



DZIEDZINA: Nauki inżynieryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

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

Praca doktorska ma na celu zbadanie możliwości stworzenia laboratoryjnego stanowiska testowego dla kompletnego, pełnowymiarowego samochodu w celu kompleksowego testowania funkcji jazdy autonomicznej poprzez zasymulowania świata zewnętrznego w laboratorium.

We wstępie omówiono systemy pasywnego i aktywnego bezpieczeństwa oraz zaawansowane systemy wsparcia kierowcy ADAS oraz ich wpływ na liczbę ofiar uczestniczących w wypadkach drogowych. Omówiono również poziomy automatyzacji jazdy wg SAE J3016 oraz podano przykłady osiągniętych poziomów przez obecnie masowo produkowane samochody. Na koniec zdefiniowano cel i zakres pracy oraz wymagania dla stanowiska testowego.

Wg SAE J3016 istnieje 6 poziomów automatyzacji jazdy od 0 do 5, natomiast obecnie masowo produkowane samochody maksymalnie uzyskują poziom 3. Na maj 2023 roku są to jedynie Honda Legend oraz Mercedes Benz Klasy S. Natomiast większość producentów opanowała swoją technologię na poziomie 2 w tym również Autopilot Tesli. Poziom automatyzacji jazdy tzw. 2+ (dwa plus) nie jest zdefiniowany przez powyższą normę i został sztucznie stworzony przez producentów samochodów jako pewien „chwyt marketingowy” dla samochodów, które nie są w stanie osiągnąć poziomu 3, a które z łatwością osiągają poziom 2.

Następnie przeprowadzono gruntowny, systematyczny przegląd czujników i systemów samochodu w celu zidentyfikowania, które z nich i w jakim stopniu biorą udział w automatyzacji jazdy. Zostały przeanalizowane czujniki ultradźwiękowe, nawigacja satelitarna GNSS, inercyjna jednostka pomiarowa IMU, odometria, mapy wysokiej definicji, kamery (bliskiej podczerwieni, termowizyjne, stereo, czasu przelotu, światła strukturalnego), radary (bliskiego, średniego, dalekiego zasięgu), lidary (mechaniczne i półprzewodnikowe) oraz komunikacja V2X (DSRC, ITS-G5) oraz C-V2X. Dodatkowo określono, które faktycznie są obecnie wykorzystywane w samochodach masowej produkcji, a które już nie są dłużej stosowane. Zostały przeanalizowane zasady działania oraz zjawiska fizyczne wykorzystywane przez te systemy w celu późniejszego zaproponowania odpowiednich technologii stymulujących.

Czujniki ultradźwiękowe są wykorzystywane do monitorowania najbliższego otoczenia pojazdu i są głównymi czujnikami biorącymi udział w zautomatyzowanych manewrach parkowania. Aby pokryć szerokie pole widzenia samochody o wysokiej automatyzacji jazdy są wyposażone w dodatkowe czujniki ultradźwiękowe. Dla przykładu samochody segmentu D lub E mają sumarycznie nawet do 12 czujników ultradźwiękowych. Czujniki wykorzystują falę dźwiękową w paśmie od 40 kHz do 60 kHz i pomiar bezpośredniego czasu przelotu.

Do określania pozycji głównym systemem jest nawigacja satelitarna wraz z mapami wysokiej definicji. Systemy takie jak IMU oraz odometria są również wykorzystywane, natomiast są jedynie systemami wspomagającymi. Potwierdzeniem olbrzymiego wpływu tych technologii na automatyzację jazdy jest system Super Cruise firmy General Motors, który pomimo braku lidar, osiągnął poziom 2+ automatyzacji jazdy.

Systemy wizyjne są podstawowym systemem percepcyjnym otaczającego świata i służą głównie do klasyfikacji obiektów. Najczęściej są wykorzystywane kamery światła widzialnego w układzie pojedynczym lub podwójnym (stereo), dzięki czemu są w stanie zgrubnie określać odległość do obiektu. Kamery wykorzystujące czas przelotu (kamery ToF) oraz światło strukturalne obecnie nie są używane do monitorowania otoczenia samochodu, natomiast są często wykorzystywane do monitorowania jego wnętrza. Dotyczy to zarówno kamer światła widzialnego, jak i bliskiej podczerwieni.

Pasywne i aktywne kamery bliskiej podczerwieni obecnie już praktycznie nie są stosowane do monitorowania otoczenia, pomimo iż w zeszłych latach były wykorzystywane do tego celu. Zostały one zastąpione przez inne technologie. Jedną z nich jest termowizja, która jest obecnie wykorzystywana do wykrywania istot żywych (ludzi i zwierząt) szczególnie w nocy, gdzie zasięg widoczności kierowcy jest ograniczony. Niemniej kamery termowizyjne są dość kosztowne, dlatego tylko najwyższe modele samochodów są w nie wyposażane.

Radary są kolejnym bardzo ważnym systemem biorącym udział w automatyzacji jazdy. Głównie są wykorzystywane do określania prędkości obiektów oraz ich położenia kąтового i odległości. Wykorzystują falę elektromagnetyczną w paśmie mikrofalowym obecnie z częstotliwościami od 76 do 81 GHz, modulację częstotliwościową FMCW oraz pośredni czas przelotu – pomiar fazy. Częstotliwość 24 GHz została wycofana z użytku ze względu na regulacje prawne.

W przypadku lidarów analiza wykazała, że jest to nadal nowa technologia, dość kosztowna, która ciągle dynamicznie się rozwija i często jest ciągle w fazie badań i rozwoju. Z tego powodu tylko pojedyncze najwyższe modele masowo produkowanych samochodów są wyposażone w tę technologię. Niemniej lidar dostarcza prawdopodobnie najwięcej informacji o otoczeniu samochodu, gdyż posiada szerokie pole widzenia (nawet 360°) oraz jest w stanie najprecyzyjniej określić pozycję (kątem i odległość) wielu obiektów na raz. Występuje dużo typów lidarów, które różnią się wykorzystywanymi długościami światła (905 nm lub 1550 nm), mechanizmami skanowania, polem widzenia czy zasięgiem działania. Również mogą być budowane jako lidary mechaniczne, które wykorzystują ruchome elementy jak również całkowicie elektronicznie tzw. lidary półprzewodnikowe. Obecnie masowo produkowane samochody wykorzystują głównie lidar z obrotowym lustrem. Ten typ lidarów firmy Valeo o nazwie Scala przykładowo wykorzystuje Audi A8, Honda Legend czy Mercedes-Benz Klasy S.

Ostatnią technologią jest V2X, który jest technologią przyszłościową zgodną z zasadą internetu rzeczy, ale obecnie rzadko stosowaną w praktyce. 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. Z tego powodu dwa samochody wyposażone w system V2X w praktyce nie są zdolne do komunikacji pomiędzy sobą. Sprawę dodatkowo pogarsza komórkowy V2X (C-V2X) działający w oparciu o standardy telefonii komórkowej, który nie jest kompatybilny ani z DSRC, ani z ITS-G5.

W kolejnym kroku 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 (ang. Hardware-in-the-Loop). W przypadku braku tego typu urządzeń zostały przeanalizowane obecnie wykorzystywane metody i techniki 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 np. dla kamer bliskiej podczerwieni i kamer termowizyjnych.

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, nawigacja satelitarna czy czujniki ultradźwiękowe. Zjawiska fizyczne stojące za tymi systemami są dobrze rozpoznane, a na rynku istnieją zrealizowane projekty 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.

Jednym z największych napotkanych problemów jest stymulacja kamer termowizyjnych. W większości przypadków są one testowane w oparciu o ustandaryzowane statyczne cele, co kompletnie nie nadaje się do użycia w testach samochodu. Pocięającym 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 standardowego 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.

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 w stanie przetestować IMU 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. Jedyną 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 jeśliby ktoś się na to jednak 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 stymulować 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 zautomatyzowanej. 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.

Następnie przeanalizowano dostępne komercyjne stanowiska testowe typu HIL 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.

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 hamownie lub wykorzystać czujniki samochodu. Pomiary wykonywane przez czujniki samochodu można albo odczytać wpinając się w odpowiednią magistralę samochodową lub poprzez złącze diagnostyczne.

Rozpoczynając pracę nad doktoratem w 2018 roku jedynie stanowisko do testowania pojedynczej kamery było dostępne, natomiast w tamtym czasie trwały prace badawczo-rozwojowe nad stworzenie symulatora dla radaru. Obecnie po 5 latach to stanowisko zostało rozwinięte o symulator radaru oraz symulator nawigacji satelitarnej oraz wyposażone w emulator dynamicznej siły kierowania w celu umożliwienia skręcania kierownicą podczas wykonywania testów na hamowni i generowania sił działających na przekładnię kierowniczą. Obecnie oprócz wspomnianego stanowiska o nazwie DrivingCube firmy AVL istnieje kilka zrealizowanych projektów badawczych natomiast w o wiele mniejszym zakresie. Najczęściej są to systemy wykorzystujące stymulujące jeden, dwa lub maksymalnie trzy systemy jednocześnie. Z tego powodu tego typu stanowiska służą jedynie do weryfikacji pojedynczych systemów ADAS np. utrzymywania pasa ruchu, a nie do testów jazdy autonomicznej. Dodatkowo większość

nie przewyciężyło problemu braku możliwości skręcania kołami podczas wykonywania testu, co jest obchodzone poprzez odłączanie kół od przekładni kierowniczej. Niemniej 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, ale bardzo rzadko są wykorzystywane. Dzięki temu nie ma potrzeby ingerowania w konstrukcję samochodu, a hamownia jest w stanie zapewnić wierne odwzorowanie oporów ruchu.

W przypadku chęci zrealizowania stanowiska testowego do testów jazdy autonomicznej i 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 testach HIL tak, aby były one w stanie bezawaryjnie pracować, nie zakłócając i nie przeszkadzając sobie nawzajem. To pozwoliłoby na przetestowanie najważniejszych i najczęściej wykorzystywanych czujników i systemów. 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.

W celu udowodnienia tezy brzmiącej *Możliwe jest zbudowanie laboratoryjnego stanowiska testowego dla kompletnego samochodu, przeznaczonego do testowania głównych systemów jazdy autonomicznej* oraz jako dowód koncepcji (ang. proof of concept) przedstawiono autorskie rozwiązanie, w ramach którego, w oparciu o wirtualne jazdy testowe, zaprojektowano, stworzono i zweryfikowano pierwsze tego typu stanowisko działające w pętli zamkniętej do weryfikacji czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire.

Rozpoczynając doktorat celem było zrealizowanie dla kompletnego samochodu stanowiska wykorzystującego hamownię dynamometryczną, natomiast ze względów finansowych zakres prac musiał zostać ograniczony. Kompletnie stanowisko testowe wiązałoby się z inwestycją wielu milionów złotych dlatego zdecydowano się na pewne ograniczenia. Większość wykorzystanych elementów składowych stanowiska zostało bezpłatnie udostępnionych przez firmę Merit Poland, która jest w posiadaniu odpowiednich licencji i sprzętu. Z tego powodu wybrano dostępne oprogramowanie CANoe, sprzęt VTSsystem oraz hybrydowy sinik krokowy ze sterownikiem. Również Merit Poland jest producentem czujników do pomiaru kąta i prędkości ątovej i z tego powodu do testów został wybrany do testów. Jedyłą licencją nie będącą w posiadaniu firmy Merit była licencja do wirtualnych jazd testowych CarMaker, która przez producenta bezpłatnie została udostępniona na czas realizacji doktoratu.

Za pomocą zbudowanego stanowiska w pierwszej części przetestowano i porównano trzy komercyjne czujniki kąta kierownicy o różnych parametrach podczas wirtualnego przejazdu testowego, w celu zbadania wpływu tych parametrów na trajektorię samochodu wyposażonego w system Steer-by-Wire (SbW).

Podczas wirtualnego przejazdu testowego samochód wykonywał slalom pomiędzy 10 pachołkami rozłożonymi co 18 metrów, na całkowitym dystansie wynoszącym 230 metrów. Spośród różnych dostępnych manewrów, slalom został wybrany, gdyż podczas jego wykonywania, kierownica jest skręcana w szerokim zakresie kątów i prędkości kątowych oraz w obu kierunkach. Slalom w porównaniu do testu podwójnej zmiany pasa ruchu (ISO 3888-1) czy testu omijania przeszkody / testu łośia (ISO 3888-2) nie jest ustandaryzowany w normach międzynarodowych, europejskich czy amerykańskich. Istnieje jedynie wewnętrzny standard testowy General Motors, który definiuje odległości pomiędzy pachołkami na poziomie 23 m. Wybrana odległość pomiędzy pachołkami wynosząca 18 metrów została zdefiniowana na podstawie przeglądu istniejących publikacji w tym temacie, gdzie pachołki były rozstawione od 17 m do maksymalnie 30 m. Mniejsza odległość została wybrana, gdyż jest ona bardziej wymagająca dla samochodu (kierownica jest skręcana o większy kąt podczas omijania pachołka). Samochodem, który wykonywał przejazd, był model samochodu Volkswagen Beetle z domyślnymi parametrami kinematycznymi 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.

Badania pokazały jak wartości metrologiczne czujnika (dokładność i rozdzielczość pomiaru kąta i prędkości kątowej) wpływają na trajektorię samochodu wyposażonego w system SbW i liczbę strąconych pachołków podczas wykonywania slalomu. Wyniki ujawniły, że dwa z trzech badanych czujników mogłyby być użyte w technologii SbW, gdyż podczas slalomu samochód testowy nie przewrócił żadnego pachołka i ukończył przejazd w najkrótszym możliwym czasie podążając optymalną trajektorią. Natomiast poziom błędów generowanych przez trzeci czujnik nie pozwolił samochodowi ukończyć bezbłędnie przejazdu, gdyż spowodował przewrócenie jednego pachołka. Z tego powodu czujnik ten nie mógłby być wykorzystywany w systemie SbW, gdyż może powodować zagrożenie dla kierowcy i innych uczestników ruchu drogowego.

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

Ponadto wykazano, że parametry osiągane przez czujniki odbiegają od parametrów deklarowanych przez producenta. Pomimo że dwa z testowanych czujników według producenta charakteryzują się taką samą dokładnością i rozdzielczością wynoszącą $0,5^\circ$, w rzeczywistości jeden z nich osiągnął dwa razy gorsze wyniki. Raportowany przez niego kąt 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° . Można przypuszczać, że rzeczywista dokładność czujnika wynosiła znacznie mniej niż dokładność określona w specyfikacji technicznej.

Oprócz przebadania trzech komercyjnych czujników kąta kierownicy dodatkowo symulacyjnie w szerszym zakresie zbadano wpływ dokładności/rozdzielczości oraz okresu wysyłania danych (kąta/prędkości kątowej) na trajektorię samochodu z układem kierowniczym typu SbW uzyskując zaskakujące wyniki, które po głębszej analizie okazały się jak najbardziej prawdziwe. Do tego celu zostało nieznacznie zmodyfikowane stanowisko testowe, gdzie główną zmianą było usunięcie silnika krokowego wraz ze sterownikiem.

Przeprowadzone symulacje wykazały, że dokładność czujnika większa niż 2° ma znikomy wpływ na trajektorię samochodu i może być używana w technologii SbW. Wynika to z faktu, że pojedyncze stopnie czy nawet ułamki stopni w stosunku do pełnego zakresu skrętu kierownicy, który wynosi około 1000° to zaledwie rząd $0,1\%$ i mniej. Dodatkowo kąt skręcenia kierownicy ma znacznie mniejsze przełożenie na skręt kół samochodu, których zakres pracy to około 50° .

Stanowisko to zostało wdrożone w firmie Merit Poland, co pozwoliło na rozwinięcie i ulepszenie przez firmę Merit czujnika kąta kierownicy i potwierdzenie, że osiągane przez niego parametry są w pełni wystarczające zarówno dla systemów wspomagania kierownicy, 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.

Natomiast okres wysyłania danych 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 skręcenia kierownicy, kierowca na bieżąco starał się korygować ten

kąt, co jeszcze bardziej 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.

Oprócz stanowiska testowego do czujników kąta kierownicy, podjęto także próbę budowy stanowiska do technologii V2X bazującej na standardzie 802.11p. 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. 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.

Oprócz charakteru wdrożeniowego praca ma również aspekt naukowy. Przeprowadzono bardzo wyczerpujące badania źródłowe, zaopatrując pracę w imponującą bibliografię liczącą 381 pozycji uwzględniającą nie tylko publikacje naukowe, ale również książki akademickie i popularnonaukowe, prace inżynierskie, magisterskie i doktorskie, patenty i normy, materiały udostępniane przez producentów samochodów i poddostawców oraz wiarygodne źródła dostępne w internecie, które były wielokrotnie i rzetelnie weryfikowane przez doktoranta.

O aspekcie naukowym również świadczy opublikowanie trzech artykułów w recenzowanych czasopiśmie. Dwa z nich w wysoko punktowanych czasopiśmie IEEE Access oraz Metrology and Measurement Systems z listy MEiN (100 pkt.), natomiast trzeci jest często czytany na platformie ResearchGate (ponad 1.5 tys. wyświetleń na koniec 2023 roku).