



Dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz  
Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 15-09-2023 r.

**SEKRETARIAT**  
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ..... 20. 09. 2023 .....

Zarejestrowano pod nr .....

Podpis ..... dm

## RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Pietrucha pt. „Testowanie wybranych funkcji jazdy autonomicznej samochodu w warunkach laboratoryjnych na przykładzie stanowiska dla czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire”**

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

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

Recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, która na posiedzeniu w dniu 6 lipca 2023 roku powołała mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej, na podstawie pisma z dnia 6 lipca 2023 roku od Przewodniczącego dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH.

### 1. Wybór tematu, cel, teza i zakres rozprawy

Temat doktoratu wdrożeniowego wydaje się być bardzo zasadny i istotny w kontekście rozwoju technologii autonomicznych pojazdów oraz ich bezpieczeństwa. Oto kilka powodów, dlaczego ten temat jest ważny:

- **Bezpieczeństwo na drodze:** Autonomiczne pojazdy stanowią przyszłość motoryzacji i mają potencjał znacznego poprawienia bezpieczeństwa na drodze poprzez eliminację błędów ludzkich. Testowanie funkcji autonomicznych pojazdów w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych pozwala na dokładne i bezpieczne identyfikowanie potencjalnych problemów.
- **Steer-by-Wire jako kluczowa technologia:** System Steer-by-Wire, który umożliwia sterowanie kierownicą za pomocą elektronicznych sygnałów, jest kluczowym elementem w autonomicznych pojazdach. Badanie tego systemu pod kątem jego niezawodności i dokładności jest niezbędne do zapewnienia bezpiecznej jazdy.



- Testy w kontrolowanych warunkach: Laboratoria pozwalają na symulowanie różnych warunków drogowych i sytuacji awaryjnych, które mogą być trudne do odtworzenia na drodze. To umożliwia przetestowanie zachowania autonomicznego pojazdu w różnych scenariuszach, w tym tych ekstremalnych.
- Optymalizacja algorytmów: Testowanie w warunkach laboratoryjnych pozwala również na optymalizację algorytmów sterowania autonomicznego pojazdu. Można eksperymentować z różnymi strategiami i scenariuszami, aby poprawić wydajność i bezpieczeństwo.
- Redukcja ryzyka: Badania w laboratorium pozwalają na identyfikację potencjalnych problemów i zagrożeń, co pozwala na ich rozwiązanie przed wdrożeniem w autonomicznych pojazdach. To z kolei pomaga w minimalizacji ryzyka wypadków i incydentów związanych z autonomicznymi pojazdami.
- Rozwój technologii: Badania laboratoryjne pomagają w ciągłym rozwoju technologii autonomicznych pojazdów. Pozwalają one na testowanie nowych rozwiązań i innowacji, które mogą przyspieszyć wprowadzenie autonomicznych pojazdów na rynku.

Podsumowując, temat "Testowanie wybranych funkcji jazdy autonomicznej samochodu w warunkach laboratoryjnych na przykładzie stanowiska dla czujnika kąta kierownicy w systemie Steer-by-Wire" ma ogromne znaczenie dla rozwoju autonomicznych pojazdów i zapewnienia ich bezpieczeństwa. Badania laboratoryjne pozwalają na dokładne testowanie i optymalizację kluczowych komponentów, co jest niezbędne przed wprowadzeniem tych pojazdów na drogi publiczne.

Praca doktorska porusza problem ograniczonej możliwości testów i walidacji funkcji automatyzacji jazdy kompletnego samochodu na torach testowych i w ruchu drogowym. Walidacja tego typu, oprócz olbrzymiej zalety, jaką jest testowanie w docelowym środowisku, nie jest w stanie zapewnić wszystkich wymaganych przypadków testowych. Nie ma też możliwości odtworzenia identycznych warunków testowych w celu np. potwierdzenia, że błędy zostały naprawione. Dodatkowo, ze względu na ryzyko spowodowania wypadku, coraz więcej państw ogranicza lub całkiem zabrania testowania samochodów o wysokiej 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 laboratorium w taki sposób, aby samochód miał wrażenie jazdy w rzeczywistych warunkach.

Z danych zebranych przez Amerykański urząd ds. bezpieczeństwa ruchu drogowego NHTSA (ang. National Highway Traffic Safety Administration) wynika, że aż 94% wypadków jest spowodowanych z winy kierowcy. Z tego powodu etapem redukcji wypadków jest ograniczenie lub wyeliminowanie kierowcy z prowadzenia samochodu. Ze względu na





powodowane wypadki coraz więcej państw ogranicza lub całkiem zabrania testowania samochodów autonomicznych w ruchu drogowym.

Pierwszym samochodem, który oficjalnie osiągnął trzeci poziom to Honda Legend w 2021 roku. Uzyskała ona certyfikację poziomu trzeciego dla automatyzacji jazdy w korku na terenie Japonii przez tamtejsze Ministerstwo Transportu. W 2022 roku kolejnym samochodem został Mercedes-Benz Klasy S, z systemem Drive Pilot spełniając normy prawne UN R157 uzyskał homologację dla automatyzacji jazdy na autostradzie w Niemczech oraz w USA. Pomimo że inne samochody jak np. Audi A8 już w 2017 roku teoretycznie posiadały systemy automatyzacji jazdy na poziomie trzecim, to ze względów prawno-biznesowych grupa Volkswagen do dziś nie zdecydowała się na jego certyfikowanie. Automatyzacja jazdy bardzo dynamicznie się rozwija i kolejni producenci samochodów planują wyposażać swoje najwyższe modele samochodów w elektronikę i oprogramowanie pozwalające uzyskać poziom trzeci i wyżej. Celem recenzowanego doktoratu wdrożeniowego jest zbadanie możliwości zbudowania 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. Doktorant sformułował następującą tezę: *Możliwe jest zbudowanie stanowiska testowego dla kompletnego samochodu, przeznaczonego do testowania głównych systemów jazdy autonomicznej.*

Praca zawiera 8 rozdziałów. W rozdziale 1 zawarto wstęp a w rozdziale 2 cel i zakres pracy. 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. W rozdziale 4 w celu zidentyfikowania urządzeń do bezprzewodowej stymulacji oraz zidentyfikowania ewentualnej luki technologicznej przeprowadzono przegląd oraz 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 tym temacie. Bazując na wykonanej analizie zaproponowano pomysły ulepszenia i/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 wiedzy, 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 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, zbudowano i zweryfikowano pierwsze tego typu stanowisko testowe działające w pętli zamkniętej do weryfikacji czujnika kąta kierownicy działającego w systemie Steer-by-Wire. Rozwiązanie to zostało wdrożone w firmie Merit Poland i w oparciu o nie zostały opublikowane dwa artykuły naukowe.

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

Rozdział 8 to bibliografia zawierająca 381 pozycji w tym 3 autorstwa Doktoranta i Promotorów. Wszystkie 381 pozycji zostało zacytowane w pracy.

## 2. Uwagi do rozprawy

- Czytając pracę wydaje mi się, że punkt 2 powinien być przeglądem istniejących rozwiązań, z którego to wynika punkt 3 a mianowicie cel zakres i teza pracy.
- Praca zawiera 158 stron bez bibliografii. W moim odczuciu około 120 stron to przegląd i ogólnie dostępna wiedza, która została dobrze przedstawiona i usystematyzowana, a około 38 stron to wkład autora. W moim odczuciu proporcja ta powinna być odwrócona.
- Podrozdział 5.2.5 Przegląd istniejących laboratoryjnych stanowisk to tylko pół strony i akurat tutaj powinno być więcej.
- W tezie pracy użyto: Możliwe jest zbudowanie... natomiast w pracy użyto x-razy słowa stworzono uważam, że poprawniej było by używać tego samego określenia np. zbudowano lub zaprojektowano.
- Praca napisana jest starannie jednak wkradły się błędy edytorskie, są to:
  - Strona 18 literówka (brak w);
  - Strona 21 literówka (a – a);
  - Strona 25 literówka (a – e);
  - Strona 30 literówka (a – a);



- Strona 37 Rys. 13 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 39 Rys. 16 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 40 Rys. 17 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 47 Rys. 25 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 50 Rys. 28 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 50 literówka (do);
- Strona 53 złe odwołanie do wzoru (17);
- Strona 61 literówka (i – ę);
- Strona 67 Rys. 47 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 80 Rys. 58 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 92 literówka (usunąć c);
- Strona 98 sens: *Tarcza obrotowa jest to okrągła tarcza*;
- Strona 106 Rys. 80 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 106 literówka (brak ę);
- Strona 113 literówka (zamiana to - do);
- Strona 113 literówka (usunąć jest);
- Strona 114 Rys. 88 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 115 Rys. 89 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 117 sens zdania (*To powoduje, że ten typ stymulatora może być ciężko użyć do testów pojazdu w pętli*);
- Strona 119 literówka (ze - z);
- Strona 122 Rys. 91 opis powinien być przetłumaczony na język polski;
- Strona 126 EGO pisane dużymi literami a poniżej małymi ego;
- Strona 128 literówka (niewystarczające);
- Strona 128 literówka (Drive-By-Wire czy Drive-by-Wire);
- Strona 128 użyto dwa razy słowa wspomaganie w zdaniu;
- Strona 131 sformułowanie „w tym projekcie”?
- Strona 135 literówka (*charakteryzuje się z dokładnością*);
- Strona 140 literówka (*konieczne stało określenie ich wpływu*) brak – się;
- Strona 143 powtórzenie: *Najczęściej spotykaną dokładnością jest dokładność 0.5°*;
- Strona 148 cytując: *poziom błędów SAS II jest dwukrotnie większy niż SAS I* (na pewno? Powinno być dwukrotnie mniejszy?);
- Strona 153 i 156 literówka (Steer-By-Wire czy Steer-by-Wire);
- Strona 157 stwierdzenie: (*na dziś*) może lepiej użyć obecnie;





### 3. Metodyka badań i analiza wyników

Z treści dysertacji można stwierdzić że niewiele jest prac naukowych z zakresu testowania autonomii pojazdów w trybie laboratoryjnym. Doktorant zaproponował autorskie rozwiązanie takiego stanowiska stosując nowoczesne narzędzia wirtualnej jazdy testowej zrealizowane w oprogramowaniu CarMaker oraz CANoe. Dla zaproponowanego autorskiego rozwiązania Doktorant wyznaczył błędy, ocenił stabilności, wydajności i przydatności do testów. Przetestował i porównał trzy komercyjne czujniki kąta kierownicy podczas wirtualnego przejazdu testowego i określił ich wydajność w technologii Steer-by-Wire. Określił również błędy czujników oraz spójność względem parametrów deklarowanych przez producenta i zbadał wpływ dokładności czujnika i okresu wysyłania danych magistralą CAN na trajektorię samochodu wyposażonego w technologię Steer-by-Wire.

Stwierdził, że 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 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.

Doktorant nakreśla też kierunki dalszych prac między innymi o tym, że należałoby się skupić na rozwinięciu brakujących technologii stymulacji dla termowizji, kamer bliskiej podczerwieni, IMU oraz ulepszeniu hamowni dynamometrycznej pod kątem dynamiczniejszego skręcania kół.

Należy podkreślić poprawność badań w poszukiwaniu rozwiązania postawionego celu. Autor umiejętnie zastosował narzędzia wirtualnej jazdy w badaniach doświadczalnych. Analiza wyników została przeprowadzona w sposób właściwy, świadcząc o poprawnym zasobie wiedzy i inwencji Autora.

Należy, więc z całą odpowiedzialnością stwierdzić, że zagadnienie naukowe związane z doktoratem wdrożeniowym zawarte w celu i tezie rozprawy zostało prawidłowo zrealizowane i udowodnione.

Oдноśnie pytań do pracy to:

- Co z symulowaniem zakłóceń typu warunki atmosferyczne takie jak: woda, śnieg, oblodzenie, podmuchy boczne, mróz itp.?
- Jakie są główne wyzwania związane z przekładaniem wyników testów laboratoryjnych na rzeczywiste warunki na drodze publicznej?
- Czy możliwe jest skręcenie kół podczas stymulowania oporów ruchu łącząc je z hamownią dynamometryczną np. poprzez przeguby kulowe?



#### 4. Ocena końcowa

Opiniowana rozprawa doktorska realizowana w ramach doktoratu wdrożeniowego mgr inż. Michała Pietrucha zawiera wartościowe wyniki badań. Świadczy to o tym, że Doktorant posiada odpowiedni zakres wiadomości w Dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, umie poprawnie postawić zagadnienie naukowe, rozwiązać je, wyniki zanalizować i wyciągnąć poprawne wnioski. Zna On też współczesną literaturę związaną z rozważanym zagadnieniem. Jego wywody są jasne i poprawne a wyniki rozprawy mogą być pożyteczne dla pracowników naukowych jak i projektantów i konstruktorów autonomicznych samochodów.

Wdrożeniowy charakter rozprawy w postaci przygotowania zaawansowanego stanowiska do testów pozwolił na rozwijanie przez firmę Merit czujnika kąta kierownicy i potwierdzenie, że osiągnęte przez niego parametry są w pełni wystarczające zarówno dla systemów bezpieczeństwa jazdy jak i systemu Steer-by-Wire.

Biorąc pod uwagę całość rozprawy stwierdzam, że Autor zaproponował ciekawe rozwiązanie laboratoryjne podczas testowania wybranych funkcji autonomicznych samochodu. Zastosowane metody i wyniki badań są oryginalnym i nowatorskim osiągnięciem Doktoranta. Recenzowana praca spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz. 742).

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta mgr inż. Michała Pietrucha do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Krzysztof Kurc

