

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Herbina
„Zastosowanie skanera ruchu kończyny górnej człowieka do sterowania
urządzeniami dźwigowymi z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego”
promotorzy: prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor, dr inż. Kamil Stateczny

Podstawą do opracowania niniejszej opinii stanowi pismo WIMiM/319/2020 Prorektora ds. nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego z dnia 02.07.2020r.

PRZEDMIOT I ZAKRES PRACY

Praca dotyczy ciekawego, z naukowego i praktycznego punktu widzenia, problemu sterowania żurawiem przeładunkowym z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Ma to umożliwić przekazanie wrażeń-odczucia sił od maszyny (żurawia) do operatora. W ramach pracy zaprojektowano i wykonano urządzenie (skaner ramienia operatora SKRO), którego struktura jest zgodna ze strukturą górnej kończyny człowieka o 7 DoF. Urządzenie wyposażono w czujniki momentów napędowych zintegrowane z przekładnią ciągnową łączącą przeguby skanera z napędami (siłownikami). Urządzenie zastosowano do sterowania ruchami pewnego typu żurawia laboratoryjnego wyposażonego w odpowiednie układy pomiarowe i sterujące, przystosowane do badań.

Tematykę pracy doktorskiej, podaną w rozdz. 2, uważam za interesującą, mieszczącą się w aktualnych nurtach badań z zakresu dynamiki maszyn, robotyki i biomechaniki. Na szczególne podkreślenie zasługuje dbałość o fizyczną (techniczną) realizację egzoszkieletu ręki i sprawdzenie poprawności sformułowanej tezy, a także realizacja głównego celu pracy.

W ramach pracy przedstawiono:

- przegląd literatury dotyczącej zdalnego sterowania maszynami, przegląd egzoszkieleatów, głównie przeznaczonych do rehabilitacji, oraz napędów. W tym ostatnim przypadku zwrócono uwagę na interesujący problem tarcia w układach ciągnowych, stosowanych w pracy,
- stanowisko do badań doświadczalnych, obejmujące egzoszkieleat (SKRO) i żuraw (Hiab XS 111 duo),

- modele matematyczne obu urządzeń, obejmujące opis struktury kinematycznej, w tym parametry D-H, macierze transformacji jednorodnych, pomiary identyfikujące zakresy ruchu w poszczególnych przegubach a także analizę przestrzeni roboczej żurawia,
- zaproponowaną przekładnię cięgową przegubu napędowego egzoszkieletu, umożliwiającą przeniesienie siłowników na nieruchomy statyw. Tym samym zmniejszono masę egzoszkieletu, poprawiając jego własności dynamiczne,
- układ pomiaru momentu napędowego, sposób oraz wyniki kalibracji sensorów,
- konstrukcję egzoszkieletu, w tym jego struktury mechanicznej, sensorów, napędów i sterowania.
- metody sterowania SKRO, wzbogacając rozważania o elementy dynamiki w zakresie obciążeń grawitacyjnych,
- propozycję przekładni cięgnowej z dodatkową sprężyną oraz algorytm postępowania przy doborze jej sztywności,
- cztery scenariusze sterowania:
 - teleoperację jednokierunkową, w której brak zwrotnego sprzężenia siłowego od operatora, a więc sterowanie odbywa się w pętli otwartej. Napędy dobierane są do zadanych przemieszczeń roboczych wybranego punktu żurawia (haka),
 - uwzględnienie siłowego sprzężenia zwrotnego wykorzystującego opory ruchu SKRO w zależności od uchybu położenia końcówki żurawia względem tego położenia w egzoszkielecie, i w tym przypadku otrzymano uchyby co najmniej o połowę mniejsze (rys. 5.9),
 - przeniesienie do SKRO wrażenia odzwierciedlającego masę podnoszonego ładunku (podrozdz. 5.3).
 - uwzględnienie siłowego sprzężenia zwrotnego w kontakcie z wirtualnymi ścianami uzyskując obiecujące wyniki.

Treść pracy została przedstawiona na 117 stronach, zawiera odniesienia do 83 pozycji literatury oraz około 100 rysunków. Jej wykonanie wymagało dobrej znajomości zagadnień z zakresu kinematyki oraz sterowania, a także umiejętności konstruktorskich. Zawiera rozbudowaną część badań stanowiskowych, oraz dużą liczbę analiz związanych z walidacją opracowanych modeli.

Strony: edytorska i graficzna pracy spełniają wymagania stawiane tego typu pracom. Uważam, że zauważone niedociągnięcia w tym zakresie są dopuszczalne, więc w mojej recenzji pomijam uwagi szczegółowe, które naniiosłam na egzemplarzu pracy przekazanej

doktorantowi. Niemniej jednak, należy zwrócić uwagę na brak konsekwencji w sposobie odniesienia do pozycji, a szczególnie w spisie, literatury. Nie znalazłam w spisie literatury trzech pozycji, do których jest odniesienie w tekście pracy (Goertz et al. 1958; Pratt, 2002; Wyszomirska, 2015), a także odniesienia w tekście pracy do dwóch pozycji wymienionych w spisie literatury (Pajor i Herbin, 2015; Rank i inni, 2016).

UWAGI POZYTYWNE

Na szczególne podkreślenie zasługują:

1. Duża biegłość i rozeznanie w tematyce konstrukcji napędów, widoczna w rozdz. 3, przy omawianiu sposobów technicznej realizacji przegubów egzoszkieletu.
2. Skuteczność proponowanego postępowania polegającego na wprowadzeniu dodatkowej sprężyny zwiększającej podatność przekładni ciągnowej.
3. Umiejętne ograniczenie stref nieczułości przegubów, poprzez wyeliminowanie wpływu tarcia (efektu Stribeck'a).
4. Wiarygodność wyników pomiarów – doktorant nie waha się pokazać uchybów w trajektorii końcówki manipulatora o amplitudzie rzędu 1m (rys. 5.5).
5. Umiejętne połączenie wiedzy teoretycznej z talentami inżynierskimi.

UWAGI KRYTYCZNE

Poniższe uwagi mają charakter dyskusyjny i ich celem jest zwrócenie uwagi doktorantowi na aspekty, które w mojej opinii, mogą przyczynić się do poprawienia czytelności przyszłych prac bądź wskazać dodatkowe kierunki prac naukowych.

1. Wzory wymagają większej uwagi. Występują błędy we wzorach na macierze transformacji (3.1), (3.3), (3.5). Przydałyby się objaśnienia do wzorów (3.11-3.14), ale także w innych wzorach pojawiają się wielkości, które nie są objaśnione. Dobrze byłoby zachować konsekwencję w oznaczeniach (raz macierze oznaczane są zwykłą czcionką, raz pogrubioną, ale także te same oznaczenia wykorzystano do opisu różnych wielkości). Nie podoba mi się użycie małego t na oznaczenie transpozycji we wzorze (3.24); a ponadto chyba brak jest nawiasu w tym wzorze. Liczby rzeczywiste zapisywane są raz w notacji polskiej (z przecinkiem), a innym razem w notacji angielskiej (z kropką). Brakuje objaśnienia wielkości s (S – czy to rozróżnienie jest istotne, czy to są dwie wielkości) występujących we wzorze (4.8) oraz na schemacie 4.20. Te oraz pozostałe uwagi naniosłam na egzemplarzu przekazanym doktorantowi.
2. Jaki pakiet wykorzystano do obliczeń elementów układu napędowego i na czym polegała zastosowana optymalizacja – jaka metoda została wykorzystana?

3. Należałoby wyjaśnić dlaczego do testów układu sterowania wybrano czwarty przegub.
4. Żuraw jest faktycznie manipulatorem. Nie zawiera liny. To znacznie ułatwia obliczenia z zakresu kinematyki i dynamiki.
5. W rozważaniach z podrozdz. 5.3 autor mógł wspomnieć o układach AOPS (Automatic Overload Protection System), zabezpieczających żurawie przed zniszczeniem, a praktycznie wszędzie już wprowadzanych wg wymagań DNV.
6. W modelach dynamiki pominięto zagadnienia takie jak podatność członów egzoszkieletu oraz żurawia, czy też tarcie lepkie i suche w połączeniach. Może warto by zająć się tymi zagadnieniami w przyszłych pracach Autora.

OCENA OGÓLNA

Realizacja pracy wymagała od Autora pomysłowości, umiejętnego połączenia wiedzy inżynierskiej (w szczególności inwencji w konstrukcji egzoszkieletu i napędów) i teoretycznej z zakresu kinematyki manipulatorów, i w mniejszym stopniu z zakresu dynamiki maszyn. Na szczególne podkreślenie zasługuje dbałość o weryfikację (walidację) poprawności rozważań teoretycznych i skuteczność proponowanych rozwiązań technicznych. Bardzo duża wiedza oraz biegłość Autora w pomiarach, projektowaniu i wykonywaniu konstrukcji mechanicznych i urządzeń sterujących, świadczy o właściwym przygotowaniu do dalszej pracy naukowej.

Warto podkreślić, że wiedza Autora może znaleźć bezpośrednie zastosowanie w praktyce projektowej i produkcyjnej firm zajmujących się urządzeniami przeładunkowymi. W szczególności w zakresie innowacyjnego wspierania bezpieczeństwa w pracach przeładunkowych. Widzę też potencjalne możliwości wykorzystania doświadczeń Autora w zakresie sterowania z siłowym sprzężeniem zwrotnym.

Rozprawa, oraz wytyczne w niej kierunki dalszych prac świadczą o dojrzałości autora i umiejętności formułowania oraz realizacji celów naukowych, co utwierdza mnie w pozytywnej ocenie rozprawy doktorskiej, znajdującej odzwierciedlenie we wniosku końcowym.

WNIOSEK KOŃCOWY

Biorąc pod uwagę wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy oraz wkład własny autora niezależnie od przedstawionych uwag krytycznych uważam, że praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dn. 14 marca 2003 i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

