.

W przypadku czujników ultradźwiękowych mimo częstego pomijania ich w analizie systemów biorących udział w jeździe autonomicznej potwierdzono ich zasadniczą rolę w monitorowaniu najbliższego otoczenia pojazdu. Są one głównie wykorzystywane w działaniu wszelkiego rodzaju systemach automatycznego parkowania. Przykładowo w publikacji [25], samochód Tesla z pełni funkcjonalną kamerą poprzez oszukiwanie czujników ultradźwiękowych doprowadzono do zatrzymywania w sytuacji, kiedy przeszkody nie było oraz kontynuowania jazdy, gdy fizyczna przeszkoda faktycznie istniała.

W przypadku systemów biorących udział w określaniu położenia takich jak GNSS, IMU, odometria i mapy wysokiej definicji również potwierdzono udział oraz istotny wpływ na jazdę autonomiczną. Lokalizacja satelitarna GNSS wspomagana różnego typu technologiami jak korekcje różnicowe zapewnia dokładność pojedynczych centymetrów, dzięki czemu samochód dokładnie może się zlokalizować w obrębie pasa. IMU i odometria zapewnia weryfikację oraz przybliżoną pozycję w momencie słabego lub przerywanego sygnału GNSS, co jest niezwykle niezbędne podczas jazdy w mieście pomiędzy wysokimi budynkami oraz w tunelach. Pozycja, orientacja i prędkość zapewniana przez te systemy jest osadzona w mapach wysokiej definicji zapewniających

dokładność mapowanych obiektów na poziomie pojedynczych centymetrów. Potwierdzeniem olbrzymiego wpływu tych technologii na automatyzację jazdy jest system Super Cruise firmy General Motors, który pomimo braku lidar, osiągnął poziom 2+ automatyzacji jazdy [260].

Analiza kamer wykazała, że kamery światła widzialnego są podstawowym i najważniejszym systemem percepcyjnym otaczającego świata. Najczęściej wykorzystywana jest pojedyncza, kolorowa kamera 2D, którą można spotkać w większości nowoczesnych samochodów. Drugim najpopularniejszym rodzajem jest kamera światła widzialnego w układzie stereo, który zapewnia pomiar odległości do obiektów. Taki układ jest już wykorzystywany w samochodach wyposażonych w bardziej zaawansowane systemy wspomagania kierowcy i automatyzacji jazdy. Analizując kamery wykorzystujące czas przelotu oraz światło strukturalne okazało się, że obecnie nie są one używane do monitorowania otoczenia samochodu. Dotyczy to zarówno kamer światła widzialnego, jak i bliskiej podczerwieni. Ponadto po analizie okazało się, że pasywne i aktywne kamery bliskiej podczerwieni, mimo iż w zeszłych latach były wykorzystywane do monitorowania otoczenia samochodu głównie po zmroku, obecnie już praktycznie nie są używane w tym celu. Zostały one zastąpione przez inne technologie, a jedną z nich jest termowizja, która jest wykorzystywana do wykrywania istot żywych szczególnie w nocy, gdzie zasięg widoczności kierowcy jest ograniczony. Niemniej kamery termowizyjne są dość kosztowne, dlatego tylko najwyższe modele samochodów są w nie wyposażane.

W przypadku radarów analiza wykazała, że radary obok kamer są podstawowym czujnikiem percepcyjnym, występującym w wielu samochodach. Dzięki dokładnemu określaniu odległości i prędkości obiektów są podstawowym czujnikiem biorącym udział w systemach jazdy wzdłużnej takich jak aktywny tempomat czy automatyczne awaryjne hamowanie. Zaskoczeniem było to, że pasmo 24 GHz zostało wyłączone dla radarów, dlatego najnowsze konstrukcje niezależnie od zasięgu wykorzystują częstotliwość 76-81 GHz.

W przypadku lidarów analiza wykazała, że jest to nadal nowa technologia, która ciągle dynamicznie się rozwija, czego wynikiem jest powstawanie nowych konstrukcji. Z tego powodu tylko pojedyncze modele masowo produkowanych samochodów są wyposażone w lidar. Niemniej dostarcza on prawdopodobnie najwięcej informacji o otoczeniu samochodu, gdyż posiada szerokie pole widzenia (nawet 360°), a przede wszystkim jest w stanie najprecyzyjniej określić odległość do wielu obiektów na raz. Występuje dużo typów lidarów, od mechanicznych po w pełni półprzewodnikowe. Dodatkowo różnią się wykorzystywanymi długościami światła, mechanizmami skanowania, polem widzenia czy zasięgiem działania. Tak duża różnorodność powoduje, że bez znajomości zastosowanego w samochodzie typu lidar, można mieć problem z wykonaniem testów metodą czarnoskrzynkową z wykorzystaniem symulatorów celu.

Ostatnią technologią jest V2X, który jest technologią przyszłościową zgodną z zasadą Internetu rzeczy, ale obecnie rzadko wykorzystywaną. Chociaż pojedyncze samochody są wyposażone w tę technologię to, aby była ona w pełni funkcjonalna pozostałe samochody oraz infrastruktura też muszą ją posiadać, co obecnie nie ma miejsca. Analiza wykazała, że V2X może być oparty na dwóch standardach: amerykańskim DSRC i europejskim ITS-G5, które ze sobą nie są kompatybilne. Wynikiem tego jest fakt, że dwa samochody wyposażone w system V2X w praktyce nie są zdolne do komunikacji. Sprawę dodatkowo pogarsza C-V2X działający w oparciu o standardy telefonii komórkowej, który nie jest kompatybilny ani z DSRC, ani z ITS-G5. Podsumowując, istnieją równolegle trzy standardy V2X, które nie są ze sobą kompatybilne i nie jest możliwa komunikacja pomiędzy nimi. Technologia V2X jest obecnie najmłodsza i wymaga jeszcze sporo pracy głównie w zakresie standardów, a w kolejnym etapie ustanowienia kompatybilności, ponieważ w przeciwnym razie użyteczność V2X będzie ograniczona.

4 Testowanie, weryfikacja i walidacja czujników i systemów używanych w automatyzacji jazdy

4.1 Wstęp

W zaawansowanych systemach wspomagania kierowcy oraz jeździe autonomicznej uczestniczy wiele skomplikowanych czujników i systemów. Większość z nich jest typowymi urządzeniami elektronicznymi, natomiast niektóre urządzeniami mechatronicznymi ze skomplikowaną mechaniką jak np. lidar. Dodatkowo każdy z tych czujników jest wyposażony w zaawansowane oprogramowanie, które nieraz zawiera wiele tysięcy linii kodu. Z tego powodu urządzenia elektroniczne i oprogramowanie są rozwijane w ściśle zdefiniowany sposób oraz testowane na wielu poziomach. W motoryzacji podstawowym standardem, według którego są rozwijane systemy, jest Automotive SPICE, który oparty jest na modelu V. Zapewnia on wytyczne jak system musi być projektowany, w jakiej kolejności, jakie testy muszą zostać wykonane oraz jaka dokumentacja musi zostać stworzona. Dzięki temu cała branża motoryzacyjna wytwarza urządzenia elektroniczne i oprogramowanie względem tych samych reguł, używając jednakowej terminologii, co ułatwia komunikację i wzajemne zrozumienie. Niemniej wraz z pojawianiem się coraz bardziej zaawansowanych systemów wsparcia kierowcy oraz automatyzacji jazdy standard Automotive SPICE stał się niewystarczający. W 2011 roku został opublikowany standard ISO 26262 definiujący bezpieczeństwo funkcjonalne urządzenia, systemu i pojazdu. Standard określa m.in. mechanizmy bezpieczeństwa, które muszą zostać zaimplementowane w samochodzie oraz definiuje dodatkowe techniki testowania, które muszą zostać wykonane w zależności od zdefiniowanego poziomu integralności bezpieczeństwa ASIL (ang. Automotive Safety Integrity Level). ASIL jest określany po dokładnej analizie HARA (ang. Hazard Analysis and Risk Assessment) uwzględniającej takie czynniki jak dotkliwość, kontrolowalność czy ekspozycje.

Z powodu tak skomplikowanych urządzeń testy są wykonywane na różnych poziomach. W branży motoryzacyjnej istnieje pewna chronologia rozwijania i testowania urządzeń, począwszy od testów modelu, przez testy oprogramowania i hardware'u, a skończywszy na testach samochodu. Poziomem, gdzie testuje się kompletne urządzenie, są testy HIL (Hardware-in The-Loop). Jest to najważniejszy poziom testów, który musi przejść każde rozwijane urządzenie. Jako że testowane urządzenie jest testowane poza samochodem, wszystkie inne współpracujące elektroniczne jednostki sterujące ECU (ang. Electronic Control Unit) muszą zostać zasymulowane. Testy funkcjonalne danego urządzenia polegają na stymulacji w odpowiedni sposób jego czujników, aby przetestować poprawność działania urządzenia. Są dwa zasadnicze sposoby testowania ECU: bezinwazyjne i inwazyjne. Optymalnym rozwiązaniem jest użycie metod bezinwazyjnych, czyli niewymagających ingerencji w konstrukcję testowanego urządzenia. Niestety w niektórych typach czujników jest bardzo trudno, a czasami wręcz fizycznie niemożliwe, odpowiednio stymulować czujnik, wykorzystując różne prawa fizyki - w takich przypadkach wykorzystuje się metody inwazyjne.

Jest kilka sposobów testowania systemów z wykorzystaniem metod inwazyjnych różniących się poziomem ingerencji. Najbardziej inwazyjną metodą jest całkowite odłączenie zarówno czujnika, jak i jego elektronicznej jednostki sterującej i wstrzyknięcie odpowiednich danych bezpośrednio na magistralę komunikacyjną. Ten sposób testowania jest wykorzystywany nie podczas testowania pojedynczego urządzenia, ale podczas testów całego systemu składającego się z wielu urządzeń. Stosowanie tej techniki wymaga dogłębnej znajomości przesyłanych struktur danych przez dane urządzenie, co utrudnia jej stosowanie. Mniej inwazyjnym sposobem jest pozostawienie podłączonej elektronicznej jednostki sterującej, odłączenie tylko czujnika i następnie wysłanie sygnałów elektrycznych do sterownika z pominięciem czujnika. Jako że często czujniki są produktami z półki, jest łatwiejszy dostęp do ich dokumentacji, co ułatwia zastosowanie tej techniki.

W metodach bezinwazyjnych nie następuje ingerencja w konstrukcje urządzenia i czujniki są stymulowane bezkontaktowo. Taka stymulacja może być wykonana na dwa sposoby.

Najłatwiejszą metodą jest ustawienie fizycznych obiektów w polu widzenia czujników. Obiekty te są odpowiednikami rzeczywistych przeszkód czy uczestników. Do tego celu używane są specjalne manekiny symulujące ludzi, makiety symulujące samochody i otoczenie. Ta metoda testowa jest stosunkowo łatwa i tania w realizacji w przypadku testów statycznych, gdzie obiekty nie muszą się poruszać przed czujnikiem. W momencie przeprowadzenia testów dynamicznych, gdzie każda przeszkoda musi się poruszać, rozwiązanie staje się bardziej kosztowne ze względu na potrzebę dodania napędów do każdego obiektu. Dodatkowo poruszające się obiekty fizyczne, czasami z dużymi szybkościami, stwarzają zagrożenie uszkodzenia samochodu oraz zagrożenie dla innych ludzi przebywających w ich otoczeniu.

Innym rozwiązaniem bezinwazyjnym jest stymulacja czujników samochodu bezprzewodowo OTA (ang. Over-the-Air) za pomocą do tego przeznaczonych urządzeń – stymulatorów / symulatorów celu. Środowisko testowe składa się z dwóch głównych komponentów: źródła danych dla stymulatora oraz stymulatora celu.

Źródłem danych jest przeważnie specjalistyczne oprogramowanie, które często jest symulatorem jazdy odpowiedzialnym za wykonywanie wirtualnych jazd testowych. Symulator w większości przypadków jest również w stanie w trójwymiarowym środowisku graficznym przedstawić aktualny scenariusz testu. Wirtualny samochód podczas wykonywania jazd testowych jest wyposażony w wirtualny czujnik np. radar, który jest źródłem danych do testów rzeczywistego radaru. W momencie wykrycia przeszkody oprogramowanie przesyła dane (odległość, kąt do przeszkody, prędkość względną) do stymulatora, który następnie taki obiekt symuluje.

Stymulatory/symulatory celu są urządzeniami służącymi do sztucznego, bezprzewodowego wygenerowania celów dla różnych czujników samochodu. Jako że różne czujniki w samochodzie wykorzystując różne zjawiska fizyczne, każdy czujnik musi mieć specjalny dla niego stymulator. Stymulując czujnik, następnie bada się jego odpowiedź i weryfikuje czy działa ono zgodnie z wymaganiami.

Jak już wspomniano, każdy czujnik musi mieć odpowiedni dla niego stymulator, gdyż do swojego działania wykorzystują różne zjawiska fizyczne. Dlatego w tym rozdziale zbadano, jak testowane są omówione w poprzednim rozdziale technologie, czy jest możliwość ich bezinwazyjnego testowania, czy istnieją dla nich stymulatory celu i na jakim są etapie zaawansowania. W przypadku braku tego typu urządzeń zaproponowano zasadę działania takiego stymulatora. Zważywszy na to, że celem tej pracy jest symulowanie świata zewnętrznego dla czujników samochodu w laboratorium bez ingerencji w samochód, wszelkie metody inwazyjne nie są tutaj analizowane.

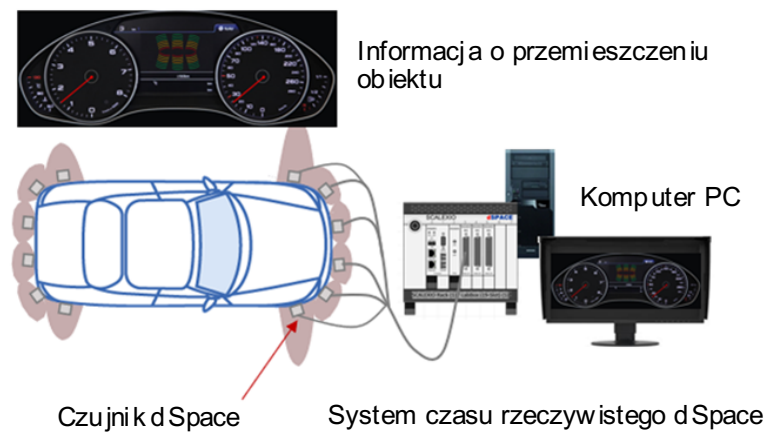
4.2 Czujniki ultradźwiękowe

Testy czujników ultradźwiękowych są definiowane przez normę ISO 17386, która określa m.in. metody testowe do wykrywania obiektów wzdłużnie oraz poprzecznie, a także walidację zasięgu czujników ultradźwiękowych za pomocą ustandaryzowanych, fizycznych obiektów. Innymi standardami, które w sposób pośredni dotyczą czujników ultradźwiękowych, są UN R79 określający przepisy dotyczące homologacji pojazdów w zakresie zautomatyzowanych układów kierowniczych oraz UN R158, która określa przepisy dotyczące homologacji urządzeń do ruchu wstecznego. Metody określone w tych standardach wymagają ustawiania rzeczywistych obiektów w polu widzenia czujnika, co jest standardowym podejściem w testowaniu wszelkiego rodzaju czujników służących do monitorowania otoczenia.

Występują również systemy testowe składające się z jednostki centralnej oraz głowic ultradźwiękowych, które są w stanie symulować obiekty w dowolnych odległościach. Jest to realizowane

za pomocą ustawienia głowicy ultradźwiękowej, w niewielkiej odległości ok. 1 cm od czujnika ultradźwiękowego. W momencie, kiedy testowany czujnik wysyła pakiet impulsów ultradźwiękowych w celu wykonania pomiaru odległości, pakiet ten jest przechwytywany przez głowicę systemu testowego. Po przechwyceniu fali jest ona przetwarzana tzn. jest analizowany jej kształt, częstotliwość, amplituda i ilość impulsów. Następnie modyfikowana jest amplituda zgodnie z założoną odległością, kątem oraz powierzchnią skuteczną radaru symulowanego obiektu. W ostatnim etapie fala ze zmodyfikowaną amplitudą jest odsyłana z opóźnieniem, uwzględniającym wpływ temperatury, symulując tym samym odległość do danego obiektu.

Taką technologię wykorzystuje m.in. system testowania czujników ultradźwiękowych firmy dSpace. Składa się on z głównej jednostki przetwarzającej SCALEXIO oraz dwunastu głowic ultradźwiękowych, jak pokazano na Rys. 63. System jest w stanie modyfikować kształt, częstotliwość, amplitudę, ilość impulsów oraz opóźnienie każdej głowicy z osobna. Dodatkowo obsługuje obliczanie bezpośrednich i pośrednich / krzyżowych sygnałów echa oraz echa wielokrotnych [261].



Rys. 63. Architektura systemu testowego czujników ultradźwiękowych firmy dSpace [262].

Kolejnym dostępnym systemem tego typu jest symulator celu czujnika ultradźwiękowego (ang. KT Ultrasonic Sensor Target Simulator) firmy Konrad. Podobnie jak wyżej opisany system, jest w stanie stymulować do dwunastu czujników ultradźwiękowych z częstotliwościami od 0 do 100 kHz i symulować odległość z rozdzielczością 0,15 mm. Również jest w stanie symulować oprócz 12 echa bezpośrednich dodatkowo 24 echa krzyżowe [263].

Trochę mniej zaawansowanym systemem jest moduł interfejsu czujnika ultradźwiękowego – M412, który wchodzi w skład systemu XPack4 firmy IPG. Jest on w stanie stymulować do 6 czujników w zakresie częstotliwości od 25 do 100 kHz z rozdzielczością odległości 0,15 mm. Dodatkowo jest w stanie symulować do 16 echa krzyżowych na jeden czujnik [264].

W tym momencie należy poruszyć kwestię wytłumienia oryginalnej fali dźwiękowej, gdyż jeśli nie zostanie ona wytłumiona, to odbije się od głowicy testowej i wróci do testowanego czujnika, określając jego rzeczywistą odległość. Eliminacja echa nie jest wymagana, gdy symulowana przeszkoda ma być bliżej niż rzeczywista odległość pomiędzy czujnikiem i głowicą. Jest to spowodowane tym, że po prostu sztuczne echo wróci szybciej do czujnika, niż echo prawdziwe. Natomiast w przypadku symulowania większych odległości wytłumienie echa jest konieczne [25]. Można to zrobić za pomocą materiału pochłaniającego fale dźwiękowe albo za pomocą techniki

aktywnego tłumienia [265]. W przypadku użycia materiału pochłaniającego dźwięk można głośniczkę testową umieścić w takim panelu lub w celu zwiększenia tłumienia stworzyć komorę bezechową. Technika aktywnego tłumienia polega na wysłaniu dźwięku o takiej samej częstotliwości i amplitudzie, ale przeciwnej fazie do oryginalnego sygnału. Fale spotykając się, łączą się i tworzą nową falę o niskiej amplitudzie lub całkowicie się znoszą. Taka technika jest używana powszechnie w słuchawkach z aktywną redukcją hałasu czy w łodziach podwodnych o obniżonej wykrywalności dla radarów (ang. stealth) [25].

4.3 Kamery

Obecnie najczęściej wykorzystywanymi kamerami w ADAS są standardowe kamery dwuwymiarowe rejestrujące światło widzialne w układzie pojedynczym lub podwójnym. Znacznie rzadziej są wykorzystywane kamery termowizyjne, a kamery bliskiej podczerwieni zarówno aktywne, jak i pasywne obecnie praktycznie nie są stosowane.

4.3.1 Kamery światła widzialnego

Kamery światła widzialnego są dość dobrze ustandaryzowane pod względem kalibracji, testowania i oceny. Testy polegają na badaniu różnych parametrów kamer takich jak: rozdzielczość i ostrość (ISO12233), odwzorowanie kolorów (ISO17321), utrata tekstury (ISO19567), szum wizyjny i zakres dynamiczny (ISO15739) czy wydajność przy słabym oświetleniu (ISO 19093). Do tego celu używa się odpowiedniego źródła światła o wysokiej jednorodności, określonej długości fali oraz natężeniu, a także odpowiednich przepuszczalnych tablic, nazywanych wykresami, które są ustawiane przed źródłem światła. Wykresy są elementami wymiennymi systemu testowego, ponieważ ich rodzaj zależy od typu testu i parametru, który chcemy zbadać. Przezroczyste obszary wykresów są podświetlone jednorodnie przez źródło światła, a następnie zarejestrowane przez badaną kamerę [266].

Testowanie ADAS opartego na pojedynczej kamerze najczęściej jest realizowane poprzez ustawienie dużego ekranu np. monitora LCD/LED lub ekranu i rzutnika przed przednią szybą samochodu i następnie przez wyświetlanie obrazu [267], [268], jak pokazano na Rys. 64. Ekran musi być ustawiony w odpowiedniej odległości od kamery, aby wyświetlany obraz w całości pokrywał pole widzenia kamery oraz aby jej ostrość była skupiona na ekranie [269]. Może być to szczególnie trudne i wymagać olbrzymiego ekranu w przypadku kamer szerokokątnych lub typu rybie oko [267]. Obrazy wyświetlane na ekranie mogą być wcześniej nagranyymi rzeczywistymi filmami albo obrazami sztucznie wygenerowanymi za pomocą odpowiednich narzędzi. W przypadku generowania obrazów istotnym aspektem jest wysoka jakość renderowanego obrazu z uwzględnieniem warunków oświetleniowych, warunków pogodowych oraz wynikających z tego odbić i refleksów [270]. Przykładowymi oprogramowaniami generującymi obrazy wysokiej jakości jest system testowy wykorzystujący grafikę generowaną przez silnik graficzny Unity 3D [271] czy symulator CARLA wykorzystujący silnik Unreal Engine 4 [272]. Istnieją również metody półwirtualne łączące obrazy rzeczywiste ze sztucznie wygenerowanymi, w których na nagrany rzeczywisty film są nakładane sztucznie wygenerowane obiekty [273].



Rys. 64. Stanowisko testowe do bezprzewodowej stymulacji kamery za pomocą ekranu [274].

W przypadku testów stereowizji sprawa się komplikuje, gdyż jako że każda z kamer widzi obiekty pod innym kątem, zastosowanie pojedynczego płaskiego ekranu nie ma sensu. Teoretycznie można dla każdej kamery ustawić osobne ekrany i na nich generować obraz odpowiednio przesunięty. Taka technika miałaby sens tylko w momencie, gdy kamery byłyby oddalone od siebie na sporą odległość tak, aby ekran jednej kamery nie wchodził w pole widzenia drugiej kamery. W samochodach w większości przypadków kamery są rozsunięte od siebie na niewielką odległość (do kilkudziesięciu centymetrów), co uniemożliwia zastosowanie tej metody. Alternatywnie można by było ustawić dwa osobne ekrany o niewielkiej przekątnej, ale bardzo blisko obiektywów badanych kamer. Istnieje przypuszczenie, że kamery mogą nie ustawić ostrości na tak blisko położonym ekranie. Dodatkowo ekran ustawiony tak blisko musiałby mieć bardzo wysoką rozdzielczość, aby kamera nie była w stanie dostrzec pojedynczych pikseli.

Jedynym sposobem na obejście wyżej wymienionych problemów jest dodanie odpowiedniego układu soczewek, które będą w stanie wygenerowany obraz przenieść w kierunku obiektywów kamer. Dzięki temu ekrany z wygenerowanym obrazem nie muszą być fizycznie ustawione przed testowanymi kamerami, a dodatkowo dzięki soczewkom można regulować dowolnie jego rozmiar.

Istnieje bardzo mało firm oferujących systemy testowe dla kamer stereo. Niemniej jedną z takich firm jest firma Konrad, która posiada takie rozwiązanie [275]. Niestety nie ma ogólnodostępnych informacji dotyczących działania tego systemu.

Z powodu utrudnionego testowania kompletnych kamer, często używa się technik inwazyjnych, polegających na rozsunięciu obiektywów kamer na wymaganą odległość. Następnie można generować dla nich odpowiednio przesunięte obrazy zgodnie z ich odległością przed modyfikacją, podobnie jak ma to miejsce podczas walidacji kamer tworzących obraz 360° wokół samochodu [269]. Z powodu problemów opisanych powyżej, obecnie kamery stereowizyjne waliduje się za pomocą rzeczywistych obrazów lub z całkowitym pominięciem obiektywów i przesyłaniem obrazów bezpośrednio do algorytmu wizyjnego [276]. Stereowizja wykorzystująca światło strukturalne jeszcze bardziej komplikuje sprawę, gdyż oprócz problemów występujących podczas testowania klasycznej stereowizji, dochodzi jeszcze generowanie odpowiedniego wzoru na obiekcie. Obecnie kamery stereo używają głównie światła widzialnego, dlatego temat testowania stereowizji, wykorzystującej światło podczerwone lub światło strukturalne, nie jest dalej analizowany.

4.3.2 Kamery termowizyjne

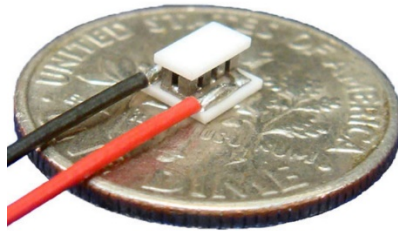
W przypadku kamer termowizyjnych stosowanie wszelkiego rodzaju monitorów nie ma większego sensu, gdyż emitowane przez monitory światło widzialne, nie jest rejestrowane przez kamerę. Obraz monitora zarejestrowany przez kamerę termowizyjną pokazuje rozkład temperatury

na ekranie zgodny z temperaturą pojedynczych pikseli. Niemniej temperatura piksela jest również zależna od koloru, który jest wyświetlany na ekranie. Ekran LCD wyświetlający jasne obrazy zużywa więcej energii niż podczas wyświetlania ciemnych obrazów [277]. Można by było zatem wyświetlać obrazy w różnych kolorach, generując tym samym obrazy rozpoznawalne przez kamerę termowizyjną. Niestety różnica w temperaturach nawet pomiędzy skrajnymi jasnościami jest zbyt mała, żeby obrazy były rozróżnialne. Ponadto, jak pokazano na Rys. 65, również rozkład temperatury jest niejednorodny w obrębie ekranu. Wyższa temperatura panuje na środku i dole ekranu i zmniejsza się w kierunku górnej i bocznych krawędzi, gdzie matryca ma lepsze chłodzenie.



Rys. 65. Obraz kamery termowizyjnej z widocznym niejednorodnym rozkładem temperatury w obrębie monitora [278].

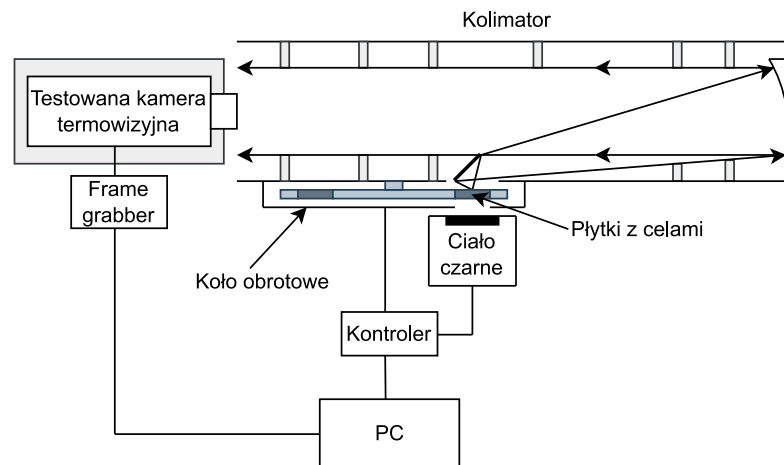
To definitywnie przekreśla pomysł generowania obrazu za pomocą zmiany wyświetlanego koloru, aczkolwiek stworzenie monitora zbudowanego z pikseli generujących promieniowanie termiczne jest ciekawym pomysłem. Obecnie nie ma na rynku dostępnych tego typu rozwiązań, ani nawet projektów czy badań w tej dziedzinie. Dlatego wymagałoby to zaprojektowania i zbudowania własnego urządzenia. Jednym z wymagań dotyczących takiego ekranu byłaby niska pojemność cieplna / bezwładność termicznych pikseli w celu dynamicznej zmiany temperatury. Takimi pikselami mogłyby być miniaturowe ogniwa Peltiera, które mogą mieć rozmiar nawet pojedynczych milimetrów, jak pokazano na Rys. 66. Jest to rząd wielkości większy niż rozmiar piksela standardowego monitora, natomiast można to skorygować, ustawiając „ekran Peltiera” w odpowiedniej odległości od kamery termowizyjnej. Ponadto obrazy rejestrowane przez kamery termowizyjne charakteryzują się niższą rozdzielczością, co ułatwia rozwiązanie problemu niższej rozdzielczości ekranu. Zmieniając polaryzację napięcia zasilania w ogniwie, można by było sterować temperaturą powierzchni ogniwa. Taki ekran pozwalałby jednocześnie symulować temperatury większe oraz mniejsze od temperatury otoczenia.



Rys. 66. Przykładowe miniaturowe ogniwo Peltiera o rozmiarze 2 x 4 mm [279].

Obecnie testy kamer termowizyjnych używanych w ADAS najczęściej polegają na ominięciu czujnika i wstrzykiwaniu wcześniej zarejestrowanych obrazów bezpośrednio do algorytmu przetwarzania obrazu [280]. W przypadku walidowania kompletnych kamer termowizyjnych z uwzględnieniem czujnika, testowanie polega na generowaniu statycznych celów o dokładnie znanym kształcie, wymiarach oraz temperaturze, a następnie porównaniu ich z obrazami zarejestrowanymi przez testowaną kamerę termowizyjną. Istnieją trzy główne rodzaje systemów testujących: systemy ze zmiennymi celami (obiektami), z regulowaną odległością, ale bez możliwości zmiany celów oraz jednocześnie ze zmiennymi celami i regulowaną odległością. Poniżej został omówiony typ pierwszy, ponieważ dwa kolejne typy można traktować jako jego uproszczone wersje [106].

Typ pierwszy, czyli system zmiennych celów jest zbudowany z ciała czarnego, kolimatora, obrotowej tarczy, zestawu celów, frame grabbera, kontrolera oraz komputera z oprogramowaniem, jak pokazano na Rys. 67.



Rys. 67. Uproszczony schemat systemu testowego kamery termowizyjnej ze zmiennymi celami. Rysunek przygotowany w oparciu o [106].











Ciało czarne jest jednym z najważniejszych elementów systemu kamer termowizyjnych. Jest używane do symulacji temperatury badanych celów. Ciało czarne pochłania całkowicie promieniowanie, jakie na nie pada, natomiast po ogrzaniu zaczyna promieniować, tym samym symulując temperaturę. Są dwa rodzaje używanych ciał czarnych: wnękowe oraz powierzchniowe. Wnękowe ciało czarne jest realizowane za pomocą wnęki w bloku materiału o dużej przewodności cieplnej (najczęściej stopu metali) i następnie regulowaniu jego temperatury za pomocą elementu grzejno-chłodzącego. Powierzchniowe ciało czarne jest uzyskiwane poprzez nałożenie warstwy

materiału o wysokiej emisyjności na płaski element metalowy o regulowanej temperaturze. Temperatura ciała czarnego jest regulowana poprzez wykorzystanie ogniwa Peltiera, które w zależności od polaryzacji przyłożonego napięcia chłodzi lub ogrzewa element emisyjny. W zależności od wybranej konstrukcji ciała czarne mają różne parametry takie jak: zakres symulowanych temperatur, rozdzielczość, stabilność czy jednorodność temperaturową [106].

Kolimator jest układem optycznym służącym do projekcji obrazów referencyjnych w kierunku testowanej kamery oraz symulowania bardzo dużej odległości pomiędzy celami a badaną kamerą [281].

Tarcza obrotowa jest to okrągła tarcza z wyciętymi miejscami na cele, która umożliwia automatyczną ich wymianę do projekcji przez kolimator lub do bezpośredniej obserwacji przez testowaną kamerę [106].

Cele są to metalowe „wkładki” z wyciętymi otworami o różnych kształtach, jak pokazano na Rys. 68. W zależności od testu różne rodzaje celów są wykorzystywane. Cele są umieszczone przed ciałem czarnym. Przez otwory w celach przechodzi promieniowanie termiczne generowane przez ciało czarne, symulując tym samym temperaturę celu, która następnie jest rejestrowana przez testowaną kamerę [106].

				
4-bars target for testing MRTD	Square target for testing NETD, SITF, FOV, MTF calibration	Pinholes for MDT and Line of Sight boresight testing	Slit Target	Step or Half-moon target for testing MTF
				
Cross target for testing FOV, Distortion, Alignment	Resolution Target See (2)	Gray Scale Target	Boresight Target for alignment of multi camera system: Laser to FLIR / Laser to CCD	LOS Target for Line of Sight alignment

Rys. 68. Przykładowe cele używane w testach kamer termowizyjnych [282].

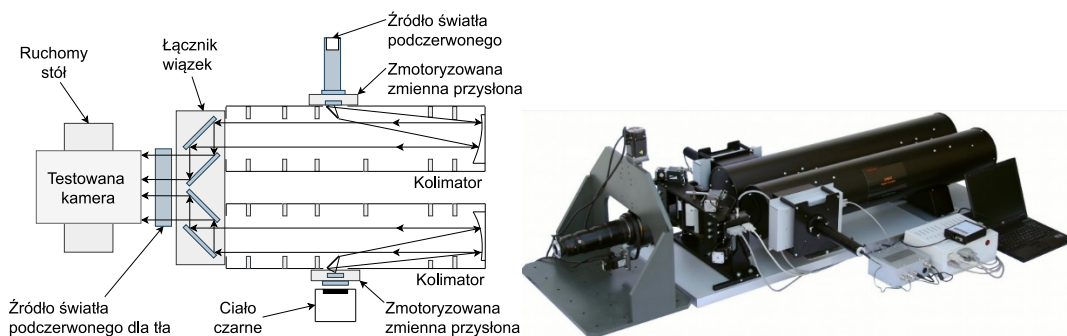
Kontroler jest odpowiedzialny za kontrolowanie temperatury ciała czarnego oraz sterowanie tarczą obrotową w celu wymiany celów.

Komputer z pomocą frame grabbera jest odpowiedzialny za przechwycenie obrazu zarejestrowanego przez testowaną kamerę termowizyjną, a specjalistyczne oprogramowanie za pomiar parametrów testowanej kamery na podstawie zarejestrowanego obrazu [106].

Ta metoda nie jest w stanie generować obiektów o dowolnym kształcie ani w dowolnym obszarze widzenia kamery termowizyjnej, co jest niezbędne do symulowania rzeczywistych scenariuszy w laboratorium. Dlatego tego rodzaju stanowisko testowe nie nadaje się do bezkontaktowego symulowania świata zewnętrznego w czasie rzeczywistym dla kamery termowizyjnej. Alternatywnie można by było pominąć kamerę i bezpośrednio wstrzykiwać wcześniej zarejestrowane lub sztucznie wygenerowane obrazy do algorytmu przetwarzania obrazów, natomiast ten sposób wymagałby ingerencji w samochód i elektronikę, co nie spełnia wymagań postawionych w rozdziale 2. Zaletą jest fakt, że są dostępne zbiory już nagranych obrazów zarówno dla kamer światła widzialnego, jak i bliskiej czy dalekiej podczerwieni [280]. Dzięki temu nie ma potrzeby nagrywania własnych obrazów, a nawet posiadania drogiej kamery termowizyjnej w momencie, gdy pra-

ujemy np. tylko nad algorytmem przetwarzania obrazu. Alternatywnie można skorzystać również z generatora sztucznych obrazów termowizyjnych np. takiego jak Simterm, aby samemu stworzyć dowolną scenę [283].

Urządzeniem obecnie na rynku, któremu najbliższym jest do spełnienia wymaganych założeń, co do bezkontaktowego generowania celów jest Simat, zaprezentowany na Rys. 69. Jest to zaawansowany projektor obrazu zdolny do dynamicznej symulacji w zakresie podczerwieni kilku niewielkich obiektów na quasi-jednolitym tle o sterowalnej temperaturze, jak pokazano na Rys. 70. Jest on w stanie równocześnie symulować dynamicznie dwa obiekty (regulowana intensywność oraz wielkość) oraz sterować ich trajektorią. Istnieje możliwość symulowania większej ilości celów, natomiast wtedy nie ma możliwości regulacji ich rozmiaru. Symulowane obiekty są generowane na tle wykonanym z ciała czarnego o sterowalnej temperaturze, dzięki czemu można symulować temperaturę otoczenia. Zasadniczo celem Simata jest umożliwienie symulacji dla kamer termowizyjnych typowych obiektów latających, takich jak samoloty czy śmigłowce [284]. Problemem jest to, że w tym symulatorze cele dynamiczne mogą przyjmować jedynie kształt rombu lub trójkąta. Takie figury geometryczne nie do końca dokładnie przybliżają kształt człowieka czy zwierzęcia i z tego powodu mogą być źle zaklasyfikowane przez algorytm przetwarzania obrazu. Podsumowując, pomimo że ten konkretny model symulatora nie jest przystosowany do symulowania istot żywych, to pokazuje on, że jest możliwość zbudowania systemu testowego typu HIL, który w bezkontaktowy sposób będzie w stanie generować cele w czasie rzeczywistym do testowania kamer termowizyjnych. Jeśli taki powstał, musiałby następnie być zintegrowany z oprogramowaniem do wirtualnych jazd testowych, który byłby odpowiedzialny za generowanie odpowiednich obrazów zgodnie z polem widzenia testowanej kamery i jej umiejscowieniem na samochodzie.



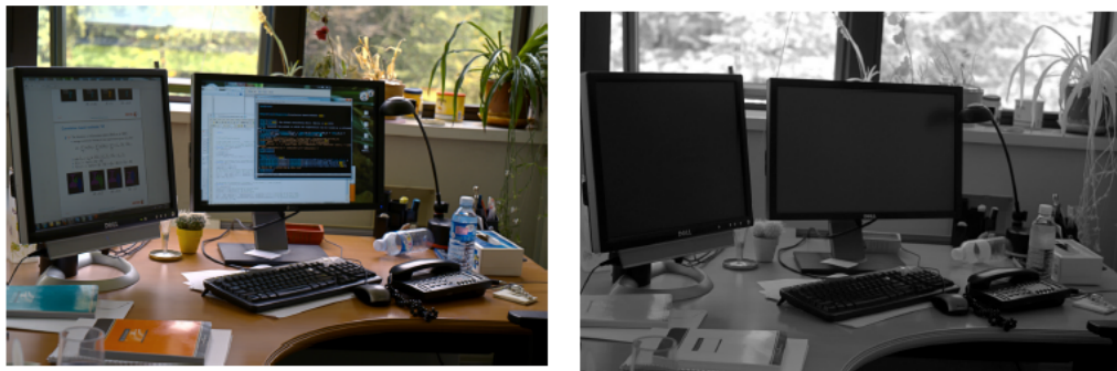
Rys. 69. Uproszczonego schematu symulatora celów termowizyjnych po lewej i jego rzeczywistej realizacji po prawej [285].



Rys. 70. Przykładowy obraz generowany przez symulator celów termowizyjnych - Simat [285].

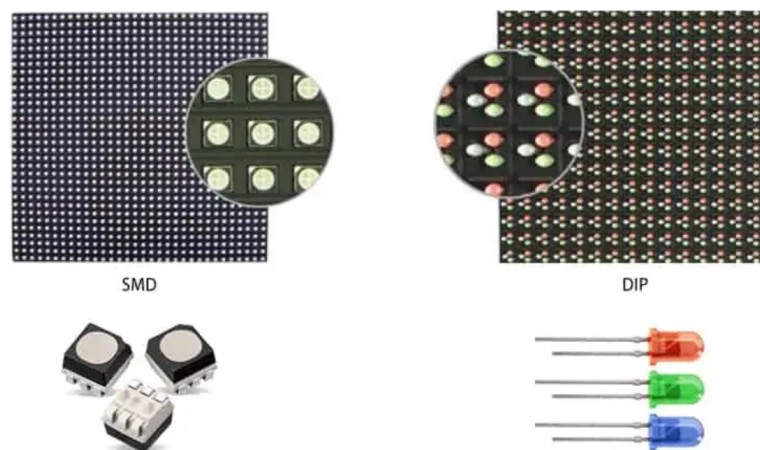
4.3.3 Kamery bliskiej podczerwieni

Podobnie jak w przypadku kamer termowizyjnych używanie monitora do wyświetlania obrazów dla kamery bliskiej podczerwieni nie ma zastosowania. Kamera termowizyjna jest w stanie zarejestrować rozkład temperatury na ekranie, natomiast obraz widziany w kamerze bliskiej podczerwieni jest jednolity, bez możliwości dostrzeżenia żadnych szczegółów, co można zobaczyć na Rys. 71. Jest to spowodowane tym, że monitory LCD i LED nie generują odpowiednio wcale [286] lub w bardzo małej ilości [287] światła podczerwonego NIR i SWIR, które może być rejestrowane przez kamerę. Wynika to głównie z faktu, że promieniowanie podczerwone jest szkodliwe dla oczu i producenci monitorów ograniczają jego emisję w swoich produktach.



Rys. 71. Po lewej obraz zarejestrowany zwykłą kamerą, po prawej obraz zarejestrowany przez kamerę bliskiej podczerwieni [288].

Na rynku nie ma dostępnych monitorów i ekranów, które generują obrazy za pomocą diod lub laserów podczerwonych. Co prawda, w klasycznych monitorach są czasami wykorzystywane diody podczerwone, ale tylko w celu uzyskania ekranu dotykowego, a nie do wyświetlania obrazów [289]. Istnieją jedynie macierze diod IR wysokiej mocy, które służą jako oświetlacze scenarii dla kamer podczerwieni, a nie do bezpośredniego generowania obrazów w kierunku kamery [290]. Podobnie jak w przypadku kamer termowizyjnych brakuje produktów, projektów, a nawet konceptów tego rodzaju symulatorów. Dlatego w celu stworzenia takiego monitora jednym z pomysłów jest wymontowanie ze standardowego monitora diod RGB i zamianie ich diodami podczerwonymi. Ten pomysł może być trudny w realizacji, gdyż matryca ekranu monitora jest elementem o dużym poziomie scalenia i bardzo małych pikselach rzędu 0,2 mm - przez to bardzo trudnym w modyfikacjach. Dlatego alternatywnie można by było użyć ekranów LED, które są zbudowane z dyskretnych diod LED typu DIP lub SMD, jak pokazano na Rys. 72. Dzięki temu o wiele łatwiej jest wylutować oryginalną diodę LED i podmienić ją na diodę podczerwoną. Problemem stanowi fakt, że większość dostępnych ekranów jest kolorowych, używających diod RGB, które mają więcej wyprowadzeń niż dioda IR, co utrudnia wymianę. Z tego powodu łatwiej jest użyć ekranu DIP, gdyż każdy piksel jest zbudowany z trzech osobnych diod LED. Jako że spadki napięcia na diodach LED zależą od koloru, diodę IR jedynie można umieścić w miejsce diody czerwonej, gdyż mają podobny spadek napięcia wynoszący około 1,5 V. Diody pozostałych kolorów mogłyby zostać w matrycy, gdyż światło przez nie emitowane nie jest rejestrowane przez kamerę bliskiej podczerwieni.



Rys. 72. Porównanie ekranów LED zbudowanych z diod SMD (po lewej) i diod DIP (po prawej) [291].

Obecnie testowanie kamer NIR dla motoryzacji praktycznie nie jest ustandaryzowane. Istnieje kilka standardów do testowania kamer bliskiej podczerwieni do widzenia maszynowego - EMVA 1288 oraz kamer przemysłowych - BS ISO 18251, ISO 10878, ISO 10880 i publikacji naukowych [292], natomiast nie ma standardów, które regulują testowanie i ocenę kamer podczerwonych dla motoryzacji. W tej sytuacji testy kamer są zwykle wykonywane przy użyciu zmodyfikowanej metodologii testowania kamer termowizyjnych oraz kamer światła widzialnego. W systemach pomiarowych ciała czarne są zastępowane źródłami jednorodnego światła podczerwonego, a cele używane w kamerach termowizyjnych są zastępowane celami wykorzystywanymi w testach kamer światła widzialnego [293].

4.4 GNSS

Z uwagi na to, że technologia GNSS jest już od wielu lat stosowana na ogromną skalę, metody, procedury oraz sprzęt testowy są dojrzałe i szeroko dostępne. Podstawowe testy odbiorników GNSS składają się z 6 typów testów odpowiadających na poniższe pytania [294]:

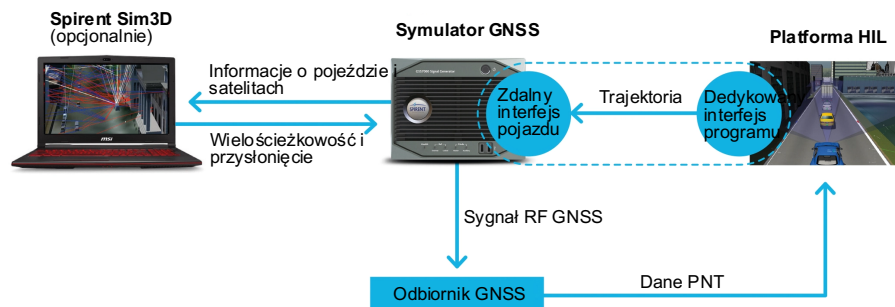
1. Jak szybko odbiornik po uruchomieniu zimnym / ciepłym / gorącym będzie w stanie wyznaczyć swoje położenie?
2. Jaka minimalna moc sygnałów satelitarnych pozwala na wyznaczenie położenia?
3. Jaka minimalna moc sygnałów satelitarnych pozwala utrzymywać już wcześniej wyznaczone położenie?
4. Jak dokładnie zostało wyznaczone położenie?
5. Jaki jest czas po utracie sygnału do ponownego wyznaczenia położenia?
6. Jak zachowuje się odbiornik narażony na typowe zakłócenia GNSS?

Oprócz klasycznego testowania w terenie z wykorzystaniem dostępnych sygnałów satelitarnych występują trzy podejścia do testowania GNSS w pomieszczeniach: Live-Sky (wzmacniacz GNSS), nagrywanie i odtwarzanie oraz symulacja. Jako że sygnały GNSS w budynkach są generalnie trudno dostępne, to niemożliwe jest testowanie odbiorników w pomieszczeniach z wykorzystaniem rzeczywistych sygnałów satelitarnych. Aby można było to zrobić, stosuje się technikę wzmacniania / powtarzania sygnału GNSS. Polega ona na przechwytywaniu rzeczywistych sygnałów GNSS przez specjalną antenę umieszczoną na budynku, a następnie na wzmacnianiu sygnału i w czasie rzeczywistym przesłaniu go do odpowiedniego pomieszczenia [295].

Drugą metodą jest nagrywanie i odtwarzanie. Polega ona na przemieszczaniu się samochodem i za pomocą odpowiedniego urządzenia nagrywaniu rzeczywistych, analogowych sygnałów GNSS. Nagrywanie polega na przechwytywaniu analogowego sygnału GNSS, konwertowaniu go do postaci cyfrowej i zapisywaniu na różnych nośnikach pamięci masowej, jak dyski twarde

czy karty pamięci. Następnie już po powrocie do siedziby, w pomieszczeniu można taką wcześniej zapisaną sekwencję odtworzyć. Dzięki tej metodzie jest możliwość wykonania jednego testu w terenie, a następnie wielokrotnego powtórzenia go w laboratorium. Zaletą jest to, że taki nagrany sygnał zawiera rzeczywiste sygnały wraz z wszystkimi niedoskonałościami wynikającymi z błędów GNSS, co pozwala w laboratorium przetestować odbiornik z wysoką dokładnością.

Ostatnią metodą testowania jest użycie symulatorów sygnału GNSS. Symulatory GNSS są urządzeniami, które sztucznie są w stanie symulować wysyłane przez satelity sygnały, zgodnie z wcześniej przygotowanymi parametrami. Są to sygnały analogowe wysyłane zgodnie ze specyfikacjami danych konstelacji GNSS. Różnicą jest to, że nie muszą przechodzić przez warstwy atmosfery, tym samym fala nie zawiera błędów. Dlatego symulatory mają możliwość dowolnego dodawania i kontrolowania typowych błędów działających na rzeczywisty sygnał radiowy np. błędów atmosferycznych, błędów zegara atomowego i efemeryd, błędów wynikających z wielościeżkowości czy efektów związanych z poruszaniem się odbiornika. Symulatory dzielą się na jednokanałowe i wielokanałowe. Symulatory jednokanałowe są w stanie zasymulować tylko jedną satelitę i z tego względu nie jest możliwe zasymulowanie położenia odbiornika, do którego są wymagane minimum 4 satelity. Jednostki jednokanałowe są powszechnie stosowane do testów na końcu linii produkcyjnej (ang. End of Line), gdzie stymulacja jednego kanału odbiornika wystarcza, aby stwierdzić, że układ działa. Symulatory wielokanałowe są w stanie symulować wiele satelitów jednocześnie. Wysyłając z różnych kanałów wiadomości odpowiednio opóźnione, symuluje się różną odległość satelitów do odbiornika, a tym samym jego pozycję. Zarówno symulatory jedno-, jak i wielokanałowe są w stanie symulować prędkość odbiornika, modulując częstotliwość zgodnie z zasadą Dopplera. W zależności od zaawansowania symulatora może on również symulować wspomagany GNSS, sygnały systemów SBAS i GBAS, satelity różnych konstelacji np. GPS, GLONASS, ale również symulować satelity, które jeszcze nie istnieją [296]–[298]. Przykładowa konfiguracja testowa została pokazana na Rys. 73, gdzie symulator GNSS jest zintegrowany ze stanowiskiem testowym typu hardware-in-the-loop. Zewnętrzne modele pojazdów i wielościeżkowe modelowanie środowiska są generowane synchronicznie w połączeniu z sygnałami GNSS, a następnie wizualizowane w programie Spirent Sim3D [299].



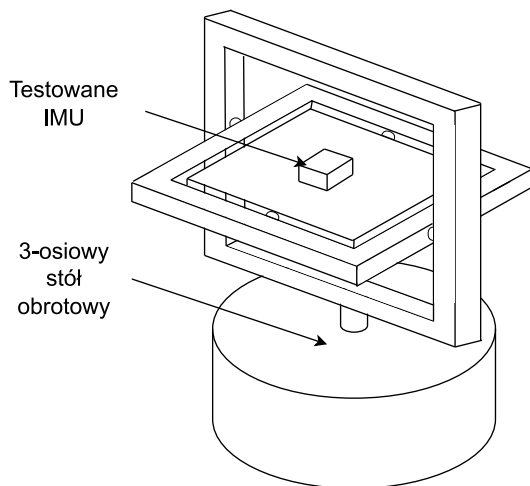
Rys. 73. Przykładowa konfiguracja systemu testowego do GNSS [299].

4.5 IMU

Testowanie czujników IMU jest zdefiniowane m.in. w standardzie o zalecanych praktykach dla urządzeń testowych, oprzyrządowania, akwizycji i analizy danych dla czujników bezwładnościowych [300] oraz zalecanych praktykach precyzyjnego testowania przyspieszeniomierzy liniowych w wirówce [301]. Na podstawie tych standardów został dokonany przegląd technik testowych.

4.5.1 Stoły obrotowe

Testowanie IMU w najprostszej wersji wykorzystuje stoły obrotowe i przyspieszenie wynikające z przyciągania ziemskiego. Stoły obrotowe mogą być jedno, dwu lub trójosiowe. Testy z wykorzystaniem stołu obrotowego polegają na zamontowaniu czujnika na stole i następnie obracaniu stołu wokół różnych osi w stosunku do wektorów grawitacji i rotacji Ziemi, jak przedstawiono na Rys. 74. Uzyskanie wglądu w działanie wszystkich osi IMU może być często osiągnięte na dwuosiowym stole obrotowym (szczególnie w przypadku testowania pozycji dyskretnych), chociaż niektóre manewry mogą być łatwiejsze do wykonania na stole obrotowym z trzema osiami. Wadą tej metody jest to, że jest ograniczona tylko do testowania przyspieszeń równych przyspieszeniu ziemskiemu [300]. Przykładowy 3-osiowy stół zaprezentowano na Rys. 75.



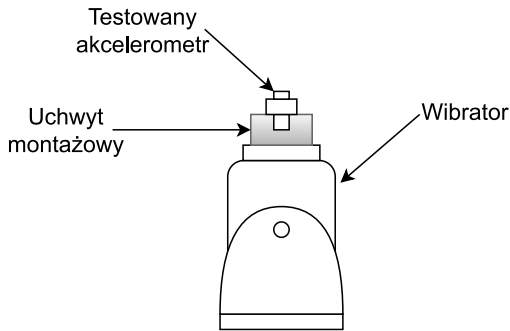
Rys. 74. Schemat 3-osiowego stołu obrotowego.
Rysunek przygotowany w oparciu o [300].



Rys. 75. Przykładowy 3-osiowy stół obrotowy
[302].

4.5.2 Wibratory

W celu przetestowania działania IMU z większymi przyspieszeniami niż przyspieszenie ziemskie są wykorzystywane wibratory. Wibrator jest to urządzenie, które drga z odpowiednią częstotliwością i amplitudą. Testy polegają na zamocowaniu badanego IMU/akcelerometru na wibratorze, jak pokazano na Rys. 76. Wibratory mogą być elektrodynamiczne albo hydrauliczne. Elektrodynamiczne charakteryzują się małym skokiem międzyszczytowym typowo ok. 2 cm i wysokimi przyspieszeniami przy wysokich częstotliwościach drgań. Dzięki temu urządzenia są niedużych rozmiarów. Przykładowy wibrator zaprezentowano na Rys. 77. Wibratory hydrauliczne mają znacznie większy skok ok. 50 cm i są używane, kiedy jest wymagane wysokie przyspieszenie przy niskiej częstotliwości [300]. Większość wibratorów jest jednoosiowych, natomiast również istnieje kilku producentów zapewniających rozwiązania trzyosiowe [303]. Dzięki testom z użyciem wibratorów można przetestować poprawność pomiaru przyspieszeń od bardzo małych do bardzo dużych oraz zweryfikować pasmo przenoszenia IMU. Tego typu urządzenia są w stanie wygenerować bardzo duże przyspieszenia, ale niestety tylko w krótkim czasie, gdyż po osiągnięciu maksymalnego wychylenia kierunek przyspieszenia się zmienia. To sprawia, że ta metoda nie jest w stanie potwierdzić, że IMU mierzy poprawnie wysokie przyspieszenie przez dłuższy czas.



Rys. 76. Schemat wibratora. Rysunek przygotowany w oparciu o [300].



Rys. 77. Przykładowy wibrator [304].

4.5.3 Wirówki

Wirówka to urządzenie, które obracając się wokół własnej osi, wytwarza siłę odśrodkową poddającą próbkę działaniu wysokiego, trwałego przyspieszenia, jak pokazano na Rys. 78. Wirówka może mieć kształt dysku [305] lub pojedynczego ramienia z przeciwwagą wyrównowazającą, jak pokazano na Rys. 79. Generowane przyspieszenie jest zależne od prędkości obrotowej i długości ramienia wirówki. Ramię wirówki obraca się w płaszczyźnie poziomej wokół centralnej piasty, która zawiera silnik napędowy oraz czujnik prędkości kątowej [300]. Badany czujnik bezwładnościowy jest zamontowany na końcu ramienia wirówki i zasilany za pomocą pierścieni ślizgowych [306]. Prędkość kątowa wirówki jest utrzymywana na żądanej wartości w celu wygenerowania odpowiedniego przyspieszenia zgodnego ze wzorem (35).

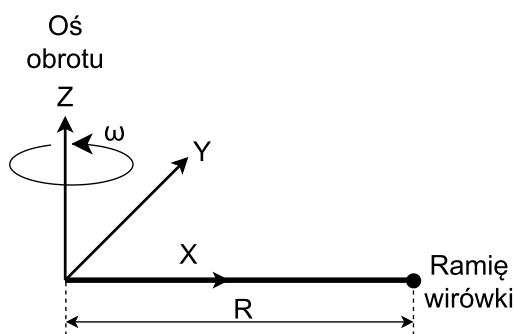
$$a = \omega^2 r \quad (35)$$

gdzie:

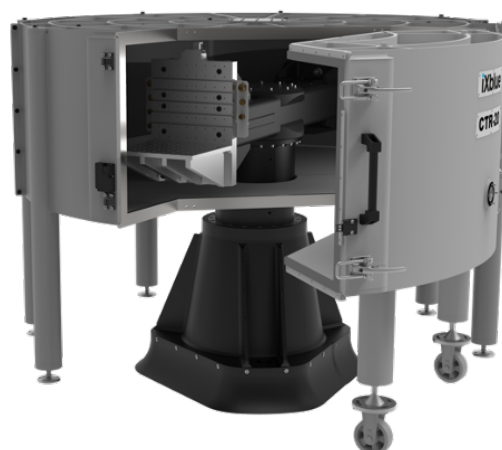
r – długość ramienia wirówki,

ω – prędkość kątowa wirówki

Wirówka generuje przyspieszenie tylko wzdłuż jej ramienia, co powoduje, że tylko jedna oś jest poddawana testom i wykrywa generowane przyspieszenie. Co prawda oś pionowa również wykrywa przyspieszenie, natomiast ono pochodzi od przyciągania grawitacyjnego. W celu poddania testom wszystkich trzech osi jednocześnie umieszcza się próbkę pod pewnym kątem tak, aby generowane przyspieszenie wirówki rozkładało się na wszystkie trzy osie IMU. Obrót próbki o 45° wokół dowolnych dwóch osi powoduje równomierne rozłożenie generowanego przyspieszenia. Na końcu ramienia wirówki można również zamontować obrotowy stół, który pozwoli na swobodną orientację czujnika i zmiany jego orientacji podczas działania wirówki. Dodatkowo dzięki obrotowemu stołowi można precyzyjnie ustawić próbkę wzdłuż ramienia tak, aby przyspieszenie było wykrywane tylko w jednej osi [305]. Dzięki tego typu testom można potwierdzić poprawność działania IMU na wysokie, trwałe przyspieszenie oraz określenie zdolności przeciążeniowej akcelerometru. Zasilanie i komunikacja są doprowadzane do próbki poprzez pierścienie. Alternatywnie można użyć komunikacji bezprzewodowej zapewniającej wyższe prędkości przesyłu danych oraz odporność na wysokie przeciążenia, o ile antena jest zlokalizowana blisko osi obrotu wirówki [306].



Rys. 78. Uproszczony schemat działania wirówki. Rysunek przygotowany w oparciu o [301].



Rys. 79. Przykładowa wirówka [307].

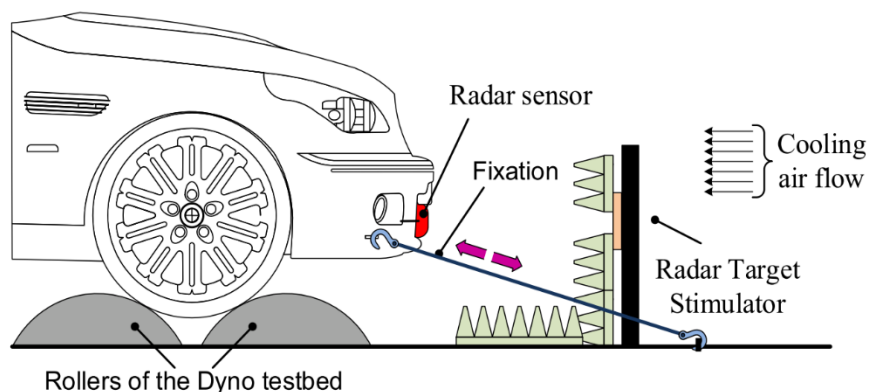
Niestety do testów IMU nie ma urządzeń elektronicznych, będących go w stanie przetestować bezkontaktowo. Nie ma obecnie technologii, która byłaby w stanie elektrycznie, ani w żaden inny sposób bezprzewodowy generować przyspieszenia, które mógłby wykrywać czujnik. Jediną metodą jest faktyczne wprawienie w ruch badanego czujnika. Dodatkowym problemem jest to, że wirówka generuje przyspieszenie tylko w jednym kierunku. W momencie symulacji przyspieszenia z wartością przeciwną, jedynym rozwiązaniem jest obrócenie czujnika o 180° , ale obrót zostanie wykryty przez żyroskop IMU. Z tego powodu nawet wirówka z 3-osiowym stołem obrotowym nie jest w stanie odwzorować rzeczywistego świata, gdyż generowanie przyspieszenia w 3 osiach za pomocą obrotów IMU zawsze będzie rejestrowane przez żyroskopy.

4.6 Radar

W celu zasymulowania obiektu można to zrobić ustawiając faktyczny obiekt przed radarem lub wykorzystać symulator celu radarowego RTS (ang. Radar Target Simulator). RTS jest to urządzenie elektroniczne, które jest w stanie wygenerować sztuczne cele, wykrywane przez czujnik radarowy jako rzeczywiste obiekty [308].

Nowoczesne radary przetwarzają odebraną falę wieloetapowo, aby jak najskuteczniej i niezawodnie wyodrębnić tylko odpowiednie obiekty. Po pierwsze sprawdzana jest energia sygnałów względem kształtu fali. Po drugie sprawdzana jest spójność pomiędzy obliczoną odległością i prędkością. Jeśli relacje fazowe pomiędzy prędkością i odległością są losowe, to wskazuje, że obiekt jest nierealny. W ostatnim kroku wykryte cele i ich parametry są wprowadzane do algorytmu śledzącego, który przeprowadza kontrolę wiarygodności zmian ruchu oraz rozmiaru w stosunku do modeli fizycznych. Wszystkie cele wykazujące nierealistyczne zachowanie (np. zmiana odległości nie jest związana z informacją dopplerowską) są tłumione. Te zagadnienia muszą być wzięte pod uwagę przez RTS, gdyż w przeciwnym razie symulowana wiązka zostanie odrzucona przez radar jako fałszywa i obiekt nie zostanie zasymulowany [151].

Wcześniej falę elektromagnetyczną wysłaną z radaru należy wytłumić, aby nie powróciła ona do odbiornika. Można to zrobić odpowiednio rozkładając wokół radaru specjalne panele tłumiące fale elektromagnetyczne [308], jak pokazano na Rys. 80. Optymalnym rozwiązaniem jest stworzenie komory bezchowej wykorzystującej takie panele. Wtedy sygnały wysyłane przez radar po wielokrotnym odbiciu od ścian zostaną całkowicie wytłumione [169].



Rys. 80. Elementy systemu testowego radaru dla pojazdu w pętli VIL z widocznymi panelami pochlaniającymi fale radarowe [308].

Po odebraniu oryginalnej fali z radaru musi ona zostać odpowiednio zmodyfikowana przez symulator celu radarowego, aby symulować dystans, prędkość oraz powierzchni skuteczną radaru symulowanego obiektu. Aby symulować odległość należy odebrany sygnał opóźnić. Można to zrobić cyfrowo za pomocą np. układu FPGA lub analogowo za pomocą linii opóźniających [151]. Alternatywnym sposobem symulowania odległości jest przesunięcie częstotliwości. Następnie, aby zasymulować prędkość obiektu, jest zmieniana faza sygnału za pomocą modulatora wektorowego. Ostatnim parametrem jest zmiana skutecznej powierzchni radaru, która jest osiągnięta poprzez odpowiednie tłumienie odebranego sygnału [169]. Tłumienie również jest zależne od odległości obiektu od radaru i musi być uwzględnione. W przeciwnym razie cel będzie się powiększał wraz ze wzrostem odległości, co jest nienaturalnym zachowaniem i może zostać odrzucony przez algorytm radaru [151].

Na rynku istnieją mniej lub bardziej zaawansowane symulatory celu radarowego. Pierwszą grupą urządzeń są systemy testowe typu „end-of-line”. Są to prostszego typu urządzenia z mniejszymi możliwościami, służące do podstawowych testów. Mogą np. ograniczać się do generowania dynamicznie tylko jednego obiektu i kilku obiektów statycznie. Dzięki temu tego typu urządzenia są znacznie tańsze [309].

Bardziej skomplikowanym urządzeniem jest RTS zaprezentowany w [151]. Jest on w stanie generować kilka obiektów równocześnie w czasie rzeczywistym. Składa się z części analogowej, która odpowiada za generowanie obiektów w niewielkiej odległości od 2 do 30 m oraz części cyfrowej zbudowanej w oparciu o FPGA do generowania obiektów w większych odległościach do 300 m.

Na rynku są również dostępne wysoko skomplikowane urządzenia mogące być użyte do pokrycia szerokiego spektrum testów. Są w stanie symulować dynamicznie wiele obiektów naraz, zmieniać ich RCS, prędkość oraz kąt. Jednym z nich jest sprzęt VRTS (Vehicle Radar Test System) firmy National Instruments zaprezentowany na Rys. 81. Jest on w stanie symulować wiele obiektów równocześnie, w odległościach od 2,5 do 300 m z rozdzielczością (podawaną przez różne dokumenty) od 5 cm [310] do 10 lub 12 cm [311] oraz prędkościami od 0 do 500 km/h z rozdzielczością 0,1 km/h [311]. Również jest w stanie zmieniać wzmacnienie wynikające z RCS.

System ten składa się z kilku podstawowych części:

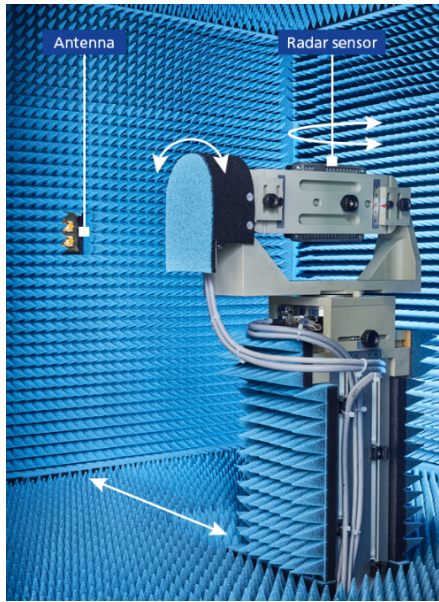
1. Jednostki sterującej PXI
2. Modułu VDG (ang. Variable Delay Generator) – do generowania obiektów poprzez optyczne linie opóźniające, jeden moduł jest w stanie generować maksymalnie dwa obiekty jednocześnie
3. Głowicy radiowej – która zamienia sygnał elektryczny na falę elektromagnetyczną, może być w konfiguracji monostatycznej albo bistatycznej
4. Modułu VST (ang. Vector Signal Transceiver) - Emulator przeszkód PXIe-5840, kontrolowanie odległości, prędkości oraz RCS; jeden moduł VST obsługuje maksymalnie dwa moduły VDG, więc w celu obsługi kolejnych kart należy również dodać kolejny moduł VST



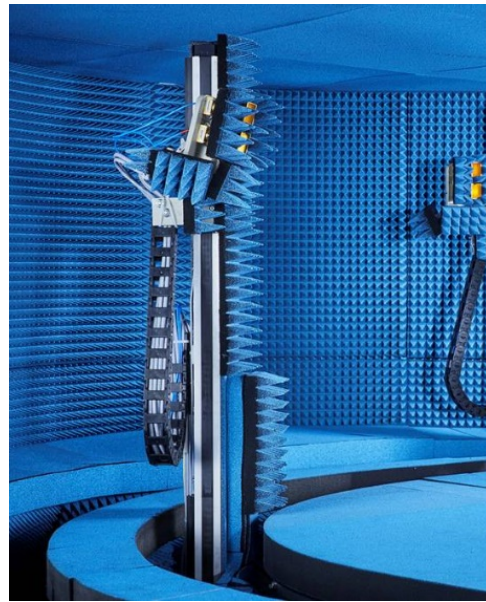
Rys. 81. Simulator celu radarowego z głowicą nadawczo-odbiorczą [310].

Taki zestaw jest w stanie symulować równocześnie dwa obiekty. Aby móc symulować kolejne obiekty należy dodać kolejne karty. W celu symulowania czterech obiektów należy dodać dodatkowy moduł VDG oraz dodatkową głowicę radiową. Cały system testowy jest dość dużych rozmiarów, dlatego nie może być umieszczony w komorze bezekowej, gdyż zostałby wykryty przez radar. Dlatego jest on umieszczony poza komorą bezekową, a tylko głowice są umieszczone w komorze. [310]

Większość opisanych dotąd symulatorów celu jest w stanie generować obiekty statyczne i dynamiczne, ale nie są w stanie symulować różnych kątów do obiektu. Aby to uzyskać, wymagane jest dodanie odpowiednich napędów, które będą wychylać w różnych osiach testowany radar, jak przedstawiono na Rys. 82 lub głowicę symulatora celu, jak pokazano na Rys. 83.

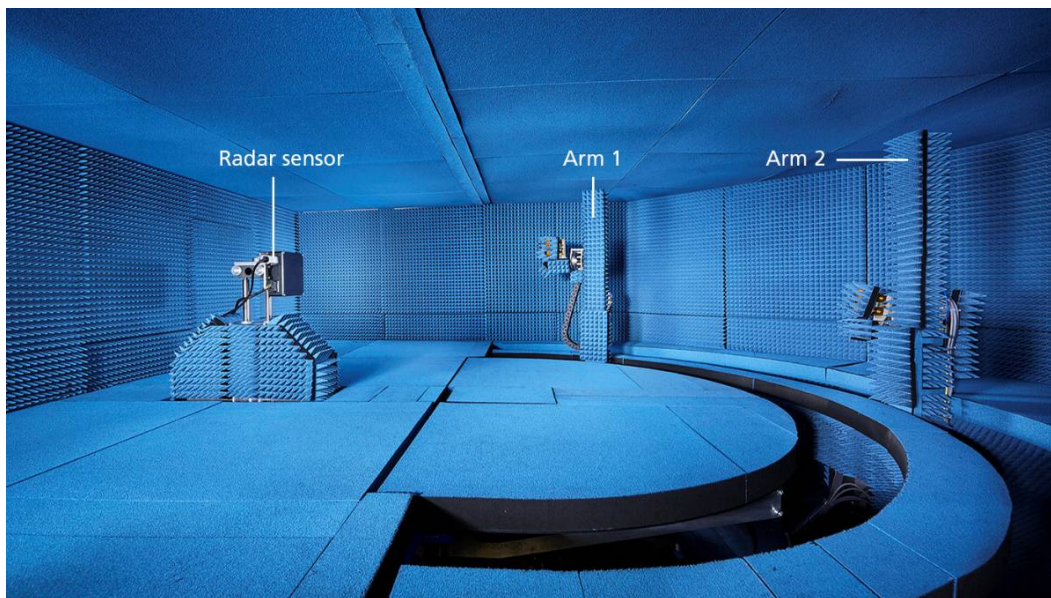


Rys. 82. Testowany radar zamontowany na obrotowym ramieniu w celu symulacji kąta [312].



Rys. 83. Głowica radarowa zamontowana na obrotowym ramieniu w celu symulacji kąta [313].

Tego typu systemami są stanowiska testowe firmy dSpace o nazwie DARTS (ang. Dspace Automotive Radar Test Systems). Występują one w trzech rodzajach: 2D, 3D i 6D. System 6D jest najbardziej zaawansowaną konfiguracją, gdyż zawiera komorę bezechową oraz dodatkowo dwa symulatory celu, które są napędzane czterema napędami, co umożliwia symulację kąta dla każdej pozycji czujnika, jak pokazano na Rys. 84.



Rys. 84. Dwa ruchome symulatory celu umieszczone na ramionach w komorze bezechowej [313].

Porównanie parametrów kilku wybranych komercyjnych symulatorów celu radarowych zostało pokazanych w Tab. 4.

Tab. 4. Parametry przykładowych symulatorów celów radarowych.

	NI VRTS [311]	dSpace Compact 3D [314]	dSpace Essential 2D [312]	Keycom ME7220 DM-77G [315]	R&S AREG10 0A [316]	R&S AREG80 0A [317]	Keysight E8707A [318]
Liczba obiektów	4	20 (w tym 5 z symulacją kątowną)	4 (w tym 1 z symulacją kątowną)	Brak informacji	4 niezależne + 3 statyczne	4 niezależne (4-17 m) 8 (17 m – 1000 m)	2 statyczne (1 niezależny)
Dystans	2,5 – 300 m	2,0 – 1000 m	1,4 – 1000 m	3,5 – 30 m / 30 – 300 m	3,2 – 299,2 m	4 – 3000 m	10 – 450 m
Rozdzielczość	10 cm	2,5 – 10 cm	2,5 - 10 cm	15 cm / 25 cm	Brak informacji	2,5 cm	no info
Prędkość	0 – 500 km/h	0 -500 / 700 km/h	0 -500 / 700 km/h	0 – 300 km/h	0 – 500 km/h	500 km/h	360 km/h
Rozdzielczość prędkości	0,1 km/h	0,07 / 0,14 km/h	0,07 / 0,14 km/h	0,1 km/h		0,001 km/h	0,1 km/h
Powierzchnia skuteczna radaru RCS	105 dB 50 dB (zakres dynamiczny)	Dostępny, ale brak szczegółowych informacji	Dostępny, ale brak szczegółowych informacji	Dostępny, ale brak szczegółowych informacji	55 dB (różnica pomiędzy indywidualnymi obiektami)	60 / 90 dB	63,5 dB
Częstotliwość	75 – 82 GHz	23-26, 75-82 GHz	23-26, 75-82 GHz	76 – 77 GHz	24, 77/79 GHz	24, 76 – 81 GHz	76-77 GHz

4.7 Lidar

Technologia lidarowa w motoryzacji jest stosowana stosunkowo krótko i tak naprawdę ciągle jest w fazie badań i rozwoju. Obecnie w większości przypadków, lidary są testowane klasycznie tzn. z użyciem fizycznych obiektów ustawianych w jego polu widzenia. Przykładem takiego podejścia jest system zaprezentowany w publikacji [319], gdzie fizyczny obiekt o określonej refleksyj-

ności jest umieszczony na szynach, po których się porusza, a pole widzenia jest testowane z wykorzystaniem goniometru. Natomiast symulatory celu nazywane Lidar Target Simulator (LTS), są jeszcze na wczesnym etapie rozwoju. Niemniej występuje kilka opatentowanych sposobów na testowanie lidarów, choć część z nich prawdopodobnie nadal pozostaje tylko w fazie koncepcyjnej. Na szczęście jest kilka firm posiadających w swoim portfolio mniej lub bardziej zaawansowane systemy LTS. To samo tyczy się międzynarodowych standardów, które w większości są nadal w trakcie rozwoju. Obecnie jest tylko jeden dostępny standard DIN SAE SPEC 91471:2023-05. Dokument określa metodologię oceny czujników lidar, niezależną od struktury czujnika i podejścia technologicznego. Dokument ma zastosowanie do producentów samochodów i dostawców czujników w celu umożliwienia określonej oceny działania czujnika na poziomie chmury punktów, na przykład dokładności, precyzji i wierności pomiarów [320].

Ponadto istnieje w fazie rozwoju kilka innych standardów, realizowanych przez różne państwa i firmy zajmujące się lidarami. Takimi standardami są np. UL4700, GB/T, ISO/PWI 13228, DIN SAE SPEC 91471 czy IEEE P2936. Normy takie jak UL4700, GB/T, ISO/PWI 13228 koncentrują się na trzech najbardziej krytycznych punktach w masowej produkcji lidarów, którymi są bezpieczeństwo, niezawodność i wydajność.

UL4700 (Norma bezpieczeństwa dla lidarów i systemów lidarowych) jest to norma wprowadzona do amerykańskich norm krajowych. W pracy nad normą brały udział między innymi Hesai, Bosch, Continental AG, Intel i Motional [321]. Norma zwraca uwagę na lidary samochodowe oceniając bezpieczeństwo na podstawie parametrów użytkownika określonych przez producenta, w tym wymagań dotyczących oceny bezpieczeństwa mechanicznego, elektrycznego, laserowego, sieciowego i funkcjonalnego.

Bardzo prędko pod kątem ustandaryzowania projektowania i testowania lidarów działają Chiny. Najważniejszymi standardami są standardy narodowe rozpoczynające się od liter GB lub GB/T, gdzie rozszerzenie T oznacza, że norma jest rekomendowana. Niższą rangą są normy przemysłowe, które są tworzone na szczeblu odpowiedniego ministerstwa. Za opracowywanie norm dla lidarów jest odpowiedzialne Ministerstwo Przemysłu i Technologii Informatycznych (Ministry of Industry and Information Technology), a normy dla sektora motoryzacyjnego (Automobile & Vehicle) zaczynają się od liter QC, QC/T [322].

GB/T Wymagania wydajnościowe i metody testowe dla lidarów samochodowych (and. Automotive Lidar Performance Requirements and Test Methods) jest to norma rozwijana w Chinach od 2021 roku pod kierownictwem Krajowego Komitetu Technicznego ds. Standaryzacji Samochodów (SAC/TC114). Grupa opracowująca normy składa się z ponad 40 firm obejmujących producentów lidarów, producentów pojazdów oraz firm testujących [321], [323]. Obejmuje takie zagadnienia, jak wymagania dotyczące zdolności percepcyjnych lidarów, ogólne metody badań, niezawodność lidarów oraz bezpieczeństwo lasera dla oczu i skóry. Ogólne metody badań koncentrują się na takich zagadnieniach, jak: wydajność i gęstość chmury punktów, możliwości pomiaru odległości, dokładność i rozdzielczość odległości i kątów, obraz widmowy o wysokim stopniu odbicia czy czas uruchamiania. Natomiast niezawodność lidarów koncentruje się na wymaganiach środowiskowych, wydajności mechanicznej i elektrycznej, kompatybilności elektromagnetycznej, odporności na kurz i wodę oraz wydajności w różnych warunkach atmosferycznych. [324].

Również zostały powołane zespoły do opracowania standardów dla konkretnych typów lidarów. Standard dla lidarów z obrotowym lustrem (QC/T „Rotating Mirror Vehicle Lidar”) jest opracowywany przez Hesai i Huawei, standard dla lidarów mechanicznych (QC/T „Mechanical Rotating Vehicle Lidar”) przez Hesai i Wanji, a standard dla lidarów MEMS (QC/T „MEMS Vehicle Lidar”) przez Sagitar i Wanji. Oprócz tego zaczęto wstępne badania nad opracowaniem standardów dla radaru błyskowego (QC/T "FLASH Type Vehicle Mounted Lidar) oraz radaru wykorzystującego macierz fazową (QC/T "Phased Array Type Vehicle Mounted Lidar) [325].

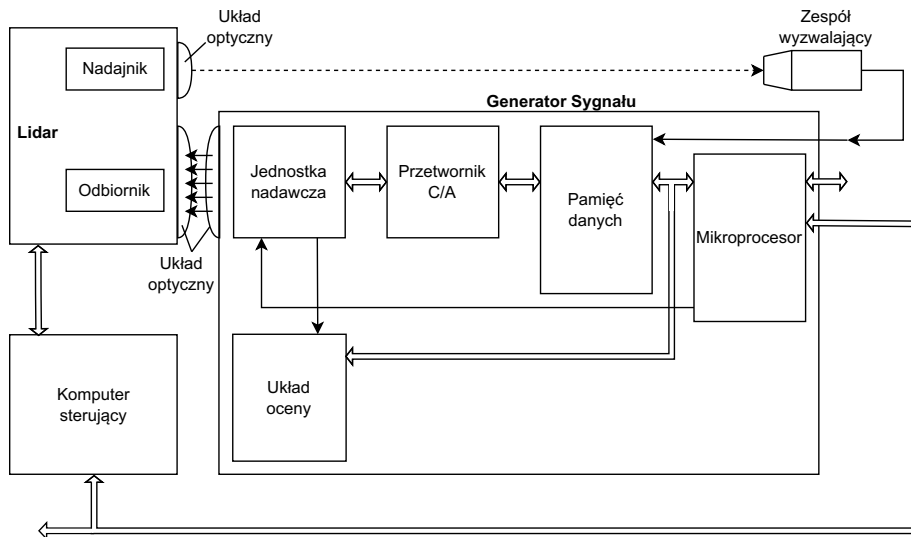
Istnieje również dokument CQC16-474031-2022 określający zasady certyfikacji lidarów samochodowych zarządzany przez Chińskie Centrum Certyfikacji Jakości CQC (China Quality Certification Centre) [326].

Norma ISO/PWI 13228 metody testowe dla lidarów samochodowych (ang. Road vehicles — Test method for automotive Lidar) ustanawia serię metod testowych do oceny wydajności chmury punktów, która jest stosowana w konstrukcji konkretnych frameworków. Jest rozwijana przez grupę roboczą o kodzie ISO/TC 22/SC 32/AHG 1 [327], [328], w której biorą udział takie firmy jak Hesai, Valeo, Denso, Bosch, Sony, Nissan i ZF. Testy obejmują ogólne wskaźniki wydajności (zasięg wykrywania, dokładność odległości, rozdzielczość kątową, pole widzenia, odbijanie światła i liczbę klatek na sekundę itp.), wskaźniki wydajności wpływające na bezpieczeństwo operacyjne (filtrowanie zakłóceń, gęstość chmury punktów, opóźnienie klatek, itp.), badanie zmian wydajności wywołanych przez czynniki środowiskowe oraz wydajność lidarów w połączeniu ze scenariuszami ADAS/AD [324].

Również stowarzyszenie IEEE rozpoczęło pracę nad opracowaniem standardu dotyczącego metod testowania wydajności lidarów samochodowych (IEEE P2936 *Standard for Test Methods of Automotive Lidar Performance*). W skład grupy wchodzi takie instytucje jak Hesai, National Instruments, Shanghai Jiao Tong University, Tsinghua University, VANJEE, Beijing Baidu Netcom Science Technology i Beijing Sankuai Online Technology. Standard określa metody testowania wydajności lidarów, które koncentrują się na chmurze punktów. Obejmują takie zagadnienia jak: dokładność/precyzja/rozdzielczość zasięgu oraz kątów, zasięg maksymalny/minimalny, prawdopodobieństwo detekcji oraz współczynnik odbicia. Metody testowe zawierają również scenariusze, przypadki użycia, narzędzia oraz metody statystyczne [329].

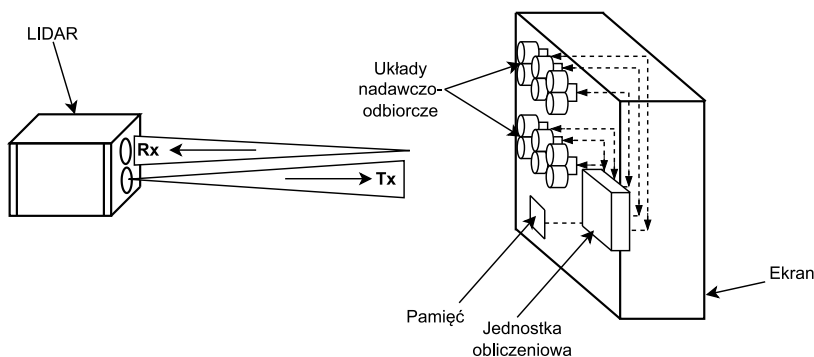
Głównymi wymaganiami co do systemu testowego jest, aby on był w stanie symulować odległość w szerokim zakresie bez konieczności modyfikowania w żaden sposób testowanego lidarów. Jako że lidary są głównie wykorzystywane w bliskim i średnim zasięgu, to najważniejszą cechą jest możliwość symulacji niewielkich odległości np. już od 1 m. Dodatkowo system testowy musi być w stanie skutecznie odebrać i wytłumić wiązkę nadawczą. Na ostatnim etapie musi wygenerować wiązkę i z odpowiednim opóźnieniem oraz tłumieniem odesłać ją do lidarów, symulując w ten sposób odległość oraz refleksyjność obiektu.

Istnieje kilka zgłoszonych patentów i publikacji naukowych, które przedstawiają różne, ciekawe koncepcje na testowanie lidarów. Patent [330] prezentuje koncepcję systemu testowego bez użycia ekranu tłumiącego, jak pokazano na Rys. 85. System testowy składa się z jednostki wyzwalającej, której zadaniem jest odebrać i prawdopodobnie wytłumić sygnał nadawczy z lidarów. Znajduje się ona w bardzo bliskiej odległości od źródła lasera testowanego lidarów. Gdy jednostka wyzwalająca wykryje impuls świetlny, jednostka sterująca (generator sygnału) ustawia wymagane opóźnienie, gęstość mocy oraz kształt impulsu. Zdefiniowany w ten sposób sygnał jest generowany i odsyłany do lidarów przez układ optyczny. Układ optyczny składa się z diody laserowej wraz z umieszczonym za nią filtrem pasmowoprzepustowym oraz dyfuzorem. Filtr pasmowoprzepustowy zapewnia wymaganą długość fali, natomiast dyfuzor uzyskanie jednorodnego oświetlenia.



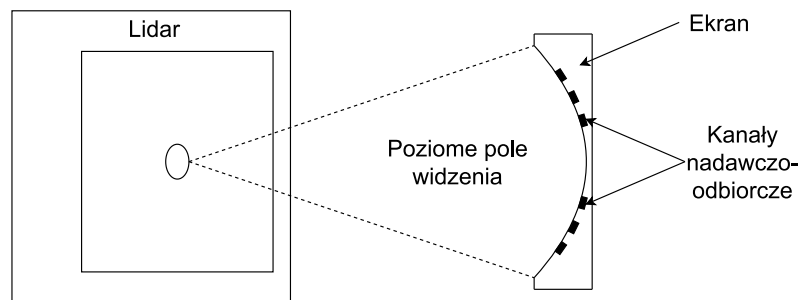
Rys. 85. Uproszczony schemat symulatora celu lidarowego. Rysunek przygotowany w oparciu o [330].

Innym pomysłem zaprezentowanym w patencie [331] jest wykorzystanie systemu składającego się z jednostki sterującej oraz ekranu, który jednocześnie pełni funkcję tłumiącą oraz odbiorczo-nadawczą. Ekran jest ustawiony w pewnej odległości od lidarów i składa się z matrycy wielu pikseli tworzonych przez parę odbiornik-nadajnik, jak pokazano na Rys. 86.



Rys. 86. Schemat stanowiska testowego z ekranem wyposażonym w elementy nadawczo-odbiorcze. Rysunek przygotowany w oparciu o [331].

Optymalnym ekranem jest ekran zakrzywiony w dwóch płaszczyznach, aby każdy piksel ekranu był w jednakowej odległości od lidarów. Jest to szczególnie ważne w lidarach wykorzystujących bezpośredni czas przelotu. Natomiast ze względu na to, że lidarzy mają przeważnie szerokie poziome pole widzenia, ale wąskie pionowe, to dopuszczalne jest zastosowanie również ekranu zakrzywionego tylko w płaszczyźnie poziomej, jak pokazano na Rys. 87. Nadajnikiem w tym przypadku może być podczerwona dioda laserowa, natomiast odbiornikiem fotodioda. Zasada działania systemu polega na odebraniu i wytłumieniu wiązki na odpowiednim pikselu ekranu, a następnie wygenerowaniu i odesłaniu impulsu świetlnego z tego piksela.



Rys. 87. Zakrzywiony w jednej, poziomej płaszczyźnie ekran z zaznaczonymi elementami nadawczo-odbiorczymi. Rysunek przygotowany w oparciu o [331].

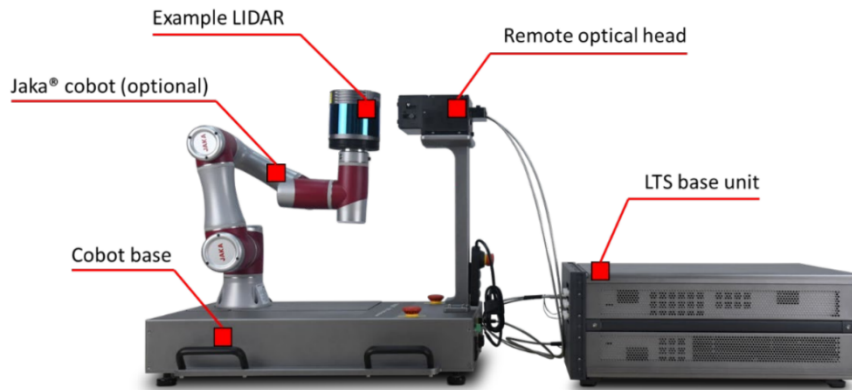
Pewną odmianą tego patentu jest projekt zaprezentowany w publikacji [194]. Wykorzystuje on tłumiący, zaokrąglony ekran umieszczony w pewnej odległości od testowanego lidar. W tym projekcie ekran składa się z wielu pikseli nadawczych i tylko jednego elementu odbiorczego umieszczonego w rogu ekranu. Zastosowanie pojedynczego detektora zmniejsza odbicie wiązki nadawczej od ekranu oraz zmniejsza problemy wielościeżkowości. Wynika to z faktu, że detektor znajduje się tylko w jednym punkcie i zajmuje mniejszą sumaryczną powierzchnię. Ekran jest odsunięty na pewną minimalną odległość ze względu na kryterium głębi ostrości DOF. W przeciwnym razie ekran byłby widziany przez lidar jako rozmyty.

W jednym i drugim projekcie z ekranem zauważono kilka wad. Po pierwsze detektor jest umieszczony na ekranie w pewnej odległości od lidar emitującego światło. To powoduje, że system testowy nie ma natychmiastowej informacji, kiedy lidar wygenerował sygnał i musi czekać, aż impuls dotrze do ekranu. Wobec tego system testowy nie jest w stanie zasymulować odległości mniejszej niż jego faktyczna odległość od testowanego lidar. Nawet jakby od razu bez żadnego opóźnienia po odebraniu sygnału, wygenerował i odesłał sygnał, to lidar nie wykryłby, że jest w zerowej odległości, a tak naprawdę zmierzyłby prawdziwą odległość do ekranu. Żeby zasymulować odległości mniejsze, system musiałby wysyłać w ciemno impulsy, zanim jakiegokolwiek dotrą do ekranu. Możliwe, że dałoby się zastosować jakieś metody predykcji, gdyż impulsy świetlne są wysyłane powtarzalnie z określoną częstotliwością, choć na pewno byłoby to obciążone większymi błędami.

Dodatkowo drugi pomysł z ekranem przypuszczalnie nie nadaje się do testowania lidarów skanujących. Jako że ekran ma tylko jeden detektor, nie jest on w stanie wykryć, w które piksele wiązka aktualnie uderzyła, więc nie jest w stanie odesłać sygnału z poprawnych pikseli. Z tego powodu prawdopodobnie jest w stanie poprawnie działać tylko z lidarami błyskowymi, gdyż wtedy sygnał jest odsyłany równocześnie przez wszystkie piksele z opóźnieniem uwzględniającym dystans.

Jest kilka firm, które w swoim portfolio oferują sprzęt do testowania lidar. Niestety firmy te mocno ukrywają technologie oraz parametry tych systemów i jest mało ogólnodostępnych informacji na ten temat. Jednym z systemów testowych jest LTS firmy Konrad Technologies, który jest w stanie testować lidary 1D, 2D, 3D, lidary błyskowe i lidary wirujące, co ogranicza jego zastosowanie. Potrafi on symulować odległość do obiektów w zakresie od 10 do 200 m, ich refleksyjność oraz ruch [332]. Kolejnym systemem jest LTS firmy Keycom, który jest w stanie pracować z lidarami wykorzystującymi technologię ToF oraz FMCW. Symuluje on odległość od 1,5 m aż do 300 m z rozdzielczością 0,25 m. Dzięki wymiennej optyce jest może współpracować z lidarami wykorzystującymi zarówno falę 905, jak i 1550 nm. Dodatkowo potrafi tłumić wiązkę w zakresie od 0 do 10 dB z krokiem 1 dB, tym samym symulując refleksyjność obiektów [333].

Prawdopodobnie najbardziej zaawansowanym komercyjnym systemem testowym dysponuje firma Keysight. Jest on w stanie symulować obiekty dla wszystkich typów lidarów, wykorzystujących technikę czasu przelotu, takich jak MEMS, FLASH, MMT oraz mechanicznego. Symuluje obiekty w odległości od 3 m do 300 m z rozdzielczością 1 m oraz dokładnością 5 cm. Dodatkowo potrafi symulować refleksyjność od 10% do 94% [334]. W skład stanowiska testowego wchodzi jednostka bazowa LTS, głowica optyczna oraz ramię robotyczne, jak pokazano na Rys. 88.



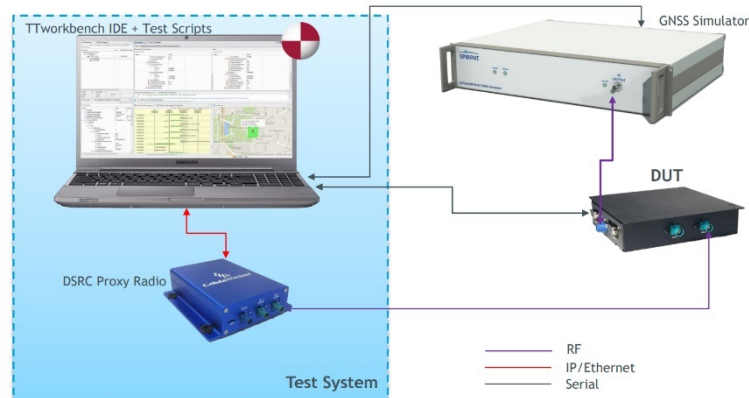
Rys. 88. Symulator celu lidarowego firmy Keysight [334].

Głowica optyczna odbiera i nadaje sygnały z testowanego lidar. Jednostka bazowa jest odpowiedzialna za dodanie opóźnienia i tłumienia w celu zasymulowania pożądanej odległości oraz refleksyjności obiektu. Manipulator, który jest nazywany w tym przypadku cobotem, jest opcjonalny i jest używany do przetestowania pełnego pola widzenia testowanego lidar. Cobot jest w stanie przetestować pole widzenia w zakresie $\pm 35^\circ$ w pionie oraz 360° w poziomie. Domyślnie system jest wyposażony w głowicę przystosowaną do pracy z 905 nm, natomiast są również dostępne głowice 850 nm oraz 1550 nm. Do systemu testowego jest dołączone oprogramowanie do generowania sztucznych obiektów oraz analizy wyników [334]. Jako że system nie wykorzystuje żadnego typu ekranu tłumiącego, można przypuszczać, że może działać na zasadzie opisanej w patencie [330].

4.8 V2X

Testy technologii C-V2X czy V2X są przeważnie realizowane w metodologii HIL i środowiskach symulacyjnych, gdyż na ten moment jeszcze wiele pojazdów oraz infrastruktura nie jest wyposażonych w tę technologię. Środowisko testowe składa się z dwóch warstw oprogramowania oraz sprzętu. Oprogramowaniem jest symulator jazdy testowych, który jest odpowiedzialny za generowanie podstawowych parametrów samochodu, które następnie zostaną przesłane ramkami V2X do innych uczestników ruchu. Przykładami takiego oprogramowania jest SUMO [335], VTD [336], CANoe Car2x [337] czy ProSivic. Jeśli symulator jazdy nie obsługuje wybranego sprzętu, to dodatkowo używa się oprogramowania pośredniczącego, pełniącego funkcję interfejsu pomiędzy symulatorem jazdy a fizycznym sprzętem. Takimi interfejsami może być np. Matlab [335] czy RTMAPS [338]. Warstwa sprzętowa składa się najczęściej z trzech typów urządzeń: interfejsu komunikacyjnego V2X/C-V2X, symulatora zaniku sygnału radiowego oraz symulatora sygnału GNSS. Interfejs komunikacyjny jest odpowiedzialny za wysyłanie i odbieranie drogą radiową ramek V2X, symulator zaniku sygnału za symulowanie rzeczywistego środowiska dla sygnału radiowego np. środowiska wiejskiego, miejskiego, wysokich prędkości [336], a symulator

GNSS za dostarczenie aktualnego czasu oraz aktualnej pozycji testowanego pojazdu. Do najprostszych zastosowań symulator zaniku sygnału może zostać pominięty tak jak w przykładowej konfiguracji testowej pokazanej na Rys. 89.



Rys. 89. Przykładowe elementy systemu testowego V2X [342].

Ze względu na różną warstwę fizyczną używaną w V2X i C-V2X muszą być użyte dedykowane interfejsy. Zważywszy na to, że technologia V2X jest stosunkowo młoda, na rynku nie ma wielu dostawców kompletnych systemów testowych, ale nawet samych interfejsów. Do testów V2X (standardu 802.11p) można użyć np. interfejsu firmy Vector VN4610, Cohda Wireless MK5, SEA 802.11p Communication Module lub R&S CMW500 [336], a do testów C-V2X (LTE/5G) np. Cohda Wireless MK6 [337] czy Autotalks Craton2 EVK. W przypadku symulatorów GNSS, jak już wcześniej wspomniano, istnieje wielu dostawców, z których można zastosować przykładowo R&S SMBV100b [339] czy Spirent GSS7000 [340]. Do zanikania sygnału można użyć Spirent Vertex Channel Emulator [340], [341]. W przypadku testowania C-V2X i interfejsu Uu wykorzystującego sieć komórkową środowisko testowe może wymagać dodatkowo ekranowego pomieszczenia, które będzie tłumić prawdziwy sygnał komórkowy. W tym przypadku jest potrzeba symulowania dodatkowych elementów takich jak stacje bazowe. [339].

4.9 Podsumowanie rozdziału

W rozdziale przeanalizowano metody bezkontaktowego stymulowania czujników, zidentyfikowano dostępne na rynku urządzenia oraz w oparciu o nie zrealizowane projekty. W przypadku braku dostępnych urządzeń na rynku przeanalizowano obecnie wykorzystywane metody i techniki testowe, w celu określenia luki pomiędzy stanem obecnym a wymaganym do testów pojazdu w pętli sprzężenia zwrotnego. Bazując na wykonanej analizie, zaproponowano pomysły ulepszenia lub rozszerzenia obecnych metod testowych oraz koncepcję działania brakujących stymulatorów celu.

W przypadku testów czujników ultradźwiękowych są dostępne na rynku symulatory celu zarówno przystosowane do testów HIL, jak i VIL. Również producenci tych systemów przedstawiają faktycznie zrealizowane projekty w oparciu o te systemy. To pozwala przypuszczać, że tego typu stymulatory mogą bezproblemowo zostać wykorzystane w celu symulowania otoczenia. Jedynym problemem jest brak zrealizowanej integracji z dostępnym oprogramowaniem do wirtualnych jazd testowych, której przygotowanie jest możliwe kosztem dodatkowego nakładu pracy.

W przypadku kamer światła widzialnego do stymulacji kamery wystarczy ustawienie w jej polu widzenia zwykłego monitora lub ekranu z projektorem i następnie wyświetlanie obrazów wygenerowanych przez dowolny program graficzny. Dzięki temu można generować dowolne sytuacje na drodze i weryfikować skuteczność działania kamery. Metoda ta jest szeroko stosowana przez wiele firm w testach ADAS opartych na kamerach. Sprawa komplikuje się w przypadku kamer stereo, gdyż ustawienie pojedynczego monitora jest tutaj niewystarczające. Dodatkowo bliska odległość kamer nie pozwala na ustawienie przed nimi dwóch ekranów, gdyż wchodziłyby sobie nawzajem w pole widzenia. Jedynym spotykanym rozwiązaniem bezinwazyjnym jest użycie specjalnie przygotowanego układu optycznego, który obraz generowany w innym miejscu wyświetli przed obiektywem kamer. Po przeanalizowaniu rynku okazało się, że tylko jedna firma posiada w swojej ofercie testy kamer stereo. Niestety techniki wykorzystywane przez tę firmę nie są ujawnione. Jako że kamery stereo są dość często wykorzystywane i odgrywają dużą rolę w systemach ADAS, jest to niezbędny element stanowiska testowego.

W przypadku kamer termowizyjnych użycie monitora jest bezużyteczne, gdyż kamera widzi rozkład temperatury na ekranie, a nie wyświetlany obraz. Nie ma również dostępnych innych symulatorów celu, które byłyby w stanie dynamicznie generować obraz termiczny. Większość testów jest wykonywanych z użyciem statycznych, rzeczywistych celów, a następnie ocenieniu jakości zarejestrowanego obrazu. W przypadku termowizji urządzenia używane do testów są skomplikowane i kosztowne. Niemniej istnieje pewien rodzaj urządzenia, którego można by nazwać symulatorem celu. Niestety pomimo jego skomplikowanej budowy jest w stanie wygenerować tylko podstawowe obrazy składające się z figur geometrycznych. Z tego powodu obecnie na rynku nie ma dostępnych urządzeń nadających się do dynamicznego testowania kamery termowizyjnej, choć istnienie wspomnianego stymulatora celu jest pewnym punktem startowym, od którego można by było zacząć rozwój takiego urządzenia. Tego typu urządzenie jest dość kosztowne, dlatego alternatywnie zaproponowano stworzenie ekranu z pikseli „termicznych”, które mogłyby być zrealizowane przez miniaturowe ogniwa Peltiera. Obecnie nie ma tego typu projektów, dlatego jest to całkowicie nowy pomysł, który teoretycznie nadawałby się do dynamicznego generowania obrazu termicznego.

Mimo że kamery bliskiej podczerwieni nie są obecnie stosowane do monitorowania otoczenia, to również przeprowadzono krótką analizę, która wykazała, że klasyczne monitory nie nadają się do stymulacji tego typu czujników. Na rynku nie ma dostępnych żadnych alternatywnych sposobów na dynamiczne stymulowanie kamer podczerwonych. Z tego powodu poddano pomysł stworzenia ekranu składającego się z diod podczerwonych, który byłby w stanie generować obraz w paśmie podczerwonym. Jest to kolejna luka, która wymaga uzupełnienia, gdyż kamery podczerwieni są używane do monitorowania wnętrza samochodu.

W przypadku systemów satelitarnych GNSS istnieje bardzo wielu dostawców systemów testowych. Są w stanie w sposób bezkontaktowy symulować poszczególne satelity, różne konstelacje satelitów, zjawisko Dopplera, zanikanie sygnału oraz błędy. Tego typu systemy są szeroko dostępne na rynku i potrafią wiernie symulować rzeczywiste satelity i ich warunki pracy. Ponadto, jako że większość testów jest wykonywanych w pomieszczeniach, gdzie sygnał otrzymywany z rzeczywistych satelitów jest bardzo słaby lub niedostępny, nie ma potrzeby specjalnego tłumienia sygnałów rzeczywistych.

Symulator GNSS jest również obowiązkowy w stymulacji technologii V2X. Pomimo że technologia V2X jest dość nowa, ale jako że bazuje na warstwie fizycznej zmodyfikowanego Wi-Fi, nie ma większego problemu z dostępnością na rynku odpowiednich interfejsów. Większy problem jest z interfejsami do C-V2X, które dodatkowo muszą w odpowiedni sposób symulować stacje bazowe oraz przełączanie pomiędzy nimi. Największym utrudnieniem jest to, że występują równoległe trzy standardy V2X, które są niekompatybilne pomiędzy sobą. Co prawda DSRC i ITS-G5 korzysta z tej samej warstwy fizycznej, dzięki czemu można użyć tego samego interfejsu do

tych dwóch protokołów, natomiast pozostałe warstwy muszą być osobno zaimplementowane. W przypadku C-V2X, który korzysta z LTE/5G musi być zakupiony osobny interfejs. Niemniej z testowaniem V2X nie ma większego problemu, a interfejsy często są zintegrowane z różnymi symulatorami wirtualnych jazd testowych, co jest dodatkowym ułatwieniem.

W przypadku radarów, które są od wielu lat wykorzystywane w samochodach, stymulatory celów radarowych są dostępne dopiero od kilku lat. Istnieje kilka firm, które posiadają w swoim portfolio tego typu urządzenia. Dostępne są one w różnych konfiguracjach i z różnymi możliwościami: od generowania pojedynczych statycznych celów, po generowanie wielu celów dynamicznych ze zmiennym RCS czy zmiennymi kątami. Również bazując na tych stymulatorach, powstało wiele stanowisk testowych z bardzo dobrymi rezultatami. Stymulatory celów radarowych są dość drogimi urządzeniami i dodatkowo wymagają wyłumienia wiązki elektromagnetycznej, co powiększa całe stanowisko testowe. Może być to pewne utrudnienie w momencie umiejscowienia radaru blisko innych czujników, które również muszą być stymulowane podczas testowania pojazdu w laboratorium.

Technologia lidarowa jest jedną z najnowszych, powoduje to, że nie tylko jest mało komercyjnych urządzeń do stymulacji bezprzewodowej, ale również metody testowe i większość standardów jest dopiero w trakcie definiowania. Z tego powodu wiele firm testuje lidary w oparciu o własne techniki. W tym momencie jest tylko jeden w pełni funkcjonalny stymulator celu lidarowego, który jest w stanie stymulować różne konstrukcje lidarowe. Pozostałe urządzenia dostępne na rynku pozostawiają jeszcze wiele do życzenia i są prezentowane jako pewnego rodzaju plan działań, który pokazuje nad czym obecnie firmy pracują. Niestety producenci dostępnych systemów testowych nie ujawniają zasady działania oferowanych stymulatorów, dlatego zostały przeanalizowane dostępne patenty oraz projekty symulatorów celu. W oparciu o przeprowadzoną analizę zostały zidentyfikowane ewentualne braki i potencjalne problemy.

Istnieją dwie koncepcje budowy symulatora celu lidarowego. Jeden z nich przewiduje wykorzystanie dużego ekranu tłumiącego z elementami-nadawczo odbiorczymi. Podobnie jak przy okazji użycia ekranu w przypadku kamer widzialnych może to powodować, że ekrany będą sobie przeszkadzać nawzajem wchodząc w pole widzenia sąsiednich czujników. To powoduje, że ten typ stymulatora może być ciężko wykorzystać do testów pojazdu w pętli. Alternatywny pomysł nie wykorzystuje ekranu ani żadnych innych elementów tłumiących. Tego typu symulator celu funkcjonuje na rynku, ale jest on prezentowany w testach HIL, dlatego nie można ostatecznie stwierdzić czy również bez żadnych modyfikacji mógłby być zastosowany do testów pojazdu. Prawdopodobnie największym problemem jest duża różnorodność dostępnych na rynku lidarów, które różnią się zasadą działania. Z tego powodu jeden stymulator może nie być na tyle uniwersalny, żeby być w stanie stymulować wiele różnego typu lidarów. Pomimo wielu różnych konstrukcji lidarów dostępnych na rynku samochody wykorzystują głównie lidary z obrotowym lustrem. Założenie, że taki typ lidarów jest domyślnym typem wykorzystywanym w samochodach, znacząco ułatwia testowanie, ograniczając jednak uniwersalność stanowiska.

Ostatnim analizowanym systemem była inercyjna jednostka pomiarowa IMU. Przeanalizowano obecnie wykorzystywane metody testowe i narzędzia wykorzystywane do ich wykonywania. Z analizy wyniknęło, że wszystkie testy wymagają wprowadzenia testowanego czujnika w ruch i nie ma dostępnych symulatorów celu. Najczęściej czujniki IMU są testowane na wirówkach, które wraz ze stołem obrotowym umieszczonym na jej ramieniu, wykorzystując siłę odśrodkową, są w stanie wygenerować przyspieszenie wzdłuż testowanych osi akcelerometru. Zmiana proporcji przyspieszenia w osiach wymaga zawsze obrotu czujnika, co powoduje, że nie ma możliwości zmiany przyspieszenia bez wyzwalania pomiarów żyroskopu. Wynika z tego, że nawet na wirówce z 3-osiowym stołem obrotowym nie da się w pełni zasymulować rzeczywistych warunków. Na dziś nie ma możliwości bezprzewodowej stymulacji IMU, gdyż nie da się wygenerować sztucznego przyspieszenia. Również nie spotkano się z realizacją wirówki, która generowałaby

przyspieszenia i obroty dla żyroskopów w oparciu o dane z wirtualnych jazd testowych. Sprzężenie działania wirówki wraz z oprogramowaniem z wirtualnymi jazdami testowymi jest ciekawym pomysłem, który jest wart dalszej analizy.

5 Testowanie i walidacja samochodu w warunkach laboratoryjnych

Większość systemów biorących udział w automatyzacji jazdy można bezprzewodowo stymulować za pomocą odpowiednich urządzeń – stymulatorów celu. Najczęściej te systemy testowe są wykorzystywane do testów na poziomie hardware’u w pętli (HIL). Inżynierowie i naukowcy od wielu lat próbują stworzyć środowisko testowe, które będzie stymulować równocześnie kilka systemów, aby być w stanie przetestować systemy ADAS oparte na fuzji czujników.

5.1 Stanowiska HIL do fuzji czujników

Obecnie nie ma stanowiska testowego, które jest w stanie stymulować wszystkie czujniki i systemy jednocześnie. Większość firm ma w ofercie stanowiska testowe pod konkretne systemy ADAS, które korzystają z fuzji czujników np. do funkcji aktywnego tempomatu czy asystenta utrzymania pasa ruchu. Równocześnie większość stanowisk nie jest dedykowanych do testów całego pojazdu, a jedynie do testów czujników poza samochodem. Oprócz omówionych w rozdziale 4 symulatorów celu dla jednego czujnika jest kilka firm dostarczających systemy testowe do fuzji czujników. Istnieją trzy rodzaje firm. Pierwszym rodzajem są firmy jak np. dSpace, które są producentami sprzętu i równocześnie oferują stanowiska testowe do fuzji czujników. Drugim rodzajem są firmy np. National Instruments, które również są producentami sprzętu, ale nie oferują zintegrowanych stanowisk testowych do fuzji czujników. Z tego powodu istnieje trzeci rodzaj firm np. Konrad Technologies, które korzystając ze sprzętu firm trzecich, przygotowują stanowiska testowe do fuzji czujników. Stanowiska testowe tego rodzaju firm obecnie zapewniają najpełniej pokryty rynek do stymulacji czujników, gdyż po pierwsze nie są ograniczeni do korzystania ze sprzętu tylko z jednej firmy, a po drugie są skoncentrowani typowo na integracji sprzętu i przygotowaniu kompletnych rozwiązań.

Najbardziej popularnym i dostępnym systemem oferowanym do fuzji czujników jest system złożony ze stymulatora kamery oraz radaru. Jest to uzasadnione, gdyż taki zestaw jest jednym z podstawowych źródeł działania wielu systemów ADAS i z tego powodu jest często spotykany w samochodach. Taki system dostarcza m.in. firma dSpace [343], National Instruments razem z Altran [271], Keycom [344] czy Konrad [345].

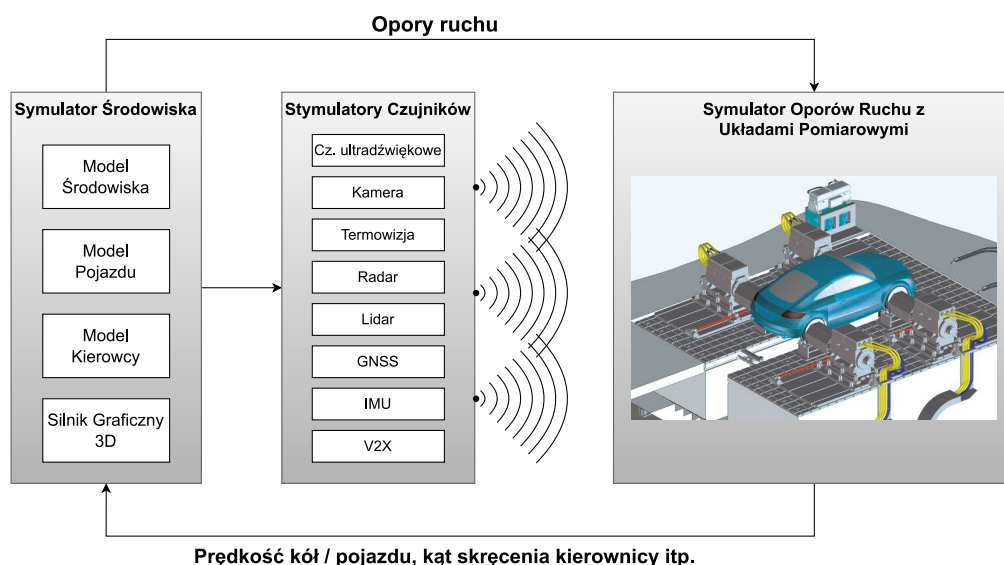
W przypadku stanowisk testowych do fuzji innych czujników sprawa się komplikuje, gdyż na rynku nie ma wiele firm proponujących takie rozwiązania. Występują różne systemy testowe do fuzji czujników składające się z różnych kombinacji istniejących stymulatorów np. firma dSpace, która oprócz systemu do fuzji kamery i radaru oferuje ten system rozszerzony o czujniki ultradźwiękowe [346]. Firma Konrad Technologies posiada wiele różnych stanowisk testowych do fuzji czujników np. kamera + radar + czujniki ultradźwiękowe + GNSS czy kamera + czujniki ultradźwiękowe [345]. Dodatkowo zaprezentowała stanowisko do jednoczesnego testowania kamery + radaru + lidar + [347], [348]. W Tab. 5 zostały podsumowane technologie, które są oferowane przez kilka firm do fuzji czujników. Zostały one opracowane wyłącznie na podstawie informacji dostępnych na stronach internetowych tych firm oraz innych informacji dostępnych w internecie, dlatego mogą one nie być do końca zgodne ze stanem faktycznym. Dodatkowo poniższe firmy dynamicznie pracują nad nowymi rozwiązaniami, dlatego liczba oferowanych rozwiązań może się szybko zdezaktualizować.

Tab. 5. Systemy testowe do fuzji czujników dostępne na rynku.

	Keycom	dSpace	Konrad	AVL	TOYO
Kamera	+	+	+	+	+
Radar	+	+	+	+	+
Lidar	-	-	+	-	-
Czujniki ultradźwiękowe	-	+	+	-	-
GNSS	-	-	+	+	-
IMU	-	-	-	-	-
V2X	-	-	-	-	-
Hamownia dynamometryczna	-	-	-	+	+

5.2 Testy pojazdu w pętli

Większość systemów testowych do fuzji czujników jest systemami do testów HIL, gdzie czujniki znajdują się poza samochodem. Tego typu systemy nie są przystosowane do testów pojazdu w pętli z użyciem hamowni. System testowy pojazdu w pętli składa się z trzech głównych elementów: symulatora środowiska zewnętrznego, stymulatorów czujników oraz symulatora oporów ruchu wraz z układami pomiarowymi, jak pokazano na Rys. 90. Zasada działania w pętli zamkniętej polega na stworzeniu odpowiedniego przejazdu testowego w symulatorze środowiska. Symulacja jest źródłem danych do stymulatorów, które synchronicznie stymulują badane czujniki samochodu zgodnie z zaplanowanym scenariuszem testu. Równocześnie symulacja zapewnia dane dla symulatora oporów ruchu, który generuje odpowiednie opory na każde koło. W momencie wykrycia przeszkody (sztucznie wygenerowaną przez stymulatory czujników) samochód aktywuje odpowiedni system bezpieczeństwa np. AEB i wykonuje manewr mierzony i wprowadzany z powrotem do symulatora środowiska. Dzięki temu w symulatorze środowiska wirtualny samochód odzwierciedla rzeczywisty manewr wykonany przez testowany samochód.



Rys. 90. Elementy składowe stanowiska testowego pojazdu w pętli.

5.2.1 Symulator środowiska

Jednym z najważniejszych systemów jest symulator środowiska. Jest to oprogramowanie, dzięki któremu można symulować jazdy testowe w wirtualnym środowisku, przedstawione w środowisku graficznym 3D. Kompletny symulator składa się z modelu środowiska, modelu kierowcy i modelu samochodu wraz z modelami czujników [349]. Model środowiska definiuje drogi (szerokość, nachylenie, pasy ruchu), budynki, drzewa czy innych uczestników ruchu, jak inne pojazdy, zwierzęta czy piesi. Sieć drogowa również może być definiowana za pomocą standardu ASAM OpenDrive, dzięki czemu sieci dróg mogą być wymieniane między różnymi symulatorami. Model kierowcy definiuje typ i zachowanie kierowcy podczas wykonywania zaplanowanych manewrów, gdyż manewry mogą być różnie wykonywane w zależności czy kierowcą jest zwykły człowiek, czy np. kierowca wyścigowy. Model kierowcy dotyczy takich elementów jak: szybkość reakcji kierowcy, szybkość zmiany biegów, punkty zmiany biegów czy agresywność przyspieszania oraz hamownia. Model samochodu jest odwzorowaniem rzeczywistego samochodu w świecie wirtualnym i jest nazywany pojazdem EGO (ang. EGO vehicle). Model samochodu definiuje jego kinematykę, charakterystykę zawieszenia, silnika, skrzyni biegów, hamulców, opon i wielu innych. Dzięki temu podczas wirtualnych jazd testowych model wirtualny samochodu zachowuje się podobnie do swojego rzeczywistego odpowiednika. Dodatkowo posiada modele czujników takich jak radar, lidar czy kamera, które są źródłem sygnałów do symulatorów czujników. Symulator środowiska najczęściej wykorzystuje silnik graficzny do wizualizacji stworzonego środowiska, samochodu oraz manewrów wykonywanych przez niego. Dzięki temu, mimo że testowany samochód w rzeczywistości stoi na hamowni dynamometrycznej, to można zobaczyć jak wyglądają manewry realizowane przez niego [350].

Na rynku funkcjonuje kilka firm dostarczających symulatory jazd testowych. Takimi oprogramowaniami przykładowo są IPG CarMaker, VTD Virtual Test Drive, Simcenter Prescan, Vector DYNA4, AirSim, Matlab/Simulink czy CARLA. Jak wiadomo, model jest zawsze pewnym uproszczeniem rzeczywistości, dlatego różne programy z różną dokładnością odwzorowują samochody, kierowców czy środowisko. Jeśli dokładność wbudowanych modeli nie jest satysfakcjonująca, można wykorzystać modele zdefiniowane w narzędziach trzecich. W przypadku modeli samochodów można wykorzystać np. CarSim [351], ADAMS/Car [352] czy Simulink/veDYNA [349]. Również jakość generowanych obrazów może się różnić, co jest kluczowe w momencie testowania ADAS opartego na kamerach. Narzędziami wyróżniających się jakością renderowanych obrazów jest VTD (Virtual Test Drive) firmy Hexagon (kiedyś VIRES) [349], a szczególnie CARLA oparta na silniku graficznym Unreal Engine 4 [272].

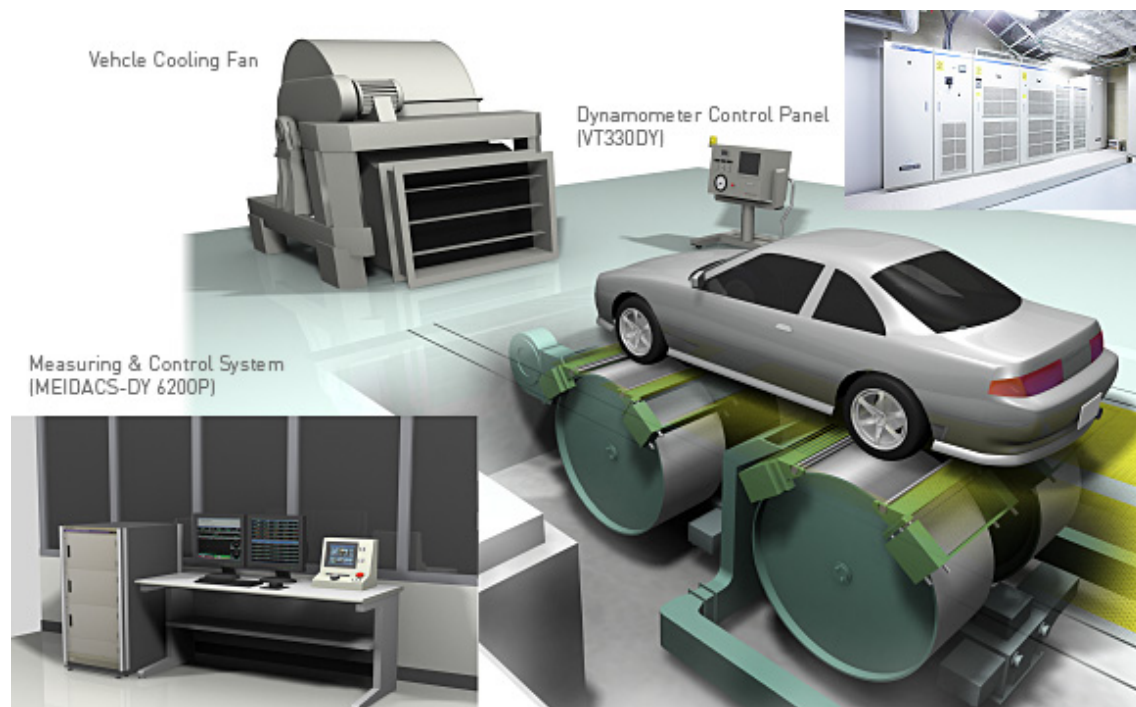
5.2.2 Stymulatory czujników

Stymulatorami są urządzenia, które w sposób bezinwazyjny stymulują badane czujniki i systemy, wykorzystując odpowiednie zjawiska fizyczne. W rozdziale czwartym zostały omówione techniki zdalnej stymulacji każdego systemu biorącego udział w jeździe autonomicznej. Te same stymulatory celu mogą być również użyte podczas testów kompletnego samochodu. W tym przypadku wiele różnych stymulatorów musi działać jednocześnie, co niesie ze sobą pewne problemy. Po pierwsze wszystkie stymulatory muszą być ze sobą zsynchronizowane, aby każdy generował tę samą scenę dla swojego czujnika. Źródłem danych do stymulatorów są modele czujników zdefiniowanych w programie do symulacji środowiska. Kolejnym problemem jest to, że różne stymulatory celu mogą sobie przeszkadzać, jeśli czujniki są umieszczone w samochodzie blisko siebie, a przed każdym czujnikiem trzeba umieścić dużych rozmiarów stymulator często wraz z odpowiednimi materiałami tłumiącymi.

5.2.3 Stymulator oporów ruchu wraz z układami pomiarowymi

Dodatkowym stymulatorem dotychczas nieomawianym jest stymulator oporów ruchu. Jest on odpowiedzialny przede wszystkim za symulowanie momentów sił wynikających z przyspieszania, hamowania, jazdy pod wzniesienie / ze wzniesienia czy różnych oporów ruchu, jak oporów toczenia czy oporów aerodynamicznych. Dodatkowo jest stymulatorem dla odometrii, gdyż zapewnia toczenie się kół. Symulowane opory ruchu są generowane na podstawie danych otrzymanych z symulatora środowiska. Stymulatorem do testów w pętli najczęściej jest hamownia dynamometryczna. Na rynku istnieje wiele różnych typów hamowni dynamometrycznych, które mniej lub bardziej nadają się do tego typu zadań. Większość hamowni jest projektowana typowo pod pomiary mocy i momentu jednostki napędowej, dlatego nie do końca nadają się do symulacji różnych obciążeń. Występują dwa zasadnicze rodzaje hamowni dynamometrycznych: podwoziowa i napędowa.

Hamownia podwoziowa wykorzystuje rolki o dużej średnicy i dużym momencie bezwładności, na których umieszcza się samochód, jak pokazano na Rys. 91. Powierzchnia rolek jest radełkowana / moletowana w celu zwiększenia przyczepności pomiędzy rolką a oponą. Dzięki temu jest możliwe przenoszenie większych momentów, gdyż nie ma uślizgów pomiędzy oponą i rolką [353]. Hamownia podwoziowa może być przystosowana do testów jednego koła w przypadku motocykli lub dwóch lub czterech kół w przypadku samochodów. W przypadku użycia hamowni do symulowania jazdy, tylko hamownia z napędem na cztery koła może być zastosowana, również w przypadku samochodów napędzanych tylko na jedną oś. Jest to spowodowane tym, że nowoczesne samochody w momencie wykrycia różnic obrotowych pomiędzy przednią i tylną osią mogą powodować błędy systemu ABS czy kontroli trakcji lub nawet ograniczać moc silnika. Dlatego w dalszej analizie zostały uwzględnione tylko hamownie na wszystkie koła.



Rys. 91. Elementy składowe hamowni podwoziowej w konfiguracji jedna rolka na jedno koło [354].

Hamownie podwoziowe w zależności od projektu mogą używać różnych rolek i ich konfiguracji. Najprostszą konfiguracją jest hamownia składająca się z dwóch szerokich rolek - po jednej dla każdej osi. Szerokość rolki w takich przypadkach wynosi około dwóch metrów, dzięki czemu prawe i lewe koło znajduje się na tej samej rolce [355]. Jako że oba koła są umieszczone na jednej rolce, występuje pełna synchronizacja obrotów pomiędzy prawym i lewym kołem, co zmniejsza straty generowane przez dyferencjał. Drugą konfiguracją jest hamownia składająca się z czterech rolek. W tej konfiguracji każde koło samochodu jest umieszczone na osobnej rolce. Z tego powodu nie ma pełnej synchronizacji pomiędzy prawymi i lewymi kołami i mogą występować dodatkowe opory wynikające z działania mechanizmu różnicowego. Quasi synchronizację uzyskuje się poprzez przyłożenie do prawego i lewego koła dokładnie takiego samego momentu hamującego. Kolejną konfiguracją jest użycie dwóch mniejszych rolek na jedno koło. Zastosowanie dwóch rolek powoduje większą powierzchnię styku pomiędzy oponą i rolką, dzięki czemu możliwe jest przenoszenie większych momentów. Osiągnięcie takiego samego tarcia przez jedną rolkę wymaga użycia rolki o dużo większej średnicy, ale dzięki temu taka rolka lepiej odwzorowuje jazdę po płaskiej powierzchni, gdyż opory toczenia po rolce są podobne do oporów toczenia na rzeczywistej drodze. W przypadku dwóch rolek opory toczenia są większe niż rzeczywiste opory toczenia. Dodatkowo opory toczenia na takiej rolce rosną nieliniowo wraz z prędkością. Z drugiej strony taka zależność może w przybliżeniu symulować opory aerodynamiczne, które również rosną nieliniowo. Wadą pojedynczych rolek jest ich duża średnica, co powoduje, że hamownia jest duża i mniej wygodna w montażu i użytkowaniu. Dodatkowo jest bardziej niebezpieczna, ponieważ koło samochodu znajduje się w niestabilnej pozycji na górze rolki. W przypadku niepoprawnie zamocowanego samochodu, podczas testu koło może zjechać z rolki. W przypadku dwóch rolek ten problem nie występuje, gdyż koło jest zanurzone pomiędzy dwoma rolkami [356].

We wszystkich wymienionych powyżej konfiguracjach rolki oprócz umożliwienia toczenia się kół, zapewniają również moment hamujący. Moment hamujący w hamowniach inercyjnych wynika głównie z dużego momentu bezwładności rolki (jej dużej masy oraz średnicy), ale również z oporów toczenia oraz oporów mechanizmu napędowego. Zaletą tej hamowni jest nieskomplikowana budowa i niski koszt, natomiast wadą jest ograniczone maksymalne obciążenie, wynikające z momentu bezwładności rolki oraz brak możliwości kontrolowania momentu hamującego. Z tego względu ten typ hamowni nie nadaje się do testów pojazdu w pętli [357].

W celu zwiększenia maksymalnego momentu hamującego oraz możliwości jego kontrolowania do rolek hamowni inercyjnej dodaje się różnego rodzaju hamulce [357]. Mogą być to hamulce hydrauliczne lub elektryczne. Hamownie hydrauliczne z hamulcem wodnym są stosowane przy dużych mocach i momentach przy testowaniu takich pojazdów jak ciężarówki czy autobusy [358]. Hamownie z hamulcami elektrycznymi wykorzystują hamulce wirowe [357], [359] albo hamulce prądu przemiennego [360]. Hamulec wirowy wytwarza moment hamujący na zasadzie prądów wirowych indukowanych w obracającym się metalowym dysku zanurzonym w polu magnetycznym [359]. Moment hamujący jest zależny od indukcji pola magnetycznego oraz szybkości wirowania dysku i jest kontrolowany poprzez zmianę indukowanego pola magnetycznego [361]. Wadą tych hamulców jest brak momentu trzymającego oraz brak możliwości pracy silnikowej [362]. Z tego powodu hamownia z hamulcem wirowym nie nadaje się do testowania pojazdu w pętli, gdyż brak pracy silnikowej nie pozwala symulować jazdy ze wzniesienia. Dodatkowo moc jest wytracana w postaci ciepła i nagrzewania się dysku, co powoduje, że musi być on chłodzony powietrzem lub wodą. Również z braku możliwości pracy silnikowej rolki przedniej i tylnej osi muszą być spięte za pomocą odpowiedniego pasa zębatego, w celu synchronizacji prędkości obrotowych kół obu osi [354].

Tego problemu nie mają hamulce wykorzystujące silniki prądu przemiennego, gdyż potrafią zwracać odebraną energię do sieci [363]. Silnikami prądu przemiennego mogą być silniki induk-

cyjne lub silniki z magnesami trwałymi [364]. Dodatkowo oprócz pracy generatorowej - hamującej, mogą pracować silnikowo tym samym symulować np. zjazd ze wzniesienia. Dzięki temu ten typ hamowni jest w stanie symulować wszystkie wymagane warunki jazdy dla pojazdu w pętli. Natomiast występują jeszcze nowocześniejsze technologie, które jeszcze lepiej nadają się do tego typu testów.

Drugim rodzajem hamowni dynamometrycznej jest hamownia napędowa (ang. powertrain dyno), czasami klasyfikowana również jako hamownia podwoziowa z dynamometrami piastowymi [365]. W tym przypadku samochód już nie jest umieszczany na rolkach, a hamowanie odbywa się poprzez podłączenie niezależnego hamulca do każdej piasty koła, jak pokazano na Rys. 92. Wcześniej należy zdjąć koła, aby piasty kół poprzez specjalne adaptery mogły zostać połączone z wałami silnika obciążeniowego. Brak kół powoduje mniejsze opory toczenia, dlatego muszą one zostać dodatkowo zasymulowane, aby uzyskać wyniki porównywalne z oporami uzyskanymi na hamowni rolkowej [366]. Hamownie piastowe mogą używać hamulców wiropędowych [365] albo silników prądu przemiennego. W zależności od użytego typu hamulca mają one takie same cechy jak omawiane wyżej. W przypadku hamulców wiropędowych brak momentu trzymającego, brak pracy silnikowej oraz wymagane wydajne chłodzenie powodują, że ten typ nie nadaje się do symulowania rzeczywistych oporów. Największymi zaletami tego typu hamowni jest możliwość niezależnego hamowania każdego z kół, większa dynamika hamowni ze względu na brak rolek o dużej bezwładności oraz brak uślizgów kół [367], [355]. Z tego powodu hamownia napędowa z hamulcami prądu przemiennego jest najlepszym wyborem, jeśli chodzi o symulowanie rzeczywistych oporów ruchu dla pojazdu w pętli.



Rys. 92. Hamownia napędowa [368].

Niestety zarówno na hamowni podwoziowej, jak i napędowej koła muszą być ustawione idealnie na wprost podczas wykonywania testu. Powoduje to, że takie hamownie nadają się tylko do testów systemów wzdłużnych samochodu np. adaptacyjnego tempomatu. Istnieje obejście tego problemu polegające na odłączeniu układu kierowniczego od kół poprzez usunięcie drążków kierowniczych w testowanym samochodzie. Dodatkowo w celu symulacji sił działających na układ

kierowniczy pochodzących od kół np. podczas skręcania, w miejsce usuniętych drążków kierowniczych instaluje się specjalny element wykonawczy. Podczas wykonywania wirtualnego przejazdu, siły działające na układ kierowniczy pojazdu wirtualnego (pojazdu EGO) są przesyłane do siłownika, który przykłada siłę do rzeczywistej przekładni kierowniczej. Następnie spowodowane tą siłą przesunięcie przekładni jest mierzone i z powrotem wysyłane do symulatora w celu odzwierciedlenia tego w symulacji [369]. Przykładem takiego modułu jest emulator dynamicznej siły kierowania firmy AVL pokazany na Rys. 93.



Rys. 93. Emulator dynamicznej siły kierowania [274].

Alternatywnie najnowsze hamownie napędowe dają możliwość skrętu kół w niewielkim zakresie podczas wykonywania pomiaru, bez potrzeby ingerencji w przekładnię kierowniczą. Podczas wykonywania skrętu hamulce dynamometryczne są nadal zamontowane na piastach kół, ale mają możliwość przemieszczania się po odpowiedniej bieżni, jak pokazano na Rys. 94. Dzięki temu samochód ma możliwość skrętu kołami w granicach od -20° do 20° [370], co powoduje, że można testować systemy, które nie wymagają wykorzystywania pełnego zakresu skrętu kół. Problemem może być to, że hamulce dynamometryczne o dużej masie są połączone do piast, co prawdopodobnie, bazując na wideo [371], uniemożliwia wykonywanie dynamicznych manewrów kierownicą. W celu umożliwienia bardziej dynamicznych manewrów system należałoby zmodyfikować poprzez np. dodanie odpowiednich napędów do obecnie nienapędzanych kółek zapewniających przemieszczanie się hamulca. Dodatkowo w porównaniu do emulatora dynamicznej siły kierowania ten system nie jest w stanie generować rzeczywistych sił działających na układ kierowniczy zgodnie ze scenariuszem testowym, co jest pewną wadą. Mimo wszystko sama masa podłączonych hamulców w przybliżeniu symuluje siły działające na układ kierowniczy. Podsumowując pomimo ograniczonego kąta skrętu, ograniczonej dynamiki oraz braku możliwości generowania rzeczywistych sił na układ kierowniczy, tego typu hamownia jako jedyna spełnia wszystkie minimalne wymagania postawione przed hamownią do testowania pojazdu w pętli. Jest to hamownia dostępna na rynku, którą można użyć bez żadnych modyfikacji hamowni czy samochodu, dlatego w mojej opinii jest na dziś optymalnym wyborem.



Rys. 94. Hamownia dynamometryczna z możliwością skrętu kół [371].

5.2.4 Zasada działania stanowiska

Istnieją dwie metody testowania z wykorzystaniem wirtualnych jazd testowych: testowanie w pętli otwartej oraz w pętli zamkniętej. Testowanie w pętli otwartej polega na tym, że testowane urządzenie jest stymulowane z zewnątrz, ale jego odpowiedź nie jest mierzona i nie jest zwracana do symulatora. Innymi słowy, dane idą zawsze tylko w jednym kierunku z symulacji do samochodu i nigdy z powrotem. To powoduje, że w symulatorze nie pojawia się informacja o reakcji samochodu na wygenerowany sygnał stymulujący np. jeśli rzeczywisty samochód zahamuje to nie będzie to odzwierciedlone w symulacji i pojazd EGO będzie jechał jak dotąd. Testowanie w pętli otwartej powoduje brak synchronizacji i spójności pomiędzy fizycznym samochodem a samochodem EGO. Z tego powodu ta metoda nie jest najlepszym rozwiązaniem do pełnego przetestowania samochodu w laboratorium i znacznie lepszym jest użycie pętli zamkniętej.

Testowanie w pętli zamkniętej polega na tym, że odpowiedź testowanego urządzenia jest mierzona i z powrotem zwracana do symulatora. Dzięki temu w symulacji widoczna jest reakcja samochodu na napotkaną sytuację i nie następuje utrata synchronizacji pomiędzy rzeczywistym pojazdem a pojazdem ego. Testowanie w pętli zamkniętej wymaga dodatkowych czujników mierzących różne parametry samochodu i następnie wysyłania ich w czasie rzeczywistym z powrotem do symulacji. Podstawowymi parametrami, które muszą być mierzone są: prędkość lub przyspieszenie i kąt skręcenia kierownicy. Do tego celu można wykorzystać dodatkowe zewnętrzne urządzenia pomiarowe, urządzenia pomiarowe zapewnione przez hamownię lub wykorzystać czujniki samochodu. Pomiarów wykonywanych przez czujniki samochodu można albo odczytać wpinając się w odpowiednią magistralę samochodową lub poprzez złącze diagnostyczne OBD II. Przykładem działania systemu w pętli zamkniętej jest urządzenie omawiane w poprzednim rozdziale do generowania siły układu kierowniczego.

5.2.5 Obecne projekty stanowisk

Jednymi z niewielu firm oferujących kompletny system testowy do pojazdu w pętli z uwzględnieniem hamowni dynamometrycznej są firmy AVL oraz TOYO. AVL posiada system o nazwie DrivingCube, który jest systemem pracującym w pętli zamkniętej, składającym się z oprogramowania do wirtualnych jazd testowych, hamowni dynamometrycznej oraz stymulatorów kamery, radaru oraz lokalizacji satelitarnej GNSS. Dodatkowo zapewnia emulator dynamicznej siły kierowania w celu możliwości skręcania kierownicą podczas wykonywania testów na hamowni i generowania sił działających na przekładnię kierowniczą [274]. Stanowisko testowe firmy TOYO również jest przystosowane do testowania pojazdu w pętli, zapewnia hamownię z możliwościami skrętu kół, natomiast posiada stymulatory tylko radaru oraz kamery [372].

Zostało zrealizowanych również kilka projektów badawczych działających na podobnej zasadzie. Jednym z projektów było zrealizowanie stanowiska testowego dla niewielkiego samochodu elektrycznego wyposażonego w kamerę Mobileye 560 z funkcjami ADAS [267]. Został on ustawiony na hamowni podwoziowej i w celu umożliwienia skręcania kierownicą odłączono przekładnię kierowniczą. Stanowisko wykorzystywało symulator jazdy do generowania obrazu dla kamery, natomiast sam pojazd był kierowany przez kierowcę. Testy polegały na prowadzeniu samochodu i obserwowaniu czy kamera z funkcją ADAS dobrze rozpoznała sytuację na drodze i wygenerowała ostrzeżenie np. o opuszczaniu pasa ruchu. Innym projektem było stanowisko do badania dynamiki pojazdu opartego na radarze. Stanowisko badawcze składało się z hamowni podwoziowej, na której zamontowany był badany pojazd oraz symulator celu radarowego. Czujnik radarowy pojazdu był stymulowany wielokanałowym, wieloecelowym symulatorem celu radarowego na podstawie danych wygenerowanych z CarMaker. Odpowiedź pojazdu była mierzona i zwracana z powrotem do symulacji w celu zwizualizowania zachowania pojazdu [366].

5.3 Podsumowanie rozdziału

W rozdziale zidentyfikowano i opisano zasadę działania i najważniejsze składowe laboratoryjnego stanowiska testowego do pojazdu w pętli, który byłby w stanie spełnić wymagania postawione w rozdziale 2. Dodatkowo wykonano przegląd rodzajów i typów hamowni dynamometrycznych pod kątem wybrania najlepszego rozwiązania do symulowania oporów ruchu podczas wirtualnych jazd testowych. Na koniec zostały zbadane komercyjne stanowiska testowe do fuzji czujników oraz pojazdu w pętli, zakres testów, które są w stanie wykonać. Zidentyfikowano braki i problemy oraz zaproponowano rozwiązania ulepszenia obecnych konstrukcji.

Największym zidentyfikowanym problemem jest to, że znaczna większość stymulatorów jest wykorzystywana głównie w testach HIL, gdzie testowany czujnik jest wyizolowany z samochodu. Istnieje kilka działających stanowisk testowych HIL do fuzji czujników, które jednocześnie wykorzystują kilka stymulatorów, gdzie każdy z czujników jest w osobnej komorze bezdechowej. Obecnie nie ma na rynku dostępnych stanowisk testowych do stymulowania jednocześnie wszystkich czujników jazdy autonomicznej zarówno w testach HIL, jak i VIL. W większości przypadków testy fuzji czujników w metodzie HIL ograniczają się do jednoczesnego stymulowania maksymalnie trzech czujników.

W przypadku testowania pojazdu w pętli istnieją stanowiska testowe wykorzystujące hamownię dynamometryczną i stymulującą dwa lub trzy systemy jednocześnie. Również brakuje stymulatorów kilku czujników takich jak lidar czy czujniki ultradźwiękowe. Z tego powodu tego typu stanowiska ograniczają się do weryfikacji pojedynczych systemów ADAS, a nie do jazdy autonomicznej. Dodatkowo istotnym problemem jest brak możliwości skręcania kołami podczas wykonywania testu, co jest obchodzone ingerencją w strukturę pojazdu, poprzez odłączanie kół od przekładni kierowniczej. Nowoczesne hamownie dynamometryczne z hamulcami prądu pręmiennego również oferują możliwość skręcania kół podczas testów oraz są w stanie symulować precyzyjnie, z dużą dynamiką obciążenia działające na koła samochodu. Dzięki temu nie ma potrzeby ingerowania w konstrukcję samochodu, a hamownia jest w stanie zapewnić wierne odwzorowanie oporów ruchu. Niemniej w przypadku chęci zrealizowania stanowiska testowego do symulacji środowiska zewnętrznego w laboratorium jest nadal jeszcze sporo pracy. Przede wszystkim w pierwszej kolejności należałoby zintegrować ze sobą dostępne stymulatory, które obecnie pracują głównie w systemach HIL, aby były one w stanie bezawaryjnie pracować, nie zakłócając i nie przeszkadzając sobie nawzajem. To pozwoliłoby na wysokie pokrycie najważniejszych i najczęściej wykorzystywanych czujników. W dalszej kolejności należałoby skupić się na rozwinięciu brakujących technologii symulatorów celów dla termowizji, aktywnych kamer bliskiej podczerwieni, IMU oraz ulepszeniu hamowni dynamometrycznej pod kątem pełniejszego i dynamiczniejszego skręcania kół.

6 Projekt stanowiska do testów czujnika kąta kierownicy

Rozdział został opracowany w oparciu o artykuły naukowe opublikowane w trakcie realizacji pracy doktorskiej [1], [2] i [3].

6.1 Wstęp

Oprócz różnego typu czujników, które są odpowiedzialne za percepcję otaczającego świata, drugim kluczowym elementem w automatyzacji jazdy są aktywne elementy wykonawcze, które są odpowiedzialne za kierowanie, przyspieszanie czy hamowanie. W przypadku ich braku, pomimo że samochód miałby pełną percepcję otoczenia, to nie byłby w stanie wykonać żadnych manewrów, a jedynie wygenerować ostrzeżenia wizualne, haptyczne lub dźwiękowe. Jest to wystarczające w niektórych systemach ADAS, natomiast jest kompletnie niewystarczające do automatyzacji jazdy. W normalnym samochodzie kierowca jest odpowiedzialny za operowanie pedałami gazu, sprzęgła i hamulca, operowanie kierownicą czy zmianami biegów. W samochodzie autonomicznym lub o wysokim poziomie automatyzacji (wyższym niż 2) te czynności muszą być realizowane przez samochód.

Czynności te są realizowane za pomocą różnych systemów wchodzących w skład technologii Drive-By-Wire (DbW). Technologia DbW polega na wykorzystaniu systemów elektrycznych lub elektromechanicznych do wykonywania funkcji pojazdu tradycyjnie realizowanych za pomocą połączeń mechanicznych. Nazwa Drive-by-Wire jest ogólną nazwą technologii, a w jej skład wchodzi takie systemy jak: elektroniczne sterowanie przepustnicą (Throttle-by-Wire), elektroniczne hamowanie (Brake-By-Wire) czy elektroniczne kierowanie (Steer-by-Wire).

Najbardziej rozpowszechniony jest system elektronicznej przepustnicy, która zastąpiła przepustnicę połączoną z pedałem gazu za pomocą linki. W mechanicznej wersji wraz ze wciśnięciem pedału gazu linka otwierała zawór motylkowy, dostarczając więcej powietrza do silnika. Elektroniczna przepustnica składa się z trzech głównych elementów: pedału przyspieszenia z czujnikami, elektronicznej przepustnicy sterowanej silnikiem elektrycznym oraz komputera sterującego. Podczas używania pedału gazu, jego wychylenie jest mierzone za pomocą czujników i rejestrowane przez jednostkę sterującą, która następnie w oparciu o te dane steruje silnikiem elektrycznym przepustnicy w celu dawkowania ilości powietrza do silnika. Na podobnej zasadzie działają wszystkie inne systemy DbW, tzn. z jednej strony czujnik wykonuje pomiary, natomiast z drugiej strony jest element wykonawczy kontrolowany przez sterownik.

Jednym z ostatnich systemów występującym nadal w wersji mechanicznej, praktycznie we wszystkich samochodach, jest układ kierowniczy. Przez wiele dziesiątek lat był wielokrotnie ulepszany i modyfikowany, natomiast nadal występuje mechaniczne połączenie kierownicy z kołami. Jednym z najważniejszych ulepszeń było zastosowanie systemu wspomagania kierownicy. Służy on do łatwiejszego manewrowania samochodem, dzięki zwielokrotnieniu siły przyłożonej przez kierowcę do kierownicy. Przez wiele lat systemy wspomagania kierownicy ewoluowały od systemów hydraulicznych, a skończywszy na wspomaganii czysto elektrycznym.

W układzie kierowniczym wyposażonym we wspomaganie hydrauliczne HPS (ang. Hydraulic Power Steering) wspomaganie jest realizowane za pomocą układu hydraulicznego bez żadnych elektrycznych elementów sterujących. Wspomaganie hydrauliczne składa się z m.in. z siłownika hydraulicznego współpracującego z pompą hydrauliczną, która jest napędzana bezpośrednio z paska wieloklinowego silnika spalinowego [373]. Pompa jest na stałe połączona z silnikiem, dlatego jest napędzana cały czas, niezależnie od zapotrzebowania na wspomaganie, co powoduje podwyższone zużycie paliwa [374]. Dodatkowo jej obroty są wprost proporcjonalne do obrotów silnika. Oznacza to, że przy wysokich prędkościach obrotowych silnika układ kierowniczy będzie działał mocniej niż przy niskich prędkościach obrotowych. Z tego powodu w obwodzie jest zawór sterujący przepływem, zapewniający ciśnienie niezależne od obrotów silnika [375]. Główną

zaletą HPS są duże siły wspomaganie generowane przez układ hydrauliczny (20% kierowca – 80% wspomaganie), dlatego takie układy nadal są stosowane w ciężkich pojazdach jak np. ciężarówka [373]. Główne wady to zwiększone zużycie paliwa oraz masa całego układu hydraulicznego w porównaniu z elektrohydraulicznym EHPS (ang. Electro- Hydraulic Power Steering) czy elektrycznym wspomaganie kierownicy EPS (ang. Electrical Power Steering).

Hydrauliczne wspomaganie kierownicy następnie ewoluowało do elektrohydraulicznego wspomaganie kierownicy EHPS (ang. Electro- Hydraulic Power Steering), gdzie napęd pompy hydraulicznej z silnika spalinowego został zastąpiony przez silnik elektryczny, natomiast pozostałe hydrauliczne podzespoły zostały niezmiennione [376]. Jako że pompa nie jest dłużej już napędzana z silnika spalinowego, a jej obroty nie są wprost proporcjonalne do obrotów silnika, zużycie paliwa uległo zmniejszeniu o ok. 1% [377]. Niestety pompa nadal jest napędzana z niewielką szybkością podczas braku ruchów kierownicą, aby w układzie hydraulicznym istniało minimalne ciśnienie wymagane w momencie skrętu kierownicy [378]. Dodatkowo wymagany jest sterownik ECU, który steruje silnikiem elektrycznym w oparciu o prędkość samochodu oraz prędkość kątową kierownicy [376].

W kolejnej wersji zrezygnowano z całego układu hydraulicznego, a jego rolę przejął jedynie silnik elektryczny z jednostką sterującą, tworząc tym samym elektryczne wspomaganie kierownicy EPS (ang. Electrical Power Steering). Pozwoliło to na ograniczenie zużycia paliwa od 3% do 6% w porównaniu do EHPS, gdyż silnik pracuje tylko w momencie kręcenia kierownicą. Dodatkowo poprzez usunięcie całego systemu hydraulicznego uzyskano redukcję masy od 3 kg do 5 kg [379]. Wadami tego rozwiązania jest możliwość niewielkiego przenoszenia drgań z silnika elektrycznego na kierownicę oraz fluktuacje momentu w zakresie od 1% do 3% [379]. Silnik jest sterowany za pomocą sterownika w oparciu o moment siły przyłożonej przez kierowcę, kąt skręcenia kierownicy, prędkość samochodu oraz moment siły pochodzącej od kół samochodu [380]. Dzięki systemowi EPS jest możliwa implementacja funkcji ADAS takich jak asystent pasa ruchu (LKA) czy system wspomaganie parkowania [377]. Pojawienie się EPS pozwoliło z kolei na stworzenie aktywnego układu kierowniczego AS (ang. Active Steering) przez firmę ZF Lenksysteme GmbH, który pierwszy raz został zaprezentowany w BMW Serii 5 [381]. Aktywny układ kierowniczy to rozszerzenie EPS o specjalną mechanikę oraz oprogramowanie, dzięki którym jest możliwe dodawanie lub odejmowanie kąta do kąta kierownicy wymuszane przez kierowcę. Z tego powodu układ kierowniczy może zmieniać w ograniczonym zakresie przełożenie kierownicze w zależności od szybkości samochodu, kąta skręcenia kierownicy czy trybu jazdy. Dzięki temu przy wyższych prędkościach układ kierowniczy jest bardziej stabilny, a przy niższych bardziej zwrotny.

Elektryczne systemy wspomaganie są bardzo dobrym punktem startowym do stworzenia układu kierowniczego typu Steer-by-Wire. Pomimo że w układzie z elektrycznym wspomaganie istnieje nadal mechaniczne połączenie między kierownicą a kołami, to taki układ jest już wyposażony w wiele czujników, elementów wykonawczych oraz sterownik, które są również niezbędne w SbW. W technologii SbW kolumna kierownicza została całkowicie odseparowana od pozostałych składowych układu kierowniczego, tracąc bezpośrednio, mechaniczne połączenie z kołami, co zaprezentowano na Rys. 95. W tym przypadku skręcanie kół jest realizowane silnikiem elektrycznym w oparciu o m.in. zmierzony kąt kierownicy. Za pomiar kąta kierownicy odpowiada samodzielne ECU, które najczęściej jest nazywane czujnikiem kąta kierownicy SAS (ang. Steering Wheel Angle Sensor). Zmierzony kąt jest cyklicznie wysyłany na magistralę komunikacyjną, który następnie jest odbierany przez urządzenie wykonawcze - Road-Wheel Motor (RWM) realizujące skręt kół. Oprócz silnika realizującego skręty kół jest dodatkowy silnik w kolumnie kierowniczej - Hand-Wheel Motor (HWM), który jest odpowiedzialny za generowanie odpowiednich sił, aby kierowca miał wrażenie sił pochodzących od klasycznego układu kierowniczego.



Rys. 95. Układ kierowniczy w technologii SbW z widocznym odseparowaniem kolumny kierowniczej od przekładni kierowniczej [1].

Technologia SbW posiada wiele zalet jak możliwość dowolnej zmiany przełożenia kierowniczego w zależności od prędkości samochodu czy trybu jazdy oraz polepszenie komfortu prowadzenia samochodu, gdyż nie są przenoszone drgania z podłoża na kierownicę. Możliwe jest też wykonywanie skrętu kołami bez odzwierciedlenia tego w ruchu kierownicy, co ma znaczenie z punktu widzenia samochodów o wysokiej automatyzacji jazdy. Dodatkowo jako że kolumna kierownicza jest odseparowana od przekładni kierowniczej, może ona się chować w desce rozdzielczej w momencie korzystania z funkcji autopilota. Dzięki temu kierowca zyskuje więcej przestrzeni w kabinie samochodu. Jeśli chodzi o wady to przede wszystkim taki układ jest dużo bardziej skomplikowany, gdyż posiada wiele czujników, napędów oraz skomplikowane metody sterowania, co może przyczynić się do zmniejszenia ogólnej niezawodności. Z tego powodu jest bardzo mało samochodów wykorzystujących tę technologię. Niemniej ze względu na coraz większą automatyzację jazdy technologia Steer-by-Wire staje się coraz popularniejsza. W 2022 roku został zaprezentowany Lexus RZ 450e, który jest pierwszym samochodem w historii nieposiadającym mechanicznego połączenia pomiędzy kierownicą i kołami [1].

Jednym z ważniejszych elementów układu kierowniczego i systemu SbW jest czujnik kąta kierownicy SAS (ang. Steering Wheel Angle Sensor). Jest on odpowiedzialny za pomiar kąta i prędkości kątowej kierownicy oraz wysłanie tych danych z wykorzystaniem magistrali do współpracujących urządzeń. Pomiar kąta i prędkości kątowej jest również wykorzystywany w działaniu bardzo wielu innych systemów takich jak: elektryczne wspomaganie kierownicy (EPS), elektroniczna stabilizacja toru jazdy (ESP), aktywny układ kierowniczy (AS), asystent pasa ruchu (LKA), cztery koła skrętne, aktywne zawieszenie, reflektory skrętne czy wykrywanie senności kierowcy [1].

Często testy czujnika ograniczają się do podstawowych przypadków użycia, które mają niewiele wspólnego z rzeczywistymi manewrami podczas prawdziwej jazdy np.:

1. Zakręć w prawo/lewo o kąt x z niską/wysoką prędkością kątową i sprawdź, czy SAS pokazuje poprawny kąt x
2. Zakręć w prawo/lewo z prędkością kątową x i sprawdź, czy SAS pokazuje poprawną prędkość kątową x

Tego typu testy oczywiście sprawdzają, czy czujnik poprawnie mierzy kąt i prędkość kątową, ale niestety tylko w bardzo niewielkim zakresie w porównaniu do tego, jak będzie używany w rzeczywistości. Podczas prawdziwej jazdy czujnik jest odpowiedzialny za pomiar kąta i prędkości kątowej w bardzo różnych sytuacjach, w tym znacznie bardziej krytycznych, od których może zależeć zdrowie i życie kierowcy i pasażerów. Takimi manewrami mogą być np. wyprzedzanie, omijanie przeszkód (test łosia) czy wychodzenie z poślizgu. Wówczas poprawne działanie czujnika może mieć ogromne znaczenie i z tego powodu nie można sobie pozwolić, aby takie krytyczne przypadki nie zostały przetestowane.

W dokumentacji technicznej czujników skrętu kierownicy możemy znaleźć takie parametry jak: zakres pomiaru, dokładność/rozdzielczość kąta i prędkości kątowej, nieliniowość, histereza czy okres wysyłania danych na magistralę. Parametry te opisują właściwości metrologiczne czujnika, jednak ich przełożenie na jakość sterowania samochodem nie jest jednoznaczne. Nie da się bezpośrednio określić, czy systemy wykorzystujące te czujniki będą działały prawidłowo i wydajnie. Producenci samochodów wiedząc, że układ kierowniczy ma olbrzymi wpływ na samochód, automatycznie wysuwają coraz bardziej restrykcyjne wymagania dokładnościowe dla czujnika kąta kierownicy. Wymagania te jest coraz trudniej spełnić dostawcom czujników, dlatego warto postawić pytanie: Czy i w jakim stopniu parametry czujnika, takie jak dokładność/rozdzielczość oraz okres wysyłania danych wpływają na trajektorię samochodu i jego zachowanie podczas rzeczywistej jazdy?

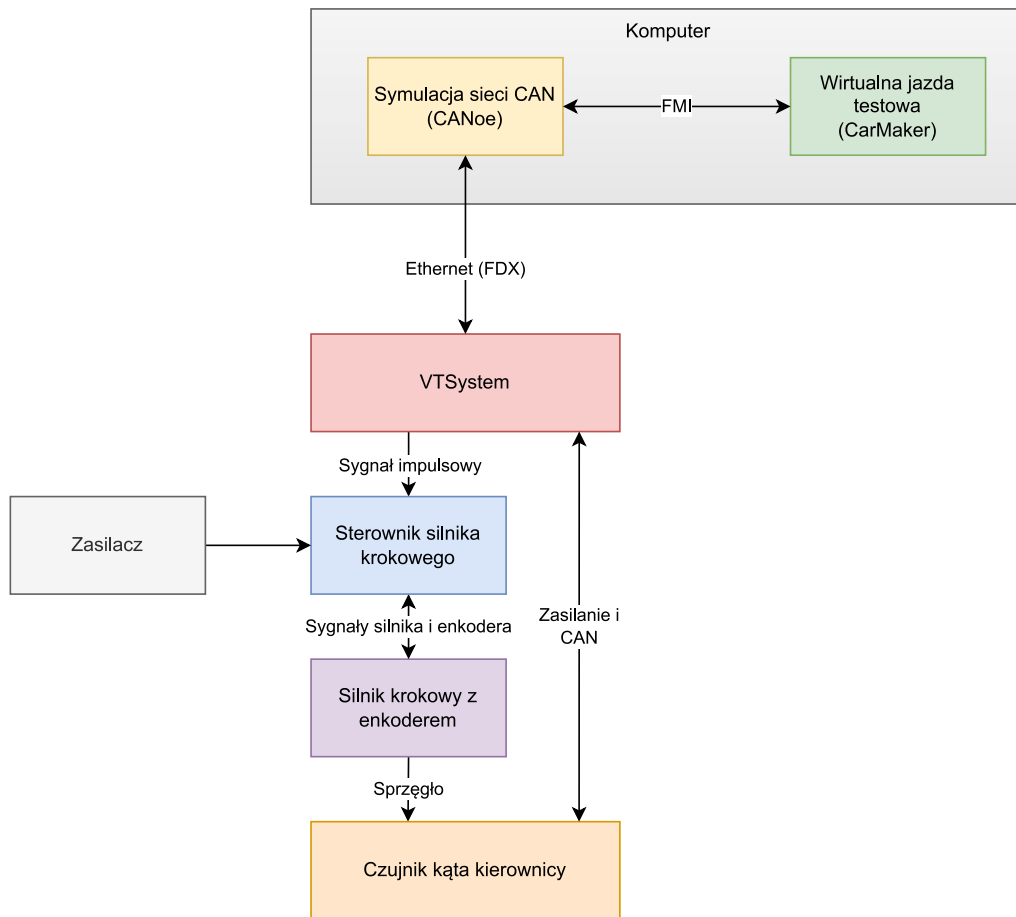
Do tego celu zbudowano stanowisko testowe na wzór stanowiska do testów pojazdu w pętli. Wykorzystuje ono wirtualne jazdy testowe stworzone w oprogramowaniu CarMaker oraz CANoe. Zbadano wpływ czujnika kąta kierownicy na samochód z układem kierowniczym typu Steer-by-Wire (SbW). Wyznaczono błędy wprowadzane przez system w celu oceny jego stabilności, wydajności i przydatności do testów. Następnie przetestowano i porównano trzy komercyjne czujniki kąta kierownicy podczas wirtualnego przejazdu testowego i określono ich wydajność w technologii SbW. Określono błędy czujników oraz spójność względem parametrów deklarowanych przez producenta. Następnie zbadano wpływ dokładności czujnika i okresu wysyłania danych na magistralę CAN na trajektorię samochodu wyposażonego w technologię Steer-by-Wire. Bezpośredni wpływ parametrów takich jak nieliniowość i histereza nie są tematem badań w tym projekcie, natomiast zakres czujnika jest właściwością związaną z konstrukcją mechaniczną i nie ma wpływu na jakość sterowania.

6.2 Budowa stanowiska testowego

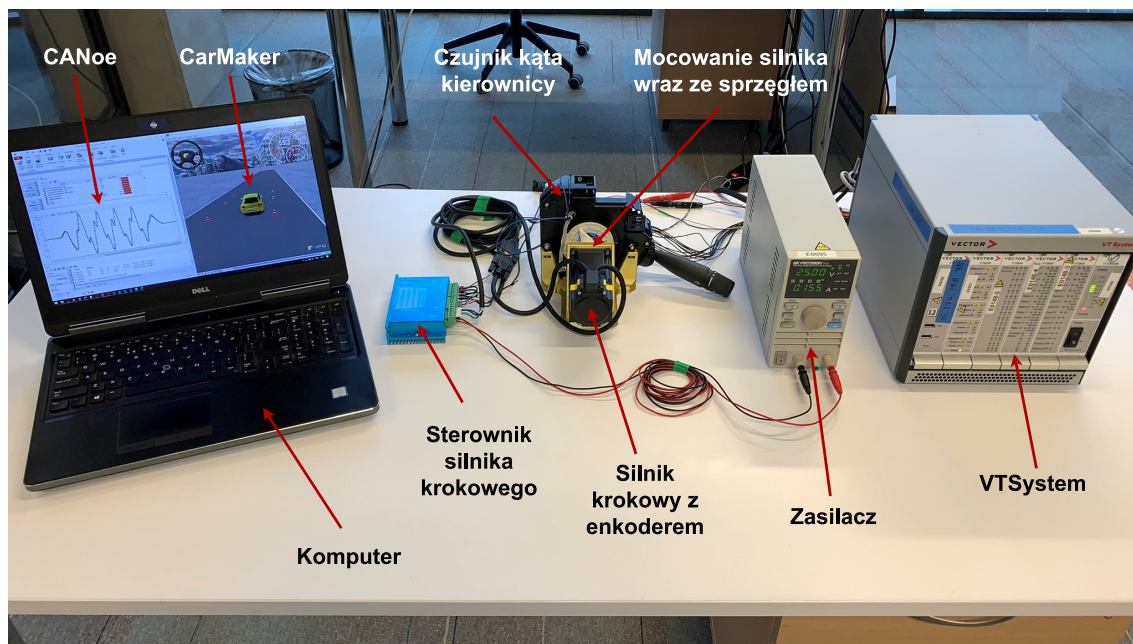
Opracowane autorskie stanowisko testowe składa się z następujących komponentów:

- Oprogramowania CarMaker do wykonywania wirtualnych jazd testowych oraz ich wizualizacji
- Oprogramowania CANoe do symulacji magistrali CAN i urządzeń współpracujących z badanym czujnikiem
- Systemu VTSYSTEM spełniającego funkcję interfejsu CAN pomiędzy CANoe, a czujnikiem oraz generatorem impulsów do sterowania sterownikiem silnika krokowego
- Sterownika silnika krokowego
- Silnika krokowego z wbudowanym enkoderem
- Badanego czujnika kąta skrętu kierownicy
- Mocowania silnika wraz ze sprzęgłem do połączenia silnika krokowego z badanym czujnikiem

Schemat stanowiska testowego z uwzględnionymi interfejsami został zaprezentowany na Rys. 96, natomiast jego rzeczywista realizacja na Rys. 97.



Rys. 96. Elementy składowe oraz interfejsy systemu testowego.



Rys. 97. Elementy systemu testowego działającego w pętli zamkniętej i wykorzystującego wirtualne jazdy testowe do testowania czujnika kąta kierownicy.

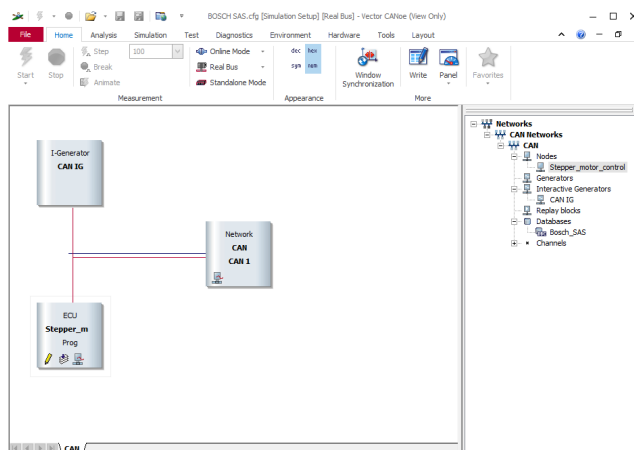
6.2.1 CarMaker i CANoe

W oprogramowaniu CarMaker została przygotowana wirtualna jazda testowa polegająca na wykonaniu slalomu pomiędzy 10 pachołkami rozłożonymi co 18 metrów, na całkowitym dystansie wynoszącym 230 metrów, co pokazano na Rys. 98. Spośród różnych dostępnych manewrów, slalom został wybrany, gdyż podczas jego wykonywania, kierownica jest skręcana w szerokim zakresie kątów, w obu kierunkach i z różnymi prędkościami kątowymi. To pozwala dokładnie zwerfikować wydajność czujnika kąta kierownicy. Samochodem, który wykonywał przejazd, był model samochodu Volkswagen Beetle z domyślnymi parametrami ustawionymi w CarMaker. Samochód rozpoczynał slalom z prędkością początkową 55 km/h i taką prędkość starał się utrzymywać przez cały okres wykonywania slalomu. Prędkość wynosząca 55 km/h została wyznaczona eksperymentalnie, gdyż przy takiej prędkości samochód był w stanie pokonać slalom w najkrótszym czasie bez strącania żadnych pachołków.



Rys. 98. Samochód podczas wykonywania przejazdu testowego.

W CANoe dla każdego testowanego czujnika została przygotowana osobna symulacja sieci CAN, odpowiedzialna za zasymulowanie pozostałych urządzeń, z którymi komunikuje się czujnik. Dzięki temu czujnik działa prawidłowo mierząc kąt i prędkość kątową oraz wysyłając i odbierając wszystkie dla niego ważne dane. Jedna ze stworzonych symulacji sieci CAN została zaprezentowana na Rys. 99.



Rys. 99. Symulacja sieci CAN stworzona w programie CANoe.

6.2.2 VTSystem

Jako interfejs pomiędzy CANoe a testowanym czujnikiem wykorzystano VTSystem. VTSystem jest to system służący do wykonywania testów, który składa się z dowolnie wymiennalnych kart pomiarowych. Zdecydowano się na taki wybór z kilku powodów. Po pierwsze, VTSystem zapewnia wykonywanie testów w czasie rzeczywistym, dzięki wykorzystaniu karty VT6011 udostępniającej własny procesor z systemem operacyjnym czasu rzeczywistego. Po drugie, zapewnia interfejs CAN do komunikacji z czujnikiem z pomocą karty VT6104A. Po trzecie, dzięki zastosowaniu karty wejść/wyjść VT2848 jest w stanie generować stabilny sygnał prostokątny, który jest niezbędny do sterowania sterownikiem silnika krokowego. Oprócz wyżej wymienionych elementów VTSystem składa się z elementów współpracujących: obudowy VT System Desktop Case 42 HP, płyty głównej VT8006A, zasilacza VTC8920B oraz interfejsu CAN CANpiggy 1057Gcap.

VTSystem jest podłączony do komputera za pomocą ethernetu i do komunikowania się wykorzystuje protokół szybkiej wymiany danych FDX (ang. Fast Data Exchange). Dzięki protokołowi FDX istnieje możliwość wymiany danych takich jak zmienne systemowe i środowiskowe, sygnały CAN czy startowanie i zatrzymywanie pomiarów i symulacji. Można również samodzielnie definiować zmienne, które mają być wymieniane za pomocą pliku XML lub używając środowiska graficznego FDX Editor wbudowanego w oprogramowanie CANoe.

6.2.3 Sterownik silnika krokowego

W konstrukcji stanowiska wykorzystano sterownik hybrydowy o oznaczeniu HBS57AJ. Najważniejszą cechą zastosowanego sterownika jest możliwość pracy w sprzężeniu zwrotnym z silnikami wykorzystującymi enkodery. Sterownik działa w zakresie napięć od 24 do 80 V, natomiast sygnały sterujące przyjmuje w zakresie od 5 do 24 V. Sterownik przyjmuje dwa sygnały cyfrowe: jeden określający ilość i szybkość wykonywanych kroków oraz drugi określający kierunek obrotów. Kąt α jest proporcjonalny do liczby impulsów n podawanych na sterownik zgodnie z równaniem (36), natomiast prędkość kątowna silnika ω jest proporcjonalna do częstotliwości podawania tych impulsów f zgodnie z zależnością (37).

$$n = \frac{\alpha}{\alpha_{krok}} \quad (36)$$

gdzie:

n – liczba impulsów sterujących,

α – kąt,

α_{krok} – kąt pojedynczego kroku.

$$f = \frac{\omega}{\alpha_{krok}} \quad (37)$$

gdzie:

f – częstotliwość impulsów sterujących,

ω – prędkość kątowna,

α_{krok} – kąt pojedynczego kroku.

Sterownik posiada ponadto cztery przełączniki typu DIP, za pomocą których można włączyć pracę w trybie mikrokroków. W zależności od kombinacji przełączników można uzyskać rozdzielczość do 200 mikrokroków.

6.2.4 Silnik krokowy

Zastosowano silnik krokowy z wbudowanym enkoderem o oznaczeniu 57BTG-84. Jest to dwufazowy bipolarny silnik krokowy, o maksymalnym momencie obrotowym wynoszącym 2,5 Nm, z minimalnym kątem obrotu wynoszącym 1,8° i tolerancją +/-5%. Zdecydowano się na silnik krokowy z wbudowanym enkoderem, gdyż silniki krokowe sterowane w pętli otwartej często potrafią gubić kroki i nie osiągać wymaganego kąta obrotu. Enkoder zapewnia sprzężenie zwrotne, na podstawie którego sterownik kompensuje ewentualne błędy, co powoduje, że silnik niezawodnie obraca się o zadany kąt.

Jako że najdokładniejszy testowany czujnik charakteryzuje się z dokładnością 0,1°, to dokładność silnika krokowego musi być większa. Z tego względu silnik jest sterowany w trybie mikrokroków, a pojedynczy krok, który wynosi 1,8°, został podzielony jeszcze 200 krotnie. Końcowo każdy pojedynczy impuls obraca silnik o 0,009° zgodnie z równaniem (38), co jest już wystarczającą dokładnością. W tym przypadku pełny obrót silnika o 360° wymaga podania na niego równo 40 tys. impulsów.

$$\alpha_{krok} = \frac{1.8^\circ}{m} \quad (38)$$

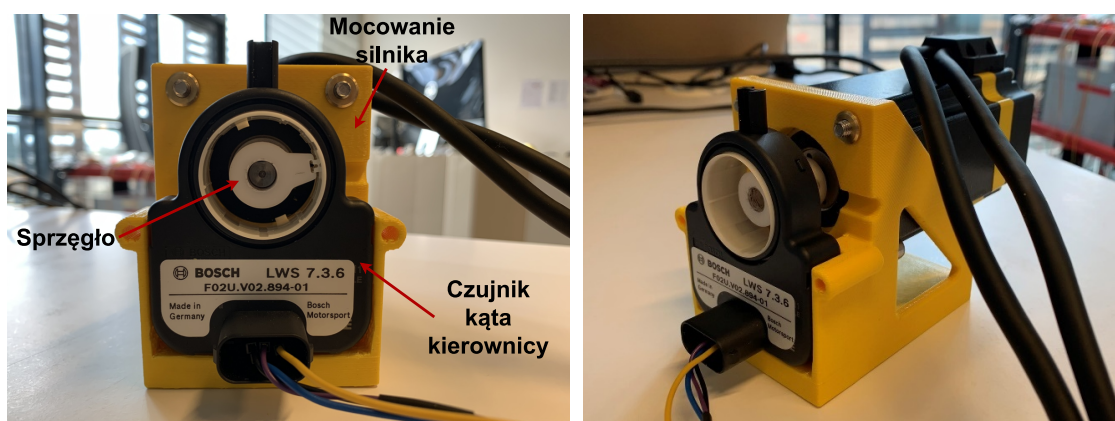
gdzie:

α_{krok} – kąt pojedynczego kroku/mikrokroku,

m – dzielnik/liczba mikrokroków.

6.2.5 Mocowanie silnika ze sprzęgłem

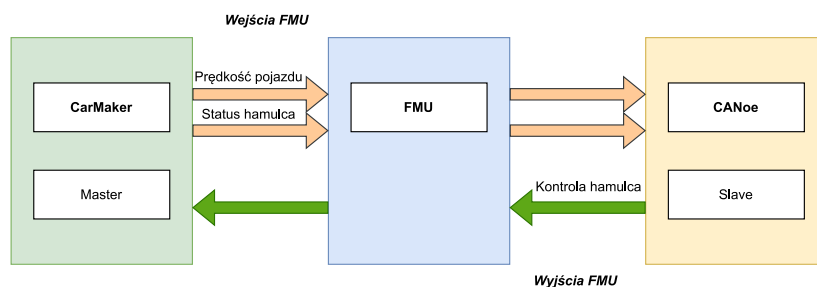
Do każdego z badanych czujników kąta kierownicy zostało zaprojektowane i wydrukowane na drukarce 3D mocowanie silnika wraz ze sprzęgłem. Mocowanie jest odpowiedzialne za sztywne połączenie silnika krokowego z badanym czujnikiem ze szczególną dbałością o współosiowość tych dwóch elementów. Sprzęgło jest odpowiedzialne za przenoszenie momentu obrotowego z silnika na czujnik kąta kierownicy. Jeden z przygotowanych mocowań silnika wraz z silnikiem i czujnikiem został pokazany na Rys. 100.



Rys. 100. Mocowanie silnika i czujnika.

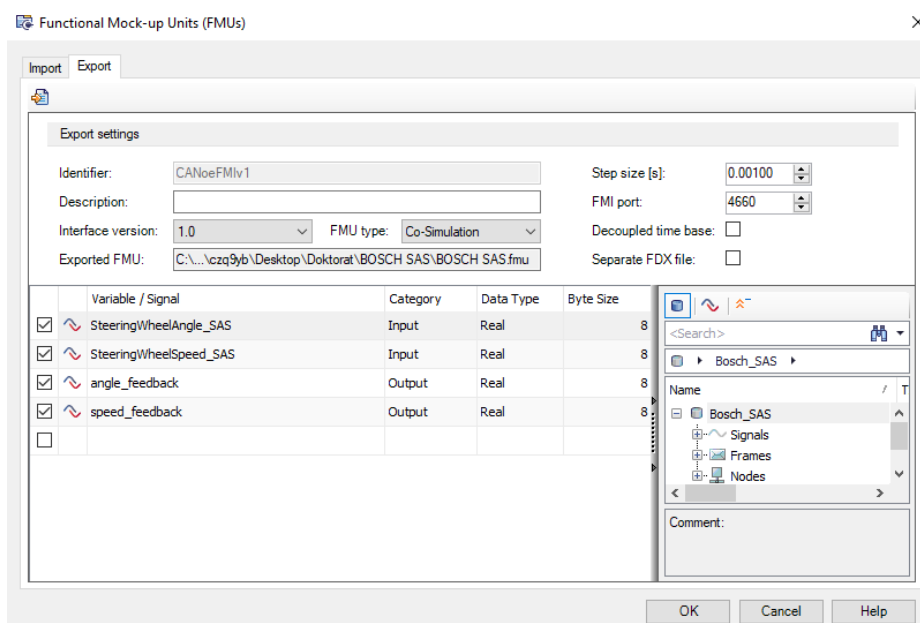
6.2.6 Interfejs FMI

Do komunikacji pomiędzy CANoe, a CarMaker'em wykorzystano interfejs FMI (ang. Functional Mock-Up Interface). To otwarty standard, który służy do wymiany modeli pomiędzy różnymi aplikacjami inżynierskimi oraz do kosymulacji, czyli wykonywania równocześnie symulacji przez dwie różne aplikacje wymieniając się danymi w czasie rzeczywistym. Taki model nazywany FMU (ang. Functional Mock-Up Unit) ma formę spakowanej paczki zip, która w sobie posiada kilka plików definiujących takie parametry jak: wersja interfejsu, typ interfejsu, okres wymiany danych, numer portu FMI, a przede wszystkim definicję zmiennych wysyłanych i odbieranych. Ogólna zasada komunikacji pomiędzy CarMaker'em i CANoe z wykorzystaniem FMU została zaprezentowana na Rys. 101.



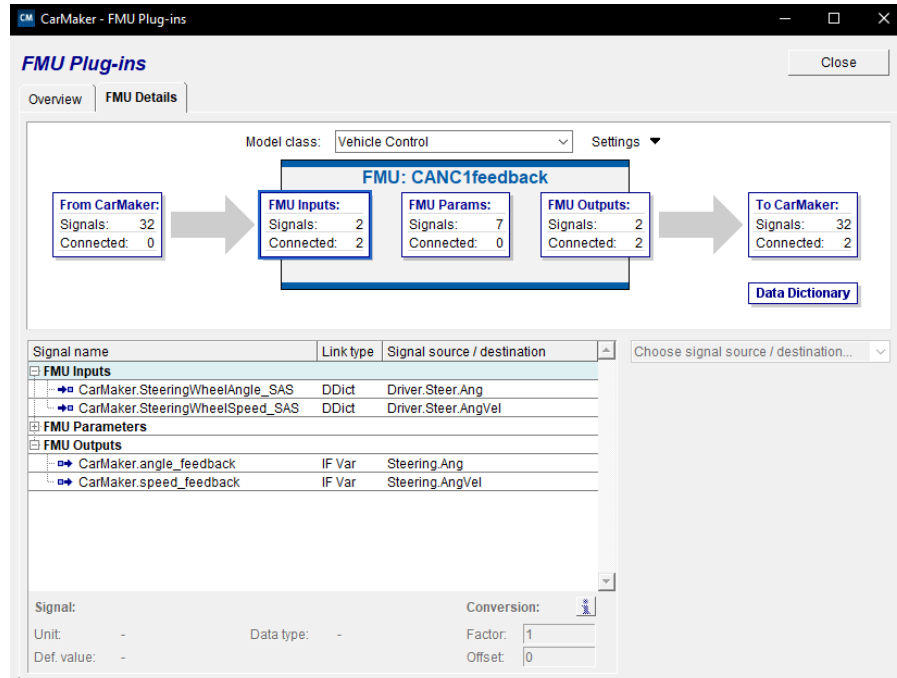
Rys. 101. Przykładowy schemat komunikacji pomiędzy CarMaker i CANoe z wykorzystaniem FMU w architekturze master-slave.

FMU zostało stworzone za pomocą graficznej aplikacji wchodzącej w skład CANoe – Functional Mock-Up Interface (FMI), jak pokazano na Rys. 102. Jako że CANoe podczas pracy z VTSys-tem'em służy jedynie do wizualizacji, gdyż same obliczenia są wykonywane bezpośrednio na VTSys-tem'ie, po wygenerowaniu pliku FMU należało go jeszcze raz ręcznie zmodyfikować, a dokładniej zmienić adres IP na adres VTSys-tem'u.



Rys. 102. Tworzenie pliku FMU za pomocą CANoe.

Gotowy FMU wczytano do CarMaker'a i następnie zmienne z CANoe zmapowano na wewnętrzne zmienne CarMaker'a, jak pokazano na Rys. 103. Po wczytaniu FMU przekazano sterowanie samochodem z CarMaker'a do modelu FMU. Od tej pory samochód był sterowany nie z aplikacji CarMaker, a w oparciu o zmienne odbierane z CANoe.



Rys. 103. Mapowanie zmiennych pliku FMU w CarMaker.

Szybkość wymiany danych pomiędzy CarMaker'em a CANoe jest konfigurowalna, a w tym przypadku została ustawiona na okres 1 ms. Taki czas pozwala z jednej strony na niezawodne przesyłanie danych pomiędzy aplikacjami, zbytnio nie obciążając procesora, a z drugiej strony zapewnia wystarczającą dokładność wymaganą do testów.

Warto dodać, że wymieniane zmienne są typu zmiennoprzecinkowego o podwójnej dokładności (double 64-bit). Pozwala to na wymianę danych z bardzo dużą dokładnością i na uniknięcie błędów zaokrąglenia czy obciążenia.

6.2.7 Zasada działania i mapowanie zmiennych

W CarMaker uruchamiany jest wirtualny przejazd testowy, który automatycznie uruchamia CANoe. Podczas testu z CarMaker do CANoe, za pomocą FMI, cyklicznie są wysyłane wartości kąta i prędkości kątowej, z jaką kierowca skręca kierownicę. Następnie bazując na otrzymanych wartościach w CANoe za pomocą języka CAPL (ang. Communication Access Programming Language), obliczono kierunek i kąt obrotu silnika, jak pokazano na Rys. 104 oraz wymagane parametry do wysterowania silnika o zadany kąt i prędkość kątową, jak pokazano na Rys. 105.

```

/*funkcja przygotowujaca dane otrzymane z carmkera do krecenia sil-
nikiem;
jako, ze silnikiem trzeba krecic od wartosci poprzednio otrzymanej
należy te wartosc trzymac w zmiennej previous_angle;
current_angle to zmienna, ktora opisuje wartosc nowego kata, ktora
przyszla z CarMakera;
new_angle to zmienna, ktora jest roznica pomiedzy poprzednia warto-
scia kata a obecna i ta wartosc jest wysylana do silnika;
kat dodatni to przeciwnie do ruchu zegara;
polarity = 0 - krecenie w lewo
polarity = 1 - krecenie w prawo
*/
on sysvar_update CarMaker::SteeringWheelAngle_SAS_RAW{
    double previous_angle = 0, current_angle = 0, new_angle = 0;
    double current_speed = 0;
    byte polarity = 0;

    current_angle = @CarMaker::SteeringWheelAngle_SAS_RAW;
    current_speed = @CarMaker::SteeringWheelSpeed_SAS_RAW;

    //krecenie w lewo
    if (current_angle > previous_angle){
        polarity = 1;
        new_angle = current_angle - previous_angle;
    }
    //krecenie w prawo
    else if(current_angle < previous_angle){
        new_angle = previous_angle - current_angle;
        polarity = 0;
    }
    //brak kręcenia, jesli poprz. i obecna wart. kata sa taki same
    else {
        new_angle = 0;
    }
    //obrot silnika
    SAS_rotation(new_angle, polarity, 200, current_speed);
    previous_angle = current_angle;
}

```

Rys. 104. Fragment kodu źródłowego do obliczenia kierunku oraz kąta w oparciu o otrzymane dane z CarMaker'a.

```

/*Funkcja do krecenia silnikiem krokowym
deg - kat,
polarity - kierunek obrotu,
division - dzielnik pojedynczego kroku,
VLVR - predkosc katowa.
*/
void SAS_rotation(float deg, int polarity, int division, float VLVR)
{
    float st_ang;
    long repeat, frequency, resolution;
    const byte step = 200;

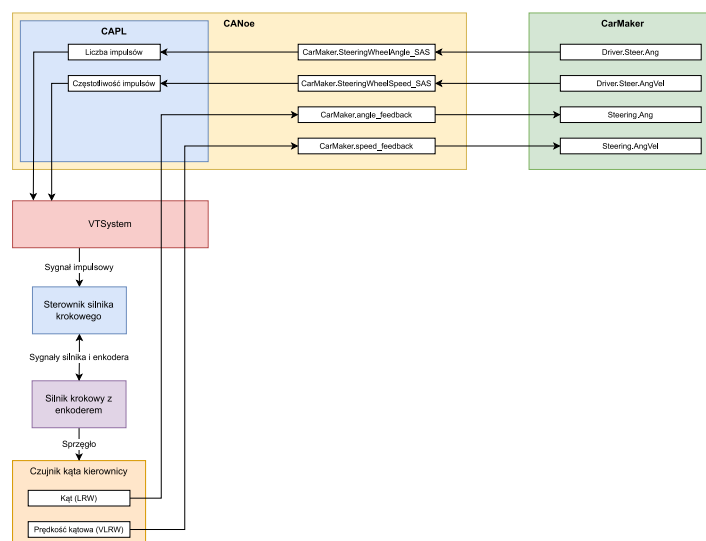
    resolution = step * division;
    st_ang = (float)360 / resolution;
    repeat = (long)_round((deg/st_ang));
    sysvar::VTS::M2_Ch47.SetPWMRepeats(repeat);
    frequency = abs((long)_round((VLVR/st_ang)));
    write("VLVR: %f, Frequency: %d", VLVR, frequency);

    if(frequency != 0){
        @sysvar::VTS::M2_Ch47::PWMOutputFreq = frequency;
        @sysvar::VTS::M2_Ch48::DigitalOutput = polarity;
        sysvar::VTS::M2_Ch47.StartStimulation();
    }
    else if (frequency == 0 && repeat == 0){
        sysvar::VTS::M2_Ch47.StopStimulation();
        write("Repeat: %d Deg: %f", repeat, deg);
    }
}

```

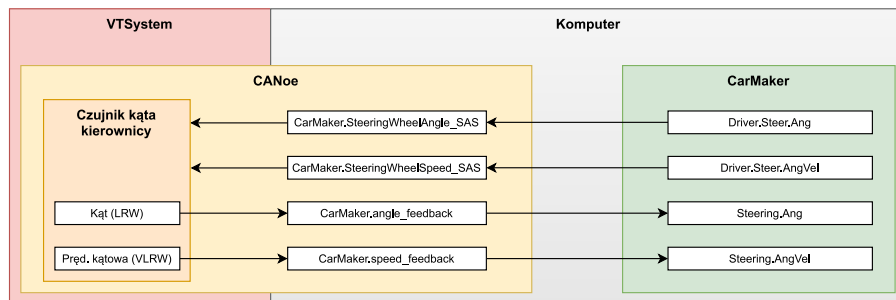
Rys. 105. Funkcja do obliczenia parametrów i sterowania silnikiem krokowym.

W dalszej kolejności badany czujnik mierzy wartość kąta i prędkości kątovej, które następnie wysyła do CANoe za pomocą magistrali CAN. Po otrzymaniu ramki z danymi wyodrębniane są z niej wartości kąta i prędkości kątovej i następnie przesyłane z powrotem do CarMaker'a. Ostatecznie CarMaker otrzymane dane aplikuje na przekładnię kierowniczą i samochód wykonuje manewr, odzwierciedlając to w środowisku graficznym. Przepływ danych pomiędzy elementami stanowiska testowego został zaprezentowany na Rys. 106.



Rys. 106. Przepływ danych podczas testowania czujników kąta kierownicy.

W przypadku określenia wpływu dokładności czujnika i okresu wysyłania danych powyższe stanowisko zostało zmodyfikowane. Został usunięty silnik krokowy wraz ze sterownikiem oraz rzeczywisty czujnik kąta kierownicy. Pozostał VTSYSTEM jako maszyna czasu rzeczywistego, na której są wykonywane obliczenia. W CANoe została stworzona symulacja oparta o magistralę High Speed CAN działająca z szybkością 500 kbit/s. Został zasymulowany czujnik odpowiedzialny za pomiar kąta (LRW) i prędkości kątowej (VLRW) kierownicy, który cyklicznie wysyła ramkę z tymi danymi na magistralę, jak pokazano na Rys. 107.

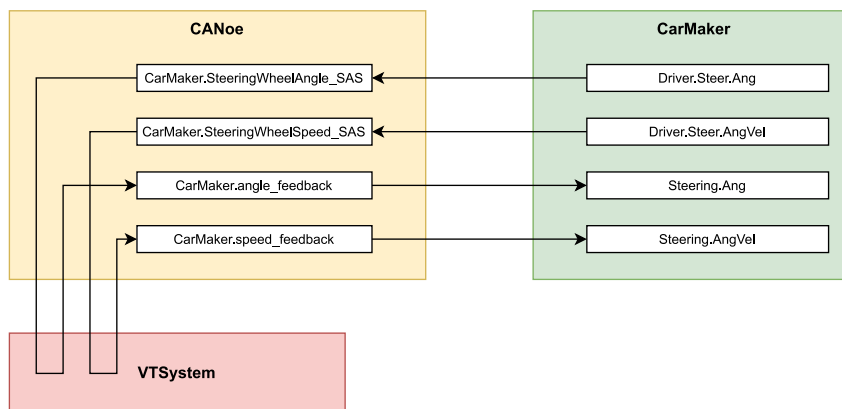


Rys. 107. Elementy stanowiska i przepływ zmiennych podczas symulacji wpływu dokładności oraz okresu ramki czujnika.

6.2.8 Weryfikacja wydajności stanowiska testowego

Wymiana danych za pomocą FMU następuje cyklicznie w dyskretnych chwilach czasowych, a komunikacja między VTSYSTEM'em a komputerem, na którym pracuje CANoe i CarMaker wprowadza opóźnienia i z tego powodu stanowisko jako całość wprowadza nieznane opóźnienie. Ponieważ wartości opóźnienia wpływają na działanie modelu, konieczne stało określenie ich wpływu. W tym celu zestawiono połączenie w sposób przedstawiony na Rys. 108. Dane odbierane w CANoe z CarMaker'a po przejściu przez VTSYSTEM natychmiast zostawały wysłane z powrotem do CarMaker'a. Do określenia jakości systemu zdecydowano się na wyznaczenie trzech parametrów: maksymalnego absolutnego błędu kąta, błędu średniokwadratowego oraz liczby przewróconych pachołków.

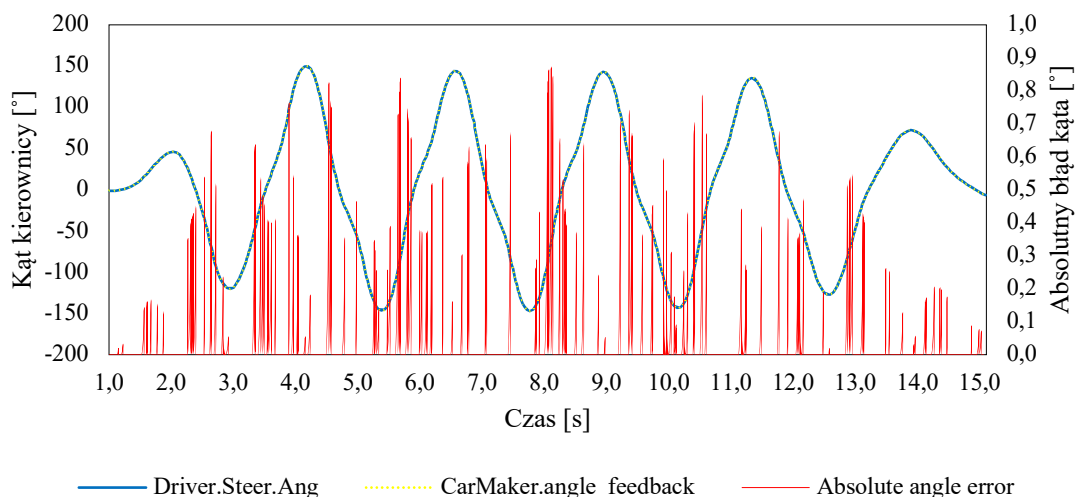
Należy tutaj zwrócić uwagę, że w pomiarach opóźnienia nie uwzględniono opóźnień wprowadzonych przez sterownik silnika krokowego oraz sam silnik krokowy. Wyznaczenie tych opóźnień wymagałoby dodatkowego sprzętu oraz rozłączenia urządzeń. Opóźnienia te mogą jednak być pominięte, gdyż silnik jest sterowany co 1 ms, co powoduje, że różnica kąta, jaką musi zrealizować w tym czasie jest bardzo nieduża, rzędu dokładności silnika tj. około 0,01°.



Rys. 108. Urządzenia i mapowanie zmiennych podczas wyznaczania błędów wprowadzanych przez stanowisko testowe.

Po wykonaniu wirtualnego przejazdu testowego zebrane zostały wartości kąta wysłanego z CarMaker'a i odebranego z CANoe w danych punktach czasowych oraz obliczona różnica, co pokazano na Rys. 109.

Maksymalny absolutny błąd kąta wyniósł $0,96^\circ$, a błąd średniokwadratowy zaledwie $0,06^\circ$. Niski błąd średniokwadratowy świadczy o tym, że przebieg wysłany i otrzymany praktycznie w całym zakresie są bardzo zbliżone, co można zobaczyć na Rys. 109. Maksymalny błąd kąta jest rząd wielkości większy, gdyż wynosi $0,96^\circ$, a jest on spowodowany bardzo szybką zmianą kąta kierownicy podczas omijania pachołka. Powoduje to większe błędy, natomiast, jako że jest to manewr bardzo krótki, mimo dużej wartości, znikomo wpływa na średni błąd całego przejazdu. Ponadto samochód przejechał cały slalom, nie stracając żadnego pachołka. Te wartości pokazują, że błędy wprowadzone przez CANoe i VTSYSTEM są nieduże i taki system może być użyty do testów czujnika kąta kierownicy.



Rys. 109. Nałożone przebiegi kąta wysłanego (Driver.Steer.Ang) i odebranego (CarMaker.angle_feedback) w CarMaker oraz absolutny błąd kąta (Absolute angle error).

6.3 Metodologia testowania

6.3.1 Procedura testowa dla rzeczywistych czujników kąta kierownicy

Poniższa procedura została wykorzystana zarówno do wyznaczenia błędów wprowadzanych przez stanowisko testowe, jak i do testów czujników kąta kierownicy oraz z nieznacznymi modyfikacjami do zbadania wpływu dokładności i okresu ramki na trajektorię samochodu.

Procedura składa się z następujących kroków:

1. Uruchomienie wirtualnej jazdy testowej.
2. Zebranie przebiegów:
 - a. kąta żądanego przez kierowcę (rzeczywisty kąt kierownicy) oraz
 - b. kąta zmierzonego przez czujnik kąta kierownicy
3. Zanotowanie, ile pachołków stracił samochód.
4. Obróbka danych i obliczenie błędu średniokwadratowego RMSE (ang. Root Mean Square Error) w oparciu o (39) i maksymalnego błędu absolutnego MAE (ang. Maximum Absolute Error) w oparciu o (40).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n (X_i - X_j)^2} \quad (39)$$

gdzie:

n – liczba próbek,
 X_i – kąt rzeczywisty,
 X_j – kąt zmierzony.

$$MAE = \max(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n) \quad (40)$$

gdzie:

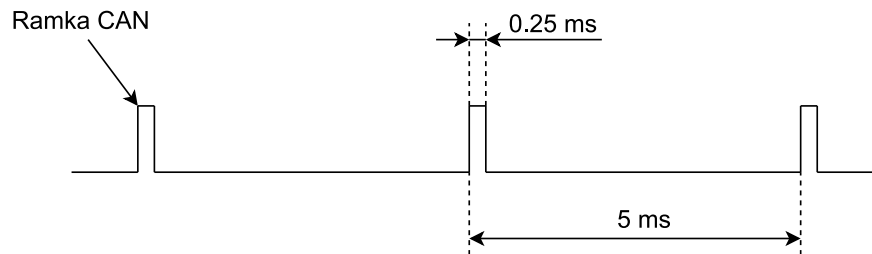
$\Delta x_n = |X_{in} - X_{jn}|$,
 n – liczba próbek,
 X_i – kąt rzeczywisty,
 X_j – kąt zmierzony.

W oparciu o przejazd testowy zdefiniowany w rozdziale 6.2.1 zostały przeprowadzone testy dwóch generacji czujników kąta kierownicy tego samego producenta SAS I oraz SAS II, a także jeden czujnik konkurencyjnego producenta – SAS III. Są to komercyjne czujniki używane w samochodach osobowych. Czujniki według producenta cechują się dokładnością pomiaru kąta od $0,5^\circ$ do $0,1^\circ$ i okresem wysyłania ramki 10 ms, co stanowi 10-krotność okresu wymiany danych pomiędzy CANoe i CarMaker, który wynosi 1 ms. Wszystkie czujniki używają magistrali High Speed CAN o prędkości 500 kbit/s.

6.3.2 Procedura testowa do zbadania wpływu dokładności i okresu danych

Badania zostały wykonane dla różnych dokładności kąta oraz różnego okresu ramki. Okres ramki był zmieniany w zakresie od 5 ms do 150 ms, natomiast dokładność kąta w zakresie od $0,1^\circ$ do $2,0^\circ$.

Minimalny okres ramki 5 ms został wybrany z dwóch przyczyn. Po pierwsze, w rzeczywistych urządzeniach wyposażonych w magistralę CAN okresy ramek są bardzo zróżnicowane: od kilkuset ms dla mniej istotnych danych, do około 10 ms dla istotnych danych jak np. pomiary kąta kierownicy. Warto tutaj zaznaczyć, że czas trwania ramki nie jest ograniczeniem, gdyż ramka przy prędkości 500 kbit/s trwa około 0,25 ms, więc jest znacznie krótsza niż okres 5 ms, jak pokazano na Rys. 110.



Rys. 110. Długość ramki w stosunku do okresu wysyłania ramki CAN.

Drugą przyczyną jest fakt, że dane pomiędzy aplikacjami są wymieniane z okresem 1 ms, więc okres wysyłania ramki musi być większy, aby żaden zmierzony kąt nie został pominięty. Okres 5 ms spełnia to wymaganie i pozwala na niezawodną współpracę aplikacji.

Okres maksymalny został wyznaczony metodą prób i błędów na wartość 150 ms. Jest to maksymalny okres przesyłania ramki, przy którym wirtualny samochód w większości przypadków jest w stanie ukończyć slalom, nie wypadając z drogi. Wypadnięcie z drogi powoduje przerwanie testu i uznanie go za nieukończony.

Dokładności czujnika wybrane do testów zostały określone na podstawie znajomości rynku. Najczęściej spotykaną dokładnością jest dokładność $0,5^\circ$, natomiast już w najnowszych konstrukcjach ta dokładność wynosi $0,1^\circ$. Wartość maksymalna $2,0^\circ$ została wybrana ze względu na potencjalny spadek dokładności urządzeń spowodowanych zużywaniem się podzespołów.

Testy zostały wykonane z wszystkimi możliwymi kombinacjami dla następujących wartości parametrów:

1. Dokładność kąta: $0,1^\circ$; $0,5^\circ$; $1,0^\circ$; $2,0^\circ$
2. Okres ramki: 5 ms, 10 ms, 20 ms, 50 ms, 100 ms, 150 ms

Każda z kombinacji została wykonana 4-krotnie, a ostateczny wynik został uśredniony.

Procedura testowa:

1. Ustawienie dokładności kąta oraz okresu ramki symulowanego czujnika.*
2. Uruchomienie wirtualnej jazdy testowej.
3. Zebranie przebiegów:
 - a. kąta kierownicy żądanego przez kierowcę (rzeczywisty kąt kierownicy) oraz
 - b. kąta kierownicy zmierzonego przez czujnik kąta kierownicy
4. Zanotowanie, ile pachołków strącił samochód i w jakim czasie ukończył slalom.
5. Obróbka danych i obliczenie błędu średniokwadratowego RMSE (ang. Root Mean Square Error) w oparciu o (39) i maksymalnego błędu absolutnego MAE (ang. Maximum Absolute Error) w oparciu o (40) pomiędzy:

- a. kątem kierownicy żądanym przez kierowcę, a zrealizowanym przez samochód oraz
- b. kątem kierownicy żądanym przez kierowcę, a optymalnym kątem do pokonania slalomu

*Dokładność czujnika została ustawiona poprzez zmianę rozdzielczości parametru kąta w ramce CAN. W przypadku pomiaru wartości ułamkowej raportowany kąt był zaokrąglany do najbliższej wartości rozdzielczości. Przykładowo, gdy czujnik z rozdzielczością ramki $0,1^\circ$ wykonał pomiar kąta z wynikiem $0,45668^\circ$, to został on zaokrąglony w górę i w ramce został zaraportowany jako $0,5^\circ$, natomiast kąt wynoszący $0,942659^\circ$ został zaokrąglony w dół i w ramce został zaraportowany jako $0,9^\circ$. Pogrupowane kolorami wartości rzeczywiste kąta i ich zaokrąglone odpowiedniki pokazano w Tab. 6. Przesunięcie czasowe wynika, że fragment loga pochodzi z czujnika wysyłającego ramkę CAN z okresem 5 ms, więc od pomiaru kąta do jego zaraportowania na magistralę następuje opóźnienie ok. 5 ms.

Tab. 6. Fragment loga z pogrupowanymi kolorami, rzeczywistymi wartościami kąta i jej odpowiednikami w ramce CAN.

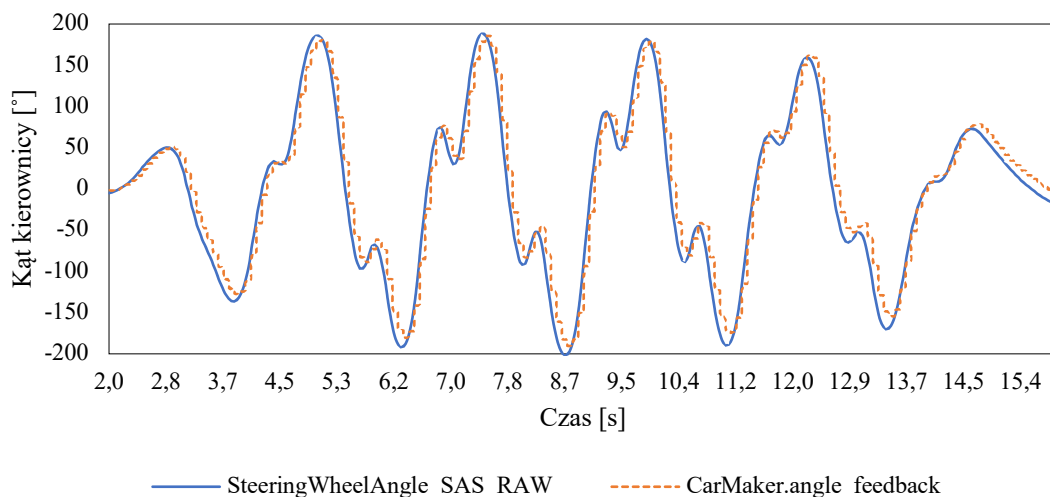
Czas [s]	Kąt rzeczywisty [$^\circ$]	Kąt zaraportowany w ramce CAN [$^\circ$]
2,0752	0,45668	0,3
2,0772	0,494568	0,4
2,0792	0,533057	0,4
2,0812	0,572062	0,5
2,0832	0,61153	0,5
2,0852	0,651441	0,5
2,0872	0,691786	0,6
2,0892	0,732554	0,6
2,0912	0,773735	0,7
2,0932	0,815325	0,7
2,0952	0,857333	0,7
2,0972	0,899772	0,8
2,0992	0,942659	0,8
2,1012	0,986009	0,9
2,1032	1,029835	0,9
2,1052	1,07415	0,9
2,1072	1,118969	1
2,1092	1,164307	1

6.4 Analiza wyników

6.4.1 Testy komercyjnych czujników kąta kierownicy

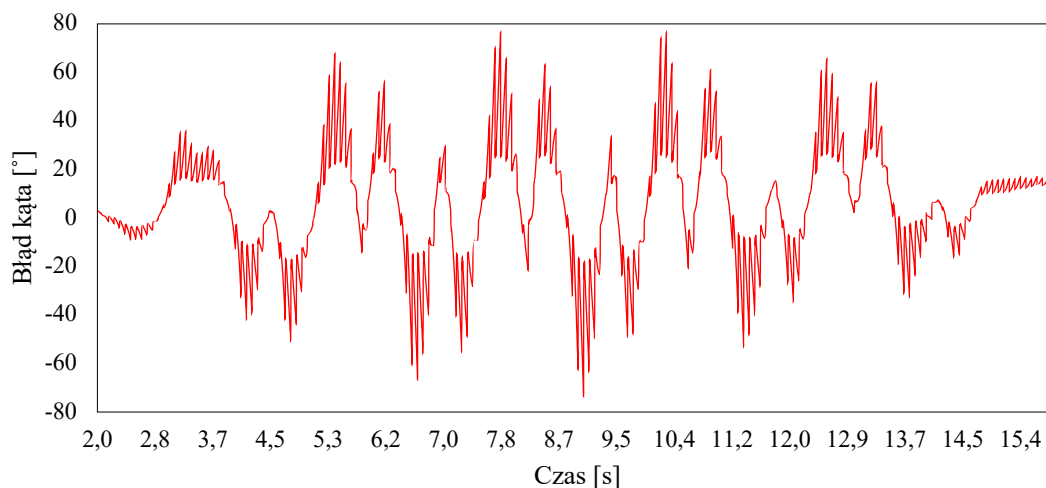
SAS I

W ramach testów komercyjnego czujnika kąta kierownicy SAS I zmierzono wartość kąta zadanego i wartość kąta zmierzonego przez czujnik podczas całego przejazdu. Jak widać na Rys. 111, przebieg kąta jest opóźniony względem przebiegu zadawanego oraz mocno „schodkowy”, czyli cechuje się dużym błędem kwantowania.



Rys. 111. Rzeczywisty kąt kierownicy (SteeringWheelAngle_SAS_RAW) vs. kąt zmierzony przez czujnik SAS I (CarMaker.angle_feedback).

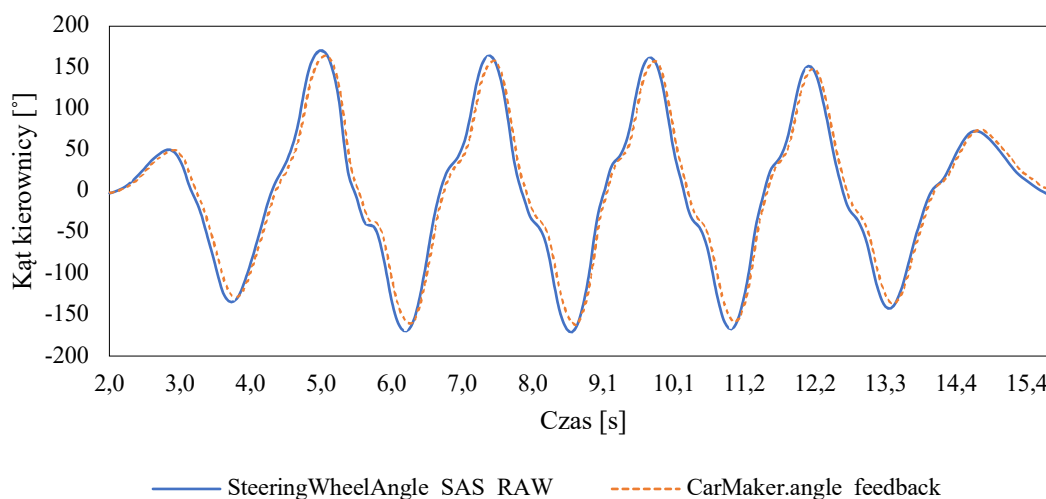
Głównym powodem opóźnienia jest wysyłanie ramki z okresem 10 ms oraz w mniejszym stopniu opóźnienie wprowadzane przez system testowy. Natomiast schodkowy charakter przebiegu jest spowodowany niską faktyczną rozdzielczością pomiaru kąta, znacznie niższą od deklarowanej przez producenta, która wynosi $0,5^\circ$. Analizując zebrane dane stwierdzono, że pomimo, iż deklarowana rozdzielczość pomiaru wynosi $0,5^\circ$, to w rzeczywistości SAS I bardzo rzadko zwraca wartości połówkowe, a w większości przypadków zwraca wartości całkowite. Może to świadczyć, że dokładność jest znacznie gorsza od wynikającej z rozdzielczości $0,5^\circ$. Błąd średniokwadratowy wyniósł $23,4^\circ$, natomiast maksymalny błąd aż $77,6^\circ$, co w rezultacie spowodowało przewrócenie 1 pachołka podczas przejazdu. Wykres błędów zaprezentowano na Rys. 112.



Rys. 112. Błąd kąta SAS I.

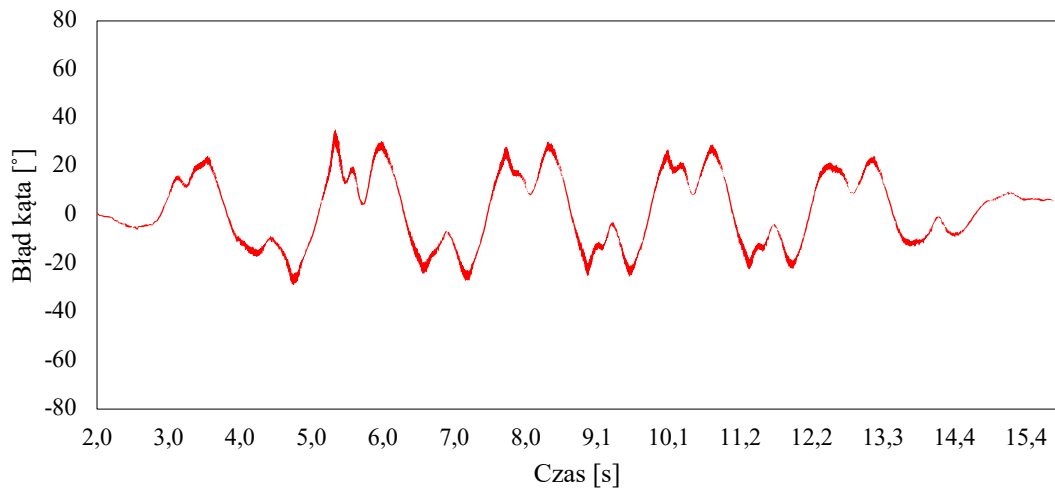
SAS II

W czujniku SAS II zmodyfikowane zostały elementy mechaniczne, elektroniczne oraz algorytm obliczania kąta, natomiast nadal kąt jest mierzony z dokładnością i rozdzielczością $0,5^\circ$ oraz wysyłany na magistralę z okresem 10 ms. Jak pokazano na Rys. 113, zmierzony przebieg również jest opóźniony, gdyż nadal kąt jest raportowany na magistralę co 10 ms oraz jest opóźnienie wprowadzone przez system testowy. Natomiast przebieg jest o wiele bardziej gładki i nie ma na nim widocznych schodków.



Rys. 113. Rzeczywisty kąt kierownicy (SteeringWheelAngle_SAS_RAW) vs. kąt zmierzony przez czujnik SAS II (CarMaker.angle_feedback).

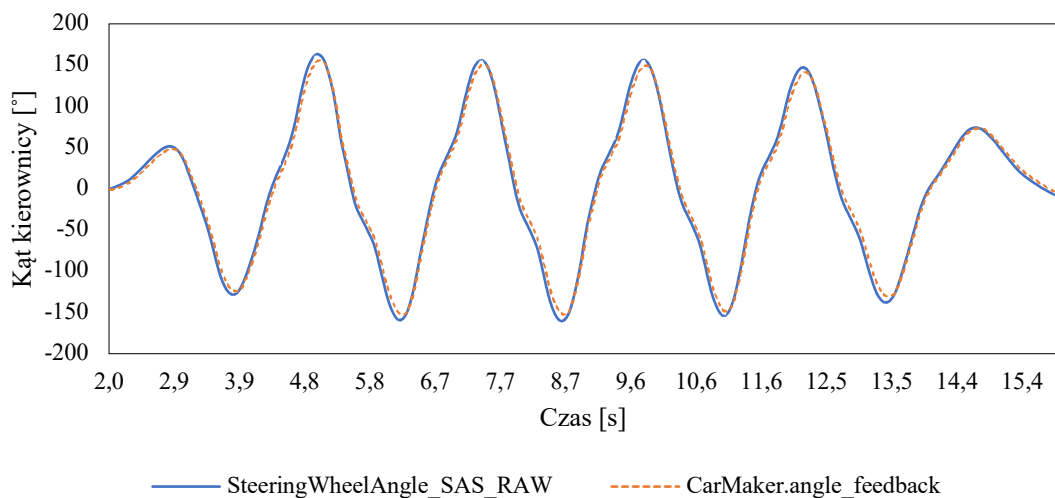
Spowodowane jest to tym, że SAS II o wiele częściej od SAS I raportuje kąty połówkowe, zgodnie z deklarowaną dokładnością $0,5^\circ$. Błąd średniokwadratowy wyniósł $14,4^\circ$, czyli prawie dwukrotnie mniej, a błąd maksymalny $35,4^\circ$, czyli ponad dwukrotnie mniej, co pozwoliło na ukończenie slalomu bez strącania żadnego pachołka. Przebieg błędu zaprezentowano na Rys. 114.



Rys. 114. Błąd kąta SAS II.

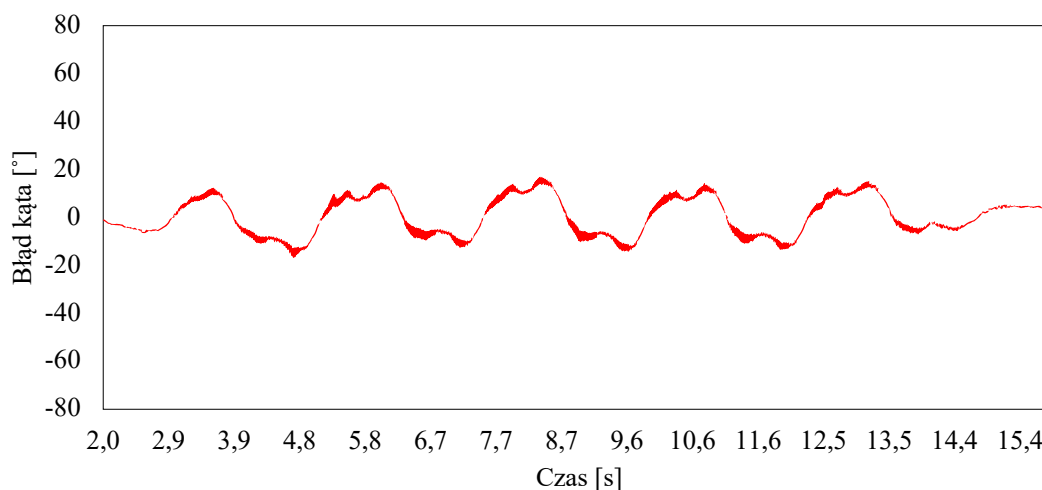
SAS III

Czujnik charakteryzuje się najlepszą deklarowaną dokładnością i rozdzielczością wynoszącą $0,1^\circ$, co daje przypuszczenie, że otrzymane wyniki będą najlepsze. Jak widać na Rys. 115, przebieg jest minimalnie opóźniony względem zadanego, gdyż nadal kąt jest wysyłany na magistralę co 10 ms oraz również jest opóźnienie wprowadzone przez system testowy. Sam przebieg jest gładki w całym zakresie i dokładniej niż poprzednie czujniki pokrywa zadany przebieg, co jest skutkiem wysokiej dokładności i rozdzielczości czujnika wynoszącej $0,1^\circ$.



Rys. 115. Rzeczywisty kąt kierownicy (SteeringWheelAngle_SAS_RAW) vs. kąt zmierzony przez czujnik SAS III (CarMaker.angle_feedback).

Potwierdza to błąd średniokwadratowy, który wynosi zaledwie $7,95^\circ$, czyli prawie dwukrotnie mniej niż dla SAS II. Największe różnice, w porównaniu z dwoma poprzednimi czujnikami, można zaobserwować w miejscu zmiany kierunku kręcenia kierownicą (wartości szczytowe przebiegu). Widać, że w tych miejscach przebiegi kąta zadanego i otrzymanego są bardziej zbliżone, co potwierdza błąd maksymalny, który wynosi $17,1^\circ$, czyli ponad 2 krotnie mniej niż dla SAS II. Przebieg błędu zaprezentowano na Rys. 116. Wysoka wydajność czujnika została ostatecznie potwierdzona podczas wykonania slalomu, gdyż samochód przejechał tor bezbłędnie, nie stracając żadnego pachołka.



Rys. 116. Błąd kąta SAS III.

Porównanie wyników

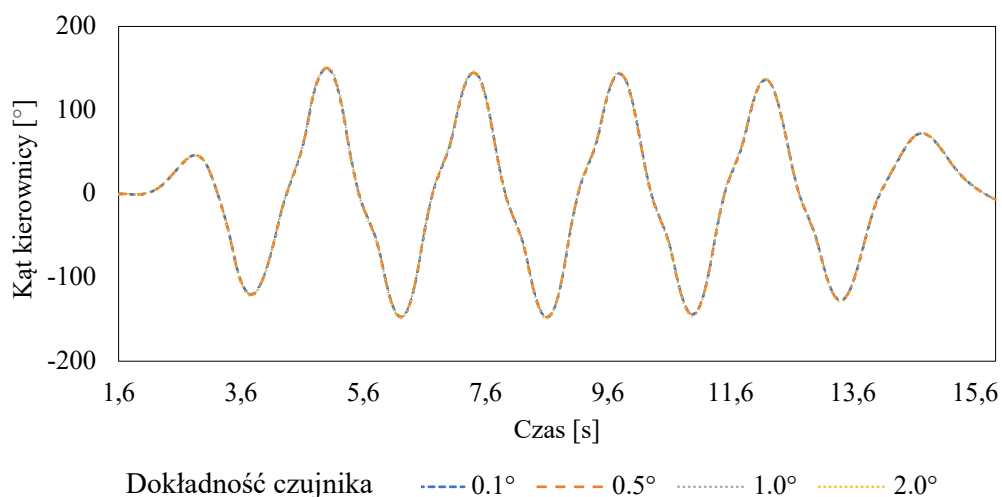
Wartości podsumowane w Tab. 7 świadczą o tym, że poziom błędów SAS II jest dwukrotnie większy niż SAS I, pomimo że katalogowo mają taką samą dokładność i rozdzielczość wynoszącą $0,5^\circ$. Prawdopodobnie czujnik SAS I nie spełnia parametrów deklarowanych przez producenta i jego dokładność jest znacznie mniejsza niż $0,5^\circ$. Z kolei SAS III uzyskał dwa razy niższy poziom błędów niż czujnik SAS II, co było zgodne z oczekiwaniami, gdyż deklarowana rozdzielczość i dokładność kąta wynosiła $0,1^\circ$. Wyniki pokazują jednak, że zwiększenie dokładności wcale nie powoduje proporcjonalnego zmniejszenia błędów czujnika podczas rzeczywistej jazdy. Na przykład pięciokrotnie lepsza dokładność (deklarowana) SAS III względem SAS II skutkowałą jedynie dwukrotnym zmniejszeniem błędów podczas wykonywania slalomu. Samochody wyposażone w czujniki SAS II i SAS III nie straciły żadnego pachołka, pomimo że błędy generowane przez SAS II były dwukrotnie większe niż błędy SAS III. Natomiast samochód wyposażony w czujnik SAS I spowodował przewrócenie jednego pachołka, co świadczy, że poziom błędów generowany przez ten czujnik realnie wpływa na trajektorię pojazdu. Z tego powodu czujnik SAS I nie nadaje się do wykorzystania w systemie SbW, gdyż może powodować zagrożenie dla pasażerów i innych uczestników ruchu drogowego.

Tab. 7. Zestawienie błędów uzyskanych podczas testów trzech komercyjnych czujników kąta kierownicy.

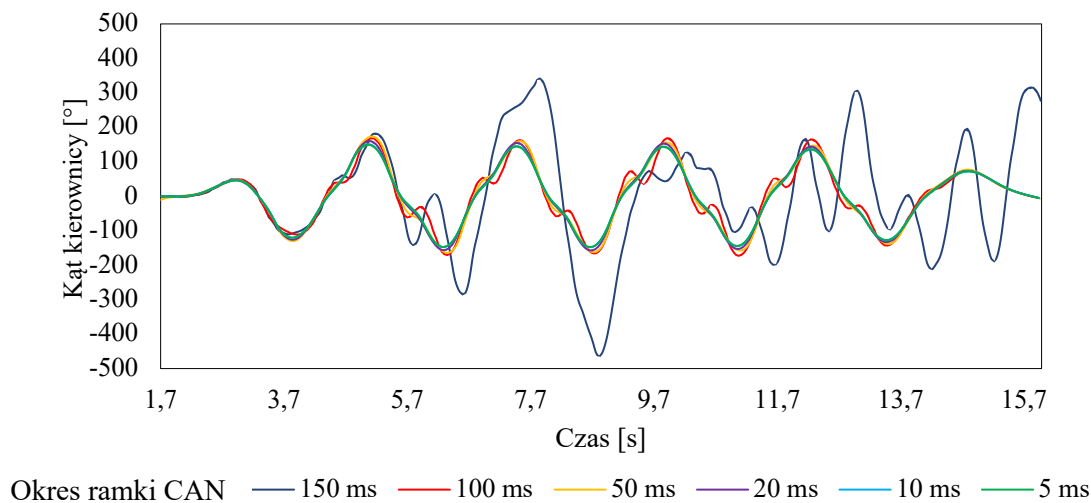
	SAS I	SAS II	SAS III
Błąd maksymalny MAE	77,6°	35,4°	17,1°
Błąd średniokwadratowy RMSE	23,4°	14,4°	7,95°
Liczba przewróconych pachołków	1	0	0

6.4.2 Wpływ dokładności i okresu wysyłania danych

Wyniki są zaskakujące i nieoczekiwane, ponieważ dokładność pomiaru kąta w zakresie od $0,1^\circ$ do $2,0^\circ$ nie ma praktycznie wpływu na trajektorię pojazdu, jak pokazano na Rys. 117 i liczbę przewróconych pachołków podczas slalomu, gdy okres ramki CAN jest równy lub mniejszy niż 50 ms. Z drugiej strony, okres ramki ma bardzo duży wpływ na trajektorię, jak pokazano na Rys. 118 i liczbę przewróconych pachołków.



Rys. 117. Wpływ dokładności czujnika na kąt kierownicy.

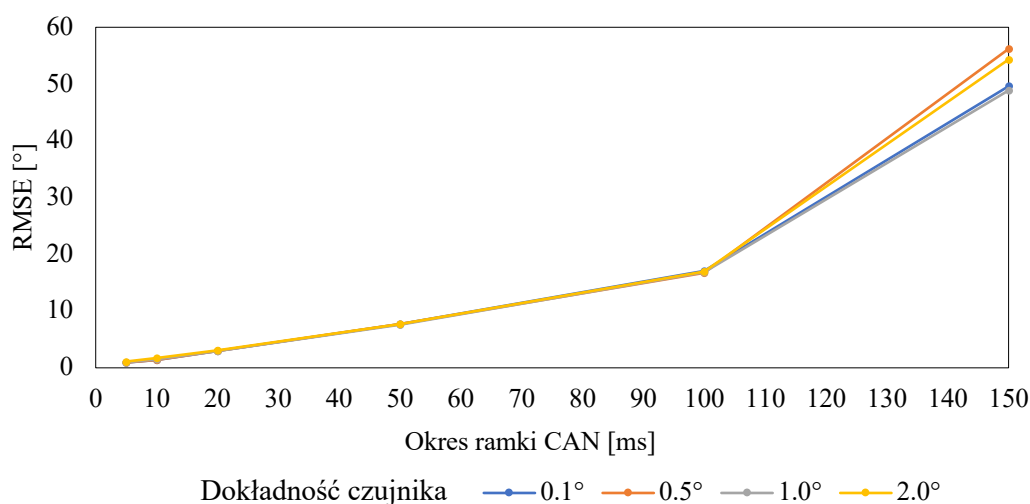


Rys. 118. Wpływ okresu ramki CAN na kąt kierownicy.

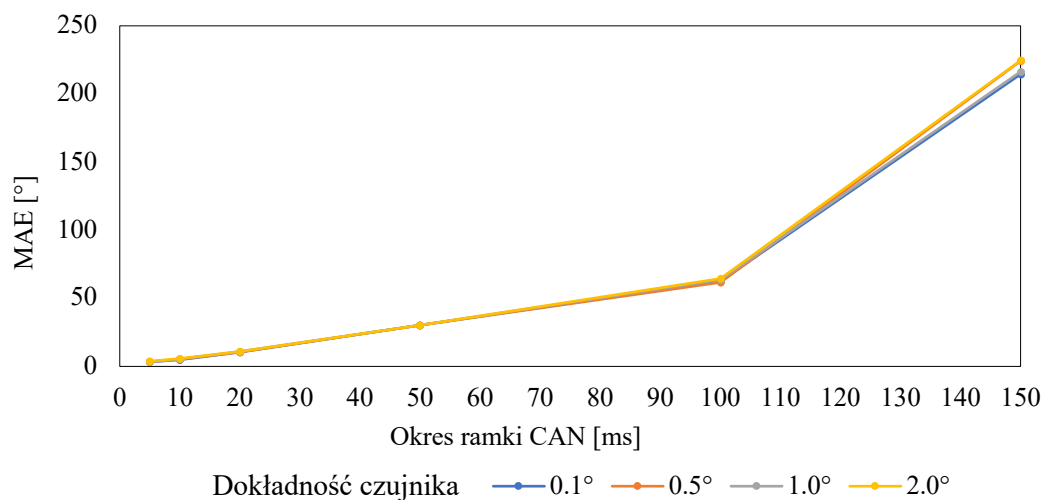
Wpływ dokładności czujnika

Niezależnie od tego, czy dokładność czujnika wynosi $0,1^\circ$, czy $2,0^\circ$ błędy są zbliżone. Wszystkie przebiegi błędów praktycznie się pokrywają, co pokazano na Rys. 119 i Rys. 120. Dla przykładu dla okresu ramki wynoszącej 5 ms i dokładności $0,1^\circ$ RMSE wyniósł $0,9^\circ$, a MAE $3,3^\circ$, a dla dokładności 20 razy mniejszej, czyli dla $2,0^\circ$ RMSE wyniósł $1,1^\circ$ (wzrost o $0,2^\circ$), a MAE wyniósł $3,7^\circ$ (wzrost o $0,4^\circ$). Dane te wskazują, że następuje wzrost błędów wraz ze zmniejszeniem dokładności, natomiast ich wielkość w badanych granicach ma znikomy wpływ na trajektorię samochodu.

Dopiero dla okresu wynoszącego 150 ms zaczynają się niewielkie rozbieżności, gdzie widać, że dokładność kąta ma niewielkie znaczenie. Dla 150 ms i dokładności $0,1^\circ$ RMSE wyniósł $49,6^\circ$, a MAE 214° , a dla dokładności $2,0^\circ$ RMSE wyniósł $54,3^\circ$ (wzrost o $4,7^\circ$), a MAE wyniósł 224° (wzrost o $10,0^\circ$).

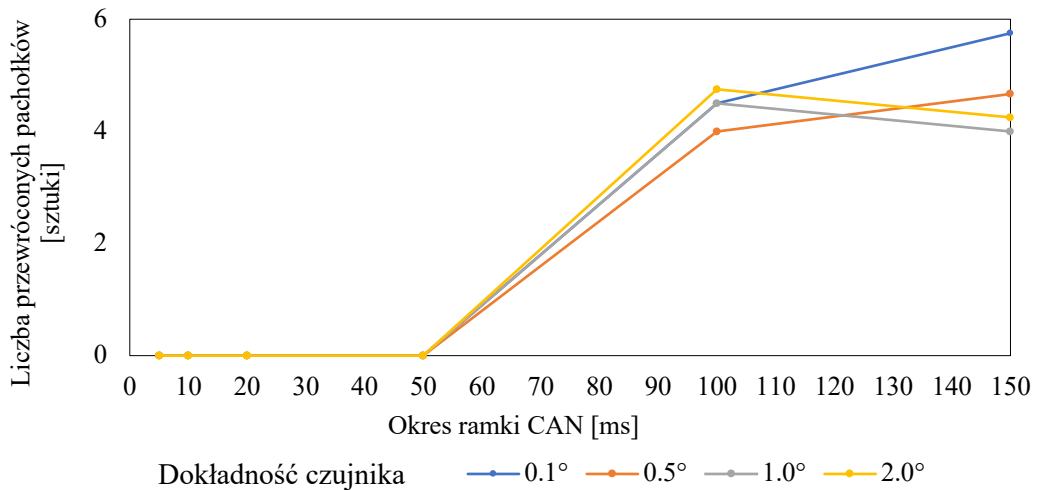


Rys. 119. Wpływ okresu ramki CAN oraz dokładności czujnika na RMSE.



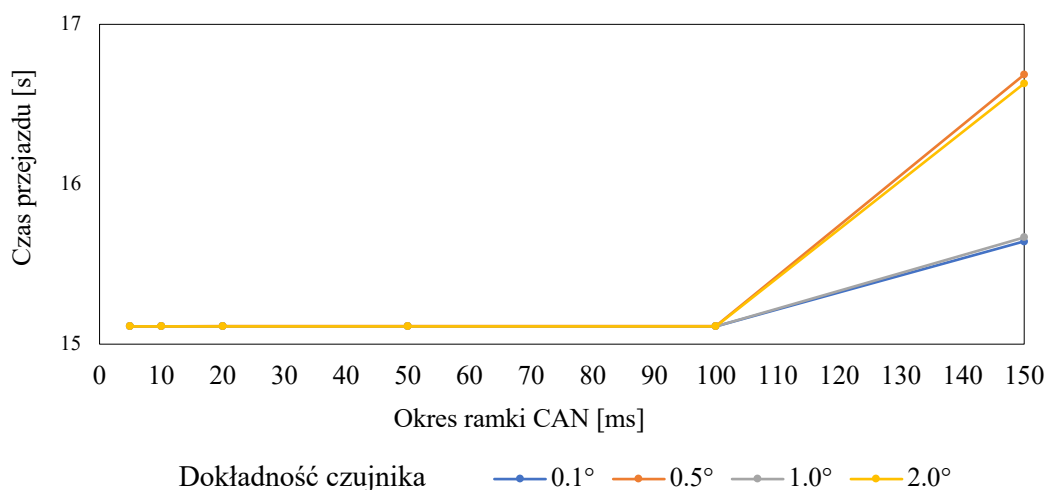
Rys. 120. Wpływ okresu ramki CAN oraz dokładności czujnika na MAE.

Jeśli chodzi o liczbę strąconych pachołków, do okresu ramki wynoszącej 50 ms dokładność czujnika nie ma żadnego znaczenia. Niezależnie czy czujnik posiadał dokładność $0,1^\circ$, czy $2,0^\circ$ samochód idealnie pokonał slalom w najkrótszym możliwym czasie wynoszącym 15,1 s, nie strącając żadnego pachołka. Dopiero dla okresu powyżej 50 ms samochody zaczęły strącać pachołki, co pokazano na Rys. 121.



Rys. 121. Wpływ okresu ramki CAN oraz dokładności czujnika na liczbę przewróconych pachołków.

Przy okresie 150 ms samochody z dokładniejszym czujnikiem paradoksalnie zaczęły strącać więcej pachołków niż samochody z mniej dokładnym czujnikiem. Spowodowane jest to tym, że przy dużym okresie ramki, większa dokładność powoduje, że samochód wykonuje łagodniejsze i płynne manewry. Gorsza dokładność powoduje ostrzejsze manewry, co skutkuje, że samochód jedzie szerszym łukiem, łatwiej trafiając pomiędzy pachołki. Jako że, samochód jedzie szerszym łukiem, czas przejazdu ulega wydłużeniu, jak pokazano na Rys. 122.



Rys. 122. Wpływ okresu ramki CAN oraz dokładności czujnika na czas pokonania slalomu.

Niezależnie od dokładności, przy okresie wynoszącym 150 ms samochód pokonuje slalom bardzo chaotycznie. Często nie jest w stanie go ukończyć, wcześniej wypadając z drogi, dlatego liczba strąconych pachołków w tym przypadku może być zafałszowana i nie powinna być brana pod uwagę.

Wpływ okresu ramki

Jeśli chodzi o okres ramki, błędy są o rząd wielkości większe. Jak widać na rysunku Rys. 119 i Rys. 120, okres ramki znacząco wpływa na RMSE oraz MAE.

W zakresie od 5 ms do 100 ms ta zależność jest liniowa tzn. każde dwukrotne zwiększenie okresu ramki, powoduje dwukrotne zwiększenie błędów. Dla dokładności $0,1^\circ$ i okresu 5 ms RMSE wyniósł $0,9^\circ$, a MAE $3,3^\circ$, a przy okresie 20 razy większym, czyli 100 ms, RMSE wyniósł $17,0^\circ$ (wzrost 19-krotny), a MAE $62,5^\circ$ (wzrost również 19-krotny).

Natomiast w zakresie od 100 do 150 ms następuje znaczne zwiększenie błędów. Dla dokładności $0,1^\circ$ i okresu 100 ms RMSE wyniósł $17,0^\circ$, a MAE $62,5^\circ$, a przy okresie 1,5 razy większym, czyli 150 ms, RMSE wyniósł $50,0^\circ$ (wzrost 3-krotny), a MAE $214,4^\circ$ (wzrost ponad 3-krotny).

Jeśli chodzi o liczbę strąconych pachołków, to sprawa również wygląda podobnie. Do okresu ramki 50 ms, niezależnie od dokładności kąta, samochód idealnie pokonał slalom w najkrótszym możliwym czasie wynoszącym 15,1 s, nie strącając żadnego pachołka. Dopiero dla czasów powyżej 50 ms, niezależnie od dokładności kąta, samochody zaczęły strącać pachołki. Pomiarzy zostały zaprezentowane w Tab. 8, w której widać, że dokładność czujnika nie ma istotnego wpływu na liczbę strąconych pachołków w porównaniu do okresu wysłania wiadomości.

Tab. 8. Pomiary dla różnych dokładności czujnika i okresu wysyłania danych.

			Okres ramki CAN					
			5 ms	10 ms	20 ms	50 ms	100 ms	150 ms
Dokładność czujnika	$0,1^\circ$	Pachołki	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	5,8
		Czas	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,6
		RMSE	0,9	1,4	2,9	7,7	17,0	49,6
		MAE	3,3	4,7	10,3	30,4	62,5	214,5
	$0,5^\circ$	Pachołki	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	4,7
		Czas	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	16,7
		RMSE	0,9	1,4	3,0	7,7	16,7	56,2
		MAE	3,5	5,2	10,4	30,4	61,6	224,2
	$1,0^\circ$	Pachołki	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	4,0
		Czas	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,7
		RMSE	1,0	1,5	3,0	7,6	16,9	48,9
		MAE	3,3	5,2	10,9	30,1	63,4	216,4
	$2,0^\circ$	Pachołki	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	4,3
		Czas	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	16,6
		RMSE	1,1	1,7	3,0	7,7	17,0	54,3
		MAE	3,8	5,9	10,9	30,2	64,3	224,6

6.4.3 Podsumowanie

Za pomocą zbudowanego stanowiska przetestowano i porównano trzy komercyjne czujniki kąta kierownicy o różnej dokładności i rozdzielczości podczas wirtualnego przejazdu testowego, w celu zbadania wpływu tego parametru na trajektorię samochodu wyposażonego w Steer-by-Wire. Wyniki ujawniły, że dwa z trzech badanych czujników mogłyby być użyte w technologii SbW, gdyż podczas slalomu samochód testowy nie przewrócił żadnego pachołka.

Dodatkowo wykazano, że parametry osiągane przez czujniki odbiegają od parametrów zdefiniowanych przez producenta. Pomimo że czujniki SAS I i SAS II według danych producenta charakteryzują się taką samą dokładnością i rozdzielczością wynoszącą $0,5^\circ$, w rzeczywistości jeden z czujników osiągnął dwa razy gorsze wyniki. Raportowany kąt przez SAS I najczęściej przyjmował wartości całkowite, co powodowało, że zebrany przebieg kąta w czasie cechował się wysokim błędem rozdzielczości, a błędy podczas zmiany kierunku jazdy osiągały wartość prawie 80° . Z tego wynika, że rzeczywista dokładność czujnika wynosiła znacznie mniej niż dokładność określona w specyfikacji technicznej.

Dodatkowo wyniki pokazały, że zwiększenie dokładności czujnika wcale nie powoduje proporcjonalnego zmniejszenia błędów generowanych przez czujnik podczas rzeczywistej jazdy. Dla przykładu pięciokrotne zwiększenie dokładności czujnika SAS III względem SAS II skutkowało jedynie dwukrotnym zmniejszeniem błędów podczas wykonywania slalomu, a liczba przewróconych pachołków nie uległa zmianie.

Dodatkowo w szerszym zakresie zbadano symulacyjnie wpływ dokładności oraz okresu wysyłania kąta/prędkości kątowej na trajektorię samochodu SbW. Wykazano, że dokładność czujnika większa niż 2° ma znikomy wpływ na trajektorię samochodu i może być używana w technologii SbW. Wynika to z faktu, że dokładność rzędu ułamków stopnia względem pełnego zakresu skrętu kierownicy, wynoszącym około 1000° , jest bardzo mała i ma małe przełożenie na rzeczywisty skręt kół.

Natomiast okres wysyłania ramki w zakresie od 5 ms do 150 ms ma znaczący wpływ. Błędy są o rząd wielkości większe od błędów wynikających z dokładności czujnika i mają kluczowy wpływ na trajektorię samochodu. W zakresie od 5 ms do 100 ms ta zależność jest liniowa tzn. każde dwukrotne zwiększenie okresu ramki, powoduje dwukrotne zwiększenie błędów. Podczas wykonywania przejazdu do okresu 50 ms samochód niezależnie od dokładności pokonał slalom, nie przewracając żadnego pachołka. Dopiero powyżej 100 ms samochód zaczął strącać pachołki. W takiej sytuacji, kiedy skręt kół samochodu nie podążał za kątem skrócenia kierownicy, kierowca na bieżąco starał się korygować kąt skrócenia kierownicy, co jeszcze pogarszało sprawę, powodując całkowite wypadnięcie z synchronizacji kierownicy i kół.

Ze względu na bardzo niewielki wpływ błędów wynikających z dokładności czujnika w porównaniu z błędami wynikającymi z okresu przesyłania danych, producenci samochodów w pierwszej kolejności powinni położyć nacisk na szybkość i niezawodność wymiany danych, a dopiero w drugiej kolejności na dokładność i rozdzielczość czujnika kąta skrętu kierownicy. Takie podejście pozwoli na znaczne ograniczenie kosztów produkcji, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności i bezpieczeństwa systemu Steer-By-Wire.

W tym miejscu warto wyjaśnić jedną sprawę. Błędy uzyskiwane przy testowaniu rzeczywistych czujników różnią się co do wartości od błędów uzyskiwanych w symulacji. Po pierwsze, jest to spowodowane tym, że w badaniach symulacyjnych tylko dokładność czujnika była zmienna, natomiast wszystkie inne parametry czujnika, które również wpływają na wydajność czujnika np. histereza czy nieliniowość, pozostawały bez zmian. W przypadku rzeczywistych czujników każdy z nich posiadał inną rozdzielczość, histerezę, nieliniowość czy okres wysyłania ramek. Z tego powodu nie można bezpośrednio porównywać wyników uzyskiwanych symulacyjnie,

gdzie tylko jeden parametr był zmieniany. Dodatkowo, jak wykazano, dwa czujniki SAS I i SAS II, pomimo że w dokumentacji mają dokładnie takie same parametry, to ich rzeczywista dokładność znacznie się różni, dlatego nie należy do końca takim danym ufać. W związku z tym, aby zweryfikować i potwierdzić wyniki uzyskane symulacyjnie z rzeczywistością, wcześniej należy samemu wyznaczyć podstawowe parametry czujnika takie jak: dokładność, rozdzielczość, histereza czy nieliniowość, a nie ufać danym w notach katalogowych.

Warto w tym miejscu poruszyć sprawę rozdzielczości i dokładności oraz jak te dwa parametry wpływają na siebie. Rozdzielczość jest najmniejszą różnicą wskazania urządzenia, która może być zauważona. W przypadku przyrządów cyfrowych jest to różnica wskazań odpowiadająca zmianie o jednostkę najmniej znaczącej cyfry. Natomiast dokładność to błąd graniczny wokół rzeczywistej wartości mierzonej. Te dwa parametry są ze sobą związane. Jeśli przyrząd charakteryzuje się wysoką rozdzielczością (jest w stanie wyświetlić wiele miejsc po przecinku), ale niską dokładnością, to wysoka rozdzielczość jest zbędna, gdyż przyrząd będzie na dalszych miejscach po przecinku pokazywał przypadkowe cyfry. Ten przypadek został zaobserwowany przy pomiarach czujnika SAS I, gdzie rozdzielczość wynosiła $0,5^\circ$, ale ona nie była wykorzystywana, gdyż z powodu mniejszej dokładności, czujnik i tak w większości przypadków raportował kąty całkowite. Z drugiej strony rozdzielczość stanowi dolne ograniczenie dokładności przyrządu, tj. nawet gdyby przyrząd był w stanie wyznaczyć wartość wielkości mierzonej z większą dokładnością, nie będzie jej w stanie z taką dokładnością zaraportować. Z tego powodu w badanych czujnikach, które charakteryzowały się ograniczoną rozdzielczością $0,5^\circ$ lub $0,1^\circ$ tracimy informację o rzeczywistej dokładności.

7 Wnioski i dalsze kierunki prac

Samochody z wysoką automatyzacją jazdy działają w oparciu o wiele czujników i systemów takich jak: kamery światła widzialnego, kamery stereo, kamery termowizyjne, radary, lidary, nawigację satelitarną GNSS, inercyjną jednostkę pomiarową IMU, V2X czy czujniki ultradźwiękowe. Każdy z tych systemów wykorzystuje różne zjawiska fizyczne do percepcji otaczającego świata. Często są to systemy bardzo zaawansowane technologicznie zarówno od strony elektronicznej, oprogramowania, jak i mechanicznej. Dany czujnik może występować w wielu różnych typach różniących się budową i zasadą działania. Czy zatem jest możliwe zasymulowanie świata zewnętrznego w środowisku laboratoryjnym poprzez odpowiednią bezkontaktową stymulację czujników, aby można było w pełni przetestować funkcję jazdy autonomicznej samochodu? W celu udzielenia odpowiedzi na to pytanie przeprowadzono zakrojone na szeroką skalę badania źródłowe, a następnie zbudowano stanowisko mające stanowić potwierdzenie tezy.

Na podstawie przeprowadzonych badań źródłowych stwierdzono, że dla większości czujników wykorzystywanych podczas automatyzacji jazdy istnieją mniej lub bardziej zaawansowane systemy do bezkontaktowego stymulowania. Szczególnie dojrzałe i szeroko wykorzystywane są urządzenia do stymulacji takich systemów jak kamery światła widzialnego, radary, GNSS czy czujniki ultradźwiękowe. Zjawiska fizyczne stojące za tymi systemami są dobrze rozpoznane, a na rynku jest wiele zrealizowanych projektów w oparciu o te stymulatory. Również pomimo nowej technologii, jaką jest V2X, nie ma większych problemów z symulacją takiego środowiska, gdyż jest oparta na warstwie fizycznej od dawna wykorzystywanej w innych systemach komunikacji bezprzewodowej. W przypadku lidarów, który jest od niedawna stosowany w motoryzacji i nadal dynamicznie rozwijany, pojawiają się pojedyncze firmy posiadające symulatory celów. Niemniej ze względu na mnogość różnych typów lidarów, różniących się zasadą działania, technikami skanowania czy długością światła podczerwonego, może być problem z uniwersalnością takich stymulatorów.

W przypadku testowania pojazdu w pętli sprzężenia zwrotnego istnieją komercyjne stanowiska testowe, stymulujące kilka systemów jednocześnie i wykorzystujące hamownię dynamometryczną. Zostało również zrealizowanych kilka projektów badawczych, działających na podobnej zasadzie. Co prawda nie powstało jeszcze stanowisko, które byłoby w stanie stymulować wszystkie czujniki, ale wyniki badań materiałowych pozwalają wstępnie potwierdzić postawioną w rozdziale drugim tezę, że możliwe jest zbudowanie stanowiska testowego dla kompletnego samochodu, przeznaczonego do testowania głównych systemów jazdy autonomicznej.

Aby całkowicie potwierdzić tezę, skonstruowano stanowisko pozwalające na testy wybranego czujnika w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Stanowisko zostało zbudowane w taki sposób, aby łatwe było jego rozbudowanie o dalsze czujniki i elementy wykonawcze. Dzięki temu może ono stanowić potwierdzenie koncepcji. Wybór padł na czujnik przeznaczony do wyznaczania kąta i prędkości kątowej kierownicy, powszechnie instalowany we współczesnych samochodach i związany zarówno z bezpieczeństwem funkcjonalnym, jak i systemami automatyzacji jazdy. Wybór ten był podyktowany wdrożeniowym charakterem rozprawy. Przygotowanie zaawansowanego stanowiska do testów tego rodzaju czujników, pozwoliło na rozwinięcie przez firmę Merit czujnika kąta kierownicy i potwierdzenie, że osiągnęte przez niego parametry są w pełni wystarczające zarówno dla systemów bezpieczeństwa jazdy, jak i układu kierowniczego typu Steer-by-Wire. Dodatkowo weryfikacja wydajności innych komercyjnych czujników kąta kierownicy, pozwoliła na analizę porównawczą własnych produktów oraz produktów konkurencji. Testy pokazały, że konkurencja uzyskuje lepsze wyniki i nadal istnieją obszary do poprawy, co skłoniło firmę do dalszego rozwijania i ulepszania oferowanych produktów.

Ponadto symulacyjnie wykazano niewielki wpływ błędów wynikających z dokładności czujnika w porównaniu z błędami wynikającymi z okresu przesyłania danych na trajektorię systemu z

układem sterowniczym Steer-by-Wire. Z tego powodu producenci samochodów w pierwszej kolejności powinni położyć nacisk na szybkość i niezawodność wymiany danych, a dopiero w drugiej kolejności na dokładność i rozdzielczość czujnika kąta kierownicy. Takie podejście pozwoli na znaczne ograniczenie kosztów produkcji przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności i bezpieczeństwa systemu Steer-By-Wire.

Zbudowane stanowisko testowe na wzór stanowiska do testowania pojazdu w pętli potwierdziło nieocenioną wartość dodaną tego typu rozwiązań. Pozwalają one przetestować działanie systemów w oparciu o dane wygenerowane podczas wirtualnych jazd testowych, które odzwierciedlają warunki spotykane podczas rzeczywistej jazdy. Dzięki temu czujniki mogą być zweryfikowane za pomocą danych zbliżonych do rzeczywistych. W tym przypadku można było zobaczyć, jak dane metrologiczne opisujące dany czujnik, faktycznie przekładają się na wydajność i jakość uzyskiwaną na drodze. Dodatkowo dzięki wysoko realistycznym modelom samochodu i jego kinematyki oraz wygenerowanemu obrazowi 3D, można zobaczyć, jak samochód zachowuje się podczas przejazdu, co jest znacznie wygodniejsze, a przede wszystkim przemawiające do wyobraźni. To potwierdza trend powstawania tego typu stanowisk testowych oraz ich przydatność zarówno w testach pojedynczych urządzeń HIL, jak i w testach całego pojazdu VIL.

Oprócz stanowiska testowego do czujników kąta kierownicy, podjęto także próbę budowy stanowiska do technologii V2X bazującej na standardzie 802.11p. Wykorzystano interfejs komunikacyjny SEA 9719 802.11p Communication Module oraz oprogramowanie LabView. Pomimo początkowych sukcesów w integrowaniu tych narzędzi, jego kontynuacja została porzucona ze względu na brak chęci udostępnienia bibliotek przez producenta urządzenia. Niemniej zdobyta wiedza o technologii V2X/C-V2X oraz urządzeniach symulujących i testowych dostępnych na rynku, pozwoliła na uruchomienie w firmie Merit innowacyjnego projektu inteligentnej anteny wykorzystującej technologię C-V2X. Do tego celu zgodnie z zaleceniem autora wykorzystano omawiany wcześniej interfejs Cohda Wireless, który okazał się bardzo dobrym wyborem. Obecnie projekt zarówno modułu C-V2X, jak i całego stanowiska jest ukończony i jest prezentowany największym na świecie producentom samochodów, w celu nawiązania współpracy i masowej produkcji tego typu urządzeń.

Prace badawczo-rozwojowe nad nowym stanowiskiem stanowiły nie lada wyzwanie, które pomimo przeciwności związanych m.in. z bardzo ograniczonym budżetem czy ograniczeniami pandemicznymi, zostały z sukcesem doprowadzone do końca. Wyniki prac są wykorzystywane w procesie projektowania i testowania nowych komponentów, a zdobyta wiedza pozwoliła na realizację założonego projektu. Dodatkowo przyczyniła się do rozwoju wspomnianych powyżej produktów, ale przede wszystkim pozwoliła na rozwinięcie całkowicie nowych projektów dotychczas niebędących w portfolio firmy Merit, jakim jest C-V2X. Poza aspektem wdrożeniowym badania miały także aspekt naukowy, o czym świadczy opublikowanie trzech artykułów w recenzowanych czasopismach, a dwa z nich w wysoko punktowanych w czasopismach z listy MEiN (100 pkt.).

Podsumowując, zbudowanie i badania przeprowadzone z wykorzystaniem opisanych stanowisk pozwoliły ostatecznie potwierdzić postawioną w rozdziale drugim tezę, że możliwe jest zbudowanie laboratoryjnego stanowiska testowego dla kompletnego samochodu, przeznaczonego do testowania głównych systemów jazdy autonomicznej.

W ramach przeprowadzonych badań zidentyfikowano też niedoskonałości i ograniczenia takiego stanowiska oraz zaproponowano rozwiązania niektórych z nich. Jednym z największych napotkanych problemów jest stymulacja kamer termowizyjnych. W większości przypadków są one testowane w oparciu ustandaryzowane statyczne cele, co kompletnie nie nadaje się do użycia w testach samochodu. Pocięszającym jest fakt istnienia urządzenia, które w przybliżeniu można

by było nazwać symulatorem celu. Natomiast jakość oraz dynamika generowanych obrazów pozostawiają wiele do życzenia. Stymulator jest w stanie symulować jedynie figury geometryczne w ograniczonej ilości i rozmiarze. Dodatkowo istniejący stymulator jest urządzeniem skomplikowanym, dużym i nieporęcznym, co utrudnia korzystanie z niego. To powoduje, że obecnie na rynku nie ma dostępnych urządzeń nadających się do dynamicznego testowania kamery termowizyjnej, choć istnienie wspomnianego stymulatora celu jest pewnym punktem startowym, od którego można by było zacząć rozwój takiego urządzenia. Tego typu urządzenie jest kosztowne, dlatego alternatywnie zaproponowano stworzenie ekranu z pikseli „termicznych”, które mogłyby być zrealizowane przez miniaturowe ogniwa Peltiera. Są one o rząd wielkości większe niż piksele monitora, natomiast można to skorygować, ustawiając „ekran Peltiera” w odpowiedniej odległości od kamery termowizyjnej. Zmieniając polaryzację napięcia zasilania w ogniwie, można by było sterować temperaturą powierzchni ogniwa. Taki ekran pozwalałby jednocześnie symulować temperatury większe oraz mniejsze od temperatury otoczenia. Obecnie nie ma tego typu projektów, dlatego jest to całkowicie nowy pomysł, który w teorii nadawałby się do dynamicznego generowania obrazu termicznego i dlatego jest wart dalszego kontynuowania.

Podobnie sytuacja wygląda z kamerami bliskiej podczerwieni, gdyż obecnie nie ma dla nich symulatorów celu. Klasyczne monitory również nie są wystarczające do stymulacji tego typu czujników, gdyż praktycznie nie emitują światła bliskiej podczerwieni. Z tego powodu poddano pomysł stworzenia ekranu składającego się z diod podczerwonych, który byłby w stanie generować obraz w paśmie podczerwonym. Do tego celu można by było użyć dostępnych ekranów z dyskretnymi diodami LED typu SMD lub DIP i następnie podmienić diody kolorowe diodami podczerwonymi. Dzięki temu stworzenie tego ekranu ograniczyłoby się tylko do wymiany elementów matrycy, natomiast wszystkie pozostałe elementy z uwzględnieniem sterownika graficznego mogłyby pozostać niezmienione. Pozwoliłoby to stosunkowo łatwo i szybko stworzyć taki monitor i poddać go badaniom. Jest to kolejna luka, która wymaga uzupełnienia, ponieważ pomimo że kamery bliskiej podczerwieni na dziś są bardzo rzadko wykorzystywane do percepcji otoczenia, to jako że w przeszłości były już stosowane, jest szansa, że w przyszłości zostaną ponownie użyte.

Ze wszystkich badanych czujników i systemów największy problem w stymulacji został napotkany przy inercyjnej jednostce pomiarowej IMU. Nie istnieją stymulatory, które byłyby go w stanie przetestować bezkontaktowo, a większość testów odbywa się z wykorzystaniem wirówek i stołów obrotowych. Nie ma obecnie technologii, która byłaby w stanie elektrycznie ani w żaden inny sposób bezprzewodowy i bezinwazyjny generować sztucznego przyspieszenia. Jediną metodą jest faktyczne wprawienie w ruch badanego czujnika. Sprawa dodatkowo się komplikuje w momencie potrzeby stymulacji IMU zamontowanego w pojeździe. Wymagałoby to umieszczenia samochodu na olbrzymiej wirówce ze stołem obrotowym. Również na tej wirówce musiałyby być umieszczone i mocno przytwierdzone wszystkie inne stymulatory dla pozostałych czujników oraz hamownia dynamometryczna. Wydaje się to być niemożliwe i nieopłacalne do zrealizowania. Natomiast jeśli ktoś się na to zdecydował, to i tak wirówka ze stołem obrotowym nie jest w stanie wygenerować wszystkich rzeczywistych warunków. Jest to spowodowane tym, że każda zmiana proporcji przyspieszenia w osiach, wymaga zawsze obrotu czujnika, co powoduje wyzwalanie pomiarów żyroskopu. Pomijając pomiar przyspieszenia, alternatywnie jako półśrodek do testowania IMU, można by było umieścić samochód wraz ze wszystkimi innymi urządzeniami na dużym obrotowym stole. Dzięki temu obracając stół, można by było chociaż w jednej osi symulować żyroskop. Dwie pozostałe osie nadal zostałyby nieruchome, natomiast one mają o wiele mniejszy wpływ na działanie systemów, gdyż mierzą jedynie przechyły boczne oraz wzdłużne samochodu. Symulowanie obrotu wokół osi Z jest istotne, ponieważ ten kąt zmienia się np. w trakcie poślizgów i jest ważny dla systemu stabilizacji toru jazdy.

Niemniej IMU jest raczej systemem uzupełniającym inne systemy, a nie systemem wiodącym, bez którego jazda autonomiczna nie ma prawa działać. Potwierdzeniem tego są różne projekty testowania pojazdu w pętli i pomimo że IMU nie jest w żaden sposób stymulowane, to samochód

zachowuje się zgodnie ze stymulacją pozostałych czujników. To potwierdza, że dane zapewniające przez IMU nie są niezbędne do jazdy autonomicznej i prawdopodobnie są używane tylko w niektórych sytuacjach, jak brak dostępu do danych z innych rodzajów czujników. Z tego powodu czujnik IMU może zostać pominięty podczas stymulacji i nie będzie czynnikiem blokującym stworzenie stanowiska testowego do badania funkcji jazdy autonomicznej. Nie stanowi to zaprzeczenia postawionej w pracy tezy, mówiącej o systemach głównych, a nie pomocniczych. Wskazuje jednak na możliwe dalsze kierunki prac badawczych w zakresie testowania samochodów autonomicznych.

Dodatkowo istotnym problemem jest brak możliwości skręcania kołami podczas wykonywania testu, co jest omijane za pomocą ingerencji w strukturę pojazdu poprzez odłączanie kół od przekładni kierowniczej. Od pewnego czasu nowoczesne hamownie dynamometryczne z hamulcami prądu przemiennego oferują możliwość skręcania kół podczas testów oraz są w stanie symulować precyzyjnie z dużą dynamiką obciążenia działające na koła samochodu. Dzięki temu nie ma potrzeby ingerowania w konstrukcję samochodu, a hamownia jest w stanie zapewnić wierne odwzorowanie oporów ruchu.

Podsumowując, w przypadku chęci zrealizowania kompletnego stanowiska testowego będącego w stanie w pełni zasymulować środowisko zewnętrzne w laboratorium jest nadal jeszcze sporo pracy. Przede wszystkim, w pierwszej kolejności należałoby zintegrować ze sobą dostępne stymulatory (obecnie pracujące głównie w systemach HIL), aby były one w stanie bezawaryjnie pracować, nie zakłócając i nie przeszkadzając sobie nawzajem podczas testów kompletnego samochodu. To pozwoliłoby na wysokie pokrycie najważniejszych i najczęściej wykorzystywanych czujników i systemów. W dalszej kolejności należałoby skupić się na rozwinięciu brakujących technologii stymulacji dla termowizji, kamer bliskiej podczerwieni, IMU oraz ulepszeniu hamowni dynamometrycznej pod kątem dynamiczniejszego skręcania kół. Ponownie, powyższe stwierdzenia nie stanowią zaprzeczenia tezy, gdyż przedstawione ograniczenia mają głównie charakter techniczny a nie fizyczny czy naukowy i mogą zostać przewyżnione pod warunkiem zastosowania odpowiednich środków technicznych (wiązących się z odpowiednio wysokimi nakładami).

8 Bibliografia

- [1] M. Pietruch, A. Wetula, and A. Młyniec, "Influence of the Accuracy and CAN Frame Period of the Steering Wheel Angle Sensor (SAS) on the Trajectory of a Steer-by-Wire-Equipped Car," *IEEE Access*, vol. 10, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3211942.
- [2] M. Pietruch, A. Wetula, and A. Młyniec, "VERIFICATION OF HARDWARE-IN-THE-LOOP TEST BENCH FOR EVALUATING STEERING WHEEL ANGLE SENSOR PERFORMANCE FOR STEER-BY-WIRE SYSTEM," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 29, no. 4, 2022, doi: 10.24425/mms.2022.143065.
- [3] M. Pietruch, A. Młyniec, and A. Wetula, "An overview and review of testing methods for the verification and validation of ADAS, active safety systems, and autonomous driving," *Min. - Informatics, Autom. Electr. Eng.*, vol. 1 (541), no. 1, 2020, doi: 10.7494/miag.2020.1.541.19.
- [4] T. Stewart, "Overview of motor vehicle traffic crashes in 2021 (Report No. DOT HS 813 435).," 2023. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813435> (Dostęp 19.06.2023).
- [5] S. Singh, "Critical reasons for crashes investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey," 2018. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/Publication/812506> (Dostęp 19.06.2023).
- [6] S. Engineering, S. Committee, C. S. Committee, and C. Society, *IEEE Standard for System and Software Verification and Validation*. 2012.
- [7] "What Is Active Safety?," *MOBILITY INSIDER*, 2020. <https://www.apativ.com/en/insights/article/what-is-active-safety> (Dostęp 19.06.2023).
- [8] G. Leen and D. Heffernan, "Expanding automotive electronic systems," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 35, no. 1, 2002, doi: 10.1109/2.976923.
- [9] Y. X. Cui, L. Sun, L. H. Sui, J. Kang, and Y. Jiang, "Interactive Safety Analysis Framework of Autonomous Intelligent Vehicles," in *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 44, doi: 10.1051/mateconf/20164401029.
- [10] "What Is ADAS?," *MOBILITY INSIDER*, 2020. <https://www.apativ.com/en/insights/article/what-is-adas> (Dostęp 19.06.2023).
- [11] "Advanced driver assistance," *Insurance Institute for Highway Safety (IIHS)*. <https://www.iihs.org/topics/advanced-driver-assistance#front-crash-prevention> (Dostęp 19.06.2023).
- [12] S. Karush, "Back stop. Rear crash prevention ratings aim to reduce parking lot collisions. Status report.," *Status Report*, 2018. <https://www.iihs.org/api/datastore/document/status-report/pdf/53/1> (Dostęp 19.06.2023).
- [13] "EURONCAP. 2020. Assisted Driving Tests.," 2020. <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/2020-assisted-driving-tests/>.
- [14] SAE International, "SAE J3016: Levels of Driving Automation," *Soc. Automot. Eng.*, 2021.
- [15] J. Hassol, D. Perlman, L. Chajka-Cadin, and J. Shaw, "Understanding Surveys of Public Sentiment Regarding Automated Vehicles: Summary of Results to Date and Implications

- of Past Research on the Dynamics of Consumer Adoption,” *Dot-Vntsc-Fhwa-20-03*, no. November 2019, 2019.
- [16] “VALEO SCALA LIDAR,” *Valeo*. <https://www.valeo.com/en/valeo-scala-lidar/> (Dostęp 19.06.2023).
- [17] “Honda Receives Type Designation for Level 3 Automated Driving in Japan,” *Honda*, 2020. <https://global.honda/newsroom/news/2020/4201111eng.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [18] “Introducing DRIVE PILOT: An Automated Driving System for the Highway.” <https://group.mercedes-benz.com/documents/innovation/other/2019-02-20-vssa-mercedes-benz-drive-pilot-a.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [19] “Certification for SAE Level 3 system for U.S. market.,” *Mercedes-Benz*. <https://group.mercedes-benz.com/innovation/product-innovation/autonomous-driving/drive-pilot-nevada.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [20] S. Edelstein, “Audi gives up on Level 3 autonomous driver – assist system in A8.,” *MOTOR AUTHORITY*. https://www.motorauthority.com/news/1127984_audi-gives-up-on-level-3-autonomous-driver-assist-system-in-a8 (Dostęp 19.06.2023).
- [21] “Audi Can’t Upgrade A8 To Level 3 Autonomous Driving,” *AUTOMUSE*. <https://www.automuse.co.nz/news/audi-cant-upgrade-a8-to-level-3-autonomous-driving> (Dostęp 19.06.2023).
- [22] D. Shapiro, “Leveling Up: What Is Level 2 Automated Driving? NVIDIA,” 2019. https://blogs.nvidia.com/blog/2019/02/06/what-is-level-2-automated-driving/?fbclid=IwAR0NcZGh_qV3R3twvK1RN5eUOiy2XXe1_BQg7Zw50nlOKlcKaxKER6-aFsw (Dostęp 19.06.2023).
- [23] “What Are the Levels of Automated Driving?,” *MOBILITY INSIDER*, 2020. <https://www.aptiv.com/en/insights/article/what-are-the-levels-of-automated-driving> (Dostęp 19.06.2023).
- [24] “Model S Owner’s Manual. Autopilot,” *TESLA*. https://www.tesla.com/ownersmanual/models/en_us/GUID-32E9F9FD-0014-4EB4-8D96-A8BE99DBE1A2.html (Dostęp 19.06.2023).
- [25] W. Xu, C. Yan, W. Jia, X. Ji, and J. Liu, “Analyzing and Enhancing the Security of Ultrasonic Sensors for Autonomous Vehicles,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 6, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2867917.
- [26] “The 2019 Audi A8 Electrics and Electronics. eSelf-Study Program 970293,” *Audi of America, LLC*, 2018. <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2018/MC-10144683-9999.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [27] “The 2019 Audi e-tron Introduction. eSelf-Study Program 990993,” *Audi of America, LLC*, 2019. <https://static.nhtsa.gov/odi/tsbs/2019/MC-10155750-9999.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [28] D. Bank, “High-Resolution Ultrasonic Sensing for Autonomous Mobile Systems,” 2005. <https://d-nb.info/995861013/34> (Dostęp 19.06.2023).
- [29] “TECHNICAL GUIDE FOR ULTRASONIC SENSORS.” <http://us.azbil.com/uploadedSpecs/GUIAGFUSONICTEC-e3RD.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [30] A. Toa, M Whitehead, “Application Note. Ultrasonic Sensing Basics (Rev. D). Texas

- Instruments,,” 2021.
https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf?ts=1683443980676&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (Dostęp 19.06.2023).
- [31] “Ultrasonic Sensor System OHW – Entry,” *BOSCH*. https://www.bosch-mobility.com/media/global/products-and-services/off-highway-and-large-engines/driver-assistance-systems/ultrasonic-sensor-systems/beg_onepager_uss_en_rgb_20211209.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [32] “CES 2021. Mobility is the Heartbeat of Life Ultrasonic Parking Sensor,” *Continental*. https://cdn.continental.com/fileadmin/_imported/sites/corporate/usa/english/hubpages/10_20press/40_20events/ces_202021/30_20media_20information/products_20and_20services_20accordians/ams_20content/download_ams_ultrasonic_20parking.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [33] A. Linares, “Implementation and Integration of an Experimental Vehicle Sensor Setup for Automated Parking,” 2018.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/125497/Thesis_Alberto_Linares.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Dostęp 19.06.2023).
- [34] Z. Wu *et al.*, “A novel transfer function based ring-down suppression system for pmuts,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, 2021, doi: 10.3390/s21196414.
- [35] “Technical Explanation for Ultrasonic Sensors,” *Omron*.
https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/50/ultrasonic_tg_e_1_1.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [36] “Ultrasonic-based driver assistance systems. Ultrasonic sensors, generation 6,” *BOSCH*.
<https://atleducation.org/wp-content/uploads/curriculum/adas/product-data-sheet-ultrasonic-sensors-generation-6.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [37] B. Wirtzner, W. M. Grimm, H. Schmidt, and R. Klinnert, “Interference Cancellation in Ultrasonic Sensor Arrays by Stochastic Coding and Adaptive Filtering,” *IEEE Int. Conf. Intell. Veh.*, 1998.
- [38] “RTKLIB ver. 2.4.2 Manual,” 2013. https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [39] “How GPS Receivers Work – Trilateration vs Triangulation,” *GISGeography*, 2022.
<https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/> (Dostęp 19.06.2023).
- [40] E. Canuto, C. Novara, L. Massotti, D. Carlucci, and C. Perez Montenegro, *Spacecraft dynamics and control: The embedded model control approach*. 2018.
- [41] “GPS Navigation Message.”
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (Dostęp 19.06.2023).
- [42] “The Transmission of GPS Signals.” <https://ee3550-gps.weebly.com/transmission-of-gps-signals.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [43] A. E. Süzer and H. Oktal, “PRN code correlation in GPS receiver,” in *Proceedings of 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST 2017*, 2017, doi: 10.1109/RAST.2017.8002960.
- [44] A. Angrisano, G. Cappello, S. Del Pizzo, and S. Gaglione, “Time-Differenced Carrier Phase Technique for Precise Velocity Estimation on an Android Smartphone,” *Sensors*, vol. 22, no. 21, 2022, doi: 10.3390/s22218514.

- [45] M. Håkansson, A. B. O. Jensen, M. Horemuz, and G. Hedling, "Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning," *GPS Solutions*, vol. 21, no. 3. 2017, doi: 10.1007/s10291-016-0572-7.
- [46] D. Tang, D. Lu, B. Cai, and J. Wang, "GNSS Localization propagation error estimation considering environmental conditions," in *Proceedings of 2018 16th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications, ITST 2018*, 2018, doi: 10.1109/ITST.2018.8566771.
- [47] E. Karlsson and N. Mohammadiha, "A Statistical GPS Error Model for Autonomous Driving," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 2018, vol. 2018-June, doi: 10.1109/IVS.2018.8500422.
- [48] J. Narkiewicz, *Podstawy układów nawigacyjnych*. .
- [49] S. Joardar, T. A. Siddique, S. Alam, and M. Hossam-E-Haider, "Analyses of different types of errors for better precision in GNSS," in *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEiCT 2016*, 2017, doi: 10.1109/CEEICT.2016.7873127.
- [50] P. Roberts, "IONOSPHERIC DISPERSION COMPENSATION USING A NOVEL MICROWAVE DE-DISPERSION FILTER," *CSIRO, Aust. Telesc. Natl. Facil.*, Dostępny online: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1305/1305.0333.pdf>.
- [51] A. I. Eriksson, *Waves in Space Plasmas. An introduction for the course Space Physics II at Uppsala University*. 2003.
- [52] M. Mainul and N. Jakowski, "Ionospheric Propagation Effects on GNSS Signals and New Correction Approaches," in *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*, 2012.
- [53] "Tropospheric Delay," *Navipedia*. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Tropospheric_Delay (Dostęp 19.06.2023).
- [54] J. Feltens *et al.*, "Tropospheric and ionospheric media calibrations based on global navigation satellite system observation data," *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 8. 2018, doi: 10.1051/swsc/2018016.
- [55] K. Krasuski, "Estimation Troposphere Delay Parameters for GNSS Reference Station," *Pomiary Autom. Robot.*, vol. 20, no. 1, 2016, doi: 10.14313/par_219/75.
- [56] "How Does GPS Work?," 2020. https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/How_Does_GPS_Work%3F (Dostęp 19.06.2023).
- [57] M. Supej and I. Čuk, "Comparison of global navigation satellite system devices on speed tracking in road (tran)SPORT applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 12, 2014, doi: 10.3390/s141223490.
- [58] "Racelogic PerformanceBox." https://www.vboxmotorsport.com/store/index.php?route=product/product&product_id=46 (Dostęp 19.06.2023).
- [59] R. V. dos Santos, "GNSS Positioning in Multi-Constellation Scenarios." https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090413509/Dissertacao_67230.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [60] M. Stanisak, U. Haak, and A. Schwithal, "Different positioning strategies using multi-

- frequency/multi-constellation GNSS measurements,” in *28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2015*, 2015, vol. 4.
- [61] “Dragy GPS Performance Box - DRG70,” *Dragy Motorsports*.
<https://dragymotorsports.co.uk/products/dragy-gps-performance-box> (Dostęp 19.06.2023).
- [62] “How Does DGPS (Differential GPS) Work?,” 2018.
[https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/How_Does_DGPS_\(Differential_GPS\)_Work%3F](https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/How_Does_DGPS_(Differential_GPS)_Work%3F) (Dostęp 19.06.2023).
- [63] G. Sorensen, *A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [64] “Real Time Kinematic,” *Vbox Automotive*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Real_Time_Kinematic (Dostęp 19.06.2023).
- [65] F. van Diggelen, “GPS and GPS+GLONASS RTK,” in *New Product Descriptions*, 1997, Dostępny online: https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/RTK_survey2.pdf.
- [66] “How Does RTK (Real Time Kinetic) Work?,” 2021.
[https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/How_Does_RTK_\(Real_Time_Kinetic\)_Work%3F](https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/How_Does_RTK_(Real_Time_Kinetic)_Work%3F) (Dostęp 19.06.2023).
- [67] A. Cina, P. Dabove, A. M. Manzano, and M. Piras, “Network Real Time Kinematic (NRTK) Positioning – Description, Architectures and Performances,” in *Satellite Positioning - Methods, Models and Applications*, 2015.
- [68] “What is Network RTK (NTRIP)?,” 2021.
[https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/What_is_Network_RTK_\(NTRIP\)%3F](https://en.racelogic.support/VBOX_Automotive/Knowledge_Base/What_is_Network_RTK_(NTRIP)%3F) (Dostęp 19.06.2023).
- [69] “What is SBAS?,” 2022. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas> (Dostęp 19.06.2023).
- [70] “EGNOS - europejski system typu SBAS.” <https://technologiagps.org.pl/sbas/egnos.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [71] J. Chen, Y. Zhang, C. Yu, A. Wang, Z. Song, and J. Zhou, “Models and performance of SBAS and PPP of BDS,” *Satell. Navig.*, vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s43020-022-00065-3.
- [72] R. KAŹMIERCZAK and G. GRUNWALD, “Rozkład poprawek EGNOS w czasie,” *Logistyka*, 2012.
- [73] “Acceleration Sensor MM5.10,” *BOSCH*. <https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/en-GB/51546379119226251.html#/Tabs=51588235/> (Dostęp 19.06.2023).
- [74] M. Keerthi NARAYANA, K.S, “Solutions for the localization of mobile mapping systems in structured environments.” <https://theses.hal.science/pastel-00617985/> (Dostęp 19.06.2023).
- [75] K. Bikonis and J. Demkowicz, “Mems Technology Quality Requirements as Applied to Multibeam Echosounder,” *Polish Marit. Res.*, vol. 25, no. 4, 2018, doi: 10.2478/pomr-2018-0132.
- [76] “Automotive Inertial Measurement Unit (IMU) Sensors Market by 360 Market Updates

- Reports with Top Featured Companies Dominating the Industry,” 2023.
<https://www.wicz.com/story/48481026/Automotive-Inertial-Measurement-Unit-IMU-Sensors-Market-by-360-Market-Updates-Reports-with-Top-Featured-Companies-Dominating-the-Industry/> (Dostęp 19.06.2023).
- [77] M. Horton, “Inertial measurement units will keep self-driving cars on track.”
<https://www.microcontrollertips.com/inertial-measurement-units-will-keep-self-driving-cars-on-track-faq/> (Dostęp 19.06.2023).
- [78] “OpenIMU335RI.” https://navview.blob.core.windows.net/web-resources/6020-3321-01_C_OpenIMU335RI.pdf?t=1658419946109 (Dostęp 19.06.2023).
- [79] B. V. Amini, S. Pourkamali, and F. Ayazi, “A high resolution, stictionless, cmos compatible soi accelerometer with a Low noise, Low power, 0.25 μ M cmos interface,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2004, doi: 10.1109/mems.2004.1290649.
- [80] “1.3 MEMS OPERATION,” *VECTORNAV*.
<https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-mems> (Dostęp 19.06.2023).
- [81] “Speed Sensors,” *Continental*. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Safety-and-Motion/Products/Sensors/Speed-Sensors> (Dostęp 19.06.2023).
- [82] W. Ouyang, Y. Wu, and H. Chen, “INS/Odometer Land Navigation by Accurate Measurement Modeling and Multiple-Model Adaptive Estimation,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 57, no. 1, 2021, doi: 10.1109/TAES.2020.3011998.
- [83] M. Mu and L. Zhao, “A Data Fusion Algorithm of GNSS/INS/ Odometer Integrated System in Consideration of Total Odometer Errors,” in *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2021, vol. 2021-October, doi: 10.23919/ICCAS52745.2021.9649816.
- [84] “TLE5041plusC Wheel Speed Sensor,” *Infineon Technologies*.
<https://www.mouser.pl/new/infineon/infineon-tle5041plusc-sensor/> (Dostęp 19.06.2023).
- [85] T. H. Cong, Y. J. Kim, and M. T. Lim, “Hybrid Extended Kalman Filter-based localization with a highly accurate odometry model of a mobile robot,” in *2008 International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2008*, 2008, doi: 10.1109/ICCAS.2008.4694596.
- [86] “Wheel speed sensor,” *BOSCH*. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/wheel-speed-sensor/> (Dostęp 19.06.2023).
- [87] “Wheel Speed Sensor,” *Continental*. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Safety-and-Motion/Products/Sensors/Speed-Sensors/Wheel-Speed-Sensors/Wheel-Speed-Sensor> (Dostęp 19.06.2023).
- [88] “XENSIV™ Magnetic Speed Sensors,” *Infineon Technologies*.
<https://www.mouser.pl/new/infineon/infineon-xensiv-hall-gmr-sensors/> (Dostęp 19.06.2023).
- [89] J. Xie, J. Tang, Y. Wang, Q. Zhu, and S. Liu, “Brief industry paper: An infrastructure-aided high definition map data provisioning service for autonomous driving,” in *Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS*, 2021, vol. 2021-May, doi: 10.1109/RTAS52030.2021.00042.

- [90] M. N. Simon Ulbrich, Andreas Reschka, Jens Rieken, Susanne Ernst, Gerrit Bagschik, Frank Dierkes and M. Maurer, "Towards a Functional System Architecture for Automated Vehicle," Dostępny online: <https://arxiv.org/pdf/1703.08557.pdf>.
- [91] Z. Bao, S. Hossain, H. Lang, and X. Lin, "A review of high-definition map creation methods for autonomous driving," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 122, p. 106125, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2023.106125.
- [92] "HERE HD Live Map," *HERE*. https://www.here.com/sites/g/files/odxslz256/files/2021-10/HERE_HD_Live_Map_product_one-pager_2020.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [93] "HERE HD Live Map Technical Paper," *HERE*. https://go.engage.here.com/rs/142-UEL-347/images/Tech_Brief_HERE_Technologies_Self-healing_Map.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [94] "Introduction to Mapping Concepts," *HERE*. https://developer.here.com/documentation/mapping-concepts/white_paper/topics/formats-filters-quality.html.
- [95] "THE SELF-HEALING MAP FROM HERE," *HERE*. <https://go.engage.here.com/self-healing.html#formcta> (Dostęp 19.06.2023).
- [96] S. Abuelsamid, "Super Cruise HD Map Developer Ushr Acquired By Dynamic Map Platform Of Japan," 2019. <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2019/02/12/super-cruise-hd-map-developer-ushr-acquired-by-dynamic-map-planning-of-japan/?sh=1f1c2f791d6b> (Dostęp 19.06.2023).
- [97] J. B. Kim, "Efficient vehicle detection and distance estimation based on aggregated channel features and inverse perspective mapping from a single camera," *Symmetry (Basel)*, vol. 11, no. 10, 2019, doi: 10.3390/sym11101205.
- [98] A. Luštica, "CCD and CMOS image sensors in new HD cameras," in *Proceedings Elmar - International Symposium Electronics in Marine*, 2011.
- [99] "CCD Image Sensors Technical Note," *Hamamatsu*. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/ccd_kmpd9002e.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [100] "qCMOS Quantitative CMOS technology enabled by Photon Number Resolving," *Hamamatsu*. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/sys/SCAS0149E_qCMOS_whitepaper.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [101] I. Takayanagi and R. Kuroda, "HDR CMOS Image Sensors for Automotive Applications," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 69, no. 6, 2022, doi: 10.1109/TED.2022.3164370.
- [102] S. Ma *et al.*, "Development and Reliability study of 3D WLCSP for automotive CMOS image sensor using TSV technology," in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 2020, vol. 2020-June, doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00080.
- [103] A. Vision, "CCD or CMOS: can CMOS sensors replace CCDs in all cases?," *Allied Vision*. https://cdn.alliedvision.com/fileadmin/content/documents/products/cameras/various/app_note/various/CCD_Vs_CMOS_WhitePaper_EN.pdf (Dostęp 19.06.2023).

- [104] S. Mahlke, D. Rösler, K. Seifert, J. F. Krems, and M. Thüring, "Evaluation of six night vision enhancement systems: Qualitative and quantitative support for intelligent image processing," *Hum. Factors*, vol. 49, no. 3, 2007, doi: 10.1518/001872007X200148.
- [105] O. Tsimhoni, J. Bärgrman, and M. J. Flannagan, "Pedestrian detection with near and far infrared night vision enhancement," *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am.*, vol. 4, no. 2, 2007, doi: 10.1582/LEUKOS.2007.04.02.003.
- [106] Krzysztof Chrzanowski, *Testing Thermal Imagers - Practical Guidebook*, no. 9. 2010.
- [107] R. Ali *et al.*, "Passive Autofocusing System for a Thermal Camera," *IEEE Access*, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006356.
- [108] Y. Li, J. Moreau, and J. Ibanez-Guzman, "Unconventional Visual Sensors for Autonomous Vehicles," Dostępny online: <https://arxiv.org/pdf/2205.09383.pdf>.
- [109] A. Camera, "How Far Can A Night Vision Camera See?" <https://alfred.camera/blog/how-far-can-a-night-vision-camera-see/> (Dostęp 19.06.2023).
- [110] Y. Zhang, A. Carballo, H. Yang, and K. Takeda, "Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 196. 2023, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.021.
- [111] "Driver Assistance Systems Technology Guide," *Mercedes-Benz*. https://www.oem1stop.com/sites/default/files/2013-12_Fahrerassistenzsysteme_EN.PDF (Dostęp 19.06.2023).
- [112] "Lexus LX 470 (2007) manual." <https://www.manua.ls/lexus/lx-470-2007/manual> (Dostęp 19.06.2023).
- [113] R. Garcia-Martin, "Introduction to Infrared Vision: Near vs. Mid-Far Infrared Images." <https://pyimagesearch.com/2022/10/10/introduction-to-infrared-vision-near-vs-mid-far-infrared-images/> (Dostęp 19.06.2023).
- [114] C. Unger, "Contributions to Stereo Vision." <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1136933/817461.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [115] "Rolls-Royce Motor Cars Wraith," *Rolls-Royce*. <https://rolls-roycemotorcars-apac.com/pdf/Wraith.pdf>.
- [116] "Cadillac CT6 Owners Manual." <https://www.cadillac.com/content/dam/cadillac/na/us/english/index/ownership/technology/supercruise/pdfs/2020-cad-ct6-owners-manual.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [117] "BMW Night Vision. Model: E60, E61, E63, E64, E65, E66." <https://ia801005.us.archive.org/11/items/BMWTechnicalTrainingDocuments/ST402BodyElectronicsIII/17BMWNightVision.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [118] "Honda Develops World's First Intelligent Night Vision System Able to Detect Pedestrians and Provide Driver Cautions-Available on Legend model to be released in Fall 2004-," *HONDA*. <https://global.honda/newsroom/news/2004/4040824a-eng.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [119] "DS 7 Crossback," *DS Automobiles*. https://media.dspp.awsmpsa.com/file/51/8/DS7_CROSSBACK_09_2021.pdf (Dostęp 19.06.2023).

- [120] “Peugeot 508 & 508 SW PRICES - EQUIPMENT - TECHNICAL SPECIFICATIONS Version 1.2,” *PEUGEOT*, 2022. <https://www.peugeot.co.uk/content/dam/peugeot/uk/b2c/buy/price-and-spec-guides/pdfs/508-price-spec-guide.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [121] “Self-Study Programme 462. Audi A8 Night Vision Assist,” *AUDI AG*. <https://procarmanuals.com/pdf-online-vag-ssp-462-audi-a8-2010-night-vision-assist/> (Dostęp 19.06.2023).
- [122] “Bentley Newsroom: BENTLEY’S ADAS TECHNOLOGY SUMMONED BY VVIP CUSTOMER TO LOCATE MISSING REINDEER.” <https://www.bentleymedia.com/en/newsitem/1286> (Dostęp 19.06.2023).
- [123] S. Bi, Y. Gu, Z. Zhang, H. Liu, C. Zhai, and M. Gong, “Multi-camera stereo vision based on weights,” in *I2MTC 2020 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*, 2020, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128927.
- [124] K. Y. Kok and P. Rajendran, “A review on stereo vision algorithms: Challenges and solutions,” *ECTI Transactions on Computer and Information Technology*, vol. 13, no. 2. 2019, doi: 10.37936/ecti-cit.2019132.194324.
- [125] “Eyes for robots - Industrial LiDAR Systems gaining momentum,” *OSRAM*. <https://ams-osram.com/news/blog/lidar-eyes-for-robots> (Dostęp 19.06.2023).
- [126] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Lasagni, and M. Del Rose, “Infrared stereo vision-based pedestrian detection,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 2005, vol. 2005, doi: 10.1109/IVS.2005.1505072.
- [127] “Subaru Eyesight System: How Does It Work?,” *Subaru*. <https://www.quantrellsubaru.com/subaru-eyesight-system/> (Dostęp 19.06.2023).
- [128] K. Sharma, S. G. Kim, and M. P. Singh, “An improved feature matching technique for stereo vision applications with the use of self-organizing map,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 8, 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0179-z.
- [129] A. Dubey, “Stereo vision— Facing the challenges and seeing the opportunities for ADAS applications.” https://www.ti.com/lit/wp/spry300a/spry300a.pdf?ts=1684612061891&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (Dostęp 19.06.2023).
- [130] J. Balcerek, M. Luczak, P. Pawlowski, and A. Dabrowski, “Automatic recognition of image details using stereovision and 2D algorithms,” in *Signal Processing - Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings, SPA*, 2018, vol. 2018-September, doi: 10.23919/SPA.2018.8563419.
- [131] T. Kritsonis, “All eyes on Tesla’s cameras going it alone on driver autonomy,” 2021. <https://www.theglobeandmail.com/drive/mobility/article-all-eyes-on-teslas-cameras-going-it-alone-on-driver-autonomy/> (Dostęp 19.06.2023).
- [132] “EyeSight - Subaru Technical Information System,” *SUBARU CORPORATION*, 2018. https://techinfo.subaru.com/stis/doc/ownerManual/MSA5M1913A_STIS.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [133] “Dual Camera Brake Support (DCBS) and other driving assist systems,” *Suzuki*. [https://www.suzuki.cz/auto/svet_suzuki/press/akce/suzuki-akademie/bezpecnostni-systemy/dual-camera-brake-support-\(dcbs\).pdf](https://www.suzuki.cz/auto/svet_suzuki/press/akce/suzuki-akademie/bezpecnostni-systemy/dual-camera-brake-support-(dcbs).pdf) (Dostęp 19.06.2023).
- [134] “Cumulative Sales of Vehicles Equipped with Daihatsu’s Smart Assist Active Safety

- System Top 3,000,000,” *Daihatsu Motor Co., Ltd.*, 2020.
<https://www.daihatsu.com/news/2020/20200907-2.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [135] A. Esmail and T. Joshi, Prashant Sundar, Balasubramaniam Brijesh, “METHOD AND SYSTEM FOR AGGREGATING AND CONVERTING SENSOR DATA STREAMS,” US 10,965,728 B2, 2021.
- [136] J. Yoshida, “Teardown: Tesla’s Hardware Retrofits for Model 3.”
<https://www.eetasia.com/teslas-hardware-retrofits-for-model-3/> (Dostęp 19.06.2023).
- [137] “Experimental Security Research of Tesla Autopilot,” 2019.
https://keenlab.tencent.com/en/whitepapers/Experimental_Security_Research_of_Tesla_Autopilot.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [138] W. S. Kim, A. I. Ansar, R. D. Steele, and R. C. Steinke, “Performance analysis and validation of a stereo vision system,” in *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2005, vol. 2, doi: 10.1109/icsmc.2005.1571344.
- [139] X. Yang and S. Fang, “Effect of field of view on the accuracy of camera calibration,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 2, 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2013.07.089.
- [140] H. Sarbolandi, D. Lefloch, and A. Kolb, “Kinect range sensing: Structured-light versus Time-of-Flight Kinect,” *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 139, 2015, doi: 10.1016/j.cviu.2015.05.006.
- [141] Z. Zhang, “Microsoft kinect sensor and its effect,” *IEEE Multimedia*, vol. 19, no. 2, 2012, doi: 10.1109/MMUL.2012.24.
- [142] L. Li, S. Xiang, Y. Yang, and L. Yu, “Multi-camera interference cancellation of time-of-flight (TOF) cameras,” in *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*, 2015, vol. 2015-December, doi: 10.1109/ICIP.2015.7350860.
- [143] “A brief introduction to Time-of-Flight sensing. Part 2 Indirect ToF Sensors.”
<https://www.terabee.com/a-brief-introduction-to-time-of-flight-sensing-part-2-indirect-tof-sensors/> (Dostęp 19.06.2023).
- [144] A. Maric, Josip Siedersbeck, “Time-of-flight (ToF) measurement using pulse lasers,” 2018. [https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496586/Time-of-flight_\(ToF\)_measurement_using_pulse_lasers.pdf](https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496586/Time-of-flight_(ToF)_measurement_using_pulse_lasers.pdf) (Dostęp 19.06.2023).
- [145] Z. Zheng, P. Song, X. Wang, W. Zhang, and Y. Bai, “Wiggling-Related Error Correction Method for Indirect ToF Imaging Systems,” *Photonics*, vol. 10, no. 2, 2023, doi: 10.3390/photonics10020170.
- [146] A. Kadambi and R. Raskar, “Rethinking Machine Vision Time of Flight with GHz Heterodyning,” *IEEE Access*, vol. 5, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2775138.
- [147] “Why Choose time-of-flight for your Automotive 3D Sensing Applications,” *Melexis*.
<https://www.melexis.com/en/tech-talks/why-choose-time-of-flight-for-your-automotive-3d-sensing-applications> (Dostęp 19.06.2023).
- [148] Y. Lee, S. Kim, and H. Shin, “A 24 GHz CMOS Direct-Conversion RF Receiver with I/Q Mismatch Calibration for Radar Sensor Applications,” *Sensors*, vol. 22, no. 21, 2022, doi: 10.3390/s22218246.
- [149] A. Chen, “Do you know the 24GHz radar will not be allowed after 2021, both in Europe and the U.S.?,” 2021. <https://www.linkedin.com/pulse/do-you-know-24ghz-radar->

allowed-after-2021-both-europe-alicia-chen/ (Dostęp 19.06.2023).

- [150] *COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2019/784 of 14 May 2019 on harmonisation of the 24,25-27,5 GHz frequency band for terrestrial systems capable of providing wireless broadband electronic communications services in the Union*. Official Journal of the European Union.
- [151] M. E. Gadringer *et al.*, “Radar target stimulation for automotive applications,” *IET Radar, Sonar Navig.*, 2018, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5126.
- [152] B. R. Mahafza, *Radar systems analysis and design using MATLAB: Third edition*. 2016.
- [153] W. David, “Fmcw mmw radar for automotive longitudinal control,” *Calif. Partners Adv. Transit Highw. ...*, no. May, 1997, Dostępny online: <https://escholarship.org/content/qt5pv1f3cv/qt5pv1f3cv.pdf>.
- [154] N. Long, K. Wang, R. Cheng, K. Yang, W. Hu, and J. Bai, “Assisting the visually impaired: multitarget warning through millimeter wave radar and RGB-depth sensors,” *J. Electron. Imaging*, vol. 28, no. 01, 2019, doi: 10.1117/1.jei.28.1.013028.
- [155] Y. Makino, T. Nozawa, M. Umehira, X. Wang, S. Takeda, and H. Kuroda, “Inter-radar interference analysis of FMCW radars with different chirp rates,” *J. Eng.*, vol. 2019, no. 19, pp. 5634–5638, 2019, doi: 10.1049/joe.2019.0167.
- [156] Z. Tong, R. Reuter, and M. Fujimoto, “Fast chirp FMCW radar in automotive applications,” in *IET Conference Publications*, 2015, vol. 2015, no. CP677, doi: 10.1049/cp.2015.1362.
- [157] R. Iovescu, Cesar, Sandeep, “The fundamentals of millimeter wave radar sensors,” 2020. <https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1681450341737> (Dostęp 19.06.2023).
- [158] M. M. Vázquez, “Radar Range: How Far Can a Radar ‘See’?,” 2022. <https://www.renesas.com/us/en/blogs/radar-range-how-far-can-radar-see> (Dostęp 19.06.2023).
- [159] J. Samuelsson, “Phased array antenna element evaluation,” Linköping University, 2017.
- [160] M. M. Vázquez, “Radar Resolution: How Accurate Can a Radar Be?,” 2022. <https://www.renesas.com/us/en/blogs/radar-resolution-how-accurate-can-radar-be>.
- [161] J. Wenger, “Automotive radar - Status and perspectives,” in *Technical Digest - IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, CSIC*, 2005, doi: 10.1109/CSICS.2005.1531741.
- [162] M. M. Vázquez, “Why Do We Need Radar?,” 2021. <https://www.renesas.com/us/en/blogs/why-do-we-need-radar> (Dostęp 19.06.2023).
- [163] “Short Range Radar – SRR320,” *Continental*. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/2-Wheeler/Safe-Mobility/Sensors/Short-Range-Radar-SRR320> (Dostęp 19.06.2023).
- [164] “Surround Radar SRR600,” *Continental*. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Radars/SRR600> (Dostęp 19.06.2023).
- [165] “Radar sensors for assistance and automotive applications. Mid- and Long-range radar sensor.,” *BOSCH*. <http://www.bosch.co.jp/tms2017/pdf/CC-ProductDataSheet-MRR->

LRR-EN.pdf (Dostęp 19.06.2023).

- [166] “Chassis Systems Control: Mid-Range Radar Sensor (MRR1Plus),” *BOSCH*. <https://fccid.io/ANATEL/00850-13-03745/Manual-para-refer/F235B5AA-6AEA-408E-A9F5-4D1C40CC1EB9/PDF> (Dostęp 19.06.2023).
- [167] “ARS540,” *Continental*. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Radars/Long-Range-Radar/ARS540> (Dostęp 19.06.2023).
- [168] “ARS441,” *Continental*. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Radars/Long-Range-Radar/ARS441> (Dostęp 19.06.2023).
- [169] E. Guerrero -Menendez, “Frequency-modulated continuous-wave radar in automotive applications,” *Universitat Autònoma de Barcelona*, 2018.
- [170] N. Pandey, “Beamforming in MIMO Radar,” *National Institute of Technology Rourkela*, 2014.
- [171] S. Rao, “MIMO Radar Application Report,” 2018. https://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf?ts=1681538664935&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FAWR2944 (Dostęp 19.06.2023).
- [172] I. P. Gravas, “Development of Beamforming Techniques for Antenna Arrays,” *Aristotle University of Thessaloniki*, 2021.
- [173] M. I. Skolnik, *INTRODUCTION TO RADAR SYSTEMS*, Second Edi. McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- [174] T. S. Kiong, S. B. Salem, J. K. S. Paw, K. P. Sankar, and S. Darzi, “Minimum variance distortionless response beamformer with enhanced nulling level control via dynamic mutated artificial immune system,” *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/164053.
- [175] K. Benson, “Phased Array Beamforming ICs Simplify Antenna Design,” 2019. <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-1/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [176] “ETSI TR 103 593 V1.1.1 System Reference document (SRdoc); Transmission characteristics; Technical characteristics for radiodetermination equipment for ground based vehicular applications within the frequency range 77 GHz to 81 GHz.” Dostępny online: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103593/01.01.01_60/tr_103593v010101p.pdf.
- [177] S. Piatek, “LiDAR and Other Techniques.” https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/static/hc/resources/W0004/lidar_webinar_12.6.17.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [178] “Self Study Programme 668 - Audi A8 (type 4N) driver assistance systems,” *AUDI AG*. <https://procarmanuals.com/vag-ssp-668-audi-a8-type-4n-driver-assistance-systems/> (Dostęp 19.06.2023).
- [179] Y. Junko and E. Maurizio Di Paolo, “Audi A8 with Level 3 self-drive and LiDAR technology,” 2020. <https://www.eeweb.com/audi-a8-with-level-3-self-drive-and-lidar-technology/> (Dostęp 19.06.2023).

- [180] R. E. Calem, "NEXT GEN LIDAR. LiDAR, from autos to smart city infrastructure applications.," 2021. https://cdn.cta.tech/cta/media/media/resources/i3/2021/sept-oct/pdfs/000-feature_next-gen-lidar.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [181] "Zupełnie nowe Volvo EX90," *VOLVO*. <https://domvolvo.volvocars-partner.pl/kampanie/volvo-ex90/> (Dostęp 19.06.2023).
- [182] "Investor update for the year ended. Polestar," *Polestar Automotive Holding*, 2023. <https://investors.polestar.com/static-files/2219588a-6a7a-4ded-9ef5-82ef57f418b1> (Dostęp 19.06.2023).
- [183] "INTRODUCING THE 2024 KIA EV9: MODERN REFINEMENT AND ALL-ELECTRIC CAPABILITY ESTABLISH A NEW INDUSTRY TOUCHSTONE," 2023. <https://www.kiamedia.com/us/en/models/ev9/2024> (Dostęp 19.06.2023).
- [184] "Lotus Eletre. The World's First Electric Hyper-SUV from Lotus," *Lotus Cars*. <https://autocatalogarchive.com/wp-content/uploads/2023/03/Lotus-Eletre-2022-TH.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [185] "Lucid Air Owner's Manual," *Lucid*, 2022. https://lucidmotors.com/media/document/OM_NA_enUS_2022_46.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [186] S. Chan, "Using Ouster lidar data to advance intersection safety research," 2022. <https://ouster.com/blog/using-ouster-lidar-data-to-advance-intersection-safety-research/> (Dostęp 19.06.2023).
- [187] "LiDAR for Automotive and Industrial Applications 2021. Market and Technology Report 2021," *YOLE*. <https://s3.i-micronews.com/uploads/2021/09/YINTR21174-LiDAR-for-Automotive-and-Industrial-Applications-2021-Sample.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [188] A. Szafarczyk and C. Toś, "The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements," *Sensors*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: 10.3390/s23010292.
- [189] Z. Dai, Y. Li, S. M. Caspar, T. Grabe, and R. Lachmayer, "Lidars for vehicles: from the requirements to the technical evaluation," in *9th International Forum on Automotive Lighting (IFAL)*, 2021, doi: <https://doi.org/10.15488/11352>.
- [190] R. Roriz, J. Cabral, and T. Gomes, "Automotive LiDAR Technology: A Survey," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 7, 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3086804.
- [191] D. Chu, S. Aboujja, and D. Bean, "1550nm Triple Junction Laser Diode Outshines 905nm in Automotive LiDAR." Dostępny online: https://www.seminex.com/wp-content/uploads/2021/10/905_vs_1550_LiDAR_white_paper_Rev9_LFW.pdf.
- [192] J. Wojtanowski, M. Zygmunt, M. Kaszczuk, Z. Mierczyk, and M. Muzal, "Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions," *Opto-Electronics Rev.*, vol. 22, no. 3, 2014, doi: 10.2478/s11772-014-0190-2.
- [193] D. Tonvall, "Study of reflective and polarization properties of objects found in automotive LiDAR applications," Umea University, 2020.
- [194] S. Grollius, M. Ligges, J. Ruskowski, and A. Grabmaier, "Concept of an Automotive LiDAR Target Simulator for Direct Time-of-Flight LiDAR," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 8, no. 1, 2023, doi: 10.1109/TIV.2021.3128808.

- [195] C. Rablau, "Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences," in *Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2523863>.
- [196] O. Svelto, *Principles of lasers*, 5th ed. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010.
- [197] "Infrared lasers for industrial LiDAR applications. Selection guide and product portfolio.," *OSRAM*. https://media.osram.info/im/img/osram-dam-17789486//OSRAM_OS_Flyer_Industrial_l=LIDAR_A4_2020_11_EN.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [198] Z. Dai, A. Wolf, P. P. Ley, T. Glück, M. C. Sundermeier, and R. Lachmayer, "Requirements for Automotive LiDAR Systems," *Sensors*, vol. 22, no. 19, 2022, doi: 10.3390/s22197532.
- [199] D. Bastos, P. P. Monteiro, A. S. R. Oliveira, and M. V. Drummond, "An overview of LiDAR requirements and techniques for autonomous driving," in *2021 Telecoms Conference, ConfTELE 2021*, 2021, doi: 10.1109/ConfTELE50222.2021.9435580.
- [200] "Photodetectors for Lidars," *Hamamatsu*, 2023. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/Photodetector_lidar_kapd0005e.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [201] V. J. Kitsmiller, C. Campbell, and T. D. O'Sullivan, "Optimizing sensitivity and dynamic range of silicon photomultipliers for frequency-domain near infrared spectroscopy," *Biomed. Opt. Express*, vol. 11, no. 9, 2020, doi: 10.1364/boe.401439.
- [202] P. Chazette, J. Totems, L. Hespel, and J. S. Bailly, "Principle and Physics of the LiDAR Measurement," in *Optical Remote Sensing of Land Surface: Techniques and Methods*, 2016.
- [203] "Velodyne LiDAR PUCK," *Velodyne*. <https://www.amtechs.co.jp/product/VLP-16-Puck.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [204] "CX Series Multi-Channel 360 Degree LiDAR." <https://www.lidarsolutions.com.au/leishen-cx-lidar-sensors/> (Dostęp 19.06.2023).
- [205] "Hesai Technology Releases Pandar128: A 128-Channel, High-Performance Lidar for Autonomous Driving Applications," *Hesai*, 2020. <https://www.hesaitech.com/hesai-technology-releases-pandar128-a-128-channel-high-performance-lidar-for-autonomous-driving-applications/> (Dostęp 19.06.2023).
- [206] A. Davies, "Waymo's Self-Driving Jaguars Arrive With New, Homegrown Tech," *TRANSPORTATION*, 2020. <https://www.wired.com/story/waymos-self-driving-jaguars-arrive-new-homegrown-tech/> (Dostęp 19.06.2023).
- [207] B. Winter, H. Fürniss, and K. Röss, "LIDARVORRICHTUNG, FAHRASSISTENZSYSTEM UND FAHRZEUG," DE 11 2019 000 517 T5, 2020.
- [208] S. Royo and M. Ballesta-Garcia, "An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 19, 2019, doi: 10.3390/app9194093.
- [209] H. Holzhüter, J. Bödwadt, S. Bayesteh, A. Aschinger, and H. Blume, "Technical concepts of automotive LiDAR sensors: a review," *Opt. Eng.*, vol. 62, no. 03, 2023, doi: 10.1117/1.oe.62.3.031213.

- [210] “For LiDAR scanning solution Polygon Mirrors and Scanner Motors Vol.1,” *Nidec*. https://www.nidec-components.com/us/featuring/lidar-polygon/vs_galvo/ (Dostęp 19.06.2023).
- [211] “SCALA® 3D LASER SCANNER GEN 1,” *Valeo*. [https://autonomoustuff.com/-/media/Images/Hexagon/Hexagon Core/autonomoustuff/pdf/valeo-scala-datasheet-v14-whitelabel.ashx?la=en&hash=A37C80A52495AF83507309908CE79081](https://autonomoustuff.com/-/media/Images/Hexagon/Hexagon%20Core/autonomoustuff/pdf/valeo-scala-datasheet-v14-whitelabel.ashx?la=en&hash=A37C80A52495AF83507309908CE79081) (Dostęp 19.06.2023).
- [212] “Laser scanner,” *Audi MediaCenter*, 2017. <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/laser-scanner-52974> (Dostęp 19.06.2023).
- [213] “SCALA® 3D LASER SCANNER GEN 2,” *Valeo*. [https://autonomoustuff.com/-/media/Images/Hexagon/Hexagon Core/autonomoustuff/pdf/valeo-scala-gen-2-v17-datasheet-whitelabel.ashx?la=en&hash=3132D13FD3DF0446A785659CB0245F57](https://autonomoustuff.com/-/media/Images/Hexagon/Hexagon%20Core/autonomoustuff/pdf/valeo-scala-gen-2-v17-datasheet-whitelabel.ashx?la=en&hash=3132D13FD3DF0446A785659CB0245F57) (Dostęp 19.06.2023).
- [214] G. Helser, “MEMS mirrors vs polygon scanners for LIDAR in autonomous vehicles,” *Precision Laser Scanning*, 2017. <https://precisionlaserscanning.com/2017/12/mems-mirrors-vs-polygon-scanners-for-lidar-in-autonomous-vehicles/> (Dostęp 19.06.2023).
- [215] G. Raciukaitis, “Ultra-Short Pulse Lasers for Microfabrication: A Review,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, 2021, doi: 10.1109/JSTQE.2021.3097009.
- [216] A. Manakov, H. P. Seidel, and I. Ihrke, “A mathematical model and calibration procedure for galvanometric laser scanning systems,” in *VMV 2011 - Vision, Modeling and Visualization*, 2011, doi: 10.2312/PE/VMV/VMV11/207-214.
- [217] J. Domińska, “Skanery galwanometryczne w znakowaniu laserowym,” *MM magazyn przemysłowy*, 2018.
- [218] J. VanderWerf, S. Shladover, and M. A. Miller, “Conceptual Development and Performance Assessment for the Deployment Staging of Advanced Vehicle Control and Safety Systems,” *Calif. PATH Res. Rep.*, 2004, Dostępny online: <https://escholarship.org/uc/item/8hg3b55r>.
- [219] “Technical Development Electronics Parts,” *Toyota*. https://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/electronics_parts/index.html (Dostęp 19.06.2023).
- [220] T. Henriksson, “Driver Assistance Systems with focus on Automatic Emergency Brake,” KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [221] M. Sztandkie, “Usage of Infrared Camera in Active Safety Systems,” *Arch. Transp. Syst. Telemat.*, vol. 3, no. 4, 2010, Dostępny online: <https://bibliotekanauki.pl/articles/393295.pdf>.
- [222] P. R. Patterson, D. Hah, M. Fujino, W. Piyawattanametha, and M. C. Wu, “Scanning micromirrors: an overview,” in *Optomechatronic Micro/Nano Components, Devices, and Systems*, 2004, vol. 5604, doi: 10.1117/12.582849.
- [223] V. Milanović, A. Kasturi, J. Yang, and F. Hu, “Closed-loop control of gimbal-less MEMS mirrors for increased bandwidth in LiDAR applications,” in *Laser Radar Technology and Applications XXII*, 2017, vol. 10191, doi: 10.1117/12.2264069.
- [224] A.-J. Maurer, “Microscanner mirrors replace human vision,” *Fraunhofer Institute for Photonic*, 2021. <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/january-2021/microscanner-mirrors-replace-human-vision.html> (Dostęp 19.06.2023).

- [225] J. Pei, M. McCord, and J. Ye, "SCANNING LIDAR SYSTEMS FOR THREE - DIMENSIONAL SENSING," US20170307758A1, 2017.
- [226] K. Montalban, C. Reymann, D. Atchuthan, P. E. Dupouy, N. Riviere, and S. Lacroix, "A quantitative analysis of point clouds from automotive lidars exposed to artificial rain and fog," *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 6, 2021, doi: 10.3390/atmos12060738.
- [227] J. Ludwig, "New Sensors for New Mobility," 2019. <https://www.emove360.com/wp-content/uploads/2019/11/New-Sensors-for-New-Mobility-Notes.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [228] "Quanergy Delivers Industry-First 250 Meter Range for OPA-Based Solid State LiDAR," *Quanergy*, 2022. <https://quanergy.com/pressrel/quanergy-delivers-industry-first-250-meter-range-for-opa-based-solid-state-lidar/> (Dostęp 19.06.2023).
- [229] L. Eldada, "Solid State LiDAR for Ubiquitous 3D Sensing," *GPU Technol. Conf.*, 2016, Dostępny online: <https://on-demand.gputechconf.com/gtc/2016/presentation/s6726-louay-eldada-quanergy-systems.pdf>.
- [230] "Introducing the Digital Flash (DF) lidar series from Ouster Automotive," *Ouster*. <https://www.youtube.com/watch?v=HK5qTvDhuN4> (Dostęp 19.06.2023).
- [231] "Ultra-High Resolution FMCW LiDAR Insight 1600 and Insight 400." <https://insightlidar.com/wp-content/uploads/2021/12/Insight-1600-and-Insight-400.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [232] ETSI, *ETSI TS 133 185 V17.0.0.LTE; 5G; Security aspect for LTE support of Vehicle-to-Everything (V2X) services (3GPP TS 33.185 version 17.0.0 Release 17)*. .
- [233] ETSI, *ETSI TR 103 300-1 V2.3.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vulnerable Road Users (VRU) awareness; Part 1: Use Cases definition; Release 2*. .
- [234] "Introduction to the vehicle-to-everything communications service V2X feature in 3GPP release 13. White paper Version 01.00," *Rohde & Schwarz*. https://vertassets.blob.core.windows.net/download/c6aacc94/c6aacc94-b748-4984-8229-7a2d205d94f6/introductiontov2xfeaturein3gpprelease14_wp_en_3607_7970_52_v0100_120dpi1.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [235] "Coexistence of C-V2X and ITS-G5 at 5.9GHz," 2018. Dostępny online: <https://5gaa.org/content/uploads/2018/10/Position-Paper-ITG5.pdf>.
- [236] ETSI, *ETSI TR 103 439 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Multi-Channel Operation study; Release 2*. 2021.
- [237] A. K. Gulia, "A Simulation Study on the Performance Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X," KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2020.
- [238] R. F. Atallah, M. J. Khabbaz, and C. M. Assi, "Vehicular networking: A survey on spectrum access technologies and persisting challenges," *Vehicular Communications*, vol. 2, no. 3. 2015, doi: 10.1016/j.vehcom.2015.03.005.
- [239] SAE, "V2X Communications Message Set Dictionary - J2735," *SAE.org*, 2020. .
- [240] J. B. Kenney, "Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 7, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2132790.
- [241] ETSI, *ETSI EN 302 571 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS)*;

Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. 2017.

- [242] C. Suthaputchakun and Z. Sun, "Routing protocol in intervehicle communication systems: A survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 12. 2011, doi: 10.1109/MCOM.2011.6094020.
- [243] ETSI, *ETSI EN 302 663 V1.2.0 Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band.* 2012.
- [244] A. Festag, "Cooperative intelligent transport systems standards in Europe," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 12, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6979970.
- [245] IEEE Vehicular Technology Society, *IEEE Std 1609.4 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-channel Operation.* 2010.
- [246] ETSI, *ETSI TS 102 687 V1.2.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part.* 2018.
- [247] IEEE Computer Society, *IEEE Std 802-2001 (Revision of IEEE Std 802-1990), IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture*, no. February. 2002.
- [248] *J2945/1_202004 On-Board System Requirements for V2V Safety Communications.* .
- [249] ETSI, *ETSI EN 302 636-4-1 V1.4.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 4: Geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 1: Media-Independent Functionality.* 2019.
- [250] ETSI, *ETSI EN 302 636-5-1 V2.2.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol.* 2019.
- [251] ETSI, *ETSI EN 302 637-2 V1.4.1 CAM Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.* 2019.
- [252] ETSI, *ETSI EN 302 637-3 V1.3.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service.* 2019.
- [253] ETSI, *ETSI TR 103 562 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2.* 2019.
- [254] ETSI, *ETSI TS 103 300-3 V2.2.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vulnerable Road Users (VRU) awareness; Part 3: Specification of VRU awareness basic service; Release 2.* 2020.
- [255] ETSI, *ETSI EN 302 890-1 V1.2.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Facilities layer function; Part 1: Services Announcement (SA) specification.* 2019.
- [256] ETSI, *ETSI TS 103 724 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Facilities layer function; Interference Management Zone Message (IMZM); Release 2.* 2021.

- [257] ETSI, *ETSI TS 103 301 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services; Release 2*. 2021.
- [258] ETSI, *ETSI TS 123 285 V17.1.0 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements for V2X services (3GPP TS 23.285 version 17.1.0 Release 17)*. 2022.
- [259] Z. Wu, S. Bartoletti, V. Martinez, and A. Bazzi, "A Methodology for Abstracting the Physical Layer of Direct V2X Communications Technologies," *Sensors (Switzerland)*, vol. 22, no. 23, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22239330>.
- [260] L. Brooke, "'Level 2+': Making automated driving profitable, mainstream," *SAE International*, 2020. <https://www.sae.org/news/2020/12/rise-of-sae-level-2> (Dostęp 19.06.2023).
- [261] H. A. Urizar and T. Zubert, "Simulation Model for Ultrasonic Sensors," 2020. <https://www.dspace.com/en/pub/home/news/engineers-insights/sim-model-ultrasonic-sensors.cfm> (Dostęp 19.06.2023).
- [262] T. Michalsky, "Mobile Test System for Ultrasonic Sensor Technology in the Vehicle for Vehicle-in-the-Loop Applications," 2020. https://www.dspace.com/en/pub/home/news/engineers-insights/mobile_test_system.cfm (Dostęp 19.06.2023).
- [263] "KT Ultrasonic Sensor Target Simulator (KT USTS)." [https://www.konrad-technologies.com/files/konrad/media/datasheet/2021/KT_Ultrasonic_Sensor_Target_Simulator_\(KT_USTS\).pdf](https://www.konrad-technologies.com/files/konrad/media/datasheet/2021/KT_Ultrasonic_Sensor_Target_Simulator_(KT_USTS).pdf) (Dostęp 19.06.2023).
- [264] "M412 – Ultrasonic Sensor Interface," *IPG*. <https://ipg-automotive.com/en/products-solutions/hardware/xpack4/m412-ultrasonic-sensor-interface/> (Dostęp 19.06.2023).
- [265] S. Lee, W. Choi, and D. H. Lee, "Securing Ultrasonic Sensors against Signal Injection Attacks Based on a Mathematical Model," *IEEE Access*, vol. 7, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932843.
- [266] "iQ lab - Camera Test," *Image Engineering*. <https://www.image-engineering.de/services/test-laboratory-iq-lab/866-iq-lab-camera-test> (Dostęp 19.06.2023).
- [267] C. Galko, R. Rossi, and X. Savatier, "Vehicle-hardware-in-the-loop system for ADAS prototyping and validation," in *Proceedings - International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling and Simulation, SAMOS 2014*, 2014, doi: 10.1109/SAMOS.2014.6893229.
- [268] A. Albers and T. Düser, "Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform," *2101_Vils*, 2010, Dostępny online: https://www.kit-technology.de/fileadmin/138_vehicle-in-the-loop_paper_01.pdf.
- [269] F. Reway, W. Huber, and E. P. Ribeiro, "Test Methodology for Vision-Based ADAS Algorithms with an Automotive Camera-in-the-Loop," in *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES 2018*, 2018, doi: 10.1109/ICVES.2018.8519598.
- [270] F. Chucholowski, C. Gnadtt, C. Hepperle, and S. Hafner, "Close to reality surrounding model for virtual testing of autonomous driving and ADAS," in *Advanced Vehicle Control AVEC'16: Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16)*, 2017, doi: 10.1201/9781315265285-15.

- [271] M. Amoruso, S. Caiola, G. Doronzo, and M. Difino, "Altran and NI Demonstrate ADAS HIL With Sensor Fusion," 2023. <https://www.ni.com/en/solutions/transportation/adas-and-autonomous-driving-validation/altran-and-ni-demonstrate-adas-hil-with-sensor-fusion.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [272] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun, "CARLA An Open Urban Driving Simulator," in *1st Conference on Robot Learning (CoRL)*, 2017, Dostępny online: <https://arxiv.org/pdf/1711.03938.pdf>.
- [273] M. R. Zofka, R. Kohlhaas, T. Schamm, and J. M. Zollner, "Semivirtual simulations for the evaluation of vision-based ADAS," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 2014, doi: 10.1109/IVS.2014.6856593.
- [274] "AVL DRIVINGCUBE," *AVL*. <https://www.avl.com/en/testing-solutions/automated-and-connected-mobility-testing/avl-drivingcube> (Dostęp 19.06.2023).
- [275] "Sensor Validation Test," *KONRAD Technologies*. <https://www.konrad-technologies.com/en/expertise-and-innovation/technologies/adas-test-solutions/sensor-validation-test.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [276] T. Vaudrey, C. Rabe, R. Klette, and J. Milburn, "Differences between stereo and motion behaviour on synthetic and real-world stereo sequences," in *2008 23rd International Conference Image and Vision Computing New Zealand, IVCNZ*, 2008, doi: 10.1109/IVCNZ.2008.4762133.
- [277] J. A. Roberson *et al.*, "Energy Use and Power Levels in New Monitors and Personal Computers," *Environ. Prot.*, no. July, 2002, Dostępny online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/799557>.
- [278] "DP-21 Handheld Thermal Imaging Camera." <https://www.dyt-ir.com/dp-21-infrared-thermal-imaging-camera-product/> (Dostęp 19.06.2023).
- [279] "TEC Specification Sheet 00411-9G30-20CN," *Custom Thermoelectric*. https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEC_spec_sheets/00411-9G30-20CN_spec_sht.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [280] S. You, Y. Ji, S. Liu, C. Mei, X. Yao, and Y. Feng, "A Thermal Infrared Pedestrian-Detection Method for Edge Computing Devices," *Sensors*, vol. 22, no. 17, 2022, doi: 10.3390/s22176710.
- [281] "Kolimatory," *Inframet*. <https://www.inframet.pl/collimators.htm> (Dostęp 19.06.2023).
- [282] "Infrared (IR) Targets for Electro Optical Test Systems," *EISystems*. <https://www.ci-systems.com/ir-targets> (Dostęp 19.06.2023).
- [283] "Symulatory komputerowe," *Inframet*. https://www.inframet.pl/computer_simulators.htm (Dostęp 19.06.2023).
- [284] "Symulatory sprzętowe," *Inframet*. https://www.inframet.pl/target_simulators.htm (Dostęp 19.06.2023).
- [285] "Dynamic target simulator," *Inframet*. https://www.inframet.pl/Data_sheets/Simat.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [286] A. J. Woods, K. L. Yuen, and K. S. Karvinen, "Characterizing crosstalk in anaglyphic stereoscopic images on LCD monitors and plasma displays," *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 15, no. 11, 2007, doi: 10.1889/1.2812989.

- [287] M. Ozolinsh and K. Muizniece, “Color difference threshold of chromostereopsis induced by flat display emission,” *Front. Psychol.*, vol. 6, no. APR, 2015, doi: 10.3389/fpsyg.2015.00337.
- [288] N. Salamati, D. Larlus, G. Csurka, and S. Süsstrunk, “Incorporating Near-Infrared Information into Semantic Image Segmentation,” 2014, Dostępny online: <https://arxiv.org/pdf/1406.6147.pdf>.
- [289] Z. Wei *et al.*, “The design of infrared touch screen based on MCU,” in *2011 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2011*, 2011, doi: 10.1109/ICINFA.2011.5949041.
- [290] “Operational Manual. CM-IR130-850 Illuminator.” <https://cmvisiontech.com/E-manual/CM-IR130-850.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [291] “What’s the Difference Between SMD and DIP LEDs?,” *Dakco*, 2022. <https://www.dakco.cn/blog/279.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [292] D. Rebhan, P. G. Dittrich, M. Rosenberger, and G. Notni, “Radiometric extension of a measurement arrangement in accordance with the EMVA 1288 standard for camera characterization in UV to NIR wavelength range,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1379, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1379/1/012056.
- [293] “NIR (near-infrared) camera performance testing,” *Image Engineering*, 2022. <https://www.image-engineering.de/library/blog/articles/1173-nir-near-infrared-camera-performance-testing> (Dostęp 19.06.2023).
- [294] “How to Construct a GNSS Test Plan,” *Spirent*. https://www.spirent.com/assets/eb_how-to-construct-gnss-test-plan (Dostęp 19.06.2023).
- [295] L. Perdue, H. Sasaki, G. Boime, and E. Sicsik-Paré, “1.4 - Testing GNSS Receivers Robustness Against Spoofing attempts,” 2020, doi: 10.5162/etc2016/1.4.
- [296] “Choosing a GNSS Simulator,” *Spirent*. https://www.spirent.com/assets/eb_choosing-a-gnss-simulator (Dostęp 19.06.2023).
- [297] S. Geneder, F. Pfister, C. Wilhelm, and A. Arnold, “Development of Connected Powertrains at the Power Test Bed,” *ATZ Worldw.*, 2016, doi: 10.1007/s38311-014-0188-x.
- [298] I. Petrovski, T. Tsujii, J.-M. Perre, B. Townsend, and T. Ebinuma, “GNSS Simulation: A User’s Guide to The Galaxy,” *Inside GNSS*, 2010.
- [299] “What is a GNSS/GPS Simulator?,” *Spirent*. <https://www.spirent.com/solutions/what-is-a-gnss-gps-simulator> (Dostęp 19.06.2023).
- [300] IEEE Standards Board, *IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment , Instrumentation , Data Acquisition , and Analysis*, no. November. 2005.
- [301] IEEE, “IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers,” *IEEE Stand. 836-1991*, vol. 1991, 1992.
- [302] “EVO-30 Series. Three-axis rate positioning and rate tables,” *iXblue*. <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2022/03/evo-30-series-datasheet.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [303] A. Schiavi, F. Mazzoleni, and A. Germak, “SIMULTANEOUS 3-AXIS MEMS ACCELEROMETER PRIMARY CALIBRATION: DESCRIPTION OF THE TEST-RIG

- AND MEASUREMENTS,” in *XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry,”* 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.1049.4487.
- [304] “Permanent Magnet Shakers,” *DynaLabs*. <https://www.dynalabs.com.tr/pm-shakers/> (Dostęp 19.06.2023).
- [305] X. Dong *et al.*, “Calibration Method of Accelerometer Based on Rotation Principle Using Double Turntable Centrifuge,” *Micromachines*, vol. 13, no. 62, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/mi13010062>.
- [306] J. G. Zornberg, J. Friedrichsen, and E. Dell’Avanzi, “Performance of centrifuge data acquisition systems using wireless transmission,” *Geotech. Test. J.*, vol. 28, no. 2, 2005, doi: 10.1520/gtj12224.
- [307] “Centrifuges. CTR Series,” *iXblue*. <https://www.ixblue.com/industry/motion-simulation/centrifuges/> (Dostęp 19.06.2023).
- [308] M. Vorderderfler, M. Gadringer, W. Bösch, and E. Leitgeb, “Absorber Characterisation for Over-the-Air Radar Target Stimulation on Automotive Test Rigs,” in *EICE Information and Communication Technology Forum 2020*, 2020, Dostępny online: https://www.researchgate.net/publication/348548359_Absorber_Characterisation_for_Over-the-Air_Radar_Target_Stimulation_on_Automotive_Test_Rigs.
- [309] R. Kaempf and M. Solbach, “Radar Target Simulator and Testing in Validation and Production.” https://www.wks-informatik.de/wp-content/uploads/DocumentDownloads/August2017/Radar_Target_Simulator_and_Testing_in_Validation_and_Production.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [310] “VRTS Vehicle Radar Test System with 4 GHz of Bandwidth,” *National Instruments*, 2020. <https://www.ni.com/pdf/product-flyers/vrts.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [311] “VRTS Base System Specifications,” *National Instruments*, 2023. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/vrts-base-sys-specs/resource/377227e.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [312] “Radar Test Bench – Essential 2D,” *dSpace*. https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/test_benches/radar_test_benches/radar_test_bench_essential_2d.cfm#176_60478 (Dostęp 19.06.2023).
- [313] “Radar Test Bench – Advanced 6D,” *dSpace*. https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/test_benches/radar_test_benches/radar_test_bench_advanced_6d.cfm (Dostęp 19.06.2023).
- [314] “Radar Test Bench – Compact 3D,” *dSpace*. https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/test_benches/radar_test_benches/radar_test_bench.cfm (Dostęp 19.06.2023).
- [315] “RTS - DM (Radar Test System Digital Delay) Digital-Type Moving Target System Model No. RTS-DM-3,” *Keycom*. <https://www.keycom.co.jp/eproducts/rat/rat12/page.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [316] “R&S®AREG100A AUTOMOTIVE RADAR ECHO GENERATOR Product Brochure Version 03.01,” *Rohde & Schwarz*. https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/AREG100A_bro_en_3607-7057-12_v0301.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [317] “R&S®AREG800A AUTOMOTIVE RADAR ECHO GENERATOR Product Brochure | Version 03.00,” *Rohde & Schwarz*. <https://scdn.rohde->

- schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/3609_8015_12/AREG800A_bro_en_3609-8015-12_v0300.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [318] “E8707A Radar Target Simulator 76 GHz to 77 GHz,” *Keysight Technologies*. <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05310/brochures/5992-1648.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [319] T. Gomes *et al.*, “Evaluation and Testing System for Automotive LiDAR Sensors,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 24, 2022, doi: 10.3390/app122413003.
- [320] *DIN SAE SPEC 91471:2023-05 Assessment methodology for automotive LiDAR sensors*. 2023, p. 46.
- [321] “Hesai Acts as Group Leader for ISO Automotive Lidar Working Group,” *Hesai*, 2022. <https://www.hesaitech.com/hesai-acts-as-group-leader-for-iso-automotive-lidar-working-group/> (Dostęp 19.06.2023).
- [322] “Chinese Standard GB/T, GBT, GB.” <https://www.chinesestandard.net/> (Dostęp 19.06.2023).
- [323] C. Kwong, “Standaryzacja przyspiesza masową produkcję LiDAR w pojazdach,” *Shanghai Woosai Technology Co.*, 2022. <http://www.cataarc.org.cn/upload/202207/20/202207201857173400.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [324] “Budowa standardowego systemu technologii wykrywania inteligentnych pojazdów sieciowych,” *Krajowy Komitet Techniczny ds. Normalizacji Motoryzacyjnej*, 2022. <http://www.cataarc.org.cn/upload/202207/20/202207201856333586.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [325] “Hesai oraz Baidu wspólnie przejęło inicjatywę, a ponad 30 instytucji uczestniczyło we wspólnym formułowaniu chińskich standardów motoryzacyjnych lidar,” 2021. <https://www.smartautoclub.com/p/14645/> (Dostęp 19.06.2023).
- [326] “Certyfikat znaku CQC,” *China Quality Certification Centre*. <https://www.cqc.com.cn/www/chinese/c/2023-01-03/492573.shtml> (Dostęp 19.06.2023).
- [327] “ISO/TC 22/SC 32 Electrical and electronic components and general system aspects,” *ISO*. <https://www.iso.org/committee/5383636.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [328] “ISO/TC 22/SC 32/AHG 1 Test method for automotive LiDAR,” *DIN Standards Committee Road Vehicle Engineering*. <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/naautomobil/international-committees/wdc-grem:din21:352397554> (Dostęp 19.06.2023).
- [329] “IEEE P2936 Standard for Test Methods of Automotive Lidar Performance,” *IEEE SA Standard Association*. <https://sagroups.ieee.org/2936/> (Dostęp 19.06.2023).
- [330] R. H. Rasshofer, M. Spies, and H. Spies, “DE 10 2007 057 372 A1 Testsystem für Lidarsensoren,” 2009.
- [331] J. Werschnik, P. Thomas, and H. Häsel, “DE 10 2019 106 129 A1 Testeinheit und Verfahren zum Prüfen einer LIDAR-Einheit für ein Fahrzeug,” 2020.
- [332] “LIDAR TARGET SIMULATOR,” *KONRAD Technologies*. <https://dev.konrad-technologies.com/en/products/advanced-driver-assistance-systems-adas/lidar-target-simulator.html> (Dostęp 19.06.2023).

- [333] “LiDAR Test System Moving Target Type Model No. LTS03,” *Keycom*. <https://www.keycom.co.jp/eproducts/lts/lts03/page.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [334] “E8717A LIDAR Target Simulator – Distance, Reflectance, 3D Objects,” *Keysight Technologies*. <https://www.keysight.com/us/en/product/E8717A/lidar-target-simulator.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [335] G. Andriolo, “Hardware-in-the-Loop Simulation for V2X Use Cases,” Politecnico di Torino, 2019.
- [336] J. Wang and Y. Zhu, “A Hardware-in-the-Loop V2X Simulation Framework: CarTest,” *Sensors*, vol. 22, no. 13, 2022, doi: 10.3390/s22135019.
- [337] B. Mafakheri, P. Gonnella, B. M. Masini, and A. Bazzi, “CarLink: A Real-Time V2X Validation Platform for a Safe and Sustainable Mobility,” 2021, doi: 10.36227/techrxiv.16922827.
- [338] R. Rossi, C. Galko, H. Narasimman, and X. Savatier, “Vehicle hardware-in-the-loop system for ADAS virtual testing,” in *Towards a Common Software/Hardware Methodology for Future Advanced Driver Assistance Systems: The DESERVE Approach*, 2017.
- [339] X. Shen, D. Hu, Q. Zheng, C. Yin, Q. Yuan, and X. Zhang, “Hardware in-loop Test Platform for V2X Functioning Verification of Internet of Vehicles,” in *2022 International Conference on 6G Communications and IoT Technologies (6GloTT)*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/6GloTT57212.2022.00008>.
- [340] “Spirent V2X Virtual Test System,” *Spirent*. https://assets.ctfassets.net/wcxs9ap8i19s/7xR2bKAdIqVSofWVqHcfFd/69dc36d15043192f47acfd00598abad4/ds-v2x-virtual-test-system_RevA.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [341] “Satisfying Dongfeng Motor C-V2X HIL Subsystem Requirements and Enabling Autonomous Driving Assistance,” *Spirent*. https://assets.ctfassets.net/wcxs9ap8i19s/2OC37HF8qeksx0TSBDLkJ2/06190aba8da82d74fd42ee0fbff1edcc/Case_Study-Dongfeng_Motor_C-V2X_HIL_Subsystem.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [342] “Spirent V2X,” *Spirent*. https://www.toyo.co.jp/files/user/img/seminar/ict/spirent_NA/Final_Spirent_V2X_Solutions_TOKYO_2018.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [343] “Release Tests for Camera- and Radar-Based Applications Using Closed-Loop HIL System,” *dSpace*. https://www.dspace.com/en/inc/home/applicationfields/portfolio/driver_assistance_systems/hil_simulation/hil_testing_camera_and_radar.cfm (Dostęp 19.06.2023).
- [344] “Fusion Test System Model No. SRS-05,” *Keycom*. <https://www.keycom.co.jp/eproducts/srs/srs05/page.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [345] “Sensor Fusion Test,” *KONRAD Technologies*. <https://www.konrad-technologies.com/en/technologies/adas-test-solutions/sensor-fusion.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [346] “Over-the-Air Testing. Validating the function and performance of sensors and control units on a physical level,” *dSpace*. <https://www.dspace.com/en/inc/home/applicationfields/foo/over-the-air-testing.cfm> (Dostęp 19.06.2023).

- [347] "Vehicle Sensor Fusion HIL Test | Konrad Technologies," *KONRAD Technologies*. <https://www.youtube.com/watch?v=zDwzaceu4rI> (Dostęp 19.06.2023).
- [348] "ADAS TEST SOLUTIONS: Overview Technologies," *KONRAD Technologies*. <https://www.konrad-technologies.com/en/technologies/adas-test-solutions.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [349] J. Chang and Y. Liu, "Evaluation of hardware-in-the-loop framework for intelligent safety systems verification," CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2018.
- [350] "ASAM OpenDRIVE," *ASAM*. <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/> (Dostęp 19.06.2023).
- [351] S. J. Lee, K. Park, T. H. Hwang, J. H. Hwang, Y. C. Jung, and Y. J. Kim, "Development of hardware-in-the-loop simulation system as a testbench for esp unit," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 8, no. 2, 2007, Dostępny online: <https://www.ksae.org/func/download.php?path=L2hvbWUvdmlydHVhbC9rc2FIL2h0ZG9jcy91cGxvYWQvam91cm5hbC9QcmV2aWV3XzE1NjU3ODgwODNfMzgyOC5wZGY=&filename=UHJldmllld18xNTY1Nzg4MDgzXzM4MjgucGRm>.
- [352] C. J. Yeh, S. R. Ho, M. C. Lin, T. H. Hu, and T. H. Hsu, "Development of a test bench for tuning and validating electric power steering control method," in *VPPC 2007 - Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007*, doi: 10.1109/VPPC.2007.4544197.
- [353] "Przyczepność na hamowni jest krytyczna dla aut EV," *V-tech*. <https://vtechdino.pl/blog/przyczepnosc-na-hamowni-jest-krytyczna-dla-aut-ev.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [354] "Chassis dynamometer system," *Meiden Europe*. https://www.meidensha.com/meg/products/dynamometers/prod_01_01/prod_01_01_03/index.html (Dostęp 19.06.2023).
- [355] "AWD Automotive Chassis Dynamometer Model 424x," *DynoJet*. <https://www.dynojet.com/awd-automotive-chassis-dynamometer-model-424x/> (Dostęp 19.06.2023).
- [356] "Jak porównać hamownie podwoziowe dostępne na rynku?," *V-tech*. <https://vtechdino.pl/blog/jak-porownac-hamownie-podwoziowe-dostepne-na-ryнку.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [357] "Jak działa samochodowa hamownia podwoziowa," *V-tech*. <https://vtechdino.pl/jak-dziala-hamownia-podwoziowa.html> (Dostęp 19.06.2023).
- [358] "Water Brake Chassis Dynamometers (Hydraulic Dynamometers)," *Taylor Dynamometer*. <https://www.taylordyno.com/products/chassis-dynamometers/water-brake/> (Dostęp 19.06.2023).
- [359] "Eddy Current Chassis Dynamometers," *Taylor Dynamometer*. <https://www.taylordyno.com/products/chassis-dynamometers/eddy-current/> (Dostęp 19.06.2023).
- [360] "AC Chassis Dynamometers," *Taylor Dynamometer*. <https://www.taylordyno.com/products/chassis-dynamometers/ac-chassis/> (Dostęp 19.06.2023).
- [361] S. Cho *et al.*, "Design and analysis of the eddy current brake with the winding change," *J. Magn.*, vol. 22, no. 1, 2017, doi: 10.4283/JMAG.2017.22.1.023.

- [362] M. O. Gulbahce, "Neuromodel of an Eddy Current Brake for Load Emulation," *Energies*, vol. 16, no. 9, 2023, doi: 10.3390/en16093649.
- [363] K. Baszuk, M. Karczewski, and L. Szczęch, "Rozwiązanie konstrukcyjne hamowni podwoziowej małej platformy bezzałogowej," *Zesz. Nauk. Akad. Mar. Wojennej*, vol. 194, no. 3, 2015, doi: 10.5604/0860889x.1086922.
- [364] "AC Engine Dynamometers," *Taylor Dynamometer*. <https://www.taylordyno.com/products/engine-dynamometers/ac-engine/> (Dostęp 19.06.2023).
- [365] "Hamownia typu HUB DYNO," *LTS Laboratorium Techniki Samochodowej*. <https://labts.pl/hamownia/> (Dostęp 19.06.2023).
- [366] A. Diewald *et al.*, "Radar Target Simulation for Vehicle-in-the-Loop Testing," *Vehicles*, vol. 3, no. 2, 2021, doi: 10.3390/vehicles3020016.
- [367] "ROTOTEST Industrial Dynamometer Systems," *Rototest International AB*. https://www.vehiculedufutur.com/uploads/images/News-et-opportunités/PRIVTECH/Brochure_ROTOTEST.pdf (Dostęp 19.06.2023).
- [368] "AVL Powertrain TS," *AVL*. <https://www.avl.com/en/testing-solutions/icehybrid-propulsion-testing/powertrain-testing> (Dostęp 19.06.2023).
- [369] M. Förster, R. Hettel, C. Schyr, and P. E. Pfeffer, "Lateral dynamics on the vehicle test bed – a steering force module as a validation tool for autonomous driving functions," 2018.
- [370] "Hub-Mounted Chassis Dynamometer with Steering Operation Capability," *TOYO*. <https://toyotechus.com/wp-content/uploads/Rototest-Product-Brochure.pdf> (Dostęp 19.06.2023).
- [371] "Real Video Drive Player | Driving Simulator for Rototest," *TOYO*. <https://www.youtube.com/watch?v=4d37Un2xSHU> (Dostęp 19.06.2023).
- [372] "VEHICLE IN THE LOOP SIMULATOR," *TOYO*. https://toyotechus.com/automotive_measurement/vil-microsite/ (Dostęp 19.06.2023).
- [373] Y. Sun, P. He, Y. Zhang, and L. Chen, "Modeling and co-simulation of hydraulic power steering system," in *Proceedings - 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2011*, 2011, vol. 2, doi: 10.1109/ICMTMA.2011.435.
- [374] H. Jiang and H. Zhao, "Characteristics of electromagnetic clutch hydraulic power steering for heavy vehicles," in *Proceedings of 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, FPM 2015*, 2015, doi: 10.1109/FPM.2015.7337178.
- [375] M. Rosth, "Hydraulic Power Steering System Design in Road Vehicles. Analysis, Testing and Enhanced Functionality," Linköping University, 2007.
- [376] J. Hur, "Development of an electric motor-driven pump unit for electro-hydraulic power steering with 42V Power-Net," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 11, no. 4, 2010, doi: 10.1007/s12239-010-0071-8.
- [377] S. A. Mortazavizadeh, A. Ghaderi, M. Ebrahimi, and M. Hajian, "Recent Developments in the Vehicle Steer-by-Wire System," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 3, 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.3004694.

- [378] R. Zhu, L. Gao, and X. Li, "Research on the energy-saving potentiality of electro-hydraulic power steering system based on energy flow," in *CAR 2010 - 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2010, vol. 1, doi: 10.1109/CAR.2010.5456810.
- [379] S. R. V. R. G. Shriwastava, M. B. Diagavane, "Design Of A Permanent Magnet Synchronous Machine For The Electric Power Steering," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 1, no. 3, pp. 646–653, doi: 2248-9622.
- [380] R. O. Nemes, M. Ruba, S. Ciornei, H. Hedesiu, C. Martis, and C. Husar, "Real-Time Co-simulation of Electric Power Steering System," in *EPE 2018 - Proceedings of the 2018 10th International Conference and Expositions on Electrical And Power Engineering*, 2018, doi: 10.1109/ICEPE.2018.8559877.
- [381] W. Klier, G. Reimann, and W. Reinelt, "Concept and Functionality of the Active Front Steering System," *SAE Int.*, pp. 1–7, 2004.