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, 3.08.2020 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Pawła Herbina

pod tytułem:
„Zastosowanie skanera ruchu kończyny górnej człowieka do sterowania urządzeniami dźwigowymi z wykorzystaniem siłowego sprzężenia zwrotnego"

podstawa opracowania: pismo Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nr L. dz. WIMiM/320/2020 z dnia 02.07.2020, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

W ciągu ostatnich lat w dziedzinie robotyzacji nastąpił szybki wzrost zastosowań robotów manipulacyjnych w zadaniach, które wymagają jednoczesnej realizacji zadanej ścieżki ruchu i siły interakcji z otoczeniem. W zakresie zastosowań przemysłowych dotyczy to m. in. zarówno zagadnień montażowych, robotyzacji obróbki mechanicznej, jak i złożonego zagadnienia współpracy robotów z ludźmi.

Jak zauważył Autor, ostatnie wydarzenia związane z pojawieniem się pandemi koronawirusa SARS CoV-2 sprawiły, że powstała potrzeba opracowania rozwiązań umożliwiających sterowanie maszynami na odległość, czyli tzw. teleoperacji.

Dokonując przegladu literatury można zauważyć, że współczesne interfejsy do kontrolowania ruchu manipulatorów czy robotów są najczęściej bardzo proste i nie do końca zbudowane zgodnie ze stanem wiedzy na temat intuicyjnych interfejsów i interakcji człowiek-maszyna. Konstrukcja interfejsu może mieć znaczący wpływ na sukces telemanipulacji wówczas, gdy urządzenie wchodzi w kontakt z otoczeniem, a szczególnie wtedy, gdy możliwe jest przeniesienie wrażeń siłowych z urządzenia sterowanego do układu taktylnego człowieka, np. dłoni czy całej kończyny.

Z przeprowadzonego przez Doktoranta przegladu literatury wynika, że zagadnieniem naukowym wciąż nie w pełni rozpoznanym jest wykorzystanie skanera ramienia operatora w postaci egzoszkieletu kończyny górnej do sterowania maszynami przeładunkowymi.

Opracowanie odpowiednich algorytmów i metod związanych z przeniesieniem ruchu z egzoszkieletu na sterowaną maszynę jest kluczową sprawą w aspekcie efektywności i poprawności działania sterowania w konwencji teleoperacji.

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".

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

75 lat POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

2. Przegląd treści pracy

W pracy zaprezentowano nowatorskie urządzenie, oparte na idei działania egzoszkieletu kończyny górnej, przeznaczone do sterowania ruchem żurawia przeładunkowego. Urządzenie umożliwia wykorzystanie systemu taktylnego kończyny górnej człowieka do sterowania urządzeniem dźwigowym.

Autor opracował modele matematyczne urządzenia (egzoszkieletu kończyny górnej człowieka) i żurawia przeładunkowego, algorytm sterowania napędami urządzenia, system przeniesienia ruchu kończyny na ruch żurawia oraz dokonał weryfikacji poprawności działania zaproponowanego rozwiązania.

Rozprawę doktorską podzielono na sześć rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury, wykazem rysunków, streszczeniami oraz wykazem skrótów i oznaczeń zawartych w pracy.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Przegląd literatury" zamieszczono wprowadzenie do pracy, przy czym głównie skoncentrowano się na omówieniu egzoszkieletów wykorzystywanych w rehabilitacji, przedstawiając rodzaje napędów w przegubach. W rozdziale tym omówiono ponadto metody zdalnego sterowania maszynami w konwencji teleoperacji.

W rozdziale drugim zawarto cel i zakres pracy. Cel pracy zdefiniowano jako opracowanie urządzenia oraz metody sterowania umożliwiające przekazywanie wrażeń siłowych do systemu taktylnego człowieka na podstawie zachowania obiektu sterowanego w postaci żurawia przeładunkowego.

W rozdziale trzecim zatytułowanym „Budowa stanowiska do badań doświadczalnych" przedstawiono analizę zakresów ruchów w poszczególnych przegubach kończyny górnej człowieka. Analizy tej dokonano, wykorzystując w badaniach metodę fotogrametryczną. Badania te posłużyły Autorowi do opracowania struktury kinematycznej egzoszkieletu oraz modeli kinematyki prostej i modelu dynamiki ruchu. W dalszej części rozdziału Doktorant przedstawił sposób przeniesienia napędu na poszczególne człony egzoszkieletu oraz pomiar momentów napędowych w przegubach. Następnie omówiono konstrukcję egzoszkieletu oraz przedstawiono model kinematyki prostej i odwrotnej żurawia przeładunkowego.

Rozdział czwarty dotyczy metod sterowania przegubami egzoszkieletu. Opisano metodę sterowania polegającą na pozycjonowaniu poszczególnych przegubów względem siebie, metodę sterowania polegającą na kontrolowaniu wartości zarówno momentu napędowego generowanego w napędach przegubów, jak i aktualnego położenia egzoszkieletu w przestrzeni oraz metodę sterowania opartą na kontroli samego momentu napędowego. W rozdziale tym opisano ponadto bardzo istotną kwestię doboru sztywności dodatkowych sprężyn instalowanych w układzie przeniesienia napędu, umożliwiających zwiększenie czułości układu sensorycznego, co pozwala precyzyjnie sterować momentem napędowym.

Rozdział piąty zatytułowany „Układ sterowania Master – Slave" poświęcony został implementacji metod sterowania opisanych w rozdziale czwartym w układzie teleoperacji do sterowania pracą dźwigu przeładunkowego. Większość rozdziału zajmuje opis przeprowadzonych testów współpracy badanych urządzeń z siłowym sprzężeniem zwrotnym.

Rozprawa kończy się przedstawieniem wniosków końcowych i wskazaniem dalszych kierunków badań.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa posiada przejrzysty układ treści. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, poczynając od zagadnień podstawowych jak przedstawienie konstrukcji omawianych urządzeń, opis zastosowanych napędów poprzez algorytmy sterowania aż do zagadnień złożonych, związanych ze sprzężeniem egzoszkieletu kończyny górnej z urządzeniem dźwigowym w systemie teleoperacji.

Analizując istniejący stan wiedzy, dotyczącej istniejących rozwiązań związanych ze sterowaniem urządzeń dźwigowych w kontekście chwytania i przenoszenia ładunku poprzez końcówkę żurawia przeładunkowego, Autor zauważa, że zwiększenie poziomu interaktywności współpracy operatora z maszyną stanowi istotny aspekt opracowywania interfejsów komunikacyjnych dla współczesnych maszyn.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania opracowania systemu sterowania pracą żurawia przeładunkowego, wykorzystując do tego celu egzoszkielet kończyny górnej sprzężony z urządzeniem dźwigowym poprzez system teleoperacji. Osiągnięcie postawionego celu wymagało od Autora:

- zaprojektowania i wykonania egzoszkieletu kończyny górnej człowieka,
- opracowania modelu kinematyki prostej i odwrotnej egzoszkieletu,
- opracowania układu napędowego poszczególnych przegubów egzoszkieletu wraz z systemem sensorycznym mierzącym momenty napędowe w poszczególnych przegubach,
- opracowania modelu kinematyki prostej i odwrotnej urządzenia dźwigowego,
- dokonania sprzężenia sprzętowego poszczególnych systemów (mechaniczny – elektryczny – informatyczny),
- opracowania metod i algorytmów sterowania pracą żurawia przeładunkowego za pomocą ruchów egzoszkieletu kończyny górnej.

Opracowane modele oraz algorytmy sterowania stanowią oryginalne oraz nowatorskie podejście do problemu sterowania maszynami przeładunkowymi, a zastosowanie egzoszkieletu kończyny górnej, jak wykazały badania przeprowadzone przez Doktoranta, zwiększają intuicyjność sterowania urządzeniem. Efekt ten uzyskał Doktorant dzięki wykorzystaniu naturalnych ruchów ręki operatora mających odwzorowywać przemieszczanie się poszczególnych segmentów żurawia przeładunkowego w trakcie wykonywania przez niego prac. Opracowane metody i algorytmy sterowania urządzeniem zostały zweryfikowane w trakcie badań stanowiskowych. Uwzględnienie w opracowanym systemie sterowania pracą żurawia przeładunkowego naturalnych ograniczeń występujących w przestrzeni roboczej żurawia, przeniesienie do urządzenia sterującego wrażenia podnoszenia ładunku, dostosowanie dynamiki ruchu urządzenia sterującego do dynamiki obiektu sterowanego jest niewątpliwie dużym osiągnięciem naukowym i aplikacyjnym Autora.

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

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne, dotyczy bowiem istotnych zagadnień, szczególnie dla organizacji pracy operatorów maszyn przeładunkowych.

Zdaniem recenzenta zakres prac przedstawionych w recenzowanej pracy doktorskiej jest bardzo szeroki, co mogło jednak skutkować tym, że niektóre jej fragmenty zostały opisane w sposób niewystarczający.

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

- w kilku miejscach dysertacji Autor wskazuje na problem generowania drgań konstrukcji żurawia wynikających za sprzężenia jego pracy z ruchem egzoszkieletu, występujących zwłaszcza w przypadku siłowego sprzężenia zwrotnego pomiędzy egzoszkieletem a żurawiem. W pracy zabrakło wywodów wykazujących stabilność dynamiczną układu, zagadnień szczególnie istotnych podczas sterowania układem, który wchodzi w interakcję z otoczeniem, w tym z otoczeniem wirtualnym;
- autor nie wyjaśnił w wystarczający sposób idei sterowania pracą żurawia przeładunkowego za pomocą egzoszkieletu, szczególnie tego, w jaki sposób należy sterować wysięgiem ramienia żurawia;
- w rozdziale poświęconym omówieniu metod sterowania „Master – Slave" Autor uwzględnia w algorytmie sterowania sprzężenie zwrotne zarówno od bezwładności żurawia, jak i od kontaktu z wirtualnymi przeszkodami, przy czy badania te prowadzi oddzielnie. Powstaje zatem pytanie, w jaki sposób operator będzie rozpoznawał, z jakim oddziaływaniem aktualnie ma do czynienia;
- w pracy większość prezentowanych przebiegów dotyczy przegubu czwartego, nie wiadomo jednak, czym Autor uzasadnia taki wybór;
- na s. 45 Autor napisał, że "konieczne jest ograniczenie ruchomości przegubów tak, aby urządzenie nie wykonywało ruchu poza zakresem ruchu stawów operatora. Ograniczenia te są realizowane programowo ". Czy wobec tego Autor nie obawia się, że w wyniku błędu ludzkiego, np. w oprogramowaniu, może dojść do

niebezpiecznej sytuacji dla operatora i czy nie powinny wobec tego być zastosowane ograniczenia mechaniczne, np. krańcówki zakresu ruchu;

- na s. 90 Autor napisał: „Ponadto żuraw przeładunkowy z uwagi na ograniczenia mechaniczne nie jest w stanie odwzorować ruchów precyzyjnych, za które odpowiadają przeguby 5 – 7." Czy wobec tego Autor uważa, czy wymagana była aż tak złożona struktura egzoszkieletu kończyny górnej w celu sterowania przenośnikiem?;
- brak jednostek fizycznych przy oznaczeniach w wykazie oznaczeń.

W pracy zauważono błędy redakcyjne, które zostały przekazane autorowi, np.:

- we wzorach 3.21 do 3.23 występuje symbol *R*, który nie został wcześniej wyjaśniony;
- w rozdziale 3.1.3 Autor zamieścił niewłaściwe tytuły podrozdziałów „Tensometryczna belka linkowa" i „Linkowe koło tensometryczne", zarówno w pierwszym, jak i drugim tytule trudno mówić o belce linkowej czy kole linkowym;
- na s. 36 występuje niepoprawne zdanie „Każda z belek tensometrycznych mierzy napięcie pojedynczego cięgna";
- na rys. 3.21 b brakuje opisu osi rzędnych;
- rys. 3.25 został podpisany „Trajektoria realizowana przez przeguby 1 – 7 egzoszkieletu podczas symulacji dynamiki", podczas gdy przedstawiane są na rysunku przebiegi czasowe;
- niewłaściwa jednostka występuje w opisie zmiennej *d* osi rzędnej na rys. 4.43.

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, numerycznych opracowanych w środowiskach Matlab i ANSYS,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg ciekawych spostrzeżeń i wyciągnięcie na tej podstawie interesujących wniosków.

4. Ocena końcowa

Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską, należy podkreślić aktualność jej tematyki dotyczącej głównie rozwiązań inteligentnych interfejsów do telemanipulacji urządzeniami przeładunkowymi. Projektowanie nowoczesnych, mechatronicznych urządzeń tego typu wpisuje się w nowe trendy „przemysłu przyszłości".

Prezentowane treści pracy doktorskiej zawierają elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny „Inżynieria mechaniczna", a zwłaszcza wiedzy w zakresie projektowania mechatronicznego, budowy egzoszkieletów i ich napędów, budowy niestandardowych czujników siły, opracowanych modeli i algorytmów sterowania.

Uważam, że opiniowana praca mgr. inż. Pawła Herbina przedstawia metodologię rozwiązania złożonego problemu sterowania urządzeniami przeładunkowymi, wykorzystując do tego celu zaproponowany system do telemanipulacji ze zwrotnym sprzężeniem siłowym. Sposób rozwiązania zadania, opracowane algorytmy i programy komputerowe do badań symulacyjnych oraz sposób realizacji tych badań świadczą o odpowiednim przygotowaniu doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

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 do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Sławomir Duda