

Prof. dr hab. inż. Stefan Domek
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Szczecin, 20.09.2023 r.

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK
27. 09. 2023

Wpłynęło dnia
Zarejestrowano pod nr
Podpis *Jm*

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Szlachetki
„Detekcja wolnej przestrzeni wokół samochodu w oparciu o siatkę zajętości”

1. PODSTAWA PRAWNA, PRZEDMIOT I ZAKRES RECENZJI

Podstawą sporządzenia recenzji były pismo dr. hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 6.07.2023 oraz umowa o dzieło z dnia 20.07.2023 r. podpisana przez dr. inż. Mikołaja Skowrona, Prodziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Marka Szlachetki „Freespace detection and examination based on surround occupancy grid”, która powstała w ramach grantu MNiSW, projekt nr 0014/DW/2018/02, jako tzw. doktorat wdrożeniowy w partnerstwie ze Spółką Aptiv Services Poland S.A., Technical Center Kraków. Tytuł w języku polskim brzmi „Detekcja wolnej przestrzeni wokół samochodu w oparciu o siatkę zajętości”. Promotorem rozprawy doktorskiej był dr hab. inż. Jarosław Wąs, prof. AGH a Promotorem pomocniczym (ze strony Spółki) dr hab. inż. Dariusz Borkowski.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261) recenzja zawiera ocenę rozprawy doktorskiej pod względem spełnienia warunków określonych w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim w odniesieniu do dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych (Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 11 października 2022 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych – Dz. U. z 2022 r., poz. 2202.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA, ZAKRES I CEL ROZPRAWY

W ostatnich latach na całym świecie obserwuje się dynamiczny rozwój zaawansowanych systemów wspomagania kierowców (ang. ADAS – Advanced Driver Assistance Systems). Systemy te mają na celu pomóc kierowcom samochodów w bezpiecznym kierowaniu pojazdami w ciągle zmieniającym się środowisku a docelowo samodzielnie i bezpiecznie kierować pojazdami. Jakkolwiek historia systemów asystenckich jest już dość długa, dopiero niedawno zdefiniowano tzw. sześciopoziomowy model autonomiczności ruchu samochodów (Poziom 0 oznacza brak jakiegokolwiek automatyzacji funkcji przyspieszania, hamowania i zmiany kierunku, co najwyżej pomocniczą sygnalizację zagrożeń, natomiast Poziom 5 umiejętność bezpiecznego i bezkolizyjnego poruszania się pojazdu bez kierowcy w każdych warunkach drogowych). Od tej pory trwają próby realizacji systemów coraz wyższych poziomów, ale wiele zagadnień zarówno teoretycznych jak i praktycznych w dalszym ciągu nie jest rozwiązanych. Zwłaszcza jeśli weźmie się pod uwagę bardzo istotne aspekty dotyczące bezpieczeństwa użytkowników dróg.

Jednym z najważniejszych a zarazem bardzo trudnych zagadnień w rozwoju systemów wspomagania kierowców jest wiarygodna bieżąca analiza otoczenia pojazdu, zarówno dynamicznego, jak i stacjonarnego. Realizujące to systemy obejmują warstwę czujników, warstwę percepcji i warstwę planowania bezkolizyjnych manewrów. W każdej z tych warstw pozostają nierozwiązane problemy badawcze.

Autor rozprawy postanowił opracować i zbadać nowy, autorski algorytm wyznaczania i śledzenia granicy wolnej przestrzeni wokół pojazdu, wykorzystując jako model matematyczny parametryczną krzywą sklejaną typu B-spline z danymi wejściowymi w postaci siatki zajętości oraz proponując kilka oryginalnych modyfikacji dotychczasowych rozwiązań.

Wybór takiego problemu badawczego uważam za właściwy i w pełni uzasadniony. Zastosowane podejście teoretyczne, metody analizy i narzędzia świadczą o tym, że rozprawa doktorska mgr. inż. Marka Szlachetki mieści się w zakresie dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i wpisuje się w aktualny i istotny dla niej nurt badań.

Swoje idee Autor zawarł w tezie rozprawy mówiącej, że:
Odpowiednie pomijanie niektórych punktów pomiarowych w połączeniu z dynamicznym dobieraniem punktów kontrolnych definiujących krzywą sklejaną aproksymującą granicę wolnej przestrzeni wokół pojazdu macierzystego w algorytmie śledzenia tej granicy pozwala skrócić czas obliczeń i zmniejszyć użycie pamięci, jednocześnie poprawiając jakość aproksymacji w stosunku do algorytmów wykorzystujących wszystkie dostępne punkty pomiarowe i stałą liczbę równomiernie rozmieszczonych punktów kontrolnych splajnu.

Jej słuszność postanowił wykazać przeprowadzając rozważania teoretyczne na tle różnych znanych i stosowanych rozwiązań oraz liczne badania symulacyjne. Zaproponowane metody realizacji postawionych celów oceniam jako oryginalne, trafnie dobrane i dające potencjalną możliwość uzyskania interesujących rezultatów teoretycznych i praktycznych.

3. ZAWARTOŚĆ MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 157 stron. Właściwy tekst pracy o objętości 112 stron poprzedzony jest streszczeniami w języku angielskim i polskim, spisem treści oraz spisem skrótów i symboli matematycznych, a zakończony trzyczęściowym dodatkiem, wykazem źródeł bibliograficznych, spisem rysunków i tabel.

Pomijając wstęp, merytorycznie pracę można podzielić na trzy części:

– Część 1, czyli rozdział 2 ma charakter przeglądowy. Przedstawiono w niej krótko historię rozwoju systemów jazdy autonomicznej ADAS oraz opisano poszczególne warstwy wielopoziomowego modelu funkcjonalnego dzisiejszych systemów, począwszy od czujników, a skończywszy na planowaniu ruchu.

– Część 2 obejmująca rozdział 3 jest wprowadzeniem do właściwej problematyki rozprawy, tj. wyznaczania granic wolnej przestrzeni wokół samochodu. Zawiera przegląd istniejących modeli środowiska stacjonarnego oraz sposobów ich identyfikacji wraz z autorskim porównaniem opisanych modeli w aspekcie przystosowania do współpracy w czujnikami różnego typu, wymaganego poziomu szczegółowości w celu zamodelowania złożonego środowiska stacjonarnego, możliwości uwzględnienia cech przejezdności rozpatrywanego obszaru oraz wymagań dotyczących pamięci i mocy obliczeniowej. Przytoczono również autorskie porównanie opisanych metod pod względem ich przydatności do modelowania granic obszarów wolnej przestrzeni w typowych scenariuszach ruchu drogowego - na autostradzie, w mieście, przy parkowaniu.

W zakończeniu rozdziału, na podstawie wcześniejszych rozważań wytypowano algorytm referencyjny do późniejszych porównań z rozwiązaniem autorskim. Wybór padł na opracowany w roku 2016 i uznawany w tej chwili za najbardziej efektywny algorytm PFS (ang. Parametric Free Space), wyznaczający parametryczny model otoczenia samochodu z użyciem krzywych sklepanych typu B-spline.

– Część 3, obejmująca rozdziały 4, 5 i 6 stanowi zasadniczą część rozprawy. W rozdziale 4 Autor opisał szczegółowo proponowane modyfikacje algorytmu PFS. Opis rozpoczyna się od specyfikacji danych wejściowych i wyjściowych algorytmu oraz przyjętych założeń systemu. Następnie zaprezentowano dwa główne etapy proponowanego algorytmu – przetwarzanie siatki obłożenia oraz estymację krzywej zamkniętej, w której wykorzystano model B-sklejany. Proponowane usprawnienia dotyczą etapu drugiego. Opisano je dokładnie w obszernym podrozdziale 4.4.

Skuteczność działania proponowanego autorskiego algorytmu zweryfikowano w rozdziale 5, porównując go z algorytmem referencyjnym. Najpierw opisano metodologię ewaluacji określając przyjęte metryki oraz 22 rodzaje sztucznych scenariuszy ruchu drogowego, pogrupowanych w pięć kategorii. Następnie wygenerowano dane testowe i przeprowadzono liczne symulacje. Ich wyniki poddano krytycznej analizie i szczegółowo przedstawiono w formie graficznej oraz tabelarycznej. Na zakończenie przeprowadzono jeden test rzeczywisty na parkingu, używając samochodu z czterema czujnikami radarowymi.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie pracy oraz podaje potencjalne dalsze możliwości rozbudowy zaproponowanego algorytmu.

W zakończeniu rozprawy podano liczącą 127 pozycji spis wykorzystanych źródeł bibliograficznych, przywoływanych w tekście tzw. systemem harwardzkim. Obejmują one artykuły naukowe w czasopismach i materiałach konferencyjnych, jak również książki, doktoraty oraz strony internetowe opublikowane głównie w ostatnich kilku latach, i trochę starsze pozycje o charakterze podstawowym lub przeglądowym. Wśród zacytowanych pozycji są dwie prace współautorstwa Doktoranta, ściśle związane z tematem rozprawy, opublikowane w liczących się materiałach o zasięgu międzynarodowym – *Journal of Computational Science* z 2022 roku oraz *Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings* z roku 2020.

Uzupełnieniem rozprawy jest trzyczęściowy dodatek obejmujący podstawy krzywych parametrycznych *B-spline*, opis użytych scenariuszy ruchu przyjętych do badań oraz wykaz użytego sprzętu komputerowego i oprogramowania.

4. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY

Głównym celem pracy było opracowanie, analiza teoretyczna i weryfikacja numeryczna nowego algorytmu wyznaczania i śledzenia granic wolnej, stacjonarnej przestrzeni wokół samochodu, obejmującej wszystkie obiekty nieruchome, takie jak zaparkowane samochody, budynki, bariery ochronne, krawężniki, znaki drogowe, itp. Podjęto próbę stworzenia efektywnego algorytmu zapewniającego lepszą jakość aproksymacji granic obszaru, mniejszą złożoność numeryczną i krótszy czas obliczeń. Podstawą poszukiwań nowego algorytmu był solidny i systematyczny przegląd istniejących rozwiązań oraz liczne badania symulacyjne.

Proponowany algorytm porównano z przyjętym za referencyjny algorytmem PFS, uznawanym jak dotąd za najlepszy w klasie algorytmów z aproksymacją granic obszaru krzywymi parametrycznymi. Korzystając z oprogramowania stworzonego w ramach pracy sprawdzano wiele wymiernych wskaźników:

- najmniejszą odległość najbliższego punktu referencyjnego splajnu,
- najmniejszą odległość wzdłuż prostopadłej do punktu referencyjnego splajnu,
- tzw. odległość Hausdorffa, określającą dystans dla najgorszego przypadku,
- liczbę wyników zakwalifikowanych jako prawdziwie pozytywne (TP), dla których granica obszaru wyznaczona została z założoną wysoką dokładnością,
- liczbę wyników zakwalifikowanych jako fałszywie pozytywne (FP), dla których granica obszaru wyznaczona została poprawnie jako bezpieczna, ale niepotrzebnie zmniejszyła rzeczywisty obszar stacjonarnego otoczenia pojazdu,
- liczbę wyników zakwalifikowanych jako fałszywie negatywne (FN), dla których granica obszaru wyznaczona została niepoprawnie jako bezpieczna, w rzeczywistości wykraczając poza rzeczywisty obszar stacjonarnego otoczenia pojazdu,

- współczynnik wyników pozytywnych (TPR – True Positive Rate) – wzór (5.2.7),
- wartość przewidywań pozytywnych (PPV – Positive Predictive Value) – wzór (5.2.8),
- łączny wskaźnik dobrych wskazań (F1) – wzór (5.2.9),
- czas wyznaczania zamkniętej krzywej sklelanej.

Dodatkowo w kilku testach sprawdzono wpływy na jakość aproksymacji obszaru stopnia krzywej sklelanej, liczby punktów kontrolnych oraz przetasowania pomiarów dla obu algorytmów.

We wszystkich badanych przypadkach dla opracowanego algorytmu uzyskano znacząco lepsze wyniki przy ponad dwukrotnie krótszym czasie obliczeń.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że Autor rozprawy rozwiązał postawione cele w sposób kompleksowy, w formie właściwej dla prac naukowych, tj. podając odniesienia do źródeł literaturowych, formułując odpowiednie założenia, uzasadniając proponowane rozwiązania oraz projektując odpowiednie moduły oprogramowania i weryfikując przy ich pomocy poprawność opracowanych metod. Właściwości proponowanych modeli zilustrował wynikami licznych badań. Zamieścił również krytyczne dyskusje otrzymanych rezultatów.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

- usystematyzowany opis problematyki zaawansowanych systemów wspomaganie kierowców;
- opracowanie kilku oryginalnych modyfikacji algorytmu wyznaczania i śledzenia granicy wolnej przestrzeni dla modeli matematycznych wykorzystujących parametryczną krzywą sklejaną typu B-spline;
- opracowanie oprogramowania wraz z graficznym interfejsem użytkownika GUI do szerokich badań algorytmów wyznaczania granic obszaru;
- zdefiniowanie wielu metryk służących do jakościowych i ilościowych porównań algorytmów wyznaczania granic obszaru;
- przeprowadzenie licznych testów skuteczności zaproponowanych modyfikacji algorytmów i szczegółową prezentację ich wyników w formie graficznej i tabelarycznej;
- wnikliwą dyskusję otrzymanych wyników badań.

5. UWAGI OGÓLNE I SZCZEGÓŁOWE

Praca została napisana w języku angielskim co jest godne pochwały, zwłaszcza w obszarze bardzo dynamicznie rozwijających się systemów wspomaganie kierowców. Zawiera również zgodnie z zaleceniem ustawowym streszczenie w języku polskim, chociaż trochę zbyt krótkie. W czasie lektury rozprawy zauważyłem nieliczne drobne błędy i niedociągnięcia językowe, ale nie czuję się na siłach aby bardziej wnikliwie ocenić poziom gramatyczny i stylistyczny angielskiego tekstu rozprawy. Dlatego pomijam ten aspekt w recenzji.

Nasunęło mi się natomiast kilka, na ogół dość drobnych wątpliwości i uwag natury ogólnej, wartych komentarza Doktoranta:

1. Do badań wybrano konkretne metody usprawnienia algorytmu referencyjnego w zakresie zmniejszenia liczby pomiarów (spośród pięciu omówionych w podrozdziale 4.4.2.2) oraz określania nowych skojarzonych punktów splajnu (spośród siedmiu podanych w podrozdziale 4.4.2.3). Czy Autor porównywał swój wybór z innymi spośród opisanych modyfikacji?
2. We wszystkich eksperymentach początkowe iteracje były pomijane do czasu uzyskania zbieżności. Jak ją definiowano i oceniano?
3. Czy wybór konkretnych wartości granicznych -30 oraz 30 we wzorach (4.4.52) i (4.4.53) jest krytyczny? Z czego wynikają właśnie takie wartości?
4. W podrozdziale 5.3 napisano, że parametry rozpatrywanych algorytmów wybrano arbitralnie i zoptymalizowano za pomocą algorytmu genetycznego. Nie podano jednak żadnych szczegółów tych działań.
5. W scenariuszach sztucznych przyjętych do badań zastosowano siatkę o rozdzielczości $0,2$ m i wymiarach 150 m x 150 m a w scenariuszu rzeczywistym 100 m x 100 m. Z czego wynikała ta różnica?
6. Czy test przetasowania danych pomiarowych opisany w podrozdziale 5.4.6 ma sens praktyczny? O ile szacunkowo wzrasta czas obliczeń i inne metryki dla proponowanego algorytmu w przypadku nieposortowanych pomiarów?
7. Wymienione w podrozdziale 6.2 możliwe kierunki dalszych modyfikacji algorytmu wydają się dość oczywiste, a równocześnie ważne z wdrożeniowego punktu widzenia. Które z zasygnalizowanych usprawnień algorytmu zdaniem Autora najbardziej rzutują na jego praktyczne wykorzystanie w kontekście całościowej efektywności systemów ADAS?

Redakcja i układ rozprawy są co do zasady bardzo staranne, wliczając w to liczne i czytelne kolorowe rysunki oraz tabele. Niektóre drobne niedociągnięcia lub pomyłki wymieniam poniżej, na przykład:

- w kilku przypadkach zauważyłem dziwną kolejność umiejscowienia rysunków w relacji do kolejności ich cytowania w tekście, np.: rys. 3.2 cytowany na str. 31 poprzedzony jest rysunkami 2.5 i 3.1; rys. 4.9 cytowany na str. 64 poprzedzony jest rysunkami 4.10 i 4.11; podobnie na str. 119, 120 kolejność cytowania rysunków 5.45 i 5.46 jest inna niż kolejność rysunków w tekście;
- legenda do wzorów (3.1.4) – (3.1.6) wyjaśnia wielkości, z których niektóre pojawiają się dopiero we wzorze (3.1.7) i tam są powtórnie opisane; z kolei niektóre wielkości ze wszystkich wymienionych wzorów nie są w ogóle zdefiniowane, np. $\text{variance } \sigma^2(y_{end})$; przydałby się rysunek poglądowy uzupełniający rys. 3.2b;
- niejasne i słabo wyjaśnione są niektóre oznaczenia we wzorach (4.2.6) – (4.2.12), np. podwójny indeks dolny funkcji bazowej $B_{i,k}^{[n]}(s)$;

Uwagi o charakterze ogólnym i zauważone błędy edycyjne w żadnym stopniu nie obniżają mojej pozytywnej oceny całości rozprawy a tym samym nie powodują konieczności jej zmian ani uzupełnień.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Mgr inż. Marek Szlachetka wykazał się szeroką ogólną wiedzą w zakresie rozwoju zaawansowanych systemów wspomagania kierowców, a zwłaszcza algorytmów śledzenia granic wolnej przestrzeni wokół samochodu. Zadanie naukowe określone w tytule i tezie rozprawy zostało jasno sformułowane a następnie poprawnie rozwiązane przy użyciu właściwej metodyki oraz potwierdzone na drodze licznych badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykonanych za pomocą właściwych narzędzi informatycznych i nowoczesnego sprzętu automatyki. Tym samym postawione w rozprawie cele zostały osiągnięte a teza udowodniona.

Uważam, że dokonania Doktoranta przedstawione w rozprawie stanowią zauważalny wkład w rozwój praktycznej implementacji skutecznych algorytmów aproksymacji granic wolnej przestrzeni. Potencjalnie spełniają również założenie projektu, w ramach którego prowadzony był doktorat, tj. praktycznego wdrożenia jego wyników. Autor rozprawy wykazał, że posiada niezbędną wiedzę w zakresie reprezentowanej dyscypliny oraz że ma wystarczające predyspozycje do prowadzenia badań.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Marka Szlachetki spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) stawiane rozprawom doktorskim w odniesieniu do dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Marka Szlachetki do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

