

prof. dr hab. inż. Gabriel Kost, prof. PŚ1
Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice
ul. Konarskiego 18A
e-mail: gabariel.kost@polsl.pl
tel.: 32/237-16-09

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr inż. Jakuba WIECHA

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Wiecha, pt. „Synteza ruchu roju robotów kołowych”. Recenzję opracowano na podstawie:

- uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 14.07.2021 roku,
- pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 14.07.2014 (RM-530-02-02/19/2021).

1. Zakres tematyczny rozprawy

Jednym z głównych kierunków rozwoju współczesnej technologii jest robotyka. Rozwija się ona w zakresie robotyki przemysłowej, zwanej też robotyką stacjonarną, która jest jednym z fundamentów wszystkich działań w zakresie automatyzacji produkcji, oraz robotyki mobilnej, związanej głównie z rozwojem autonomicznych urządzeń samojeżdżących sterowanych zdalnie (wózki) i tzw. robotów kroczących, które obecnie wykorzystuje się głównie jako rozwiązania specjalne (doświadczalne). Główny nurt robotyki mobilnej to różnego rodzaju wózki samojeżdżące: 2-, 3-, czy 4-ro kołowe. Ten rodzaj urządzeń robotycznych związany jest głównie (poza wózkami AGV, które wykorzystywane są do transportu przedmiotów) z zastosowaniami pozaprzemysłowymi, przede wszystkim do kontroli, inspekcji obszarów niebezpiecznych i trudnych w dostępie (wojsko, policja, służby specjalne), w których obecność człowieka, ze względów

bezpieczeństwa jest znacznie ograniczona, trudna, czy wręcz niemożliwa. Robotyka mobilna rozwija się obecnie dynamicznie. Umożliwiają to nowoczesne technologie z zakresu technik komputerowych: mikroelektronika i techniki mikroprocesorowe, mikroinformatyki, technologii sterowania bezprzewodowego, sensoryki i rozwoju algorytmów sterowania, planowania ruchu, wirtualnego modelowania otoczenia robotów jeżdżących. Poszukuje się sprawnych obliczeniowo metod i algorytmów planowania działań robotów mobilnych wykorzystujących pozyskiwaną on-line bieżącą informację o otoczeniu robota (tzw. metody mapowania i lokalizacji), opartych na metodach planowania działań bezkolizyjnych, wykorzystując nierzadko metody sztucznej inteligencji. Podobnie jak w robotyce przemysłowej (stacjonarnej), tak i w robotyce mobilnej, rozwój rozwiązań ukierunkowany jest na zastępowanie działań człowieka. W robotyce stacjonarnej i mobilnej, ze względu na specyfikę pracy ludzkiej (obsługa urządzeń i procesów technologicznych), rozwój konstrukcji i sterowania robotami koncentruje się na zastępowaniu pracy jednego człowieka lub grupy ludzi. Dlatego też w robotyce mobilnej poszukuje się nie tylko metod skutecznego sterowania jednym robotem mobilnym (jeżdżącym), ale również kilkoma robotami współpracującymi ze sobą (tzw. rojem), od których wymaga się synchronicznego – skoordynowanego – współdziałania ruchu. W robotyce znane są metody planowania ruchu robotów mobilnych, dotyczące ruchu jednego robota (np. metody grafowe, metody planowania ruchu wzdłuż zadanego toru robota lub nie mające tego toru itp.), jak i roju (np.: algorytmy rojowe: roje cząstek, mrówek). O ile sterowanie jednym robotem mobilnym zdaje się być w miarę opanowane, szczególnie z wykorzystaniem techniki sterowania on-line, o tyle w odniesieniu do sterowania rojem robotów, gdzie stosowanie technologii sterowania on-line jest co najmniej niepraktyczne i konieczne jest zastosowanie algorytmów (metod) sterowania pozwalających na autonomię działania robotów. To zaś bezwarunkowo wymaga ich wzajemnej koordynacji ruchowej w przestrzeni (ruch bezkolizyjny), w której rój realizuje swoje działania. Jest to więc zadanie nie tylko ważne, ale nawet fundamentalne w robotyce mobilnej, w odniesieniu do mobilnych układów wielorobotowych.

Doktorant, podjął się zadania rozwiązania problemu skutecznego sterowania rojem 5-ciu robotów mobilnych poruszających się autonomicznie w środowisku. Problem ten jest aktualny i ważny, i wpisuje się trendy rozwoju robotyki mobilnej, która obecnie koncentruje swoje zainteresowania m.in. na sterowaniu autonomicznym mobilnych układów wielorobotowych.

2. Treść rozprawy i jej kompozycja

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 8-miu rozdziałów oraz dwóch dodatków (łącznie 113 stron). Wykaz pozycji literaturowych liczy 158 pozycji z zakresu robotyki i technik badawczych stosowanych w tym obszarze. Zwraca uwagę fakt, że żadna z cytowanych w pracy publikacji nie jest autorstwa, ani współautorstwa Doktoranta!

Celem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej było, cytuję:

„[...] zaprojektowanie, konstrukcja i oprogramowanie roju 5-ciu robotów kołowych wraz z opracowaniem prawa sterowania umożliwiającemu samoorganizację roju w zadany kształt oraz ruch nadążny roju w środowisku z oraz bez przeszkód.”

Osiągnięcie przyjętego celu pracy ma prowadzić do udowodnienia tezy, że zastosowanie przyjętej metody „wirtualnych elementów sprężysto-tłumiący”:

- umożliwi przeprowadzenie syntezy ruchu robotów wchodzących w skład skonfigurowanego roju, w czasie rzeczywistym,
- pozwoli na jego samoorganizację i realizację ruchu nadążnego, w domyśle, wg zadanej trajektorii w środowisku z przeszkodami.

To zaś pozwoliło na określenie zakresu i założeń pracy, z których głównym elementem, prócz konstrukcji robota MRK, jest opracowanie jego równań sterowania i przeprowadzenie syntezy sterowania skonfigurowanego na podstawie MRK roju 5-ciu robotów (RMRK), umożliwiającej jego samoorganizację wokół przyjętego punktu odniesienia, z uwzględnieniem robotów sąsiadujących. Ich rozmieszczenie, w oparciu o wykorzystaną metodą wirtualnych sił sprężysto-tłumiących oparto na siatce zbudowanej z trójkątów równobocznych.

Doktorant podkreśla, że osiągnięcie przyjętego celu i tezy wymaga również, opracowanie struktury układu sterowania robotem i jego specjalistycznego, dedykowanego oprogramowania, jak i układu sterowania rojem w procesie samoorganizacji i sterowania nadążnego. Zrealizowanie tych zadań umożliwiło przeprowadzenie testów numerycznych i ich weryfikację na dedykowanym stanowisku laboratoryjnym.

W początkowej części pracy, Doktorant w bardzo syntetycznej formie przedstawił:

- zaproponowaną przez siebie metodykę przeprowadzonych badań (rozwiązanie zadań sterowania robotem MRK i rojem robotów, badań symulacyjnych, ich weryfikację i ocenę jakościową);
- przegląd aktualnego stanu wiedzy z zakresu robotyki mobilnej, sterowania i planowania ruchu robotów mobilnych, z uwzględnieniem sterowania rojem robotów.

W rozdziale 3, Autor przedstawił konstrukcję wykorzystanych do badań robotów kołowych (MRK). Omówił rozmieszczenie elementów napędowych i sterujących gwarantującą ich wyważenie (robot dwukołowy) oraz budowę układu sterowania z zastosowanymi elementami elektronicznymi (układ napędowy: silniki i przekładnia, akumulator, procesor, interfejsy komunikacyjne: USB i Wi-Fi, kartę sieciową, układ pomiarowy silnika – enkoder silnika itd.). Sterowanie robotem oparto na metodzie sterowania impulsowego WPM, zaś komunikację pomiędzy robotami tworzącymi rój (odległość, orientacja) na transmisji Wi-Fi. Algorytm sterowania robotem oprogramowano w programie Matlab/Simulink z wykorzystaniem biblioteki Embadded Code, a do regulacji ruchu nadążnego robota zaimplementowano regulator typu PD, co wydaje się uzasadnione nie tylko, jak podaje Autor, ze względu na względną prostotę algorytmu sterowania regulatora i tym samym skrócenie czasu obliczeń, ale również na warunki laboratoryjne w jakich przeprowadzono testy symulacyjne, a przez to na charakter możliwych zakłóceń. Oczywiście w warunkach bardziej złożonych (Autor podkreśla, że wykorzystane roboty mogą poruszać się tylko po płaskiej powierzchni, o określonej przyczepności kół), np. przy nierównej i niejednorodnej powierzchni, czy większej liczbie przeszkód zastosowanie bardziej wydajnego procesora i regulatora uniwersalnego wydaje się bardziej uzasadnione. Teraz jednak, w warunkach laboratoryjnych, do sprawdzenia opracowanej przez Doktoranta koncepcji sterowania rojem robotów, regulator PD wydaje się wystarczający, co zresztą potwierdzają otrzymane wyniki badań.

W kolejnych etapach pracy, rozdz. 4 (powiązany z dodatkiem A i B), Doktorant rozwiązuje algorytm sterowania jednym robotem (MRK) i rojem (RMRK). Rozwiązuje zagadnienie kinematyki i dynamiki ruchu robota. Zaś w rozdziale 5, rozwiązano problem syntezy ruchu roju robotów (RMRK): jego samoorganizację wokół przyjętego punktu odniesienia z uwzględnieniem robotów sąsiadujących tworzących przedmiotowy rój, sterowanie w układzie hierarchicznym dla sterowania nadążnego (za punktem odniesienia poruszającym się wg zadanej trajektorii) w środowisku bez przeszkód i z przeszkodami. We wszystkich tych przypadkach opracowano równanie sterowania (robota i roju dla założonych warunków) oraz strukturę układu sterowania. Każdy z tych przypadków kończy przeprowadzony proces symulacji numerycznej potwierdzający poprawność uzyskanych rozwiązań. Oba rozdziały kończy ocena jakościowa przeprowadzonych testów, która opiera się na wykorzystaniu metody pierwiastka błędu średniokwadratowego i potwierdza dobrą dokładność prowadzonego (symulowanego) procesu sterowania robotami.

Poprawność przeprowadzonych symulacji numerycznych potwierdzają wyniki testów eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku badawczym. Badania te przeprowadzono wykorzystując technologię Motion Capture opartą na złożonym (min. 3 kamery na podczerwień) systemie wizyjnym i metodzie triangulacji pozwalającej na określenie położenia robota. Do testów wykorzystano stanowisko wyposażone w układ 25 kamer co, jak podaje Autor, pozwala na określenie położenia każdego robota z dokładnością do 0,15mm.

Wykorzystując takie warunki, przeprowadzono testy symulacji działania rzeczywistego roju 5-ciu robotów dla zadania:

- a) samoorganizacji roju wokół punktu odniesienia (pkt. 6.2),
- b) realizacji ruchu nadeżnego roju w środowisku bez przeszkód.

Porównując otrzymane wyniki w tych testach z wynikami uzyskanymi w testach numerycznej uważam, że są one porównywalne i zadawalające. Różnice pokazane na kolejnych wykresach (na niekorzyść symulacji rzeczywistej), moim zdaniem, wynikają z wpływu rzeczywistych warunków na ruch robotów: tarcie kół, bezwładność sterownicza napędów (czas reakcji robota na sygnał), bezwładność zastosowanych układów elektronicznych (pomiar i „obróbka” sygnałów, transmisja danych itd.). Dlatego uważam, że wyniki te spełniają oczekiwania. Co najważniejsze, zachowany jest w nich trend zmian mierzonych wartości (badanych) tych parametrów w symulacji numerycznej i rzeczywistej. Pracę kończy: podsumowanie (rozdz. 7), wskazanie kierunków dalszych badań (rozdz. 8), dodatki A i B oraz bibliografia.

3. Oryginalne osiągnięcia

Wziąwszy pod uwagę złożoność problemu badawczego (przedstawiona w pracy obszerna bibliografia podkreśla ważność podjętego przez Doktoranta tematu w robotyce mobilnej), sposób jego rozwiązania uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa ma duże walory poznawcze. U podstawy wszystkich oryginalnych osiągnięć Autora pracy leży opracowany numeryczny model sterowania robota (MRK) i roju (RMRK), bazujący na opracowanych równaniach sterowania MRK i RMRK. Za oryginalne elementy pracy uważam:

- wybór i skuteczne rozwinięcie metody wirtualnych sił i szczegółowe rozwinięcie metody sił sprężysto-tłumiących do sterowania bezkolizyjnym i samoorganizującym się ruchem roju robotów wg zaplanowanej trajektorii spełniającej warunek utrzymania zadanej konfiguracji roju (wielokąt foremny) i opracowanie równania sterowania

robotem MRK spełniające wymagania sterowania rojem RMRK. Przeprowadzone badania, wykazały poprawność przejętej tezy. Znaczenie tych badań wzmacnia fakt, że na rynku krajowym tego rodzaju badania nie są powszechne. Dlatego zachęcam Autora do opracowania, na bazie uzyskanych wyników, bardziej dostępnej publikacji, np. w formie monografii. Myślę, że nawet na rynku europejskim, przy odpowiednim rozwinięciu tematu, znalazłaby ona grono zainteresowanych czytelników;

- opracowanie równania sterowania dla roju MRK, pozwalającego na zadawanie parametrów konfiguracyjnych roju;
- opracowanie struktury układu sterowania robotem MRK, pozwalającej na logiczne połączenie go w układ 5-ciu robotów tworzących rój i jego spójne sterowanie, jako jednego zwartego układu o zadanej konfiguracji.

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na:

- dużą wiedzę Autora z zakresu modelowania kinematyki i dynamiki mobilnych robotów kołowych oraz umiejętność samodzielnego rozwiązywania zagadnień związanych z podejmowaną dziedziną nauki,
- dużą wiedzę Autora z zakresu zastosowania technik komputerowych i programowania.

W ogólnym ujęciu przedstawiona do oceny praca przedstawia dobry poziom merytoryczny. Omawiane w niej zagadnienia przedstawione zostały w sposób poprawny i logicznie spójny. Forma prezentowania materiału, też nie budzi zastrzeżeń.

4. Uwagi szczegółowe

W pracy można wskazać kilka niedociągnięć. Nie wpływają znacząco na moją pozytywną ocenę uzyskanego rozwiązania. I tak można wskazać na:

- prawie powszechny brak odwołań do literatury źródłowej; dotyczy to np. przytaczanych w pracy równań, np. pkt. 2.3 (2.3.1; 2.3.1, 2.3.3, czy 5.3.1. – błędu PBSK, itd.) – uwaga ta dotyczy prawie wszystkich równań cytowanych w pracy;
- brak opisów dotyczących parametrów równań, np. równania 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, ..., 2.3.10., itd, czy np. parametru J_k , oraz indeksów tych parametrów; niektóre z nich opisane są w dodatkach, jednak w tekście podstawowym pracy brak tego opisu, co utrudnia percepcje omawianych treści; dodatkowo niektóre parametry interpretowane są w różny sposób; i tak np. symbol R raz oznacza oporność silnika, (str. 101), a raz przestrzeń kartezjańską robota MRK; szkoda, że Autor nie opracował zestawienia wszystkich parametrów wykorzystywanych w pracy do opisu zależności matematycznych, co zdecydowanie poprawiłoby czytelność treści;

- omawiając symulację wirtualną uzyskanego rozwiązania, Autor zaproponował, że dla poprawy „przejrzystości wykresów” przedstawione zostały w pracy wyniki dla 3 z 5-ciu robotów; Doktorant nie podał jakimi kryteriami się kierował przy wyborze tych 3, czy są to te najlepsze – najlepiej spełniające oczekiwania opracowanej metody, czy „przypadkowo” wybrane 3 – które? Dodatkowo Autor nie ustosunkował się do wyników tych 2-ch pominiętych: są lepsze, gorsze, takie same, bez wpływu na ogólny wynik procesu symulacji?
- oceniając wyniki przeprowadzonych testów numerycznych i rzeczywistych, Autor podaje wyniki jakościowe w liczbach bezwzględnych: odległości pomiędzy robotami trzymającymi założony szyk (na bazie trójkąta równobocznego), odległość pomiędzy środkiem geometrycznym roju, a punktem odniesienia; szkoda, że Autor nie próbował ocenić tych wyników, czy są one zadawalające, czy nie, co może wpływać na wartościowanie tych wyników: bardzo dobre, dobre, dostateczne itd., i co może być przyczyną tych nieścisłości.

Moim zdaniem brakuje omówienia zastosowanych w pracy opracowanych przez Autora algorytmów sterowania rojem robotów i algorytmu nadążania; z kontekstu przedstawionego opisu wynika, że algorytm sterowania nadążnego dotyczy punktu odniesienia roju; w jakiej formie został on (w stosunku do rozwiązania znanego z teorii sterowania) wykorzystany, jakie zastosowano wartości parametrów sterowania nadążnego, które przecież mają istotny wpływ na jakość tego sterowania.

Dodatkowo:

- w przypadku symulacji wirtualnej ruchu roju robotów w środowisku z przeszkodami, podano jeden przypadek przestrzennego rozmieszczenia przeszkód; Autor nie odniósł się do innych przypadków rozmieszczenia przeszkód, np. w dwóch rzędach, po lewej i prawej stronie założonego, prostoliniowego toru punktu odniesienia; jak zachowa się wtedy rój? czy rój może (okresowo) poruszać się w szeregu (okresowo), żeby ominąć przeszkody? A co w przypadku równoczesnego wystąpienia oddziaływania na robota wirtualnych sił pochodzących od dwóch przeszkód jednocześnie, o czym wspomina Doktorant w pracy; szkoda, że Autor nie podjął bardziej wnikliwej dyskusji tych zagadnień;
- w pkt 6.2.1, Autor stwierdza, cytując: „Wyniki przeprowadzonej weryfikacji pokryły się z wynikami symulacji w dostateczny sposób, by stwierdzić, że proponowany algorytm sterowania umożliwi samoorganizację roju w zadany kształt pięciokąta foremnego”. Co to znaczy „w dostateczny sposób”? Zaś w podsumowaniu Autor stwierdza wręcz,

że: „Określono jakość realizacji procesu samoorganizacji roju oraz realizacji zadanej trajektorii roju z użyciem przyjętych wskaźników jakości.” Jakie są kryteria tej oceny?

W przedstawionej do oceny pracy, brakuje również:

- doświadczalnej weryfikacji modelu wirtualnego ruchu RMRK w środowisku z przeszkodami. Autor w żaden sposób nie odniósł się w pracy do tego problemu.
- dyskusji dotyczącej różnic w wynikach pochodzących z symulacji wirtualnej i testów doświadczalnych. Z czego te różnice wynikają i czy można (jak?) je zmniejszyć, bądź usunąć?

Pozostałe uwagi szczegółowe (głównie interpunkcja!), nie wpływają na jakość prezentowanego materiału, zostały zaznaczone w tekście i przekazane Autorowi.

Uważam, że praca, mimo przedstawionych uwag ma duży potencjał naukowy i może być, po uzupełnieniu, podstawą szerszego opracowania naukowego, o czym wspomniałem już w pkt. 3 niniejszej recenzji. Rozwinięcie uzyskanego rozwiązania i zagadnienia podane w pkt. 8: pt.: „Kierunki dalszych badań”, znakomicie uzupełniłoby zawarty w pracy doktorskiej materiał.

5. Wniosek końcowy

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Autor zawarł w niej najbardziej istotne dla rozwiązywanego problemu zagadnienia. Zaprezentowany materiał jest przejrzysty, uporządkowany oraz spójny logicznie i w sposób poprawny przedstawia analizowane treści. To z kolei pozwala stwierdzić, że Autor dobrze radzi sobie z postawionymi przed Nim zadaniami.

Tym samym uważam, że Pan mgr inż. Jakub WIECH wykazał się niezbędnym zasobem wiedzy z zakresu analizy, modelowania i sterowania robotami mobilnymi, ze szczególnym uwzględnieniem sterowania rojem robotów, a opiniowana praca mieści się w obszarze dziedziny naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w szczególności dotyczy eksploatacji mobilnych systemów robotycznych i spełnia warunki stawiane przez ustawę o stopniach i tytule naukowym (Dz.U. nr 65, z dnia 14 marca 2003) w odniesieniu do rozpraw doktorskich i może być dopuszczona do publicznej obrony.

