

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk

Instytut Telekomunikacji

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

mikolaj.leszczuk@agh.edu.pl

Kraków, dn. 8 kwietnia 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ WDROŻENIOWEJ

mgr inż. Łukasza Sobczaka

„Wykorzystanie symulacji komputerowej w systemach
autonomii pojazdów lądowych”

„Application of computer simulation in autonomy systems
of ground vehicles”

Promotor: dr hab. inż. Adam Domański, Prof. PŚ

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Politechnika Świętokrzyska

Dziedzina: Nauki Techniczne

Dyscyplina: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Problem badawczy objęty zakresem rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „Wykorzystanie symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych” autorstwa mgr inż. Łukasza Sobczaka, pod kierunkiem dr hab. inż. Adama Domańskiego, prof. Pol. Śl., ma na celu przedstawienie możliwości wykorzystania symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych. Praca skupia się na opracowaniu narzędzi i rozwiązań dotyczących implementacji systemów symulacji zarówno pojazdów autonomicznych, jak i sensorów stosowanych w systemach autonomii jazdy, a także na stworzeniu kompleksowego symulatora pojazdów autonomicznych WST (Wirtualny System Testujący). Autor postawił tezę, że możliwe jest dokonanie weryfikacji i ewaluacji algorytmów autonomii bez dostępu do fizycznego pojazdu poprzez odpowiednie przygotowanie systemu symulacji pojazdu i jego czujników.

Praca skupia się na zagadnieniach autonomii jazdy, takich jak lokalizacja i mapowanie otoczenia, percepcja otoczenia, wyznaczanie trasy przejazdu oraz nawigacja do celu, której opracowanie wymaga dostępu do platformy jezdnej, wielu rodzajów czujników oraz czasochłonnych testów wykonywanych w rzeczywistych warunkach. Autor proponuje wykorzystanie narzędzi i rozwiązań symulacyjnych do testowania algorytmów autonomii, bez konieczności korzystania z rzeczywistych pojazdów.

Autor poświęca dużą część badań na wykorzystanie opracowanego symulatora do ewaluacji działania algorytmu lokalizacji i mapowania SLAM (ang. *Simultaneous Localization And Mapping*), stanowiącego kluczową rolę niemal każdego systemu autonomicznej jazdy. Badania wykazują, że generowane z użyciem symulatora dane w znacznym stopniu

odpowiadają rzeczywistości, szczególnie dzięki symulacji charakterystycznych błędów i sumów danych sensorów.

Rozprawa doktorska ma ważne znaczenie dla rozwoju technologii autonomicznych pojazdów lądowych, zwłaszcza dla testowania i ewaluacji algorytmów autonomii jazdy. Autor zaproponował innowacyjne podejście do przetestowania algorytmów, które pozwala na uniknięcie konieczności korzystania z rzeczywistych pojazdów, co może znacznie zmniejszyć koszty i zwiększyć bezpieczeństwo w czasie badań. Praca jest dobrze zorganizowana i precyzyjna, a zaproponowane rozwiązania zostały przetestowane i porównane z istniejącymi rozwiązaniami. Niemniej jednak, recenzent zauważa, że nie zostały dostatecznie omówione ewentualne ograniczenia związane z wykorzystaniem symulatorów, takie jak np. brak dokładnego odwzorowania rzeczywistych warunków drogowych, a także potencjalne różnice między wynikami uzyskanymi na symulatorze a rzeczywistymi warunkami testowymi. Wskazanie na te kwestie w pracy mogłoby pomóc czytelnikom lepiej zrozumieć i ocenić wyniki badań.

Ocena organizacji rozprawy

Autor dokładnie przedstawił cele swojej pracy, metody badawcze oraz wyniki badań. Już we wstępie przedstawiono temat pracy jako aktualny i ważny ze względu na rozwój technologii autonomicznych pojazdów lądowych oraz na opracowane narzędzia i rozwiązania dotyczące systemów symulacji pojazdów autonomicznych, w tym kompleksowy symulator WST, które stanowią wartościowy wkład w rozwój tej dziedziny.

Następnie autor przeprowadził gruntowny przegląd literatury dotyczącej algorytmów autonomii jazdy i przedstawił narzędzia i rozwiązania, które pozwalają na weryfikację i ewaluację algorytmów autonomii bez dostępu do fizycznego pojazdu, co może zaoszczędzić dużo czasu i kosztów w badaniach nad autonomicznymi pojazdami lądowymi.

Same badania dotyczące skuteczności algorytmu lokalizacji i mapowania SLAM zostały dobrze przeprowadzone i przedstawione, a porównanie wyników z wykorzystaniem danych symulacyjnych i rzeczywistych dostarcza wartościowej wiedzy na temat dokładności danych symulacyjnych. Autor przeprowadził i przedstawił również badania dotyczące wpływu danych generowanych w symulatorze na jakość lokalizacji pojazdu, co jest istotne z punktu widzenia weryfikacji skuteczności algorytmów autonomii.

Organizacja rozprawy jest bardzo precyzyjna i logiczna, a jej spis treści uwypukla dokładny opis zagadnień związanych z autonomią jazdy, włącznie z omówieniem sensoryki i algorytmów autonomicznej jazdy, a także narzędzi symulacji systemów autonomicznych oraz wirtualnego systemu testującego. Przedstawione zagadnienia są logicznie ułożone i umieszczone w odpowiednich sekcjach, co ułatwia zrozumienie kolejności prezentowanych treści.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska jest bardzo dobrze zorganizowana i precyzyjna, a opis opracowanych narzędzi i rozwiązań symulacyjnych może przyczynić się do rozwoju dziedziny autonomii pojazdów lądowych.

Tezy i hipotezy rozprawy

W związku z tym, że praca dotyczy implementacji systemów symulacji pojazdów autonomicznych i sensorów używanych w systemach autonomii jazdy, a także umożliwia weryfikację i ocenę algorytmów autonomii bez potrzeby dostępu do fizycznego pojazdu, autor opracował narzędzia i środowisko symulacyjne do oceny algorytmów autonomii jazdy, które umożliwiają stworzenie kompleksowego symulatora pojazdów autonomicznych WST.

W pracy przedstawiono również zastosowanie symulatora w procesie doboru sensorów LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*), IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*) oraz odometrycznych dla wybranego algorytmu SLAM oraz możliwość wykorzystania narzędzia do testowania metod przetwarzania danych sensorycznych oraz tworzenia zbioru danych szkoleniowych dla modeli głębokiego uczenia się. Autor przedstawił również praktyczne zastosowanie symulatora do testowania algorytmów nawigacji autonomicznej oraz architekturę umożliwiającą testowanie systemu autonomii, w którym dane z rzeczywistych sensorów zastępowane są danymi symulacyjnymi.

Dlatego ponownie należy podkreślić, że rozprawa Łukasza Sobczaka stanowi istotny wkład w dziedzinie zastosowania symulacji w pracy nad pojazdami autonomicznymi. Może ona stanowić inspirację dla przyszłych badań w tej dziedzinie, a opracowane narzędzia i rozwiązania zapewniają mocne podstawy do przeprowadzenia dalszych analiz i badań.

Oryginalne wyniki rozprawy ich znaczenie dla dyscypliny naukowej

Rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Łukasza Sobczaka jest ważnym wkładem w dziedzinę autonomii pojazdów lądowych. Autor przedstawił szereg metod i narzędzi symulacyjnych, które umożliwiają ewaluację wybranych algorytmów autonomii jazdy dla różnych rodzajów pojazdów robotycznych. Praca ta jest szczególnie ważna ze względu na fakt, że testowanie i ocena algorytmów autonomii w rzeczywistych warunkach może być czasochłonne i kosztowne. Symulacje komputerowe umożliwiają szybkie i efektywne testowanie algorytmów, co może znacznie przyspieszyć rozwój tej dziedziny.

Jednym z najważniejszych wniosków, jakie można wyciągnąć z rozprawy doktorskiej, jest to, że symulacje komputerowe mogą być bardzo pomocne w ewaluacji algorytmów autonomii jazdy. Przeprowadzone przez autora badania wykazały, że generowane przez symulator dane w znacznym stopniu odpowiadają rzeczywistości, dzięki symulacji charakterystycznych błędów i szumów danych sensorów. Wyniki porównania wartości błędu lokalizacji wybranego algorytmu SLAM korzystającego z rzeczywistych i syntetycznych danych są bardzo obiecujące i wskazują, że symulacje komputerowe mogą być skuteczną metodą testowania algorytmów autonomii jazdy.

Autor przedstawił otrzymane wyniki oraz zaproponowane metody i potencjalne możliwości ich zastosowania w praktyce w kilku publikacjach, w tym w międzynarodowych czasopismach:

1. Filus K., Sobczak Ł., Domańska J., Domański A., Cupek R., *Real-time testing of vision-based systems for AGVs with ArUco markers*, IEEE International Conference on Big Data, Japan 2022. 70 punktów.
2. Sobczak Ł., Filus K., Domańska J., Domański A., *Finding the best hardware configuration for 2D SLAM in indoor environments via simulation based on Google Cartographer*, Scientific Reports, 12 (1), 2022. 140 punktów.
3. Sobczak Ł., Filus K., Domańska J., Domański A., *Building a Real-Time Testing Platform for Unmanned Ground Vehicles with UDP Bridge*, Sensors, 22 (21), 2022. 100 punktów.
4. Sobczak Ł., Filus K., Domański A., Domańska J., *LiDAR Point Cloud Generation for SLAM Algorithm Evaluation*, Sensors, 21 (10), 2021. 100 punktów.
5. Sobczak Ł., Bijok Ł., *Indoor positioning methods for small autonomous vehicles*, Fast Tracked Vehicles, 51 (1), 2019. 0 punktów.
6. Kurzeja A., Sobczak Ł., *Simulation systems for Unmanned Aerial Vehicles*, The Scientific Journals of the University of Technology in Katowice, 10, 2018. 0 punktów.

Podsumowując, rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Łukasza Sobczaka, dotycząca wykorzystania symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych, wnosi

W wyniku powyższego autor postawił tezę, że możliwe jest przygotowanie systemu symulacji pojazdu i jego czujników w sposób pozwalający na weryfikację i ocenę algorytmów autonomii bez potrzeby dostępu do fizycznego pojazdu. Narzędzia i rozwiązania przygotowane przez autora umożliwiły stworzenie kompleksowego symulatora pojazdów autonomicznych, który zapewnia dużą wydajność działania, wysoką jakość generowanych danych sensorycznych, zachowując działanie w czasie rzeczywistym, a także umożliwia wymianę danych między rzeczywistymi a symulowanymi czujnikami dzięki zastosowaniu wspólnej reprezentacji danych i formatu zgodnego z rzeczywistymi urządzeniami. Ponadto, symulator umożliwia zbieranie danych pozwalających na ocenę zasadności użycia poszczególnych sensorów i ich wyboru wraz z fizyczną lokalizacją na danym pojeździe.

Hipoteza, że dane generowane z użyciem symulatora w znacznym stopniu odpowiadają rzeczywistości, jest dobrze uzasadniona przez autora pracy. Przeprowadzone badania wykazały, że dane generowane z użyciem symulatora dość dobrze odpowiadają rzeczywistości dzięki symulacji charakterystycznych błędów i szumów danych sensorów. Pozwoliło to porównać skuteczność wyznaczania pozycji oraz jakość generowanej mapy otoczenia z użyciem danych symulacyjnych w stosunku do tych dostarczanych przez fizyczne urządzenie. Następnie, w pewnym zakresie, porównano wartości błędu lokalizacji wybranego algorytmu SLAM korzystającego z rzeczywistych i syntetycznych danych, co pozwoliło zbadać wpływ zastosowania danych generowanych w symulatorze na jakość lokalizacji pojazdu.

Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki)

Autor przeprowadził szczegółowy przegląd literatury związanej z algorytmami autonomii jazdy, włączając wiele wartościowych źródeł dotyczących badań nad samochodami autonomicznymi. Bibliografia zawiera wiele artykułów i raportów z renomowanych konferencji i czasopism, które obejmują szeroki zakres tematów związanych z nawigacją i łączeniem sensorów w pojazdach autonomicznych. Przywołane źródła dostarczają kontekstu i wglądu w historię badań nad autonomicznymi pojazdami, podkreślając kluczowe zagadnienia związane z percepcją otoczenia, nawigacją i wyznaczaniem trasy przejazdu, które są niezbędne do osiągnięcia autonomicznej jazdy. Tło literaturowe wskazuje, że system symulacji pojazdów autonomicznych opracowany przez autora jest kompleksowy i umożliwia symulację wielu rodzajów czujników stosowanych w systemach autonomii jazdy. Wszystkie narzędzia i rozwiązania przedstawione w pracy są bardzo dobrze opisane w porównaniu do rozwiązań opisanych w literaturze, co ułatwia zrozumienie wartości ich działania. Przywołane pozycje piśmiennictwa sugerują, że autor dokładnie zbadał temat i zgromadził istotne informacje z różnych źródeł, co zapewnia mocne podstawy do przeprowadzenia analizy literatury w rozprawie.

Poprawność pracy

Pod względem naukowym praca doktorska Łukasza Sobczaka jest bardzo solidna i zawiera interesujące wnioski oraz propozycje. Autor dokładnie przeanalizował literaturę i opracował narzędzia umożliwiające testowanie algorytmów autonomii dla BPL (Bezzałogowych Platform Lądowych, ang. *Unmanned Land Platforms*) oraz innych pojazdów robotycznych. Głównym celem pracy było opracowanie symulatora pojazdu autonomicznego WST, który umożliwia weryfikację i ocenę algorytmów autonomii bez konieczności dostępu do fizycznego pojazdu. Praca skupia się głównie na symulacji lokalizacji i mapowania środowiska przy użyciu algorytmu SLAM. Autor przeprowadził testy, które pokazały, że symulacja jest wiarygodna, a wartości błędów lokalizacji pojazdu są zazwyczaj porównywalne z danymi rzeczywistymi.

istotny wkład w rozwój tej dziedziny. Zaprezentowane przez autora metody i narzędzia symulacyjne mogą przyspieszyć testowanie i ocenę algorytmów autonomii jazdy, co ma kluczowe znaczenie dla rozwoju nowoczesnych pojazdów robotycznych. Otrzymane wyniki oraz opublikowane artykuły stanowią cenne źródło wiedzy dla naukowców i inżynierów zajmujących się tematyką autonomii pojazdów lądowych.

Poziom edycyjny rozprawy

Poziom edycyjny niniejszej rozprawy w znakomitej większości zasługuje na pochwałę. Autor właściwie opisuje i ilustruje ważne i aktualne zagadnienie rozwoju technologii autonomii pojazdów lądowych. Podobnie prawidłowo edycyjnie przedstawiono część pracy, w której autor udowadnia postawioną przez siebie tezę, że możliwe jest przygotowanie symulatora pojazdu i jego czujników w sposób pozwalający na weryfikację i ewaluację algorytmów autonomii bez dostępu do fizycznego pojazdu. Prawidłowo opisany i zilustrowany został opracowany przez autora symulator, który pozwala na testowanie i ocenę metod automatyzacji jazdy dla pojazdów typu BPL o niemal dowolnych rozmiarach, przeznaczeniu i konfiguracji napędu. Praca autora w dziedzinie badań nad autonomią pojazdów jest pod względem edycyjnym wartościowa i solidna, co widać w pracy nie tylko dzięki opisowi przeprowadzonych badań, ale także i dzięki opisanemu w poprzedniej sekcji przeglądowi literatury.

Tekst rozprawy nie tylko został starannie skomponowany i składany w sposób przejrzysty i czytelny (co świadczy o wysokiej dbałości o szczegóły edycyjne i profesjonalizm), ale także i starannie zilustrowany. Ilustracje, z wyjątkiem rysunków 2.5, 4.1, 4.11, 5.18 i 6.1, prezentują wysoką jakość, co ułatwia zrozumienie przedstawionych zagadnień. Rysunek 2.5, choć niskiej jakości, nadal jest szczególnie wartościowy jako źródło informacji (rysunek ten pochodzi z publikacji [47]). Niestety, rysunki 4.1, 4.11, 5.18 i 6.1, które wydają się być autorstwa doktoranta, są nieco gorszej jakości niż pozostałe ilustracje. Niemniej jednak, ogólna estetyka i czytelność tekstu są na bardzo wysokim poziomie, co pozytywnie wpływa na odbiór pracy.

Podsumowanie wad i słabych stron rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Sobczaka dotycząca wykorzystania symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych jest wyczerpującą pracą, ale posiada kilka wad i słabych stron.

Jedną z wad jest brak wystarczających informacji na temat innych badanych zagadnień i ich wyników. Chociaż w pracy podano pewne informacje, to jednak nie zostało dokładnie opisane, jakie algorytmy autonomii jazdy zostały zbadane, ani jakie dokładnie były wyniki tych badań. Brak wyczerpujących informacji na temat tych zagadnień może wpłynąć na niedoskonałość opracowania i brak wyczerpującej oceny jego wartości naukowej.

Kolejną słabością rozprawy jest brak szczegółowych informacji na temat metodyki badań. Nie wiadomo dokładnie, jakie kryteria zostały przyjęte do porównania skuteczności różnych algorytmów autonomii jazdy, a także jak dokładnie należy interpretować wyniki, które zostały uzyskane w tych badaniach.

Recenzent zauważa również, że nie zostały wystarczająco omówione ewentualne ograniczenia związane z wykorzystaniem symulatorów oraz potencjalne różnice między wynikami uzyskanymi na symulatorze a rzeczywistymi warunkami testowymi.

Niestety, rysunki 4.1, 4.11, 5.18 i 6.1, które wydają się być autorstwa doktoranta, są nieco niższej jakości niż pozostałe ilustracje.

Mimo tych wad, praca jest wartościowa ze względu na obszerny przegląd literatury oraz przeprowadzone badania i ich wyniki, które pokazują możliwości wykorzystania symulacji komputerowej w systemach autonomii pojazdów lądowych. Jednakże, uzupełnienie pracy o szczegółowe informacje na temat badanych zagadnień i metodyki badań, a także omówienie potencjalnych ograniczeń związanych z wykorzystaniem symulatorów, poprawiłoby wartość naukową pracy.

Końcowe wnioski recenzji (konkluzja)

Pomimo powyższych wad i słabych stron rozprawy, oświadczam, że:

1. Cel rozprawy został generalnie osiągnięty. Analiza wyników eksperymentów badawczych, przeprowadzonych podczas badań do niniejszej rozprawy, które zostały opublikowane w czasopismach naukowych oraz zaprezentowane na międzynarodowej konferencji naukowej, potwierdzają słuszność postawionych w rozprawie tez.
2. Osiągnięcia doktoranta zostały ujęte w rozprawie, która jest oryginalną odpowiedzią na problem naukowy z dziedziny nauk technicznych, z dyscypliny informatyki technicznej i telekomunikacji.
3. Tematyka rozprawy jest wyraźnie znana doktorantowi, o czym świadczy dobór materiału i jego analiza. W bazach publikacji (a także w wykazie literatury zawartym w treści rozprawy) znajdują się artykuły ściśle związane z tematem rozprawy, których współautorem jest autor rozprawy, wskazujące, że doktorant ma wcześniejszy dorobek naukowy na tym polu.
4. Rozprawa dodatkowo pokazuje zdolność doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań.

Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw z 2003 r. numer 65, pozycja 595, art. 13, ust. 1) stanowi:

Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub artystycznego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

Na podstawie punktów 1, 2, 3 i 4 podsumowania niniejszej recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Łukasza Sobczaka rozprawa doktorska spełnia wymagania warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o przyjęcie w/w rozprawy doktorskiej i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Jednocześnie pragnę zauważyć, że doktorant (we współautorstwie) opublikował 6 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych ujętych w Wykazie czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych wraz z przypisaną liczbą punktów Ministerstwa Nauki i Edukacji, z których kilka artykułów zostało opublikowanych w międzynarodowych czasopismach naukowych o niebagatelnej wartości punktowej (według wskaźników Ministerstwa Nauki i Edukacji).

Spełnia to z nadmiarem wymagania dotyczące wyróżniania prac doktorskich, które to wymagania zostały określone przez Radę Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej.

W świetle wspomnianych bowiem zasad, „doktorant powinien być autorem/współautorem przynajmniej dwóch publikacji związanych z tematyką rozprawy i opublikowanych lub przyjętych do druku z nadanym numerem DOI w czasopismach z listy A MNiSW”.

Biorąc więc pod uwagę powyższe ustalenia, a także wysoką aktualność i nowoczesność podjętej tematyki, wysoką wartość uzyskanych wyników, wysoki poziom naukowy rozprawy, a także staranność jej przygotowania i relatywnie wysoki poziom edycyjny, formułuję wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej przedstawionej przez Pana mgr inż. Łukasza Sobczaka.

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk