

.....Piotr Biernacki.....
(imię i nazwisko kandydata)

.....Gliwice, 21.08.2025
(miejscowość, data)

.....ul. Długa 51

.....42-134 Kuleje.....
(adres do korespondencji)

692-421-643, piotrekbiernacki@gmail.com
(nr telefonu i adres e-mail)

Streszczenie

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Metody wspomagające precyzję dokowania systemów AGV do stanowiska montażowego”

Celem pracy było opracowanie metod zwiększających precyzję dokowania systemów AGV do wymaganego punktu dla danego stanowiska montażowego. Praca była realizowana w ramach projektu międzynarodowego o akronimie CoBotAGV, którego celem było zintegrowanie systemów AGV z robotami współpracującymi i umożliwienie ich relokacji między stanowiskami montażowymi przy zapewnieniu dokładnego i powtarzalnego dokowania.

Rozwiązanie opracowane w ramach pracy doktorskiej przeznaczone jest do zastosowań w warunkach przemysłowych, przy wykorzystaniu wyłącznie zasobów pokładowych AGV, przede wszystkim LiDAR-ów 2D oraz odometrii - bez potrzeby rozbudowywania systemu AGV o kolejne podsystemy percepcji. Założeniem zarówno projektu, jak i pracy doktorskiej, było osiągnięcie wysokiej dokładności dokowania przy jednoczesnym zachowaniu elastyczności procesów produkcyjnych, zgodnie z założeniami Przemysłu 4.0.

Dodatkowym wyzwaniem, wynikającym z założeń projektu CoBotAGV był brak możliwości budowy i wykorzystania mapy środowiska.

W odpowiedzi na postawione wyzwania zaproponowano zestaw metod zapewniających poprawę dokładności oraz precyzji poprzez odpowiednio kalibrację i filtrację pomiarów dostarczanych przez podsystemy AGV. Opracowano nowatorski system pozycjonowania względem stanowiska montażowego na bazie refleksyjnego znacznika przestrzennego wykrywanego i identyfikowanego za pomocą LiDAR-u 2D. Wszystkie opracowane metody zostały zintegrowane w spójny system realizujący dokowanie oraz weryfikację pozycji AGV po zadokowaniu na bazie skalibrowanych danych pomiarowych.

W ramach pracy doktorskiej przeanalizowano charakterystyki pomiarowe czujników odległości oraz odometrii, a następnie opracowano i zweryfikowano metody ich poprawy. Autorska metoda adaptacyjnej kalibracji czujników odległości (ACM) zredukowała błędy pomiarowe nawet o 79%, a metoda adaptacyjnej kalibracji z filtracją medianową (MSCwMF) dodatkowo poprawiła precyzję pomiarów odległości poprzez skuteczniejsze tłumienie szumów. Opracowano także metodę kalibracji odometrii w ruchu obrotowym (2DLAT), wykorzystującą dane ze skalibrowanego LiDAR-u 2D w celu ograniczania kumulacji błędów systematycznych odometrii. Oceniono i zastosowano metody filtracji za pomocą średniej ruchomej oraz filtracji medianowej, uzyskując znaczne obniżenie odchylenia standardowego pomiarów odległości z LiDAR-ów 2D. Opracowane zostały również metody kalibracji czujników odległości wykorzystujące techniki uczenia maszynowego (NC oraz RC), które pozwoliły obniżyć błędy pomiarowe poniżej poziomu 1 mm.

Kluczowym dla procedury dokowania, nowatorskim elementem pracy doktorskiej jest znacznik przestrzenny z kodami refleksyjnymi (2DM-RC) oraz metoda jego detekcji i identyfikacji na podstawie danych z LiDAR-u 2D, uwzględniająca zarówno pomiary odległości, jak i intensywność odbitych wiązek laserowych. Dzięki refleksyjnej strukturze na segmentach znacznika, stanowiącej „kod” binarny możliwe jest równoczesne rozpoznanie elementów stanowiska montażowego oraz dokładne wyznaczenie jego pozycji i orientacji względem AGV. Pozwala to na bieżącą rekaliibrację trajektorii dokowania i kompensację dryfu odometrii.

Wszystkie opracowane komponenty zintegrowano w systemie dokowania opartym na systemie ROS (Robot Operating System), obejmującym węzły oprogramowania służące do komunikacji z jednostką przetwarzającą systemu AGV, kalibracji i filtracji pomiarów odległości, kalibracji odometrii, detekcji i identyfikacji znacznika 2DM-RC, nawigacji, dokowania oraz automatycznej weryfikacji pozycji po zadokowaniu. System przetestowano eksperymentalnie na prototypowej platformie „Formica 3” firmy AIUT. Badania wykazały, że kalibracja czujników odległości oraz odometrii wyraźnie zwiększa dokładność osiąganego punktu; ciągła rekaliibracja względem znaczników 2DM-RC skutecznie niweluje skumulowany błąd odometrii; procedura weryfikacji po zadokowaniu umożliwia określenie dokładnej pozycji i orientacji AGV względem stanowiska montażowego oraz wyznaczenie wartości korekt niezbędnych dla dalszych operacji robota współpracującego.

Osiągnięte wyniki potwierdzają wszystkie tezy pracy: kalibracja podnosi dokładność pomiarów, filtracja zwiększa ich precyzję, zastosowanie znacznika przestrzennego umożliwia dokładne pozycjonowanie stanowiska montażowego, a redukcja błędów pomiarowych przekłada się na wzrost dokładności dokowania. Oryginalny wkład w dziedzinę informatyki technicznej i telekomunikacji obejmuje: metody kalibracji ACM, MSCwMF, NC, RC dla czujników odległości, metodę kalibracji odometrii w ruchu obrotowym 2DLAT oraz refleksyjny znacznik przestrzenny 2DM-RC wraz z algorytmami detekcji i identyfikacji.

W rezultacie powstał kompletny łańcuch przetwarzania danych, który umożliwia dokładne i powtarzalne dokowanie AGV do stanowiska montażowego w zmiennych warunkach przemysłowych, wzmacniając zarazem implementację koncepcji Przemysłu 4.0.