

Szczecin, 07.12.2023

dr hab. inż. Jacek Piskorowski, prof. ZUT  
Katedra Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki  
Wydział Elektryczny  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

**S E K R E T A R I A T**  
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ..... 19. 12. 2023 .....

Zarejestrowano pod nr .....

Podpis ..... dm

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Turleja pt.: „Generacja bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku”.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 26 października 2023 roku, a także pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH z dnia 27 października 2023 roku. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski, a promotorem pomocniczym dr inż. Krzysztof Kogut.

### 1. Znaczenie podjętej tematyki

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy problematyki generowania i ewaluacji bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku. Publiczne drogi, po których poruszają się pojazdy, należy traktować jako złożone środowisko dynamiczne, w ramach którego należy uwzględnić m.in. inne pojazdy, a także interakcje pomiędzy tymi pojazdami. Przeprowadzone przez Doktoranta badania dotyczą w szczególności opracowania algorytmów planowania zapewniających efektywne i przede wszystkim bezpieczne poruszanie się kontrolowanego pojazdu.

Obecnie obserwuje się dynamiczny rozwój systemów bezpieczeństwa w pojazdach, których zadaniem jest wsparcie kierowców w wymagających warunkach drogowych, a także podniesienie poziomu ochrony zdrowia i życia pasażerów oraz pieszych. Rozwój aktywnych systemów bezpieczeństwa to ogólnoświatowy trend wymuszony w dużym stopniu przez Parlament Europejski, który wytyczył kierunek rozwoju motoryzacji stawiający na bezpieczeństwo. Dynamicznie rozwijają się również systemy jazdy autonomicznej, które w niedalekiej przyszłości mogą zrewolucjonizować motoryzację. Projektowanie bezpiecznych systemów jazdy autonomicznej pozostaje nadal otwartym obszarem badawczym, z wieloma problemami wymagającymi dalszych badań, takimi jak bezpieczne planowanie trajektorii jazdy, projektowanie ograniczeń bezpieczeństwa dla algorytmów planowania i kontroli, a także opracowywanie skutecznych metod testowania. Podjęta przez Doktoranta tematyka wpisuje się wprost w zakres dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Należy również podkreślić, że tematyka rozprawy doktorskiej jest niezwykle ważna i aktualna zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

## **2. Ogólna charakterystyka, zakres i cel rozprawy**

Rozprawa doktorska dotyczy generowania i ewaluacji bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku. Doktorant słusznie podkreśla, że jednym z najbardziej obiecujących podejść do planowania ruchu pojazdu jest wykorzystanie metod uczenia przez wzmocnienie (ang. *Reinforcement Learning*) do opracowania zasad jazdy, które zaplanują ruch sterowanego samochodu w najbliższej przyszłości na podstawie danych z czujników pojazdu i algorytmów percepcyjnych. W literaturze wykazano, że zasady oparte na technice uczenia przez wzmocnienie planują ruch pojazdów w sposób skuteczny i niezawodny. Co więcej, zasady te są w stanie uwzględnić złożoną interakcję między wieloma pojazdami, wykazują się ludzkimi umiejętnościami negocjacji na drodze, a także przewidują zachowanie innych użytkowników drogi. Doktorant analizując możliwości i ograniczenia algorytmów planowania ruchu pojazdów z wykorzystaniem metod uczenia przez wzmocnienie zidentyfikował kilka wyzwań związanych z zapewnieniem niezawodności oraz bezpieczeństwa tych algorytmów. Do tych wyzwań Doktorant zaliczył przede wszystkim konieczność nauczenia się właściwych reakcji na zdarzenia, które są bardzo rzadko obserwowane w procesie trenowania, uwzględnienie kilku możliwych wyników danej sytuacji, uodpornienie algorytmów planowania ruchu na błędy

percepcji, a także opracowanie automatycznych procedur testowania. Tak postawione wyzwania doprowadziły do sformułowania następujących tez rozprawy doktorskiej:

- Możliwe jest stworzenie planu bezpiecznej jazdy dla zautomatyzowanego pojazdu, który uwzględnia kilka hipotez dotyczących przyszłego stanu otoczenia pojazdu. W szczególności w algorytmie planowania ruchu można uwzględnić możliwe do przewidzenia najgorsze założenia dotyczące zachowania innych użytkowników drogi, zapewniając istnienie wykonalnych manewrów uniknięcia kolizji podczas realizacji planu ruchu.
- Zastosowanie stochastycznych modeli systemów percepcji w procesie trenowania zasad jazdy wykorzystujących uczenie przez wzmacnianie umożliwia poprawę odporności tych zasad na błędy percepcji.
- Oparte na optymalizacji metody generowania scenariuszy przeciwnych można zastosować w opartej na symulacji walidacji algorytmów planowania ruchu w celu ujawnienia potencjalnych słabości lub problemów w ocenianych systemach.

Cele oraz tezy pracy zdefiniowano w precyzyjny sposób. Można stwierdzić, że postawione cele pracy są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy w zakresie algorytmów generowania i ewaluacji bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku. Cele oraz tezy pracy odpowiadają zakresowi i tematyce rozprawy oraz determinują zakres przeprowadzonych badań. Uważam, że podjęcie tematu rozprawy doktorskiej było celowe zarówno ze względów poznawczych, teoretycznych oraz praktycznych. Tezy pracy zostały prawidłowo postawione, natomiast cele główne rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane.

### **3. Struktura rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Turleja pt.: „Generacja bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku” została napisana w języku angielskim. Rozprawa jest podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów, które zostały uzupełnione wykazem 205 pozycji literaturowych.

W rozdziale pierwszym, będącym jednocześnie wprowadzeniem do rozprawy doktorskiej, przedstawiono i omówiono automatyzację procesu prowadzenia pojazdów. Przedstawiono klasyfikację poziomów autonomii pojazdów. Omówiono ponadto zagadnienia

związane z bezpieczeństwem, odnosząc się do obowiązujących norm i standardów. W dalszej kolejności przedstawiono motywację do podjęcia badań, których wyniki przedstawiono w rozprawie doktorskiej, a także zdefiniowano tezy pracy. Przedstawiono również charakterystykę poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim przedstawiono wprowadzenie do pojazdów autonomicznych. Opisano ich historię, architekturę i metody wykorzystywane do planowania ruchu. W szczególności omówiono zaawansowane systemy wspomagania kierowcy (ADAS) i systemy jazdy autonomicznej (AD). Scharakteryzowano systemy percepcji stosowane w motoryzacji oraz omówiono ich ograniczenia. Przedstawiono problematykę fuzji danych generowanych przez systemy sensoryczne pojazdów. Odniesiono się do fuzji wysokopoziomowej oraz niskopoziomowej. Omówiono architekturę autonomicznego systemu jazdy. Przewidziano również metodę uczenia przez wzmacnianie (ang. *Reinforcement Learning*) jako jeden z typów uczenia maszynowego, który jest z powodzeniem wykorzystywany w algorytmach planowania ruchu pojazdów. Omówiono ponadto kwestie związane z bezpieczeństwem systemów ADAS oraz AD.

W rozdziale trzecim omówiono koncepcję planowania trajektorii ruchu z wieloma hipotezami. Hipotezy mogą być tworzone przez oddzielny moduł przewidywania trajektorii multimodalnych lub tworzone w oparciu o zestaw założeń związanych z prawdopodobnymi przyszłymi zachowaniami innych użytkowników dróg. Zaprezentowane podejście wykorzystuje metody generowania trajektorii oparte na optymalizacji w celu planowania ruchu pojazdu z uwzględnieniem wielu hipotez dotyczących przyszłego stanu miejsca zdarzenia. W proponowanej metodzie planuje się kilka trajektorii sterowania pojazdem, przy czym każda trajektoria jest powiązana z jedną z hipotez, a wszystkie trajektorie są identyczne w zadanym początkowym okresie czasu. Takie rozwiązanie pozwala zapewnić istnienie w tym okresie realnej, bezkolizyjnej trajektorii, niezależnie od tego, która hipoteza okaże się prawdziwa, pozwalając na odłożenie w czasie kluczowych dla bezpieczeństwa decyzji do momentu zebrania większej ilości danych dotyczących środowiska i zachowań innych użytkowników drogi. Ponadto, przedstawiono i omówiono zagadnienie planowania awaryjnego, w którym jedna trajektoria jest planowana w oparciu o najbardziej prawdopodobną hipotezę dotyczącą przyszłego zachowania innych użytkowników drogi, a druga uwzględnia ograniczenia bezpieczeństwa w oparciu o przewidywalne założenia dotyczące najgorszego przypadku przyszłego zachowania innych użytkowników drogi. W

ramach rozdziału sformułowano problem optymalizacyjny, który umożliwi jednoczesne planowanie wszystkich trajektorii. Przedstawiono również ograniczenia zaproponowanego podejścia. Odniesiono się przede wszystkim do błędów percepcji, które generują główne problemy w funkcjonowaniu systemów ADAS i AD. W rozdziale założono dostępność doskonałego modelu środowiska statycznego oraz dynamicznego. Do istotnych ograniczeń zaproponowanej metody Doktorant zaliczył również stosunkowo niską wydajność obliczeniową. Zaproponowano jednak sposoby poprawy tej wydajności.

Rozdział czwarty poświęcony jest problematyce modelowania systemów percepcji monitorujących i oceniających stan środowiska statycznego i dynamicznego pojazdu. Przedstawiono zestaw efektywnych modeli czujników do modelowania zarówno systemów dynamicznej percepcji otoczenia (np. radarowe wykrywanie obiektów), jak i statycznej percepcji otoczenia (np. oparte na kamerach detektory znaczników pasa ruchu). Zaproponowane modele czujników mogą być wykorzystane zarówno do walidacji zasad prowadzenia pojazdu, jak i ich uczenia. Przykładowe zasady prowadzenia pojazdu zostały wytrenowane w środowisku symulacyjnym z wykorzystaniem zaproponowanych modeli czujników i następnie porównywane z zasadami trenowanymi przy użyciu prostszych bazowych modeli czujników i doskonałej percepcji otoczenia. Zestaw modeli czujników odpowiedzialnych za wykrywanie oznaczeń pasa ruchu, a także wykrywanie obiektów i szacowanie stanu został zaprojektowany i oceniony w scenariuszach skryptowych i różnych środowiskach ruchu drogowego. Zasady wyszkolone w środowisku z opracowanymi modelami czujników wykazały dobrą wydajność we wszystkich środowiskach testowych, a także w scenariuszach skryptowych. Zaproponowane zasady były w stanie generować płynny i wydajny ruch, zachowując jednocześnie odporność na znaczne błędy percepcji przy minimalnych wymaganiach obliczeniowych.

W rozdziale piątym przedstawiono problematykę automatycznej walidacji systemów ADAS i AD. W ramach rozdziału zaprezentowano autorską metodę automatycznego generowania przeciwstawnych scenariuszy testowych. Zaproponowaną metodę można wykorzystać do efektywnego badania potencjalnych problemów w opracowanych zasadach drogowych, wykorzystując generację trajektorii w oparciu o optymalizację w celu znalezienia zachowań innych użytkowników drogi, które powodują krytyczne dla bezpieczeństwa problemy w testowanym systemie. Cechą charakterystyczną przedstawionej metody jest możliwość generowania scenariuszy przeciwstawnych z wzorcami błędów percepcji. Proces

generowania scenariuszy wykorzystuje stochastyczne metody optymalizacji, które są wykorzystywane do poszukiwania scenariuszy stanowiących największe wyzwanie dla testowanego systemu. Dzięki tej właściwości opracowaną metodę można wykorzystać do aktywnego badania kombinacji zachowań innych osób z prawdopodobnymi wystąpieniami błędów w percepcji, które mogą skutkować błędnymi decyzjami w zakresie zasad drogowych. Skuteczność przedstawionej metody wykazano w zadaniu wygenerowania bazy danych scenariuszy przeciwstawnych dla przykładowych zasad jazdy opartych na technice uczenia przez wzmocnienie. Algorytm implementujący zaproponowaną metodę był w stanie z powodzeniem wygenerować szeroką gamę scenariuszy testowych, które ujawniły kilka trybów awarii w testowanych zasadach. Dodatkowo, opisana metoda została wykorzystana do zbadania podatności tych zasad na niedoskonałości systemu percepcji, generując zestaw scenariuszy z błędami estymacji stanu. Zaproponowana metoda może być wykorzystana do szybkiej identyfikacji sytuacji, w której opracowane zasady jazdy mają trudności z osiągnięciem pożądanej wydajności.

W rozdziale szóstym przedstawiono podsumowanie wyników badań. Scharakteryzowano osiągnięcia rozprawy doktorskiej. Przedstawiono również kierunki dalszych badań.

Bibliografia zawiera 205 pozycje. W spisie literatury wyodrębniono również 5 prac autorstwa i współautorstwa Doktoranta. Literaturę dobrano w staranny sposób. Odniesiono się m.in. do reprezentatywnych prac z zakresu pojazdów autonomicznych, systemów aktywnego bezpieczeństwa w branży motoryzacyjnej, systemów wizyjnych oraz radarowych, systemów pomiarowych, a także analizy danych.

#### **4. Ogólna ocena rozprawy**

Autor rozprawy doktorskiej zrealizował postawione cele w sposób adekwatny, używając do tego właściwej metodyki badań. Przyjęte założenia są uzasadnione. W sposób przejrzysty odniesiono się do źródeł. Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez opracowanie metody generowania wielu trajektorii sterowania skutkujących bezkolizyjnym ruchem pojazdu, opracowanie zestawu stochastycznych modeli sensorów do modelowania błędów w statycznych i dynamicznych systemach percepcji otoczenia, a także opracowanie metody generowania scenariuszy przeciwstawnych. Do rozwiązania problemu planowania



ruchu w niepewnych sytuacjach Doktorant zaproponował metodę planowania wielohipotezowego. Przedstawiona w rozprawie doktorskiej metoda polega na planowaniu krótkich manewrów w trudnych sytuacjach i może być użyta w połączeniu z metodami wykorzystującymi techniki uczenia maszynowego, które pozwalają na strategiczne planowanie w odległym horyzoncie czasowym. Doktorant przedstawił również wysokopoziomowe modele sensorów dla celów ewaluacji i trenowania algorytmów planowania. Przedstawione modele symulują błędy występujące w systemach percepcji obiektów dynamicznych oraz wykrywania pasów ruchu. Doktorant zaproponował również metodę automatycznej generacji scenariuszy testowych, która pozwala na dokładne testowanie systemów planowania ruchu pojazdu. Przedstawiona metoda generuje nie tylko trajektorie użytkowników ruchu, ale również odpowiadające im błędy percepcji.

Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim:

- Sformułowanie problemu optymalizacyjnego służącego do jednoczesnego generowania wszystkich trajektorii. Obecnie istniejące metody planują tylko jedną trajektorię lub wykonują planowanie dla kilku hipotez w sposób sekwencyjny.
- Propozycję przewidywalnej najgorszej hipotezy w oparciu o niedawno wprowadzony standard IEEE 2846-2022.
- Propozycję stochastycznych modeli sensorów do modelowania błędów w statycznych i dynamicznych systemach percepcji otoczenia.
- Opracowanie metody generowania scenariuszy przeciwstawnych.

## 5. Pytania i uwagi krytyczne

Uwagi merytoryczne:

- Czy w pracach nad opracowaniem algorytmów planowania trajektorii ruchu przeprowadzono jakiegokolwiek badania z wykorzystaniem dynamicznego modelu pojazdu?
- W jaki sposób przeprowadzono analizę kosztu obliczeniowego związanego z generacją trajektorii ruchu pojazdu?
- Jakie metody numeryczne zostały wykorzystane do aproksymacji funkcji kosztu w zaproponowanej metodzie optymalizacji?

- Jakie metody filtracji sygnałów/obrazów uwzględniono w modelach czujników radarowych oraz kamer?
- W jaki sposób przyjęto kryteria wyboru zakłóceń sygnałów radarowych oraz obrazów z kamer?

Uwagi redakcyjne:

- Rozprawa doktorska zawiera nieliczne usterki językowe.

Wskazane uwagi krytyczne i komentarze mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę wyników zawartych w opiniowanej rozprawie doktorskiej.

## 6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Wojciech Turlej wykazał się dużą wiedzą z zakresu systemów sterowania w pojazdach autonomicznych, metod sztucznej inteligencji, a także analizy oraz fuzji danych. Rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Turleja pt.: „Generacja bezpiecznych trajektorii w czasie rzeczywistym dla pojazdów poruszających się w dynamicznym środowisku” jest oryginalnym, interesująco przedstawionym, uzasadnionym i twórczym wkładem w dyscyplinę Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Niniejsza rozprawa doktorska zawiera poprawnie sformułowany i rozwiązany problem badawczy oraz posiada bardzo duży aspekt praktyczny. Stanowi zatem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W efekcie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Turleja spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, które zostały określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuje o dopuszczenie mgra inż. Wojciecha Turleja do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

