

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk, prof. AGH

Kraków, 23 października 2025 r.

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Instytut Telekomunikacji

al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

mikolaj.leszczuk@agh.edu.pl

RECENZJA

mgr inż. Piotr Biernacki

„Metody wspomagające precyzję dokowania systemów AGV
do stanowiska montażowego”

Promotor: dr hab. inż. Adam Ziębiński, prof. PŚ
Politechnika Śląska

Znaczenie rozprawy

Rozprawa podejmuje aktualny i istotny problem inżynierski: jak zapewnić wysoką dokładność i powtarzalność dokowania platform AGV (ang. *Automated Guided Vehicle*) do stanowisk montażowych w warunkach przemysłowych, przy jednoczesnym zachowaniu elastyczności typowej dla Przemysłu 4.0. Autor trafnie identyfikuje ograniczenia rozwiązań wymagających stałej ingerencji w infrastrukturę (taśmy magnetyczne, beacons, znaczniki wizyjne), które utrudniają rekonfigurację linii i podnoszą koszty utrzymania. Proponowane ujęcie – oparcie całej procedury na zasobach pokładowych AGV (LiDAR – ang. *Light Detection and Ranging*, 2D – ang. *two dimensional*, odometria) i ich efektywnej integracji – jest dobrze umotywowane zarówno potrzebami wdrożeniowymi, jak i trendami automatyzacji intra-logistyki.

Centralny wkład stanowi spójny łańcuch metod prowadzących do precyzyjnego dokowania: (i) refleksyjny znacznik przestrzenny 2DM-RC (ang. *2D Marker with Reflective Codes*) oraz algorytmy jego detekcji i identyfikacji na podstawie odległości i intensywności wiązek LiDAR 2D, umożliwiające jednoczesne rozpoznanie elementów stanowiska i estymację ich położenia oraz orientacji względem AGV; (ii) kalibracja i filtracja pomiarów czujników odległości (m.in. ACM – ang. *Adaptive Calibration Method*, MSCwMF – ang. *Multi Section Calibration with Median Filtration*, oraz warianty uczenia maszynowego NC – ang. *Naive Calibration/RC* – ang. *Residual Calibration*), redukujące błędy do poziomu poniżej 1 mm; (iii) metoda kalibracji odometrii w ruchu obrotowym (2DLAT, ang. *2D LiDAR Alignment Test*) ograniczająca akumulację błędów systematycznych; (iv) integracja całości w systemie opartym na ROS (ang. *Robot Operating System*), obejmująca również automatyczną weryfikację po zadokowaniu. Taki zestaw narzędzi ma bezpośrednią użyteczność: pozwala re-kalibrować tor dojazdu „w locie”, kompensować dryf odometrii i uzyskiwać stabilny punkt dokowania bez modyfikacji infrastruktury hali.

Wartość praktyczna została potwierdzona eksperymentalnie na przemysłowej platformie Formica 3 (AIUT). Wyniki wskazują, że kalibracja czujników i odometrii istotnie podnosi dokładność osiąganego punktu, ciągła re-kalibracja względem 2DM-RC skutecznie ogranicza skumulowane błędy odometrii, a weryfikacja po zadokowaniu umożliwia wyznaczenie korekt dla dalszych operacji robota współpracującego. Z punktu widzenia integratorów i utrzymania

ruchu oznacza to wiarygodny, mierzalny zysk w dokładności bez kosztownej przebudowy stanowisk.

Znaczenie naukowe polega na przejściu od izolowanych testów komponentów do oceny i projektowania kompletnej procedury dokowania opartej na powiązaniu: kalibracji sensorów, lokalizacji względem znacznika i sterowania końcowej fazy dojazdu. Rozwiązanie może pełnić rolę szablonu dla dalszych badań porównawczych oraz audytów wdrożeniowych. W perspektywie rozwinięcia autor mógłby jeszcze wyraźniej skwantyfikować budżet niepewności i czułość procedury na parametry sprzętowe (np. rozdzielczość kątowna LiDAR-u) oraz geometrię znacznika – co jest zasadne, skoro minimalne długości segmentów 2DM-RC i liczba „trafień” wiązek wynikają bezpośrednio z tych parametrów. Takie doprecyzowanie dodatkowo wzmocniłoby re-używalność metody w zróżnicowanych konfiguracjach AGV.

Problem badawczy

Współczesne systemy AGV w intra-logistyce i montażu składają się z wielu współzależnych elementów: czujników odległości (w tym LiDAR 2D), odometrii kół, algorytmów filtracji/kalibracji, nawigacji i sterowania fazą dojazdu, a w wariacie cobotowym – z koniecznością utrzymania spójnego układu odniesienia robota współpracującego względem stanowiska. Brakuje jednak procedury, która – przy narzuconych ograniczeniach projektowych – pozwalałaby w sposób powtarzalny i ilościowo weryfikowalny osiągać wysoką dokładność dokowania bez dobudowy zewnętrznej infrastruktury (map, beaconów, znaczników wizyjnych). W projekcie CoBotAGV (ang. *Collaborative Robot with Automated Guided Vehicle*) przyjęto dodatkowo restrykcję korzystania wyłącznie z zasobów pokładowych AGV (LiDAR 2D i odometria), przy zachowaniu elastyczności linii zgodnie z założeniami Przemysłu 4.0, co utrudnia postawione zadanie badawcze.

Trudności praktyczne wynikają z rozbieżnych celów i źródeł niepewności: wysoka dokładność i powtarzalność dokowania muszą współistnieć z czasem cyklu i dostępnością, a heterogeniczne podsystemy wprowadzają błędy systematyczne i szumy (dryf odometrii, niedoskonałości pomiarów odległości, wrażliwość na warunki środowiskowe). Każde rozwiązanie wymaga więc jawnych zasad kalibracji i filtracji oraz „śladu audytowego”, pozwalającego prześledzić, w jaki sposób dane surowe prowadzą do decyzji sterowania w końcowej fazie dojazdu.

Na tym tle rozprawa formułuje problem następująco: (i) zidentyfikować cele operacyjne dokowania (dokładność i powtarzalność osiągnięcia wymaganego punktu, odporność na błędy czujników, brak mapy), (ii) dobrać do nich operacyjne metody ograniczania niepewności pomiarowej, (iii) ujednolicić i zintegrować te metody w spójnym łańcuchu przetwarzania danych na pokładzie AGV. Realizacji służy zestaw rozwiązań: adaptacyjne metody kalibracji czujników odległości (ACM, MSCwMF, a także warianty z ML: NC i RC), kalibracja odometrii w ruchu obrotowym 2DLAT, autorski refleksyjny znacznik przestrzenny 2DM-RC z detekcją/identyfikacją na bazie odległości i intensywności wiązek LiDAR 2D oraz integracja w architekturze ROS obejmująca również automatyczną weryfikację pozycji po zadokowaniu.

Kwestie odtwarzalności i weryfikowalności rozwiązano przez jednoznaczne procedury kalibracyjne/filtracyjne i walidację eksperymentalną na platformie przemysłowej „Formica 3” (AIUT), z pokazaniem wpływu poszczególnych składowych (kalibracji czujników, kalibracji odometrii, re-kalibracji względem 2DM-RC i weryfikacji po dokowaniu) na końcową dokładność osiąganego punktu. Tym samym przedstawiono ścieżkę od pomiarów surowych do decyzji sterowania, możliwą do ponownego odtworzenia i audytu.

Podsumowując, problem badawczy polegał na zaprojektowaniu i empirycznym potwierdzeniu takiej procedury dokowania, która – działając wyłącznie na zasobach pokładowych, bez map środowiska – minimalizuje łączny błąd pozycjonowania w ostatniej fazie dojazdu oraz zapewnia powtarzalność w zmiennych warunkach przemysłowych. Rozprawa adresuje go poprzez spójny łańcuch metod redukcji niepewności i integrację w systemie ROS, co stanowi fundament do re-używalnych wdrożeń i dalszych analiz czułości (np. wpływu rozdzielczości kątowej LiDAR-u i geometrii znacznika na budżet błędów).

Hipoteza/tezy pracy

Rozprawa stawia tezę, że spójny łańcuch metod – kalibracja i filtracja pomiarów z czujników odległości (ACM, MSCwMF oraz warianty ML – ang. *Machine Learning*: NC, RC), kalibracja odometrii w ruchu obrotowym (2DLAT), a także pozycjonowanie względem refleksyjnego znacznika przestrzennego 2DM-RC wykrywanego LiDAR-em 2D – zintegrowany w systemie ROS i działający wyłącznie na zasobach pokładowych AGV, pozwala na ilościowo mierzalne, porównywalne i audytowalne zwiększenie dokładności oraz powtarzalności dokowania w warunkach przemysłowych, bez potrzeby tworzenia map środowiska.

Szczegóły hipotezy/tezy pracy

Dla kluczowych celów procedury dokowania (dokładność i precyzja odczytów LiDAR 2D, jakość odometrii, wykrywalność i identyfikowalność 2DM-RC, błąd końcowego punktu dokowania, weryfikacja po zadokowaniu) dostępne są operacyjne wskaźniki możliwe do pozyskania na wdrożonej platformie testowej (Formica 3) oraz w realistycznych scenariuszach badawczych. Kalibracja czujników odległości metodami ACM/MSwMF oraz ML (NC, RC) obniża błąd i rozrzut pomiarów (do poziomu <1 mm lub do $\sim 79\%$ redukcji błędów), a 2DLAT ogranicza kumulację błędów systematycznych odometrii. Efekty te są wykazane empirycznie.

Zastosowanie znacznika 2DM-RC (odległość + intensywność wiązek) umożliwia jednoznaczne pozycjonowanie elementów stanowiska i bieżącą re-kalibrację trajektorii dojazdu, co kompensuje dryf odometrii i poprawia uzyskiwany punkt dokowania.

Integracja w ROS zapewnia re-produkowalny „ślad audytowy” przepływu danych: od pomiarów surowych, przez kalibrację/filtrację i detekcję 2DM-RC, po sterowanie i weryfikację po zadokowaniu. Weryfikacja na Formica 3 potwierdza wzrost dokładności oraz powtarzalności.

Założenia dot. stabilności i przenaszalności

Oczekiwano stabilności wyników względem realistycznych wahań szumu pomiarowego i parametrów wag w łańcuchu obliczeń; wnioski nie powinny być się odwracać poza obszarem rzeczywistej obojętności (granicy rozstrzygalności). W pracy wykazano powtarzalność (precyzję) oraz poprawę dokładności po zastosowanych etapach przetwarzania.

Logika oceny i doboru metod miała pozostać przenośna między konfiguracjami AGV opartymi na LiDAR 2D i odometrii; wymaga to głównie parametryzacji (np. geometrii znacznika, rozdzielczości kątowej czujnika).

Warunki falsyfikacji (kiedy teza nie będzie utrzymana)

Jeśli kluczowych wielkości nie dałoby się wiarygodnie zmierzyć w realnym wdrożeniu; jeśli kalibracja nie przyniosłaby istotnej redukcji błędów (LiDAR/odometria); jeśli detekcja/identyfikacja 2DM-RC nie umożliwiłaby stabilnej re-kalibracji w trakcie dojazdu; albo jeśli zintegrowany łańcuch nie przełożyłby się na spadek błędów punktu dokowania i poprawę powtarzalności – centralna teza nie znalazłaby potwierdzenia.

Rozwiązania praktyczne

Rozprawa nie opisuje jednego algorytmu, lecz kompletny łańcuch narzędzi do wdrożenia i weryfikacji precyzyjnego dokowania AGV. Autor dostarcza spójny łańcuch obliczeniowy (kalibracja i filtracja czujników, kalibracja odometrii, detekcja/identyfikacja znacznika, nawigacja, dokowanie, weryfikacja), zintegrowany w ROS i zademonstrowany na realnej platformie Formica 3. Dzięki temu zestaw rozproszonych pomiarów zamienia się w procedury, które dają dowody gotowe do akceptacji i audytu (logi, tematy ROS, listingi).

Rdzeń rozwiązania (moduły wdrożeniowe)

Refleksyjna struktura segmentów tworzy „kod” umożliwiający rozpoznanie elementów stanowiska (nóg AS – ang. *Assembly Station*) i wyznaczenie ich pozycji oraz orientacji względem AGV; to podstawa bieżącej re-kalibracji trajektorii i kompensacji dryfu odometrii. Pokazano format komunikatów ROS z pozycją/orientacją wykrytych elementów.

Zastosowano m.in. ACM, MSCwMF oraz warianty uczenia maszynowego (NC, RC), co obniża błąd i rozrzut (w pracy raportowane są spadki błędów do poziomu poniżej 1 mm oraz poprawa precyzji po filtracji medianowej/średniej ruchomej).

Autorski test, porównujący kąt z odometrii z kątem wyznaczonym LiDAR-em, dostarczający procedury i wzory obliczeniowe, umożliwia diagnozę błędów systematycznych i ich kompensację w parametryzacji napędów.

Procedura dokowania oraz weryfikacji po zadokowaniu, rozpisana została na trzy fazy: (1) pozycja początkowa i wyszukiwanie 2DM-RC; (2) dojazd do punktu dokowania sterowany stosem nawigacji ROS; (3) weryfikacja: ponowna obserwacja 2DM-RC i wyliczenie korekt (X, Y, YAW – kąt Eulera) – z jawnym opisem przepływu danych.

Przedstawiony zestaw metod i procedur udostępnia inżynierom gotowy, audytowalny przepływ od danych surowych po decyzję sterowania i weryfikację efektu. Pozwala to nie tylko poprawić dokładność dokowania, lecz także podejmować świadome decyzje wdrożeniowe i utrzymaniowe w fabryce.

Wkład nowatorski

Nowość rozprawy polega na działającym w praktyce szkieletcie postępowania prowadzącym do precyzyjnego dokowania AGV wyłącznie na zasobach pokładowych, bez map i bez modyfikacji infrastruktury. Autor scala zwykle rozdzielne „silosy” – kalibrację i filtrację czujników odległości, kalibrację odometrii, bezwzględne odniesienie geometryczne względem znacznika oraz końcowe sterowanie/dojście – w jedną, powtarzalną procedurę z pełnym śladem danych (od pomiaru, przez obróbkę, decyzję aż po weryfikację).

Najważniejsze elementy nowatorskie

- Znacznik 2DM-RC (refleksyjny kod wykrywany LiDAR-em 2D w domenie odległości i intensywności) wraz z algorytmiką detekcji i identyfikacji – rozwiązanie dostarcza jednoznacznego układu odniesienia dla AGV w ostatniej fazie dojazdu i pozwala na bieżącą re-kalibrację toru wprost z pomiarów pokładowych.
- Zestaw metod kalibracji czujników odległości (ACM, MSCwMF oraz warianty ML: NC/RC) połączony z filtracją, co stabilizuje i „uspójnia” dane LiDAR do poziomu operacyjnie użytecznego w sterowaniu dokładnościowym.
- 2DLAT – kalibracja odometrii w ruchu obrotowym, która wykrywa i kompensuje błędy systematyczne napędów bez dodatkowej aparatury (IMU – ang. *Inertial Measurement Unit*/enkodery zewnętrzne), wykorzystując wyłącznie odniesienia z LiDAR-u.

- Integracja w ROS całego łańcucha (od wejść z czujników, przez kalibrację/filtrację, detekcję 2DM-RC i sterowanie pojazdem, aż po weryfikację po zadokowaniu) w formie działającego prototypu zweryfikowanego na platformie przemysłowej. To przesuwając akcent pracy z „proof-of-concept” na „proof-of-deployment”.

Cechy wyróżniające podejście

Raportując uzyskane wyniki, autor nie zatrzymuje się na dokładności pojedynczego komponentu, lecz pokazuje ciąg przyczynowo skutkowy: jak redukcja niepewności w sensingu i odometrii przekłada się na błąd punktu dokowania oraz jego powtarzalność.

Każdy krok ma zdefiniowane pomiary, parametry i artefakty (logi/tematy), co pozwala odtworzyć obliczenia i weryfikować regresje po zmianach oprogramowania czy konfiguracji sprzętowej.

Ten sam schemat można stosować na różnych platformach AGV opartych na LiDAR 2D – typowo wystarcza parametryzacja (geometria znacznika, rozdzielczość kątowa czujnika, prędkości w strefie dokowania).

Efekt to praktyczny szablon: zdefiniuj cele (dokładność, powtarzalność, stabilność), zmierz je protokołami kalibracyjno-weryfikacyjnymi, połącz w jedną procedurę dokowania i raportuj wynik końcowy (błąd punktu i wektor korekt po weryfikacji). Dzięki temu decyzje wdrożeniowe i odbiorowe opierają się na mających potwierdzenie liczbach.

W tej postaci wkład jest oryginalny i użyteczny: przekuwa rozproszone techniki w spójny, wdrażalny sposób oceny i poprawy dokowania, nadający się zarówno do odbioru projektowego, jak i do ciągłego doskonalenia na linii produkcyjnej.

Oryginalne wyniki badań i ich znaczenie

Rozprawa scala dorobek autora w spójny, uruchamialny łańcuch postępowania do precyzyjnego dokowania AGV: od kalibracji i filtracji pomiarów czujników odległości (ACM, MSCwMF oraz warianty ML: NC/RC), przez kalibrację odometrii w ruchu obrotowym (2DLAT), po pozycjonowanie względem refleksyjnego znacznika 2DM-RC (detekcja i identyfikacja z użyciem odległości i intensywności wiązek LiDAR 2D) i integrację w ROS z weryfikacją po zadokowaniu. Całość została zweryfikowana eksperymentalnie na platformie Formica 3 (AIUT).

Najważniejsze osiągnięcia (w skrócie)

1. Koherentny zestaw celów i miar operacyjnych dla procedury dokowania (dokładność/precyzja LiDAR 2D, jakość odometrii, wykrywalność/ID znacznika 2DM-RC, błąd punktu dokowania, weryfikacja po zadokowaniu) wraz z protokołami pomiarowymi.
2. Praktyczna ścieżka od pomiarów do wyników: kalibracja i filtracja obniżają błędy i rozrzut (do <1 mm dla NC/RC; nawet –79% dla ACM), a 2DLAT ogranicza kumulację błędów odometrii.
3. Znacznik 2DM-RC oraz algorytmy detekcji/identyfikacji oparte na odległości i intensywności, dające jednoznaczne odniesienie geometryczne i bieżącą re-kalibrację trajektorii w końcowej fazie dojazdu.
4. Integracja w ROS z pełnym śladem danych (węzły, tematy, mapa przepływu) oraz weryfikacja po zadokowaniu dostarczająca wektora korekt (X, Y, YAW) dla dalszych operacji robota współpracującego.
5. Potwierdzenie w eksperymentach na Formica 3: wzrost dokładności punktu dokowania dzięki kalibracjom i re-kalibracji względem 2DM-RC; osiągnięta dokładność do 5 mm i < 0,05 stopnia w orientacji YAW (dla scenariuszy testowych).

Znaczenie praktyczne – powstał szablon wdrożeniowy do odbioru i utrzymania systemów AGV: z zestawem wymagań pomiarowych, progami użytkowymi, artefaktami do audytu oraz jasnym powiązaniem redukcji niepewności w sensingu i odometrii z błędem końcowego dokowania. Rozwiązanie działa bez mapy środowiska, wyłącznie na zasobach pokładowych, wspierając elastyczność zgodną z Przemysłem 4.0.

Wybrane publikacje źródłowe i ich związek badaniami opisanymi w rozprawie

1. Ziębiński, Mrozek, Cupek, ..., Biernacki, „Challenges Associated with Sensors and Data Fusion for AGV-Driven Smart Manufacturing” (ICCS 2021, 140 pkt.) – przegląd wyzwań sensora-fuzji dla AGV; osadza motywację i wymagania jakościowe dla systemu dokowania.
2. Biernacki, Ziębiński, Grzechca, „The Adaptive Calibration Method for Single-Beam Distance Sensors” (ICCCI 2021, 70 pkt.) – ACM: adaptacyjna kalibracja czujników jednowiązkowych; fundament redukcji błędów LiDAR.
3. Biernacki, Ziębiński, Syu, Lin, „The Calibration of Single Beam Distance Sensors based on Machine Learning Methods” (IEEE BigData 2023, 70 pkt.) – NC (ML): kalibracja z użyciem ML dla czujników jednowiązkowych; włączenie ML do łańcucha kalibracji.
4. Syu, Lin, Biernacki, Ziębiński, „Machine Learning-Based Calibration Approaches for Single-Beam and Multiple-Beam Distance Sensors” (IEEE Sensors Journal 2024, 100 pkt.) – RC (ML): kalibracja dla czujników jedno- i wielowiązkowych; wyniki < 1 mm.
5. Ziębiński, Biernacki, „How Accurate Can 2D LiDAR Be? A Comparison of the Characteristics of Calibrated 2D LiDAR Systems” (Sensors 2025, 100 pkt.) – MSCwMF, porównanie charakterystyk po kalibracji; walidacja wpływu filtracji.
6. Biernacki, Ziębiński, „The method of reflection-based marker detection and identification to ensure accurate AGV docking” (Scientific Reports 2025; 140 pkt., akceptacja: 20.10.2025; autor korespondencyjny: P. Biernacki) – publikacja opisująca metodę 2DM-RC (detekcja i identyfikacja znacznika na podstawie odległości i intensywności z LiDAR 2D); stanowi trzon części rozprawy poświęconej pozycjonowaniu względem znacznika.

Konkluzja

Wartość naukowa i użytkowa nie wynika z pojedynczego algorytmu, lecz z integracji: ujednolicenia metod kalibracji i pozycjonowania w jedną procedurę dokowania, której efekty są mierzalne, porównywalne i audytowalne w warunkach przemysłowych. Niewątpliwie jednak uzupełnienie dokumentacji o pełne reguły normalizacji/progi, udostępnienie artefaktów obliczeniowych oraz krótką analizę czułości/niepewności dodatkowo utrwaliłoby re-używalność i pewność decyzyjną opracowanego podejścia.

Wartość techniczna rozprawy

Praca pokazuje dojrzałe, całościowe opanowanie stosu dokowania AGV: od sensingu (LiDAR 2D, charakterystyki pomiaru, filtracja/kalibracja), przez estymację i geometrię odniesienia (detekcja/ID znacznika 2DM-RC, wyznaczanie pozycji i orientacji), odometrię i jej kompensację (2DLAT), aż po sterowanie końcowej fazy dojazdu i integrację systemową w ROS (przepływy danych, moduły, logowanie, weryfikacja po zadokowaniu). Autor swobodnie łączy perspektywę inżynierii systemów (niezawodność przepływu danych, spójność układu odniesienia, powtarzalność procesu) z praktyką algorytmiczną (kalibracja, filtracja, detekcja/identyfikacja) oraz z wymaganiami uruchomieniowo-eksploatacyjnymi (procedury odbiorowe, ślad audytowy).

Techniczna dojrzałość ujawnia się w trzech miejscach. Po pierwsze, podejście end-to-end: błędy i opóźnienia są rozpisane wzdłuż całego toru (od surowych odczytów, przez kalibrację i detekcję znacznika, po sterowanie i pomiar błędu punktu), z jasnym wiązaniem jakości poszczególnych etapów z wynikiem dokowania. Po drugie, pomiary operacyjne są traktowane jako pełnoprawne wielkości: stabilność odczytów LiDAR, jakość odometrii (w tym ruch obrotowy), wykrywalność/identyfikowalność 2DM-RC oraz powtarzalność błędu końcowego – zamiast pozostawiać je na poziomie opisowym. Po trzecie, implementacja: pipeline jest uruchamialny, z wyraźnym podziałem modułów i możliwością odtworzenia obliczeń (logi/tematy, konfiguracje), co ułatwia testy regresji i odbiory.

Studia przypadków na platformie przemysłowej Formica 3 przekładają koncepcję na praktykę: autor przechodzi przez pomiary i obliczenia dla kluczowych obszarów (LiDAR, odometria, znacznik, dokowanie), a następnie składa je w wynik końcowy (dokładność i powtarzalność punktu oraz wektor korekty po weryfikacji). Dzięki temu widać, które elementy łańcucha faktycznie „niosą” poprawę i jakimi suwakami można sterować przy wdrożeniu.

Należy jednak wspomnieć o dwóch elementach, które warto było domknąć, aby obraz był pełny: (i) jednoznacznie rozpisać tabele parametrów i progów (domyślne nastawy filtracji/kalibracji, minimalne wymagania dla detekcji 2DM-RC versus odległość i rozdzielczość kątowna), tak by inny zespół mógł odtworzyć wyniki bez zgadywania; (ii) dołożyć krótką analizę czułości/niepewności (wpływ rozdzielczości kątowej, geometrii znacznika, szumów i poślizgu kół na błąd końcowy). Są to jednak kwestie prezentacyjne – nie podważają one widocznej w pracy biegłości technicznej i kompletności ujęcia.

Ograniczenia i wyzwania

W pracy pokazane są dwa scenariusze w obrębie jednej platformy (Formica 3) i jednego typu sensora (LiDAR 2D), co daje pewną różnorodność, lecz nie można mówić o szeroko zakrojonych badaniach. Brakuje weryfikacji w środowiskach o odmiennych parametrach (inne AGV, różne LiDAR-y i enkodery, różne posadzki/tarcie, oświetlenie zakłóceń IR, zanieczyszczenia/okluzje, większe odległości startowe, wąskie korytarze). Uogólnienie na flotę wielodostawczą, wiele stanowisk oraz warunki o silnie ograniczonym budżecie czasowym pozostaje nieweryfikowane.

W rozprawie nie zawarto systematycznych testów porównawczych względem innych sposobów dokowania: znaczników wizyjnych (AprilTag/ArUco), nawigacji po mapie/SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*), taśm magnetycznych/znaczników pasywnych, UWB/RTLS, 3D LiDAR. Bez takich porównania do tzw. *baseline*, trudno ilościowo pokazać przewagę zaproponowanego łańcucha nad powszechną praktyką.

Część elementów punktacji/progów pozostaje opisana ogólnie: funkcje normalizacji (wejściowe zakresy, progi, monotoniczność), kompletne schematy wag (domyślne i „profile” dla integratora/UR), wyprowadzenia wskaźników złożonych (np. minimalna liczba trafień wiązek na segment 2DM-RC vs. odległość i rozdzielczość kątowna, margines „readiness” końcowego punktu). Miejscami stałe pojawiają się bez uzasadnienia.

Nie pokazano, jak wnioski zmieniają się przy realistycznych wahaniach szumu pomiarowego i rozsądnych zmianach wag. Brakuje kwantyfikacji niepewności dla metryk (np. wariancja odczytów LiDAR, poślizg kół, tolerancje montażowe znacznika).

W tekście są odwołania do plików obliczeniowych/konfiguracyjnych, lecz nie ma pełnego pakietu uruchomieniowego.

W studiach przypadków część wielkości jest mierzona, część zakładana; nie zawsze jest to jednoznacznie oznaczone.

Mało miejsca poświęcono utrzymaniu, zmianom i awariom: zużycie kół, rozkalibrowanie LiDAR, zabrudzenie/uszkodzenie znacznika, aktualizacje firmware/ROS, wymiana komponentów.

Aspekty bezpieczeństwa funkcjonalnego, odległości ochronne, integracja z systemem unikania kolizji oraz wymogi audytowe są jedynie zasygnalizowane i nie stanowią mierzalnych celów.

Pojawiają się niejednolite oznaczenia symboli i jednostek, miejscami słabsze ryciny/podpisy oraz błędne odwołania krzyżowe – to utrudnia weryfikację.

Przegląd literatury opiera się głównie na starszych źródłach dotyczących kalibracji/oceny; warto było silniej osadzić pracę w najnowszych trendach (ROS 2/Nav2, nowsze LiDAR-y 2D/3D, współczesne fiducjale/znaczniki przemysłowe, praktyki odbiorowe w intra-logistyce).

Powyższe uwagi nie zmieniają istoty rozwiązania – wskazują jedynie, co można było dopracować, by rozwiązanie było audytowalne, przenaszalne i możliwe do obrony w szerszej liczbie przypadków. Pomimo wszystko, przedstawiony szkielet jest nie tylko skuteczny, ale i w pełni wiarygodny jako standard oceny i wdrażania dokowania AGV.

Ocena zgodności z wymaganiami naukowymi

Rozprawa rozwiązuje realną lukę: przedstawia spójny, uruchamialny sposób osiągania dużej dokładności i powtarzalności dokowania AGV wyłącznie na zasobach pokładowych, bez map środowiska. Pytania badawcze są jasno postawione, cel ogólny – spójny, a studia przypadków pokazują, że zaproponowany łańcuch metod (kalibracje, znacznik 2DM-RC, integracja w ROS, weryfikacja po zadokowaniu) daje się zastosować w praktyce. Pod względem oryginalności i przydatności wdrożeniowej praca jest dobrze umotywowana i ma wyraźną wartość dla odbioru, eksploatacji i doskonalenia systemów.

Na tle standardowych kryteriów doktorskich moja ocena jest minimalnie zniuansowana. Wkład koncepcyjny – scalenie celów i miar operacyjnych, zaprojektowanie kompletnego łańcucha (od pomiarów, przez decyzje sterowania, do weryfikacji) – jest solidny i przekonująco umocowany doświadczeniem eksperymentalnym. Warstwa metodyczna nie jest jednak doprecyzowana do poziomu pozwalającego na niezależną replikację: nie wszystkie funkcje normalizacji i progi (dla czujników, odometrii, detekcji 2DM-RC) są podane wprost wraz z uzasadnieniem; schemat wag i reguł decyzji jest opisany, lecz nie w pełni sformalizowany; brakuje zwartej analizy czułości/niepewności (jak zmiany szumu, parametrów czy wag wpływają na błąd końcowy i powtarzalność). Walidacja zewnętrzna jest celowo wąska (jedna platforma, brak porównań „head-to-head” z alternatywami lub ablacją modułów), a przegląd literatury można było wzmocnić nowszymi ujęciami dokowania i praktyk odbiorowych. Miejscami przeszkadzają kwestie redakcyjne (spójność symboli/jednostek, odnośniki, jakość rycin).

Wszystkie te braki mają jednak charakter uzupełniający. W konkluzji więc, w mojej ocenie rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja: zawiera oryginalny, wartościowy wkład i wiarygodną weryfikację.

Końcowe wnioski recenzji (konkluzja)

Pomimo zgłoszonych wcześniej uwag i ograniczeń, oświadczam, że:

1. Cel rozprawy został zasadniczo osiągnięty. Przedstawione badania, wraz z analizą wyników eksperymentów, potwierdzają zasadność postawionych hipotez i uwiarygodniają główne tezy Autora dotyczące podniesienia dokładności i powtarzalności dokowania AGV w oparciu o zasoby pokładowe.

2. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaproponowane metody i procedury (kalibracja i filtracja pomiarów czujników odległości, kalibracja odometrii w ruchu obrotowym, pozycjonowanie względem autorskiego znacznika oraz integracja w architekturze ROS z weryfikacją po zadokowaniu) mają charakter nowatorski, a ich skuteczność została potwierdzona zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w testach w realistycznym środowisku przemysłowym.
3. Zakres tematyczny jest Autorowi dobrze znany. Świadczy o tym przemyślany dobór materiału, spójna konstrukcja pracy oraz pogłębiona analiza zagadnień z obszaru robotyki mobilnej, przetwarzania i kalibracji sygnałów czujnikowych, integracji systemów oraz sterowania końcowej fazy dojazdu.
4. Praca dowodzi zdolności do samodzielnego prowadzenia badań. Zaprezentowane procesy projektowania, implementacji oraz ewaluacji opracowanych metod potwierdzają umiejętność kompleksowego rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich i badawczych w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Zgodnie z art. 186 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.), rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Na podstawie powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Biernackiego spełnia wymagania określone w przepisach dotyczących nadawania stopnia doktora. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

W odniesieniu do wyróżnienia rozprawy doktorskiej (na podstawie § 13 Regulaminu w zakresie nadania stopnia doktora w Politechnice Śląskiej, stanowiącego załącznik do Uchwały nr 43/2023 Senatu PŚ z 25.09.2023 r.) wskazuję, że na etapie złożenia pracy przesłanka z § 13 ust. 2 pkt 2 nie była spełniona, natomiast w toku postępowania recenzyjnego została spełniona – przedłożono decyzję o przyjęciu do druku w czasopiśmie z Impact Factor Scientific Reports artykułu pt. „The method of reflection-based marker detection and identification to ensure accurate AGV docking” (doktorant jako pierwszy i korespondencyjny autor). Wobec tego, przy mojej jednocześnie wysoce pozytywnej ocenie rozprawy, spełniającej § 13 ust. 2 pkt 1, wnoszę o wystąpienie z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy mgr inż. Piotra Biernackiego.

dr hab. inż. Mikołaj Leszczuk, prof. AGH