Politechnika Śląska
UCZELNIA BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Dr hab. inż.
Sławomir Duda, prof. PŚ

Kierownik Katedry

l.dz.

Gliwice, 14.02.2022 r.

Wpłynęło dnia	17.02.2022
Podpis pracownika dziekanatu WBMiL:	CEJh

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Wincentego Skwarka

pod tytułem:
„Kinetyka współpracujących robotów"
podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz nr RM-530-0204/18/2021 z dnia 20 października 2021 r., do którego dołączono egzemplarz pracy doktorskiej.

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
ul. Konarskiego 18a, pok. 161, 44-100 Gliwice
+48 32 237 13 86
slawomir.duda@polsl.pl

NIP 631 020 07 36
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

HR EXCELLENCE IN RESEARCH

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Roboty mobilne AGV i AMR są coraz częściej stosowane do bezobsługowego transportu w nowoczesnych halach przemysłowych. Ważną ich cechą jest ich autonomiczność, czyli samodzielne podejmowanie decyzji, co znacząco usprawnia prace logistyczne w procesie produkcyjnym czy magazynowaniu.

Jedną z najważniejszych zasad, na podstawie której projektuje się współczesne systemy zrobotyzowane, jest interoperacyjność, czyli zdolność robotów do komunikowania się ze sobą, w tym poprzez Internet Rzeczy. To sprawia, że stajemy się świadkami czwartej rewolucji przemysłowej, jest to tzw. przemysł 4.0.

W ostatnich latach zauważa się duże zainteresowanie problemem sterowania wielu współpracujących pojazdów zrobotyzowanych zgodnie z wizją, że wiele pojazdów zrobotyzowanych może wykonywać zadania szybciej i wydajniej niż jeden pojazd. W przypadku robotów mobilnych zespół współpracujących robotów tworzy tzw. formację, służącą do wspólnego wykonywania określonego zadania. Formacje robotów są stosowane tam, gdzie dane zadanie jest tak złożone lub trudne, że pojedynczy robot nie może go wykonać samodzielnie. Takie sytuacje występują głównie w transporcie wielkogabarytowym. Prototypowanie układu sterowania ruchem mobilnego robota kołowego, w tym formacją robotów, wymusza opracowanie dokładnych modeli matematycznych opisujących ich ruch. Jak zauważa Autor dysertacji, pomimo istnienia szeregu prac dotyczących modelowania mobilnych robotów kołowych w dotychczasowej literaturze trudno jest znaleźć prace dotyczące modelowania dynamiki współpracujących robotów mobilnych.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna".

2. Przegląd treści pracy

Rozprawę doktorską podzielono na pięć rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury, streszczeniami oraz wykazem oznaczeń zawartych w pracy. Rozprawa została napisana na 138 stronach maszynopisu formatu A4.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do treści zasadniczych analizowanych w ramach recenzowanej dysertacji. Autor opisał w nim podstawowe wiadomości z modelowania układów rzeczywistych, jak również zdefiniował cel pracy jako „budowę modeli matematycznych o właściwościach aplikacyjnych, opisujących zadania dynamiki układów mechanicznych złożonych ze współpracujących, nieholonomicznych robotów kołowych, transportujących obiekt".

Rozdział drugi dotyczy przedstawienia równań ruchu opisujących kinematykę formacji robotów transportujących obiekty. W pierwszym podrozdziale przedstawiono generator trajektorii, po której ma się poruszać określony punkt formacji. Następnie wyprowadzono równania kinematyki układu dwóch współpracujących robotów transportujących belkę, stosując metodę klasyczną, jak również wyprowadzono równania kinematyki wykorzystując metodę Denavita – Hartenberga. W rozdziale tym zaprezentowano również równania kinematyki dla przypadku czterech współpracujących robotów transportujących bryłę oraz ponownie dla przypadku dwóch współpracujących robotów z tym, że zmianie uległ punkt zamocowania belki na ich powierzchni. Wprowadziło to powstanie punktów osobliwych w opisie kinematyki ruchu robotów, a co za tym idzie - brak możliwości rozwiązania wyprowadzonych równań. Autor przedstawił sposób rozwiązania tego problemu. W końcowej części rozdziału drugiego Autor zamieścił wyniki symulacji komputerowej prowadzonej w środowisku programu komputerowego Matlab/Simulink, przedstawiając obraz kolejnych położeń współpracujących robotów transportujących oraz przebiegi parametrów kinematycznych.

Rozdział trzeci zatytułowano „Dynamika współpracujących robotów". W niniejszym rozdziale Autor przeprowadził szereg symulacji numerycznych, wykorzystując opracowane modele matematyczne dynamicznych równań ruchu. Do sformułowania równań ruchu wykorzystano metodę Lagrange'a II rodzaju z mnożnikami. W celu eliminacji z równań ruchu mnożników Lagrange'a zastosowano metodę rzutową. Opracowano modele dla układu dwóch współpracujących robotów dla przypadku z osobliwościami, dwóch współpracujących robotów transportujących obiekt poza osią kół, jak również model dynamiki trzech współpracujących robotów.

Kolejny rozdział, czwarty, poświęcono przedstawieniu zastosowania modeli formacji robotów w prototypowaniu algorytmów sterowania. W rozdziale tym zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla przypadku dwóch robotów transportujących belkę z dopuszczeniem występowania konfiguracji osobliwych. W tym celu wykorzystano roboty AmigoBot. Porównano przebiegi zmian prędkości kątowych kół napędzających roboty wyznaczone na podstawie wyprowadzonych modeli matematycznych z tymi zarejestrowanymi podczas badania eksperymentalnego oraz przebiegi zmian momentów napędowych, otrzymując zadowalającą zbieżność.

Rozprawa kończy się podsumowaniem i lakonicznym wskazaniem dalszych kierunków badań.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa posiada przejrzysty układ treści. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od zagadnień podstawowych jak przedstawienie procesu modelowania układów mechanicznych do zagadnień ściśle związanych z pracą, opracowaniem modeli matematycznych formacji robotów.

Analizując istniejący stan wiedzy, dotyczącej opracowania modeli dynamiki współpracujących robotów, Autor zauważa niedostatek tego typu publikacji w literaturze światowej. Stąd podjęcie się tego tematu przez Autora dysertacji uważam za przejaw odwagi naukowej, gdyż Autor nie obawia się zmierzyć z materią naukową nie do końca jeszcze poznaną.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania: opracowania modeli matematycznych o właściwościach aplikacyjnych, opisujących zadania dynamiki złożonych układów mechanicznych, na przykładzie formacji robotów mobilnych. Autor zaproponował i zweryfikował metodykę postępowania podczas modelowania układów wielorobotowych w zadaniach transportowych. Osiągnięcie postawionego celu wymagało od Autora:

- opracowania modeli matematycznych kinematyki współpracujących robotów dla przypadków dwóch robotów transportujących belkę, czterech robotów transportujących bryłę i uogólnionego na n robotów transportujących bryłę, zadania kinematyki zostały rozwiązane na podstawie klasycznych metod modelowania jak i przy wykorzystaniu notacji Denavita – Hartenberga,
- opracowania modeli matematycznych dynamiki współpracujących robotów dla przypadków: dwóch robotów transportujących belkę oraz trzech robotów transportujących bryłę,
- opracowania adekwatnych modeli numerycznych analizowanych formacji robotów w środowisku programu Matlab/Simulink,
- przeprowadzenia badań doświadczalnych dla przypadku współpracy dwóch robotów transportujących belkę.

Opracowane modele oraz algorytmy opisujące kinetykę formacji robotów stanowią oryginalne oraz nowatorskie podejście do problemu budowy modeli matematycznych opisujących ruch współpracujących robotów kołowych transportujących obiekt. Opracowane metody i algorytmy zostały zweryfikowane w trakcie badań stanowiskowych.

Recenzowana praca wskazuje, że Doktorant wykazał się umiejętnością łączenia wiedzy teoretycznej i praktycznej pochodzącej z wielu dyscyplin nauki: mechaniki, automatyki i informatyki.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne, dotyczy bowiem istotnych zagadnień, szczególnie w organizacji pracy współpracujących robotów mobilnych.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne, takie jak:

- Autor w pracy modeluje ruch formacji robotów, których charakterystyczny punkt formacji (środek masy transportowanego ładunku) porusza się po trajektorii będącej literą S; z czego wynika takie założenie, dlaczego to nie jest np. cyfra 8?
- Jeżeli, jak zaznaczył Autor (str. 36) „zadaniem robotów jest przetransportowanie belki po zadanej trajektorii", dlaczego roboty poruszają się jedynie po określonej trajektorii, skoro zadanie to nie jest jednoznaczne, jakie dodatkowe założenia zostały poczynione? Czy zaprezentowana w pracy konfiguracja równoległa dla formacji dwóch robotów transportujących belkę jest optymalna np. w stosunku do konfiguracji szeregowej?
- Autor wiele razy odnosi się w swojej dysertacji do opracowanych przez siebie programów komputerowych, podając ich nazwy własne, np. na s. 69 „robot.m, bryla.m czy dane_sym.m". Moim zdaniem przedstawianie nazw programów nie wnosi dla czytelnika nic istotnego, jeżeli nie idzie za tym przedstawienie w dodatku pracy skryptu programu. Pozwoliłoby to na wyeksponowanie dodatkowych umiejętności Autora związanych z tworzeniem programów komputerowych. Analogicznie, przedstawienie na rys. 4.2 schematu funkcjonalnego środowiska szybkiego prototypowania z wykorzystaniem nazw własnych programów staje się niezrozumiałe dla czytelnika. Znacznie lepszym rozwiązaniem w tym przypadku byłoby przedstawienie algorytmu ich działania.
- W przedstawianych symulacjach zadań formacji robotów zarówno w przypadku transportu belki przez dwa roboty, jak i transportu bryły przez trzy roboty założono ciężar transportowanego elementu jako 1 kg; czy jest to celowe czy przypadkowe założenie? W celu weryfikacji opracowanych modeli przeprowadzono analogicznie badania z transportowanym prętem o masie 1,08 kg. Czy były prowadzone badania dotyczące innych parametrów elementu transportowanego (masa, długość) przy różnych stanach nawierzchni (sucha, mokra), czy badania były kilkakrotnie powtarzane i jakie to miało znaczenie przy porównaniu wyników z rozwiązaniem otrzymanym z modeli numerycznych? Generalnie brak różnorodności badań weryfikacyjnych zaprezentowanych w pracy budzi poczucie niedostatku.
- Praca kończy się podsumowaniem, właściwsze jednak byłyby wnioski.
- Brak jednostek fizycznych przy oznaczeniach w wykazie oznaczeń.

Występujące w pracy błędy edytorskie, stylistyczne czy językowe nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych informacji. Zauważone błędy redakcyjne zostały przekazane autorowi, np.:

- s. 34 w tekście znajduje się oznaczenie M, które nie zostało wcześniej wyjaśnione,
- s. 36, nieprawdziwe jest zdanie „Zadaniem robotów jest przetransportowanie belki po zadanej trajektorii". Trajektoria odnosiła się jedynie do środka masy belki.
- s. 105, niewłaściwy podpis pod rysunkiem 3.7. Rysunek ten nie przedstawia „Rozwiązania zadania odwrotnego dynamiki".

- s. 110, nieczytelny opis na rys. 3.14, analogicznie 3.15 i 3.16.
- s. 120 podwójna kropka na końcu zdania rozdziału 4.1. „... koła robotów..”

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania należy ocenić pozytywnie ze względu na:

- prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań,
- wykazane przez autora dobre rozeznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym umiejętności praktyczne budowy modeli matematycznych i ich numerycznych odpowiedników opracowanych w środowiskach Matlab/Simulink,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków.

4. Ocena końcowa

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny, nie pomniejszają jednak osiągnięć Doktoranta w uzyskiwaniu wartościowych wyników naukowych i poznawczych. Mają zwrócić uwagę na dalszą pracę i uczulić na staranność w przygotowaniu samodzielnych opracowań naukowych, wnikliwą analizę oraz zgłębianie realizowanych przez Autora problemów badawczych.

Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską, należy podkreślić aktualność jej tematyki i potrzebę wynikającą ze zwiększającego się zainteresowania wykorzystywania robotów mobilnych, w tym formacji robotów, w transporcie elementów wielkogabarytowych. Praca wnosi ważny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, gdyż dotyczy zagadnień matematycznego modelowania ruchu układów fizycznych. Opiniowana praca pana mgr. inż. Wincentego Skwarka cechuje się interdyscyplinarnym podejściem do badań modelowych oraz doświadczalnych ruchu formacji robotów mobilnych. Zawiera oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego i ma potencjał aplikacyjny. Opracowana podczas realizacji niniejszej dysertacji metodyka modelowania układów złożonych z grupy współpracujących robotów w zadaniach transportowych oraz przeprowadzone badania doświadczalne świadczą o odpowiednim przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo – badawczej. Potwierdza to również zgromadzony dorobek publikacyjny.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie do przewodu doktorskiego, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 2018 roku.

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta mgr inż. Wincentego Skwarka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Sławomir Duda