

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Janiszowski,
prof. zw. PW
Ul. Bruzdowa 145
02-991 Warszawa

Warszawa, 26. sierpnia 2019.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Dawida Sebastiana Pietrali pt.**

Analiza i synteza pneumatycznego serwo-napędu mięśniowego w zastosowaniu do manipulatora równoległego o sześciu stopniach swobody

przygotowana na zlecenie prodziekana
Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechniki Świętokrzyskiej

1. Cel, motywacja i tezy pracy

Głównym celem rozprawy było przebadanie możliwości elementów, zwanych mięśniami (lub muskułami) pneumatycznymi, w realizacji zadań mechanicznych - przedstawianie lub ruch nadążny oraz próba oceny przydatności tych zespołów w konstrukcji złożonych struktur np. manipulatora równoległego o 6 stopniach swobody.

Praca nie zawiera określonej tezy, ale zostały określone cele, które Autor przedstawił we wstępie:

- Analiza statycznego i dynamicznego modelu zachowania muskułu,
- Opracowanie modelu matematycznego opisującego zachowanie muskułu,
- Synteza układów regulacji dla serwo-napędów: zadanej pozycji kątowej i/lub momentu siły złożonych z pary muskułów,
- Opracowanie i wykonanie konstrukcji manipulatora równoległego o 6 stopniach swobody,
- Przebadanie właściwości wykonanego manipulatora oraz ocena tej struktury.

Zakres pracy stanowi **kompletny plan badań** z punktu widzenia zastosowań: przebadanie głównego efektora, opracowanie modelu, przebadanie możliwości sterowania, techniczna realizacja platformy oraz przebadanie jej możliwości, ale brak mi było sugestii, co do celu. Manipulatory o 6 stopniach swobody są od dawna znane i wykorzystywane w przemyśle, zatem zastosowanie innych rozwiązań w zakresie stosowanych elementów powinno być uzupełnione o sugestię motywującą ten kierunek badań. Tu bym przytoczył sentencję Stanisława Staszica „*Umiejętności dopotąd są jeszcze próżnym wynalazkiem, może czczym tylko rozumu wywodem, albo próżniactwa zabawą, dopokąd nie są zastosowane do użytku narodów.*”. Uzyskane wyniki w zakresie dynamiki i dokładności nie pozwalają bowiem konkurować z istniejącymi rozwiązaniami. Na szczęście Autor w zakończeniu pracy określił proponowany kierunek zastosowań – roboty (manipulatory) dla zastosowań biomedycznych w zabiegach rehabilitacyjnych.

2. Zawartość pracy

Praca składa się z 7 rozdziałów, które są logicznie uzasadnione i przedstawiają kolejne fazy opracowanych koncepcji i przeprowadzonych badań.

Wstęp zawiera zakres pracy i wprowadzenie do potencjalnego zastosowania, w platformach napędzanych strukturami równoległymi wraz z przeglądem dostępnej literatury w zakresie rozwiązań i patentów. W tym rozdziale Autor przedstawił w zakończeniu koncepcję manipulatora, który następnie został przez niego zbudowany i przebadany.

Drugi rozdział stanowi opis badań możliwości muskułu, który Autor wykorzystał w dalszych badaniach. Należy podkreślić, że jest to element skonstruowany osobiście przez Autora. We wstępnych eksperymentach Autor stwierdził, że zespoły dostępne handlowo (muskły f-my Festo) mają parametry mniej korzystne (mniejszy skok) przy tych samych wymiarach i z tego powodu zdecydował się na konstrukcję samodzielną. Muskuł wykonany przez Autora nie zawiera wewnętrznego przepłotu, który posiadają muskły Festo i jest z tego powodu bardziej elastyczny i zapewne lżejszy oraz może charakteryzować się mniejszą histerezą. Niestety nie wiadomo, jaka jest trwałość takiego elementu, ale ponieważ jest to prosta i tania struktura, zatem można uznać, że koszt ewentualnej wymiany będzie niski.

Badania statyczne efektora złożonego z zaworu ciśnieniowego (firmy Parker) oraz muskułu zostały przedstawione dość jasno, jakkolwiek przyjęta notacja: skrócenie długości jest to reakcja dodatnia ($\Delta x > 0$) powoduje w odbiorze treści nieco zamieszania. Przeprowadzone badania reakcji muskułu prowadziły do konkluzji: badany element wykazuje powtarzalne właściwości odkształcenia przy sterowaniu za pomocą zmian ciśnienia zasilania, ale jego odpowiedzi mają charakter wyraźnie nieliniowy, co należy uwzględnić przy zastosowaniu, zwłaszcza w otwartej strukturze sterowania. W zakresie badań statycznych brakuje mi wyraźnego **porównania reakcji efektora na dodatnie i ujemne wysterowanie Δu** w obranym punkcie pracy.

W celu opracowania efektywnej metody sterowania i przebadania różnych struktur realizacyjnych należało działać w trybie *fast prototyping*: opracowanie modelu, przebadanie i wybór najbardziej obiecującej strategii, następnie realizacja techniczna i sprawdzenie koncepcji w „żelazie”. Stąd kolejny rozdział trzeciej pracy został poświęcony na wyprowadzenie modelu matematycznego efektora.

Autor wykorzystał w tym celu oprogramowanie Wolfram Mathematica dla określenia funkcji odtwarzających reakcje dynamiczne efektora (zawór ciśnieniowy – muskuł) w zależności od szeregu zmiennych: wysunięcia Δx_0 , obciążenia wstępnego F_0 oraz wysterowania napięciowego u_0 zaworu ciśnieniowego. W tym celu Autor przeprowadził szereg testów obejmujących praktycznie cały zakres zmienności (Δx_0 , F_0 , u_0) działania efektora i do tej rodziny reakcji dopasował odpowiednie funkcje. Wyznaczone funkcje zależne są od 4 parametrów (a,b,c,d) i mają formę równania różniczkowego zawierającego funkcję wykładniczą, ale są dość zwarte i łatwe do obliczeń w trybie on-line. Niestety parametry (a,b,c,d) były zależne od punktu pracy efektora (Δx_0 , F_0 , u_0), co Autor próbował zredukować stosując aproksymacje ich zmienności w zależności od parametrów punktu pracy. Dało to dobry efekt, ale oznacza w praktyce, że takie obliczenia (eksperymenty i aproksymacje) należy powtórzyć za każdym razem przy stosowaniu ww. podejścia. Jakość dopasowania, zgodnie z podanymi na str. 48-56, należy ocenić jako **bardzo dobrą**. Występujące „braki” – maksymalne

różnice w reakcji są rzędu kilku mm i są zawarte głównie w strefie początkowej reakcji, co może być wynikiem nie uwzględnionej dynamiki samego zaworu ciśnieniowego. Autor nie przeprowadził oddzielnych badań samego zaworu (!!!).

Analizując uzyskane wyniki Autor starał się ocenić możliwość wykorzystania wprowadzonego opisu w trybie sterowania otwartego z zastosowaniem modelu odwrotnego, tzn. wprowadzał na wejście efektora sterowanie, które było wynikiem przełączenia modelu odwrotnego dla zadanego punktu pracy i wprowadzenie wynikowego sterowania na efektor. Uzyskane efekty, porównane z pomiarami, pozwoliły na ogólną ocenę uzyskanego opisu jako dobre odwzorowanie reakcji efektora. W kolejnym kroku Autor sprawdził koncepcję prostszego rozwiązania: w miejsce modelu różniczkowego zastosował model oparty wyłącznie na aproksymacji czynnika stałego i uzyskał obiecujące wyniki – pogorszenie jakości odtwarzania (maksymalny błąd) w pętli otwartej było niewielkie ok. 30-50%. Stąd wniosek, że przy zastosowaniu modelu statycznego i regulacji w pętli zamkniętej można oczekiwać podobnych wyników przy stosowaniu modelu dynamicznego.

Ponieważ celem działania efektora miało być zarówno przemieszczenie jak i oddziaływanie siłowe (moment na ramieniu manipulatora) Autor przeprowadził podobne badania dla odtworzenia reakcji siłowej $F(x_0, F_0 \text{ oraz } \Delta u)$ efektora w danym punkcie pracy. Metodyka postępowania była taka sama jak w przypadku modelu przemieszczenia. Zastosowany został pakiet Wolfram Mathematica i utworzone zostały odpowiednie funkcje. Należy podkreślić, że w przypadku opisu reakcji siłowej uzyskane modele były lepsze, tzn. względny błąd odtworzenia siły efektora był mniejszy niż dla modelu przemieszczenia. Prawdopodobnie gorsza jakość modelu przemieszczenia wynikała z histerezy samego muskułu.

W tym miejscu chciałbym wspomnieć o pewnym braku w pracy: Autor miał zamiar wykorzystać **parę efektorów** zastosowanego typu dla wytworzenia momentu siły na ramieniu manipulatora. Z tego powodu badania powinny być rozszerzone o model pary efektorów. W takim przypadku byłoby uproszczone sterowanie (tylko jeden sygnał) i być może efekty tarcia histerezowego w mięśniach mogłyby się kompensować.

Kolejny rozdział pracy zawiera koncepcję syntezy serwo-mechanizmu z napędem mięśniowym. Autor założył, że końcowy manipulator będzie napędzany 6 parami mięśniów pracujących przeciwobnie, tzn. w każdej parze jeden mięsień będzie się kurczył, a drugi wydłużał. Dobry pomysł, ponieważ efekt przemieszczenia jest mniejszy niż efekt zmiany siły, stąd lepiej jest wykorzystać taką parę do wytworzenia pożądanego momentu obrotowego napędzającego określone ramiona sztywne przy niewielkim efekcie przemieszczenia. W tym celu zastosował strukturę, w której każdy efektor jest sterowany odrębnym regulatorem PID (dla kompensacji odchyłki w stanie ustalonym) z zastosowaniem modelu odwrotnego.

Opisane wyniki regulacji w pętli zamkniętej (str. 76-87) sugerują, że wyniki zastosowania 6 par efektorów dla poruszania platformy manipulatora powinny zapewnić oczekiwane efekty mechaniczne. Odpowiedzi na pobudzenia zarówno sinusoidalnie zmienne jak i skokowe są poprawne, jakkolwiek obserwowane odchyłki są dość znaczne: przy nadążaniu błędy średnie były rzędu 5-8% pomimo zastosowania regulatorów PID.

Kolejny 5 rozdział zawiera analizę działania manipulatora złożonego z 6 par efektorów, z których każda porusza zespół wytwarzający określony obrót kątowy i moment ramiona sztywnego przymocowanego przegubem kulowym do platformy.

Pary te wymuszają ruch platformy w przestrzeni 3D. Autor wykonał model takiego manipulatora oraz na podstawie wymiarów określił, stosując model matematyczny sztywnego układu mechanicznego, zakres zmian położenia przestrzennego platformy (3 zmienne x, y, z oraz 3 kąty nachylenia α, β, γ), a następnie przebadał drogą symulacji różne, możliwe trajektorie ruchu.

W tym rozdziale została również szczegółowo omówiona realizacja techniczna zespołów pomiarów i sterowania poszczególnymi parami efektorów, które Autor sam opracował, wykonał i uruchomił.

Ostatni rozdział pracy zawiera wyniki badań stanowiskowych na opracowanym manipulatorze. Jest to najważniejszy rozdział, ponieważ pozwala wstępnie ocenić przydatność całej koncepcji pracy. W celu oceny możliwości nadążania Autor wybrał serię testów złożonych z wielu punktów, połączonych zmianami o charakterze przejść trapezowych (24 przesunięcia): dla ruchów jednowymiarowych, tzn. wzdłuż linii prostej, dla ruchów dwu-wymiarowych (24 serie) oraz dla ruchów trójwymiarowych – tylko dwie serie. Wybrane wyniki tych przemieszczeń zostały przedstawione w pracy, łącznie ze statystykami określającymi wartości średnie błędów. Jednocześnie testy powyższe zostały powtórzone dla platformy obciążonej niewielką masą.

Podsumowanie tych badań można ująć następująco: platforma realizowała zadane przemieszczenia, jednak błąd występujący podczas **nadążania był zbyt duży**, by można było myśleć o aplikacji typu przecinanie, przesuwanie po zadanej trajektorii, itd. Zastosowanie np. automatach do malowania czy piaskowania byłoby do rozważenia. Dość charakterystyczny był wpływ obciążenia: na platformie była umieszczona niewielka masa $m=1.1$ kg i to zakłócenie warunków pracy prowadziło do wyraźnego zwiększenia błędów realizacji zadanych trajektorii, w przypadku realizacji zmian kątowych ustawienia platformy nawet kilkunastokrotny. Należy podejrzewać, że wpływ tej masy przekładał się na zmiany parametrów modelu odwrotnego, co generowało wyraźne błędy. Serwo-regulatory PID redukowały obserwowane błędy, ale przy sterowaniu nadążnym (krótki czas na reakcję) wpływ obciążenia był bardzo wyraźny.

Druga faza badań obejmowała testy, które składały się z najazdów na określone pozycje (na określonych płaszczyznach), przedzielonych okresowymi postojami (ok. 2-5s). W tym przypadku wyniki pozycjonowania, (ocenione wybrane fragmenty ruchu) były zdecydowanie lepsze, co sugeruje, że dla zadań zwykłego przestawiania takie rozwiązanie może być warunkowo stosowane.

W ostatnim rozdziale Autor zawarł podsumowanie przeprowadzonych prac oraz własne wnioski dotyczące uzyskanych wyników. Jego główną sugestią w zakresie oczekiwanych zastosowań jest możliwość wykorzystania takiego zestawu lub podobnego rozwiązania w urządzeniach służących do rehabilitacji kończyn z powodu dużej przeciążalności i elastyczności ruchu. Autor próbował również przedstawić możliwości prowadzenia dalszych badań w celu poprawy jakości odtwarzania zadanych trajektorii.

Oprócz omówienia wyników zostały dołączone: spis literatury oraz zestaw głównych oznaczeń stosowanych w tekście.

3. Główne dokonania, uwagi krytyczne i komentarze o charakterze ogólnym

Po przeczytaniu i analizie przedstawionych wyników muszę przyznać, że rzadko miałem do czynienia z tak **kompletnie** opracowaną rozprawą doktorską.

Autor rozpoczął od badania właściwości statycznych zastosowanego elementu, który wybrał jako efektor mechaniczny, następnie utworzył na podstawie wyników eksperymentów model dynamiczny zespołu muskuł-zawór, który mógł wykorzystać do testowania algorytmów sterowania, stosując jego uproszczoną formę zaproponował sposób sterowania z wykorzystaniem algorytmu o formule PID, przeprowadził badania symulacyjne, które pozwoliły sprawdzić koncepcję sterowania w 6 stopniach swobody, skonstruował i uruchomił platformę manipulatora oraz zespoły elektroniczne służące do pomiarów i regulacji oraz wykonał szereg testów, których wyniki starał się w przejrzystej i zwartej postaci opisać.

Jedyny brak, który mógłbym wytknąć w zakresie kompletności opracowania, to brak oceny efektów ekonomicznych takich jak np. zużycie sprężonego powietrza oraz czasu niezbędnego do przygotowania manipulatora do pracy – ile i jak długo trwało np. trenowanie modelu: określenie wartości współczynników oraz funkcji aproksymujących.

Wyniki realizacji zadanych przemieszczeń były zależne od warunków przeprowadzonych testów i trudno je kwalifikować jako całkowicie akceptowalne lub nie. To zależy od zastosowania. Mam jednak wrażenie, że można by uzyskać wyraźną poprawę stosując inny algorytm sterowania. Autor wybrał algorytm PID, który moim zdaniem nadaje się do stosowania w serwo-napędach elektrycznych z ruchem obrotowym, ale dla przemieszczeń liniowych, w których występuje tarcie oraz histereza jest mało przydatny. Jednocześnie nie omówił sposobu doboru nastaw, co trochę utrudnia ocenę wyników. W algorytmie PID obserwowana odchyłka jest **zbyt późno** zredukowana przez układ regulacji i z tego powodu w stanie ustalonym (pojedyncze przesunięcia) moduł jest efektywny, ale w przypadkach w których w mechanizmie występuje nadążanie w czasie jest mało przydatny. Szkoda, że Autor nie wykorzystał algorytmu **predykcyjnego**, mając dość dobrze zgodny model dynamiki obiektu. W takim przypadku wystąpienie przeciążenia mogłoby być zaobserwowane na etapie predykcji i odpowiednio szybko skompensowane. Algorytm tego typu może być celem kolejnych badań.

Kolejną uwagą, już wspomnianą w recenzji, był brak badań zespołu dwóch efektorów: dwa muskuły sterowane przez dwa zawory ciśnieniowe, które de facto były podstawą realizacji przemieszczeń ramion napędzających platformę. Taki tandem byłby prawdopodobnie łatwiejszy do sterowania i realizacji zespołów elektronicznych.

Kolejną uwagą, o charakterze sugestii dotyczącej dalszych badań, jest **redukcja histerezy** efektora poprzez wprowadzenie wysoko-częstotliwościowego sygnału ditheru. Ta technika pozwala wyraźnie zredukować efekty histerezy i oczywiście uzyskać redukcję błędów przestawiania. Nie wiem, czy byłoby to możliwe, bo Autor nie wspomniał (i nie zbadał) parametrów dynamiki zaworu ciśnieniowego.

Analizując uzyskane wyniki i efekty działania manipulatora z obciążeniem, zastanawiałem się, czy na duże odchyłki podczas pozycjonowania nadążnego **nie miała wpływu wiotkość ramion manipulatora**, który mógł się elastycznie poddawać podczas szybkiego przesunięcia, jakkolwiek efekt odchyłki był zapewne mierzony na

przetworniku kątowym ramion manipulatora. Mogłoby dojść do efektu drgań oscylacyjnych i w takim przypadku algorytm PID jest mało skuteczny.

Autor w kilku miejscach tekstu sugerował, że opracowane rozwiązanie jest odporne na przeciążenia - ma dużą przeciążalność. **Nie zgodziłbym się z tym stwierdzeniem:** obserwując zamieszczone wyniki wpływ nawet niewielkiego obciążenia $m=1.1$ kg jest wyraźnie widoczny, jakkolwiek w zamieszczonych wynikach badań testowych nie został omówiony wpływ tego obciążenia przy realizacji przestawień z przerwami czasowymi.

Podsumowując ten fragment recenzji, muszę podkreślić jeszcze raz bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań, sumienność w przedstawianiu wyników, jakkolwiek mam pretensję o rozmiar czcionki, stosowany dla prezentacji wykresów – szereg razy musiałem sięgać po lupę.

W zakresie redakcji pracy (oprócz ww) nie mam żadnych zastrzeżeń – praca jest dobrze ułożona pod względem wprowadzania kolejnych wątków, wyniki są obszernie przedstawione i dyskutowane, a szereg informacji dotyczących strony technicznej wykonanej platformy, uzupełnia przedstawiony tekst. Oczywiście nie zabrakło pewnych „potknięć”, które z obowiązku recenzenta muszę przedstawić, ale są one do poprawy.

4. Szczegółowe uwagi o charakterze redakcyjnym

Na str. podano zależność (3.2), która określa dobraną (Wofram Mathematica) funkcję $x(t)$. Mam wrażenie, że w pierwszym składniku zbędny jest symbol c w mianowniku, jednocześnie zapis całej funkcji (różne wielkości nawiasów okrągłych budzi wątpliwości przy analizie zmienności, w wykładniku pierwszego składnika chyba jest „-”, inaczej funkcja ma narastający charakter, składnik t , powinien być umieszczany przed symbolem pierwiastka,

Prezentacja odchyłki zastosowana na Rys.4.9, nie jest fortunna. Autor zastosował zmianę wartości zadanej w formie skoku i oczywiście w chwili początkowej odchyłka ma wartość maksymalną. W badaniu serwo-napędów nigdy nie stosuje się takiego pobudzenia, bo uzyskanie odchyłki zbliżonej do 0 wymagałoby nieskończonej energii, zatem należało zastosować zadany sygnał zmienny rampowo, o określonej prędkości narastania. Taki sygnał zadany doprowadzi do wyraźnej redukcji wartości e_{max} w tabeli 4.1.

Trudno odczytać wymiar b na rysunku 5.8, str. 99

Str. 123, pierwszy akapit od dołu, sformułowanie „wybrane” wyniki brzmi enigmatycznie. Wybrane mogły być najlepsze, co jest niezbyt uczciwe. Pozostaje pytanie co z pozostałymi wynikami. Potrzebny byłby bardziej szczegółowy komentarz.

Str. 145, w opisie wyników Autor posługuje się często pojęciem wartości średniej, co jest niepoprawne, ponieważ wartość średnia nie umożliwia oceny błędu. Należy stosować ocenę w formie wartości średniej **bezwzględnej odchyłki**.

Str. 158 – ostatni akapit „wysoka obciążalność” nie rozumiem jak Autor interpretuje to pojęcie. Może można by wprowadzić jakąś miarę tego określenia.

5. Podsumowanie recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. **Dawida Sebastiana Pietrali** pt. *Analiza i synteza pneumatycznego serwo-napędu mięśniowego w zastosowaniu do manipulatora równoległego o sześciu stopniach swobody*, pomimo zamieszczonych uwag, wykazuje znajomość i erudycję w zakresie omawianej tematyki i potwierdza dużą inwencję badawczą Autora oraz konsekwencję w prowadzeniu prac naukowych i uznaję ją za **spełniającą wymagania** określone w ustawie nr 595, Dz. Ustaw nr 65 z dn. 14.03.2003 wraz z jej nowelizacją z dn. 30.08.2005 i zmianami wprowadzonymi w 27. 09. 2017 „O tytule i stopniach naukowych” oraz wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

