

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

## **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 wiernie 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 stymulatorów.

Zidentyfikowano najważniejsze składowe laboratoryjnego 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.

Kraków 26.06.2023

Michał Pietruch

# *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*

## **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.

Kraków 26.06.2023

Michał Pietruch