

dr hab. inż. Krzysztof Zatwarnicki, prof. uczelni
Wydział Informatyki
Politechnika Opolska

Opole, 12.11.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Biernackiego

**pt. „Metody wspomagające precyzję dokowania systemów AGV
do stanowiska montażowego”**

opracowana na zlecenie

Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Politechniki Śląskiej

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy metod zwiększających precyzję dokowania autonomicznych pojazdów kierowanych (AGV – Automated Guided Vehicles) do stanowisk montażowych. Problem precyzyjnego dokowania systemów AGV jest ważnym wyzwaniem w obszarze automatyzacji procesów produkcyjnych i logistyki w nowoczesnych zakładach przemysłowych.

Na skuteczność dokowania wpływają błędy pomiarowe czujników odległości, zarówno systematyczne, jak i losowe. Równie istotna jest jakość odometrii, która w czasie przejazdu AGV akumuluje błędy systematyczne prowadzące do dryfu pozycji. Ponadto charakterystyka ruchu w środowisku przemysłowym jest dynamiczna i zmienna, co dodatkowo utrudnia osiągnięcie wysokiej powtarzalności dokowania.

Doktorant zajął się w pracy kompleksowym podejściem do problemu precyzyjnego dokowania AGV. Zagadnienie to nie jest całkowicie nowe, gdyż od wielu lat prowadzone są badania nad metodami kalibracji czujników oraz systemami pozycjonowania. Należy jednak zauważyć, że wymagania stawiane systemom AGV zmieniają się nieustannie. Jednym z kluczowych trendów jest rozwój koncepcji Przemysłu 4.0, która zakłada

elastyczność linii produkcyjnych i możliwość szybkiej rekonfiguracji procesów. Większość dotychczasowych rozwiązań wymaga jednak znaczących modyfikacji infrastruktury hali produkcyjnej. Takie podejście ogranicza elastyczność systemu i generuje wysokie koszty przy zmianach konfiguracji stanowisk.

Praca doktorska dotycząca metod wspomagających precyzję dokowania systemów AGV do stanowiska montażowego odnosi się do aktualnej problematyki zwiększania precyzji dokowania przy wykorzystaniu wyłącznie zasobów pokładowych AGV, bez konieczności rozbudowy systemu o dodatkowe podsystemy percepcji. Szerokie spektrum problemów poruszonych w pracy, jak również aktualność tematyki oraz jej znaczenie praktyczne wskazują, że zainicjowane w pracy badania mogą być kontynuowane w przyszłości i znaleźć zastosowanie w przemyśle.

2. Cel i tezy badawcze rozprawy

Praca Pana mgr inż. Piotra Biernackiego jest wynikiem studiów prowadzonych przez Doktoranta nad zagadnieniami zwiększania precyzji dokowania systemów AGV, realizowanych w ramach międzynarodowego projektu CoBotAGV (Automated Guided Vehicles integrated with Collaborative Robots for Smart Industry Perspective).

Przedmiotem badań zaprezentowanych w pracy było opracowanie kompleksowego rozwiązania umożliwiającego precyzyjne dokowanie AGV z wykorzystaniem wyłącznie czujników pokładowych (LiDAR 2D, odometria), bez konieczności tworzenia mapy środowiska.

W dysertacji, na stronie 3, zdefiniowano następujące tezy badawcze:

1. Zastosowanie metod kalibracji pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów z czujników.
2. Zastosowanie metod filtracji pozwala na zwiększenie precyzji pomiarów z czujników.
3. Zastosowanie znacznika przestrzennego pozwala na dokładne pozycjonowanie stanowiska montażowego.
4. Zastosowanie metod zmniejszających błędy pomiarowe zwiększa dokładność dokowania.

Celem pracy było opracowanie metod wpływających na zwiększenie precyzji dokowania systemów AGV do wymaganego punktu dla danego stanowiska montażowego, poprzez zwiększenie precyzji i dokładności podsystemów pomiarowych oraz zastosowanie metody pozycjonowania na bazie znacznika przestrzennego.

Zagadnienia naukowe, jakie Autor postawił sobie do rozwiązania, zostały sformułowane poprawnie. Należy jednak zauważyć, że wymienione w pracy „tezy” mają w istocie charakter hipotez badawczych, które następnie są weryfikowane eksperymentalnie.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa składa się z dziesięciu rozdziałów, bibliografii oraz trzech załączników. Ogólna objętość rozprawy to 172 strony.

Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac konstrukcyjno-eksperymentalnych. Doktorant osiągnął stopień opanowania teorii w zakresie systemów AGV, czujników odległości, metod kalibracji oraz filtracji sygnałów pomiarowych, a także systemów pozycjonowania opartych na znacznikach.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowany cel oraz postawione tezy (rozdział 1).

W rozdziale drugim Autor przedstawił szczegółową analizę zagadnienia. Omówił metody kalibracji czujników odległości (ultradźwiękowych oraz typu LiDAR 2D), metody filtracji pomiarów, kalibrację odometrii oraz systemy pozycjonowania stosowane w procesie dokowania. Zaprezentowany stan wiedzy świadczy o znajomości badanych zagadnień. Przegląd literatury jest obszerny.

Rozdział trzeci poświęcony jest właściwościom czujników odległości. Autor szczegółowo omówił zasady działania czujników laserowych (LiDAR) oraz ultradźwiękowych, a następnie przeprowadził badania charakterystyki pomiarowej różnych typów czujników odległości. Badania te stanowią podstawę dla dalszych prac nad metodami kalibracji.

Rozdział czwarty zawiera opis opracowanych metod kalibracji czujników odległości. Autor zaproponował metody kalibracji statystycznej: kalibrację jednosekcyjną, adaptacyjną kalibrację (ACM) oraz adaptacyjną kalibrację z filtracją medianową (MSCwMF). Dodatkowo Autor opracował metody kalibracji z wykorzystaniem uczenia maszynowego: kalibrację naturalną (NC) oraz kalibrację resztową (RC), które pozwoliły obniżyć błędy pomiarowe poniżej 1 mm. Prezentowane wyniki wskazują na wartość praktyczną opracowanych metod.

W rozdziale piątym Autor omówił metody filtracji pomiarów odległości, w szczególności filtrację za pomocą średniej ruchomej oraz filtrację medianową. Przedstawiono wyniki badań wpływu tych metod na pomiary odległości.

Rozdział szósty poświęcony jest kalibracji odometrii. Autor opracował metody oceny jakości odometrii w ruchu liniowym oraz obrotowym. Na tej podstawie zaproponował metodę kalibracji odometrii w ruchu obrotowym (2DLAT), wykorzystującą dane ze skalibrowanego LiDAR-u 2D w celu ograniczania kumulacji błędów systematycznych.

W rozdziale siódmym Autor zaproponował refleksyjny znacznik przestrzenny z kodami refleksyjnymi (2DM-RC) oraz metodę jego detekcji i identyfikacji na podstawie danych z LiDAR-u 2D. Znacznik ten wykorzystuje zarówno pomiary odległości, jak i intensywność odbitych wiązek laserowych. Dzięki refleksyjnej strukturze na segmentach znacznika możliwe jest równoczesne rozpoznanie elementów stanowiska montażowego oraz wyznaczenie jego pozycji i orientacji względem AGV. Jest to wartościowe osiągnięcie.

Rozdział ósmy opisuje architekturę systemu kontroli oraz akwizycji danych, opartą na platformie ROS (Robot Operating System). Autor przedstawił sposób integracji wszystkich opracowanych metod w spójny system oraz opisał komunikację z platformą mobilną.

Rozdział dziewiąty zawiera opis procedury dokowania platformy mobilnej oraz wyniki badań eksperymentalnych. Autor przeprowadził szereg eksperymentów sprawdzających jakość dokowania AGV przy różnych wariantach konfiguracji (z kalibracją i bez kalibracji, z różnymi metodami). Opracowano także metodę weryfikacji pozycji AGV po zadokowaniu.

Pracę kończy rozdział dziesiąty, który stanowi podsumowanie rozprawy. Autor wskazał, że wszystkie postawione tezy zostały potwierdzone, a cel pracy został osiągnięty.

Na podstawie przedstawionego omówienia treści rozprawy należy odnotować, że Autor wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowo-technicznych oraz rozwiązał postawiony problem z zastosowaniem właściwych metod badawczych.

Oceniając pracę należy stwierdzić, że została ona wykonana na poziomie odpowiednim dla pracy doktorskiej w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Wnosi ona oryginalny wkład naukowy. Należy również odnotować praktyczne znaczenie opracowanych rozwiązań.

Do osiągnięć prezentowanych w rozprawie można zaliczyć:

- Opracowanie zestawu metod kalibracji czujników odległości.
- Opracowanie metody kalibracji odometrii w ruchu obrotowym.
- Opracowanie refleksyjnego znacznika przestrzennego z kodami refleksyjnymi wraz z metodami jego detekcji i identyfikacji.

- Zintegrowanie opracowanych komponentów w spójny system dokowania oparty na platformie ROS.
- Eksperymentalne potwierdzenie skuteczności opracowanych metod na prototypowej platformie AGV.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

Praca została napisana poprawnym językiem polskim z zachowaniem należytej staranności. Struktura rozprawy jest logiczna i przejrzysta.

W trakcie lektury pracy pojawiło się kilka uwag:

Uwaga 1: Wymienione w pracy „tezy” mają w istocie charakter hipotez badawczych. W metodologii naukowej teza to stwierdzenie, które jest przedmiotem dowodu lub uzasadnienia, podczas gdy hipoteza to przypuszczenie, które jest weryfikowane w toku badań. Przedstawione stwierdzenia są weryfikowane eksperymentalnie, co odpowiada definicji hipotezy badawczej.

Uwaga 2: W podrozdziale 2.2 użyto sformułowania „Filtracja czujników odległości”, które może być mylące, gdyż sugeruje, że filtracji podlegają same urządzenia, a nie ich sygnały wyjściowe. Poprawniejsze byłoby sformułowanie „Filtracja pomiarów czujników odległości” lub „Filtracja sygnałów z czujników odległości”.

Uwaga 3: W kontekście omawianych metod filtracji (średnia ruchoma, filtracja medianowa) brakuje szerszego omówienia wpływu ruchu platformy AGV na skuteczność tych metod. Metody filtracji operują na oknie czasowym, podczas gdy AGV znajduje się w ruchu, co wprowadza dodatkową zmienność zarówno w pomiarach odległości, jak i kąta. Szczególnie interesujące byłoby omówienie, jak dynamika ruchu AGV (prędkość liniowa i kątowa, przyspieszenia) wpływa na optymalne dobieranie parametrów filtracji oraz jak radzić sobie z artefaktami powstającymi podczas szybkich manewrów.

Uwaga 4: W pracy dominują wyniki odnoszące się do konkretnych czujników (Sick microScan3, RSL425, RPL A1, RPL A2) oraz konkretnej platformy AGV (Formica 3). Brakuje nieco uogólnionych wniosków o charakterze ogólnym, niezależnych od konkretnego sprzętu. Takie uogólnienia zwiększyłyby wartość naukową pracy, wskazując na możliwości zastosowania opracowanych metod w szerszym kontekście systemów AGV i różnych typów czujników.

Uwaga 5: We wstępie do rozdziału 8.2 używane są liczne skróty (PLC, SBC, IPC, AGV, ROS), których rozwinięcia pojawiają się dopiero w dalszej części tekstu. Znacznie utrudnia to czytanie i wymaga wielokrotnego powracania do wcześniejszych fragmentów. Wskazane byłoby wprowadzenie wszystkich kluczowych skrótów przy ich

pierwszym użyciu lub umieszczenie ich definicji w wyraźnie zaznaczonym miejscu na początku podrozdziału.

Uwaga 6: W podrozdziałach 8.2.1 i 8.2.2 przedstawiono szczegółowe opisy struktur ramek danych przesyłanych między systemem ROS a sterownikiem PLC (tabele ze strukturami pakietów, numery bajtów, typy danych). Opisy te mają charakter implementacyjny i dokumentacyjny. Warto rozważyć, jaki konkretny wkład do rozprawy naukowej wnoszą te szczegóły techniczne, które nie odnoszą się bezpośrednio do postawionych tez badawczych ani nie stanowią elementu metodologii naukowej.

Uwaga 7: We wstępie do rozdziału 9 przedstawiono założenia procedury dokowania. W punkcie pierwszym wskazano, że AGV jest wyposażone w zamontowany robot kolaboracyjny. Nie jest jednak wyjaśnione, jaki wpływ ma obecność tego robota na proces dokowania. Czy jego masa i rozmieszczenie wpływa na charakterystyki dynamiczne AGV? Czy obecność manipulatora wpływa na pole widzenia czujników lub charakterystyki odometrii? Wyjaśnienie tego aspektu pomogłoby zrozumieć uzasadnienie wymienienia tego elementu w założeniach.

Poza wskazanymi uwagami, stwierdzam, że język pracy jest poprawny, a sama praca została napisana z zachowaniem staranności.

Przedstawione powyżej uwagi nie obniżają mojej oceny pracy, lecz wskazują na możliwe kierunki dopracowania niektórych aspektów.

W trakcie zapoznawania się z treścią pracy nasunęło mi się kilka pytań, do których prosiłbym o komentarz ze strony Doktoranta:

1. Znacznik 2DM-RC wykorzystuje właściwości refleksyjne powierzchni. Jak zachowuje się system w środowisku, gdzie występują naturalne powierzchnie o wysokiej refleksyjności (np. błyszczące elementy metalowe, lustra, szyby)? Czy mogą one powodować fałszywe detekcje? Jakie mechanizmy weryfikacji zastosowano, aby uniknąć tego problemu?
2. W jaki sposób system radzi sobie z częściowym zasłonięciem znacznika 2DM-RC przez przeszkody? Jaki jest minimalny widoczny fragment znacznika wymagany do poprawnej identyfikacji?
3. W kontekście diskutowanego we wcześniejszych uwagach wpływu ruchu AGV na filtrację – jak prędkość i przyspieszenia platformy wpływają na dobór parametrów filtracji? Czy przeprowadzono badania w tym zakresie?

5. Ocena dorobku publikacyjnego

Dorobek publikacyjny Doktoranta przedstawiony w rozprawie obejmuje 12 publikacji naukowych oraz 1 patent. Wśród publikacji znajdują się 4 artykuły w czasopismach międzynarodowych (po 100 punktów), 5 publikacji konferencyjnych w konferencjach (po 70 punktów), 1 publikacja konferencyjna za 140 punktów.

W przypadku dwóch publikacji Doktorant jest pierwszym autorem, obie dotyczą bezpośrednio problematyki kalibracji czujników odległości, w tym z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Doktorant jest również współautorem patentu dotyczącego sposobu kalibracji układu sterowania osią skrętną autonomicznego pojazdu kołowego (nr 241075 z 2022 roku).

Tematyka publikacji bezpośrednio odnosi się do problematyki rozprawy doktorskiej, w szczególności do zagadnień kalibracji czujników odległości z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

6. Konkluzja recenzji

Podsumowując, rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Biernackiego rozwiązuje w sposób kompetentny istotny problem w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Jakość rozwiązania, sprawdzona eksperymentalnie na prototypowej platformie AGV, potwierdza wartość opracowanych metod. Doktorant umiejętnie korzysta z literatury i wykazuje się znajomością problematyki.

W związku z tym oceniam rozprawę pozytywnie.

Stwierdzam, że rozprawa pt. „Metody wspomagające precyzję dokowania systemów AGV do stanowiska montażowego” autorstwa Pana mgr inż. Piotra Biernackiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz o Stopniach i Tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595) oraz Rozporządzenia MNiSW z dnia 19 stycznia 2018 roku. W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy, jako rozprawy doktorskiej w dziedzinie nauk technicznych, dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. Piotra Biernackiego do publicznej obrony pracy.