

Szczecin, 16.03.2023

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

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 23 03 2023  
nr 9 zał. ....

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kowalczyka pt.: "Statystyczne podejście do weryfikacji i walidacji systemów sterowania w pojazdach autonomicznych".

Podstawą formalną opracowania recenzji jest Uchwała nr 95/2022 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej z dnia 20 grudnia 2022 roku, a także pismo o sygnaturach RDAEETK/7/2023, RDAEETK.512.12.2022 Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ z dnia 6 marca 2023 roku. Promotorem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Jacek Izydorczyk, a promotorem pomocniczym dr inż. Marcin Szelest.

### 1. Znaczenie podjętej tematyki

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy aspektów aktywnego bezpieczeństwa w branży motoryzacyjnej. Przeprowadzone przez Doktoranta badania dotyczą w szczególności zautomatyzowanej analizy dużych zbiorów danych związanych z rozwojem, testowaniem i weryfikacją działania inteligentnych systemów wspomaganie kierowcy w pojazdach. 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 ogólnoswiatowy trend wymuszony w dużym stopniu przez Parlament

Europejski, który wytyczył kierunek rozwoju motoryzacji stawiający na bezpieczeństwo. Od 2020 roku na terenie Unii Europejskiej obowiązują przepisy mające na celu wyposażenie produkowanych pojazdów w systemy zwiększające ochronę życia ich użytkowników. Zgodnie z wprowadzonymi przepisami wszystkie produkowane i sprowadzane od 2022 roku pojazdy muszą być wyposażone m.in. w takie funkcje, jak inteligentny asystent prędkości, wykrywanie pieszych i rowerzystów, automatyczne hamowanie awaryjne, awaryjne utrzymanie auta na pasie ruchu, a także monitorowanie koncentracji kierowcy. Wprowadzenie nowych przepisów ma przede wszystkim na celu zmniejszenie liczby ofiar wypadków drogowych. W branży motoryzacyjnej wykorzystywane są obecnie zaawansowane systemy, które informują kierowców z wyprzedzeniem o sytuacji na drodze oraz wspomagają w trakcie manewrów. Systemy te wyposażone są w rozmaite sensory, takie jak kamery, LiDARy, a także radary, które monitorują otoczenie pojazdów w trakcie jazdy oraz czytają znaki drogowe i ograniczenia prędkości.

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. Opracowane metody w zakresie analizy danych mogą znaleźć zastosowanie w systemach wspomagania kierowcy.

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

Rozprawa doktorska dotyczy usprawnienia metodologii zautomatyzowanej analizy dużych zbiorów danych związanych z wybranymi aspektami ewaluacji modułów percepcji odpowiedzialnych za interpretowanie otoczenia w pobliżu pojazdu. Zasadniczą motywacją podjęcia badań, których wyniki przedstawiono w rozprawie doktorskiej było ujednoczenie, zagwarantowanie odtwarzalności, a także poprawa skuteczności ewaluacji modułów percepcji. Procesy związane z akwizycją, przechowywaniem oraz przygotowaniem danych z jazd testowych wymagają dużej ilości pracy oraz zasobów. Do ewaluacji modułu percepcji wykorzystywane są metody oceny jakości interpretacji otoczenia i poziomu odwzorowania danych referencyjnych przez ten moduł. Celem rozprawy doktorskiej jest obniżenie złożoności czasowej i sprzętowej takiego przedsięwzięcia oraz zagwarantowanie powtarzalności wyników poprzez automatyzację procesu analizy jakości. W rozprawie

doktorskiej analizie poddano moduły percepcji, które analizują obiekty możliwe do opisanego przy pomocy prostokątnych regionów rozpoznania. Celem pracy jest również porównanie różnych metod analizy jakości działania sieci neuronowych oraz sposobów przetwarzania danych związanych z ich testowaniem w kontekście wykorzystania w zaawansowanych systemach wspierania kierowcy w pojazdach. Przedstawione w pracy algorytmy ewaluacji i metodologie analizy struktury danych testowych wpłyną w bezpośredni sposób na rozwój systemów aktywnego bezpieczeństwa w pojazdach. Tak postawione cele pracy doprowadziły do sformułowania następujących tez rozprawy doktorskiej:

- Możliwym jest stworzenie metodologii ewaluacji, która precyzyjniej określa jakość wyznaczenia prostokątnych regionów rozpoznania, niż robi to indeks Jaccarda w kontekście detektorów wizyjnych wchodzących w skład modułów percepcji. Ponadto, można stworzyć miarę podsumowującą całe pojawienie się obiektu w zasięgu sensorów uwzględniającą potencjalną konieczność szybkiej reakcji na nową sytuację.
- Usystematyzowanie procesu testowania modułów percepcji w zróżnicowanych warunkach ruchu drogowego i istotne rozszerzenie płynących z niego wniosków można uzyskać poprzez uzupełnienie metody testowania hipotez statystycznych o analizę topologiczną przeprowadzoną z wykorzystaniem algorytmu klastrowania i odległości Wassersteina. Dodatkowo, odległość Wassersteina może rozszerzyć samą metodologię oceny jakościowej.
- Analiza zajętości obszarów znajdujących się w zasięgu sensorów samochodu testowego z wykorzystaniem metryki Wassersteina do klastrowania dwuwymiarowych rozkładów jest metodologią umożliwiającą formalizację opisu danych uczących, testowych i walidacyjnych używanych do szeroko rozumianego rozwoju jazdy autonomicznej oraz pozwoli ocenić ich różnorodność.

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 analizy danych dotyczących systemów wspomagania kierowcy. 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. Pawła Kowalczyka pt.: "Statystyczne podejście do weryfikacji i walidacji systemów sterowania w pojazdach autonomicznych" jest podzielona na 7 zasadniczych rozdziałów, które zostały uzupełnione wykazem 162 pozycji literaturowych.

W rozdziale pierwszym, będącym jednocześnie wprowadzeniem do rozprawy doktorskiej, przedstawiono i omówiono strukturę pojazdu wyposażonego w inteligentną percepcję. Zamieszczono krótkie wprowadzenie do aktywnych systemów bezpieczeństwa, procesy gromadzenia danych, procedur testowania oraz analizy jakości percepcji. W dalszej kolejności sformułowano obszar tematyczny pracy, przedstawiono motywację podjęcia tematyki rozprawy, zdefiniowano cele pracy oraz tezy pracy, określono granice zakresu rozważań, a także przedstawiono charakterystykę poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi poświęcony jest omówieniu systemu percepcji w pojazdach autonomicznych ze szczególnym uwzględnieniem sensorów znajdujących się na pokładzie oraz modułów percepcji stanowiących podstawę dla interpretacji przez komputer otaczającego świata. W ramach rozdziału wprowadzono pojęcie pojazdu autonomicznego, przedstawiono uwarunkowania prawne w zakresie pojazdów autonomicznych, a także omówiono klasy autonomiczności. Następnie scharakteryzowano czujniki będące na wyposażeniu samochodów autonomicznych. Odniesiono się przede wszystkim do kamer, radarów, lidarów, a także czujników ultradźwiękowych i mikrofonów. W dalszej kolejności omówiono moduły percepcji, a w szczególności moduł wykrywania pieszych, moduł rozpoznawania pojazdów poruszających się po drodze, moduł rozpoznawania oraz klasyfikacji znaków drogowych, moduł oznaczania linii oraz światła drogi, a także moduł identyfikacji wolnej przestrzeni wokół samochodu. W ostatniej części rozdziału przedstawiono wyzwania dotyczące testowania percepcji pojazdu. Odniesiono się przede

wszystkim do dystrybucji danych, przechowywania i dostępu do danych, etykietowania danych, a także procesu resymulacji.

W rozdziale trzecim omówiono proces ewaluacji działania modułów percepcji w pojeździe wyposażonym w systemy aktywnego bezpieczeństwa. Scharakteryzowano prostokątne regiony rozpoznania, a także opis linii na jezdni. Omówiono problematykę wyznaczania jakości modułu percepcji. Odniesiono się w szczególności do miar podobieństwa, indeksu Jaccarda oraz miar jakości detekcji. Scharakteryzowano problem detekcji prawdziwie pozytywnej oraz wpływ dokładności detekcji na układ sterowania. Następnie odniesiono się do zbioru danych uczących, zbioru danych testowych, a także zbioru danych walidacyjnych. Przedstawiono charakterystykę dużych zbiorów danych, podkreślając przy tym, że istotnym problemem jest fakt, że mając do dyspozycji dwa różne zbiory treningowe możliwe jest wytrenowanie sieci w istotnie różny sposób. Omówiono wizualizację złożonych danych oraz nawiązano do analizy trajektorii ruchu, odnosząc się do obecnie wykorzystywanych podejść. Wprowadzono również pojęcie metryki Wassersteina i jednocześnie przyjęto założenie że odległość Wassersteina może stanowić podstawę do opracowania metodologii, która umożliwi analizę dużych ilości danych (w szczególności składających się z trajektorii).

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił autorską miarę podobieństwa prostokątnych regionów rozpoznania. Zaproponowano trzy miary składowe umożliwiające ocenę podobieństwa prostokątów pod względem atrybutów najistotniejszych dla oceny jakości, a następnie w oparciu o te składowe zdefiniowano ogólną miarę podobieństwa. Wprowadzone miary dotyczą podobieństwa pola, podobieństwa kształtu oraz podobieństwa pozycji. Generalna miara podobieństwa prostokątów (GMOS) jest ważoną średnią harmoniczną miar składowych i integruje informacje zawarte w poszczególnych funkcjach podobieństwa. W rozdziale przeprowadzono również analizę dopasowania detekcji między źródłami. Dokładność algorytmu oszacowano w oparciu o eksperyment przeprowadzony na klatkach przedstawiających przechodniów. Zaproponowany algorytm, bazujący na miarach podobieństwa prostokątów, uzyskał dokładność na poziomie 98,2%. Następnie przeprowadzono analizę zdarzeń w czasie. Wprowadzono miarę podobieństwa sekwencji oraz średnią ważoną dla późnych detekcji, a także scharakteryzowano rolę pierwszej detekcji. W dalszej części rozdziału omówiono formę wizualizacji wyników analizy jakości zaprojektowanej na potrzeby przykładowego modułu percepcji. Przedstawiono ponadto



metodologię kalibracji miar jakości dopasowania. Określono wymagania kalibracyjne modułu percepcji wykrywającego pieszych, modułu percepcji odpowiadającego za rozpoznawanie pojazdów poruszających się po drodze, a także modułu rozpoznawania sygnalizacji świetlnej. Dla wskazanych modułów przedstawiono przykładowe wyniki analizy jakości rozpoznania w klatce. Do analizy danych wykorzystano indeks Jaccarda oraz zaproponowaną przez Doktoranta miarę GMOS. W podobny sposób przeprowadzono analizę danych radarowych i lidarowych. W kolejnej sekcji dokonano porównania miar jakości lokalnej. Zaproponowaną w rozprawie doktorskiej miarę podobieństwa prostokątów porównano z innymi miarami opisanymi w literaturze. Porównano ogólne własności wybranych miar, a następnie omówiono przeprowadzony eksperyment Monte Carlo porównujący rozkłady miary GMOS i indeksu Jaccarda. W eksperymencie wykorzystano dane pochodzące z laboratorium do etykietowania danych rzeczywistych. Podczas analizy oceniono wpływ przyrostu zmiany pozycji na miary podobieństwa lokalnego przy ustalonym zaszumieniu, wpływ przyrostu rozrzutu zaszumienia wierzchołków na miarę podobieństwa lokalnego, a także wpływ przyrostu zmiany pozycji na miarę podobieństwa sekwencji.

W rozdziale piątym zaprezentowano wyniki analizy jakości dla zbiorów scenariuszy testowych. W pierwszej części rozdziału scharakteryzowano eksperyment polegający na analizie jakości działania modułu percepcji MOD odpowiadającego za rozpoznawanie pojazdów poruszających się po drodze w różnych warunkach otoczenia. Do eksperymentu wybrano sceny ze zbioru nagrań samochodów testowych Aptiv. Scharakteryzowano algorytm klastrowania jakościowego scen. Jako miarę odległości między obiektami wybrano metrykę Wassersteina. Przeanalizowano również odporność modułu MOD na zaburzenia danych pochodzących z kamery frontowej. Do degradacji obrazu wideo wykorzystano rozmycie Gaussa, redukcję głębi bitowej skali szarości, okluzję cząstkową oraz cykliczne oślepienie. Do ewaluacji degradacji na podstawie dwóch głównych parametrów rozkładów wykorzystano analizę wariancji (ANOVA) z poprawką Welch'a. Przeprowadzono również analizę topologiczną wykorzystując do tego celu odległość Wassersteina.

W rozdziale szóstym dokonano charakterystyki dużych zbiorów trajektorii. Omówiono problematykę rekonstrukcji trajektorii ze zbiorów detekcji. Wprowadzono pojęcie siatki zajętości oraz podobieństwa trajektorii. Przedstawiono przykłady metryk i miar podobieństwa trajektorii. Do obliczenia wartości metryk wykorzystano powszechnie dostępny zestaw trajektorii. Odniesiono się do metryki indukowanej przez normę  $L^p$ , podobieństwa

trajektorii w sensie Jaccarda, a także odległości trajektorii w sensie Hamminga. Następnie przeprowadzono analizę scenariuszy testowych. Przeanalizowano m.in. mapy termiczne zajętości otoczenia oraz dokonano porównania scenariuszy testowych. Do pomiaru odległości między scenariuszami posłużyła odległość Wassersteina pomiędzy odpowiadającymi im rozkładami zajętości. Do przetestowania metodologii porównywania scenariuszy wykorzystano zestaw danych nuScenes dostarczony przez Motional (przedsięwzięcie Hyundai i Aptiv). W ostatniej części rozdziału dokonano porównania zbioru scenariuszy. Wykorzystano do tego celu kumulatywne mapy termiczne, klastrowanie rozkładów zajętości, a także współczynniki różnorodności.

W rozdziale siódmym przedstawiono podsumowanie wyników badań. Scharakteryzowano motywację podjęcia się badań, których wyniki zaprezentowano w pracy doktorskiej. Wykazano ponadto elementy nowości oraz potwierdzono osiągnięcie celu rozprawy doktorskiej. Przedstawiono przegląd osiągnięć, które zostały zamieszczone w poszczególnych rozdziałach rozprawy doktorskiej. W ostatniej części rozdziału zamieszczono kierunki dalszych badań.

Bibliografia zawiera 162 pozycje. W spisie literatury wyodrębniono również 5 prac 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 dużych zbiorów 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 zaproponowanie formalnych definicji oraz algorytmów wykorzystujących dostępny aparat matematyczny. W rozprawie doktorskiej zaprezentowano autorskie propozycje metodologii testowania i ewaluacji danych związanych z działaniem modułów percepcji. Zaproponowane metodologie uwzględniają różne typy danych, ich różnorodność oraz wolumen. Istotnym

również jest, że zaproponowane rozwiązania umożliwiają wielopoziomową analizę danych. Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć przede wszystkim:

- stworzenie miary podobieństwa służącej do ewaluacji modułów percepcji na tle danych referencyjnych (zaproponowana miara umożliwia automatyczną analizę danych w postaci prostokątnych regionów rozpoznania);
- stworzenie miary podobieństwa podsumowującej lokalne wyniki miar jakości w klatce;
- stworzenie metody wizualizacji jakości scenariusza testowego pozwalającej na szybką lokalizację problemów z działaniem modułu percepcji;
- opracowanie algorytmu tworzenia układu eksperymentalnego uwzględniającego rozróżnienie grup danych oraz zaprojektowanie metody klasteryzacji opartej o algorytm  $k$ -średnich i wykorzystującej rozkład jakości sekwencji w scenariuszu jako reprezentacyjny obiekt, który można poddać klasteryzacji z wykorzystaniem metryki Wassersteina;
- przedstawienie sposobu analizy podobieństwa trajektorii, scenariuszy jako zbioru trajektorii zebranych w jednej spójnej sytuacji drogowej, a także pełnych zbiorów scenariuszy;
- rozszerzenie koncepcji siatki zajętości do histogramu i rozkładu zajętości generowanego przez zbiory trajektorii;
- przedstawienie metodologii porównawczej dla dużych zbiorów scenariuszy, wykorzystującej metrykę Wassersteina, algorytm klastrowania  $k$ -średnich i indeks Dunna,

## 5. Uwagi krytyczne

Uwagi merytoryczne:

- W rozdziale 4.1.4 zaproponowano generalną miarę podobieństwa GMOS. W jaki sposób dobierane są wagi  $w_1$ ,  $w_2$  oraz  $w_3$  z zależności (4.10)? Czy wagi  $w_1$ ,  $w_2$  oraz  $w_3$  z zależności (4.10) są tożsame z wagami  $w_i$  z zależności (4.12a) oraz (4.13a)?
- W celu analizy dokładności algorytmu dopasowania (asocjacji) przedstawionego w rozdziale 4.1.5 przeprowadzono eksperyment na ponad 100 klatkach przedstawiających przechodniów. Czy wskazany zbiór klatek był wystarczający i



dostatecznie zróżnicowany, aby w obiektywny sposób ocenić dokładność algorytmu dopasowania? Czy do analizy danych w ramach przeprowadzonego eksperymentu wykorzystano jedynie miarę GMOS oraz indeks Jaccarda?

- W rozdziale 4.5.2 scharakteryzowano przeprowadzony eksperyment Monte Carlo. Zadeklarowano, że w serii eksperymentów wykorzystano ponad 12000 referencyjnych prostokątów pochodzących z laboratorium do etykietowania danych rzeczywistych. Jakiego było zróżnicowanie tych danych?
- W rozdziale 5.1.1 zadeklarowano, że do eksperymentu wybrano 108 scen ze zbioru nagrań samochodów testowych Aptiv, które posiadały dane referencyjne dla modułu percepcji MOD. Czy wskazany zbiór scen był wystarczający i dostatecznie zróżnicowany?
- W rozdziale 5.1.3 przedstawiono rodzaje analizowanych zaburzeń. Dlaczego ograniczono się do 4 typów zaburzeń. Jakiego było kryterium wyboru tych zaburzeń?
- W rozdziale 6.1.2 zadeklarowano, że do obliczenia wartości metryk wybrano zestaw trajektorii pochodzących z opublikowanego przez Toyota i Instytut Technologii Karlsruhe zbioru KITTI. Jak duży to był zestaw i jak zróżnicowany? W tabelach 6.1-6.3 przedstawiono wyniki wartości podobieństwa dla 9 trajektorii. Czy podczas badań i eksperymentów rozpatrywano tylko 9 trajektorii, czy też w tabelach zamieszczono jedynie przykładowe wyniki?

Uwagi redakcyjne:

- Rozprawa doktorska zawiera nieliczne usterki językowe w postaci błędów stylistycznych oraz interpunkcyjnych.

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. Paweł Kowalczyk wykazał się dużą wiedzą z zakresu analizy dużych zbiorów danych oraz systemów sterowania w pojazdach autonomicznych. Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Kowalczyka pt.: "Statystyczne

podejście do weryfikacji i walidacji systemów sterowania w pojazdach autonomicznych” 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 mgr. inż. Pawła Kowalczyka 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 wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Kowalczyka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej.

Jednocześnie, z uwagi na wysoki poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej, bardzo duży potencjał aplikacyjny wyników badań, a także opublikowanie wyników badań w recenzowanych zagranicznych czasopismach naukowych posiadających współczynnik Impact Factor (jako pierwszy autor) oraz materiałach międzynarodowych konferencji naukowych wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

