

Dr hab. inż. Tomasz Buratowski, prof. AGH  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 22-11-2021 r.

## **RECENZJA**

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Wiecha

pt. „Synteza ruchu roju robotów kołowych”

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. PRz

### **1. Wybór tematu, cel i zakres pracy**

Recenzowana praca została napisana w języku polskim i obejmuje zagadnienia związane z badaniami ruchu roju robotów kołowych. Praca ma charakter badawczo-naukowy, zawiera eksperymentalne rozwiązanie tezy badawczej, dotyczącej „zastosowania metody wirtualnych elementów sprężysto-tłumiących, umożliwiającej przeprowadzenie syntezy ruchu roju robotów”. Celem pracy było zaprojektowanie, skonstruowanie i oprogramowanie roju robotów, a także opracowanie prawa sterowania, które umożliwi samoorganizację grupy 5-ciu robotów w zadany kształt i ruch nadążny urządzeń w środowisku zarówno bez jak i z przeszkodami. Niniejsza praca obejmuje koncepcję i dobór metod badawczych, planowanie i organizację eksperymentu, przedstawienie uzyskanych wyników, ich dyskusję oraz sformułowanie wniosków.

W pierwszym rozdziale pracy autor scharakteryzował problem naukowy, określona również została motywacja podjęcia próby jego rozwiązania. W rozdziale tym postawiona została również główna teza pracy, metodyka badań oraz wkład do aktualnego stanu nauki.

W drugim rozdziale znajdujemy przegląd literatury tematu w zakresie typów rojów robotów, rodzajów ich zachowań oraz metod realizacji ruchu robotów w rojach. Mgr inż. Jakub Wiech w bardzo przejrzysty i uporządkowany sposób ukazał dostępne w publikacjach naukowych zagadnienia dotyczące rodzajów rojów robotów. Autor nieco szerzej odwołał się również do tematyki związanej z rodzajami zachowań rojów, by

na końcu rozdziału przybliżyć znane metody realizacji ruchu robotów w tego typu formacjach. Informacje przedstawione w omawianym rozdziale stanowią zwarte i w pełni wystarczające wprowadzenie w obszar badań, również dla osób, które nie posiadają doświadczenia w tym zakresie. Śmiało można więc stwierdzić, iż rozdział ten ma charakter jednocześnie edukacyjny jak i naukowy, tj. informacyjno - podsumowujący dotychczasowe osiągnięcia w dziedzinie ruchu roju robotów.

W rozdziale trzecim opisane zostały prace obejmujące projektowanie oraz konstruowanie robotów wykonanych na potrzeby przeprowadzenia badań. W niniejszej części rozprawy znajdujemy skrupulatny opis działań autora, poparty grafikami i tabelami oraz odniesieniami do zastosowanych metod i sposobów pracy.

Rozdział czwarty to dokładne przedstawienie obiektów badań: mobilnego robota kołowego, kinematyki mobilnych robotów kołowych w roju oraz dynamicznych równań ruchu mobilnego robota kołowego. Model matematyczny roju został opisany prawidłowo, o czym świadczą zbliżone przebiegi wartości sygnałów z testów numerycznych oraz badań weryfikacyjnych. Do badań weryfikacyjnych zostały zaprojektowane, zbudowane i oprogramowane od podstaw roboty mobilne. Ponadto, opracowano autorski program do zdalnej komunikacji między robotami a systemem Motion Capture oraz akwizycji danych.

Testy symulacyjne oraz synteza sterowania ruchem roju mobilnych robotów kołowych zostały opisane w rozdziale piątym, który stanowi obszerną część pracy. Znaleźć tam można założenia, wyliczenia oraz wykresy w odniesieniu do samoorganizacji roju wokół punktu odniesienia. Opis hierarchicznego układu sterowania ruchem robotów jest wstępem do przeprowadzonej symulacji samoorganizacji ruchu roju wokół punktu odniesienia. Ta natomiast, oprócz samego opisu, zilustrowana jest przy pomocy wielu wykresów zawierających różnorodne i niezbędne do wysnucia wniosków dane. W podobny sposób doktorant przedstawił testy dotyczące zadania ruchu nadążnego roju robotów w dwóch środowiskach: bez przeszkód i z przeszkodami. Każda z części niniejszego rozdziału zakończona jest podsumowaniem a wykonane testy poddane zostały ocenie autora.

W rozdziale szóstym przedstawiono opis stanowiska badawczego, zastosowane technologie i wykorzystaną do badań aparaturę. Doktorant przybliżył badania eksperymentalne, wykonane w celu sprawdzenia poprawności opisywanych wcześniej symulacji. Eksperymenty przeprowadzone na stanowisku badawczym dotyczyły weryfikacji założonego sposobu działania. Opis przeprowadzonego eksperymentu zawiera

szczegółowe dane dotyczące położenia robotów, wykresy (wraz z interpretacją) możliwych do przeanalizowania wartości (prędkość, odległość, współrzędne, kąty obrotu itd.) Badania przeprowadzono w zakresie samoorganizacji roju mobilnych robotów kołowych wokół punktu odniesienia a następnie w środowisku bez przeszkód.

Siódmy rozdział stanowi podsumowanie zagadnień przedstawionych w recenzowanej pracy. Potwierdza on tezę postawioną we wstępie pracy.

Zaproponowane prawo sterowania umożliwi przeprowadzenie samoorganizacji roju oraz podążania roju robotów zadaną trajektorią w środowisku z oraz bez przeszkód, zgodnie z założeniami i celem pracy.

Odpowiednio dobierając współczynniki w prawie sterowania, rój bezkolizyjnie omija przeszkody oraz nie występują kolizje między robotami.

Rozdział ósmy zawiera kierunki możliwych do przeprowadzenia dalszych prac badawczych, dotyczących zarówno rozwoju zaprezentowanych eksperymentów, jak również niezbadanego jeszcze ruchu w środowisku z przeszkodami. Znaleźć tu można także wzmiankę o możliwościach komercjalizacji dalszych prac badawczych.

Dalsze prace przede wszystkim obejmują wyprowadzenie dowodu stabilności sterowania rojem robotów z użyciem np. metody Lapunowa lub zastosowania teorii grafów. Przeprowadzenie testów proponowanego prawa sterowania dla następujących przypadków: dla większej liczby robotów  $>10$ , przy zakłóceniach pomiarów odległości i orientacji, dla sterowania nadążnego za zadaną trajektorią z kompensacją nieliniowości (co będzie wymagało opracowanie nowych robotów z mikrokontrolerem lub komputerem jednopłytkowym o większej mocy obliczeniowej), przy zastosowaniu sensorów pokładowych zamiast systemu motion capture.

Najistotniejszym problemem do rozwiązania jest dopracowanie algorytmu sterowania rojem robotów oraz konstrukcji robotów, tak by można było zastosować rój w praktycznych problemach, jak samoorganizacja robotów w terenie jako rój obserwacyjny, przeszukiwanie gruzowisk itp.

Jednym z ciekawszych problemów jest dostosowanie algorytmu sterowania rojem robotów naziemnych na roje robotów latających (dronów).

**Nowatorstwa i oryginalności** pracy można upatrywać w zagadnieniach związanych z samoorganizacją roju robotów przy narzuconych pewnych kryteriach ich ruchu. Dodatkowo Autor pracy opracował własne konstrukcje robotów mobilnych bazując na gotowych układach elektronicznych i mechanicznych.

## 2. Poprawność metodyki badań i analiza wyników

W pracy przedstawiono prace projektowe, badania symulacyjne jak i doświadczalne. Udowodniono słuszność zaproponowanego podejścia oraz, co ważne jego praktyczną użyteczność. Zastosowana metodyka badań jest prawidłowa, analiza wyników badań przeprowadzona została w sposób właściwy świadcząc o dużym zasobie wiedzy, inwencji, pracowitości i rzetelności naukowej autora.

## 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi jakie nasuwają się po lekturze pracy mają charakter **ogólny i redakcyjny**. Zauważyć należy, że rozprawa jest bardzo starannie przygotowana zawiera jednak kilka różnorodnych usterek redakcyjnych oraz edytorskich. Mogą one utrudniać nieco lekturę lub prowadzić do pewnych wątpliwości. Zarówno te wymienione jak i inne redakcyjne usterki nie umniejszają jednak merytorycznej wartości pracy. Poniżej zamieszczono uwagi do recenzowanej pracy:

- 1) Sporadycznie znaleźć można zbędne lub wstawione w błędnym miejscu znaki interpunkcyjne, co może powodować kłopoty w poprawnej interpretacji tekstu.
- 2) Rozdział 3.1 mógłby zostać wzbogacony o schemat elektroniczny obwodu drukowanego.
- 3) Ze względu na niewykorzystaną ilość miejsca na stronie, fotografie przedstawiające stanowisko badawcze mogłyby być w większym rozmiarze. Można też było umieścić zdjęcie stanowiska z góry.
- 4) Praca nie zawiera formalnego dowodu stabilności ruchu roju robotów w samoorganizacji i podążaniu roju za punktem odniesienia.
- 5) Roboty są w stanie omijać jedynie wypukłe przeszkody. Przeszkody wklęsłe mogą powodować zatrzymanie części robotów.
- 6) W badaniach symulacyjnych i weryfikacyjnych w problemie podążania roju robotów za punktem odniesienia w środowisku z przeszkodami założono, że przeszkody nie ograniczają pola widzenia robotów, co ma miejsce w rzeczywistości.
- 7) W robotach zastosowano regulator PD w sterowaniu nadążnym za zadaną trajektorią. W przypadku robotów mobilnych, które są obiektami nieliniowymi, regulator PD bez kompensacji nieliniowości powoduje duże błędy, które mają wpływ na jakość sterowania.

8) W pracy przedstawiono po jednym przypadku dla każdego problemu sterowania ruchem roju. Nie analizowano przypadków szczególnych np. ustawienia początkowego robotów w linii prostej, w dużych odległościach od siebie, innego rozłożenia przeszkód czy dalekiego rozstawienia robotów od punktu odniesienia w procesie samoorganizacji.

#### 4. Podsumowanie

Omawiana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań i świadczy o tym, że Autor potrafi postawić zagadnienie i rozwiązać je na drodze teoretycznej oraz zweryfikować doświadczalnie, a rezultaty badań zanalizować i wyciągnąć poprawne wnioski. Wywody doktoranta są jasne a wyniki rozprawy mogą być użyteczne z naukowego jak i technicznego punktu widzenia. Na szczególną uwagę zasługuje aplikacyjny charakter pracy.

Biorąc pod uwagę całość pracy należy stwierdzić, iż autor rozwiązał istotny problem nowoczesnej tematyki naukowej w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Wiecha spełnia warunki określone w aktualnie obowiązującej ustawie w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony.

Tomasz Burdowski