

Białystok, dn. 29 sierpnia 2020 r.

Dr hab. inż. Zbigniew Kulesza
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektryczny
Politechnika Białostocka

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

Tytuł pracy: *Analiza i synteza pneumatycznego serwonapędu mięśniowego w zastosowaniu do manipulatora równoległego o sześciu stopniach swobody*

Autor pracy: mgr inż. Dawid Sebastian Pietrala
Promotor: dr hab. inż. Paweł Łaski, prof. PŚk

Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na prośbę Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej, pani dr hab. inż. Izabeli Krzysztofik, prof. PŚk, wyrażoną pismem z dnia 29 czerwca 2020 r.

Zakres i temat pracy

W pracy poruszono problemy projektowania układu sterowania położenia oraz układu sterowania siły w zastosowaniu do pneumatycznych siłowników mięśniowych. Opracowane układy sterowania, w postaci tzw. pneumatycznych serwonapędów mięśniowych, wykorzystano jako elementy napędowe manipulatora równoległego o zamkniętym łańcuchu kinematycznym typu delta. Przeprowadzono badania symulacyjne oraz eksperymentalne wykonanych prototypów siłowników mięśniowych, układów sterowania położenia oraz siły, a także finalnej konstrukcji manipulatora równoległego z sześcioma pneumatycznymi serwonapędami mięśniowymi.

We wstępnej części pracy, korzystając z aktualnych źródeł literaturowych, przedstawiono budowę, zasadę działania oraz podstawowe charakterystyki statyczne i dynamiczne pneumatycznych siłowników mięśniowych. Zagadnienia te rozpatrzono mając na uwadze istniejące przykłady zastosowania takich siłowników do napędu manipulatorów o zamkniętym łańcuchu kinematycznym. Omówiono pokrótce metody opisu zagadnień kinematyki i dynamiki manipulatorów równoległych, poruszając takie problemy jak: metody rozwiązywania zadania prostego i odwrotnego kinematyki, wyznaczanie przestrzeni roboczej, występowanie tarcia i histerezy w siłownikach mięśniowych. Następnie zwięźle przedstawiono metody i algorytmy sterowania stosowane w pneumatycznych serwonapędach mięśniowych, wymieniając m.in. sterowanie PID, sterowanie przesuwne (ang. *sliding mode control*), sterowanie rozmyte, sterowanie z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, sterowanie nieliniowe oraz układy sterowania, w których wykorzystano dwie lub więcej z wyżej wymienionych metod, czyli tzw. sterowanie hybrydowe. Należy zaznaczyć, że obecny stan wiedzy dotyczący problemów projektowania i badania pneumatycznych

siłowników mięśniowych, serwonapędów wykorzystujących takie siłowniki, a także manipulatorów równoległych jest bardzo obszerny i siłą rzeczy przegląd tych zagadnień musiał w pracy zostać ograniczony.

W drugiej części pracy, bazując na opracowanych wcześniej, autorskich prototypach pneumatycznych siłowników mięśniowych, omówiono przebieg i zakres badań eksperymentalnych, prowadzących do wyznaczenia charakterystyk statycznych i dynamicznych mięśni. Badania wykonano na opracowanym stanowisku pomiarowym, umożliwiającym pomiar siły i przemieszczenia układu dwóch mięśni pneumatycznych pracujących przeciwsośnie. Stanowisko pozwala w sposób płynny zmieniać wartość momentu obciążenia pary siłowników. Otrzymane charakterystyki statyczne są silnie nieliniowe z wyraźną strefą histerezy. Histereza ta przejawia się w różnych wartościach siły bądź przemieszczenia mięśnia, występujących przy jego obciążaniu oraz odciażaniu. Jednocześnie uzyskane charakterystyki potwierdzają bardzo dobre właściwości obciążeniowe opracowanych siłowników mięśniowych: większe wartości skrócenia względnego oraz większe wartości generowanej siły, w porównaniu do siłowników o zbliżonej wielkości, lecz nieco innej konstrukcji, produkowanych przez firmę Festo. Jeśli chodzi o charakterystyki dynamiczne, to ograniczono się do odpowiedzi skokowych mięśni, wyznaczonych w różnych punktach charakterystyki statycznej. Na podstawie otrzymanych charakterystyk dynamicznych zakwalifikowano opracowane siłowniki mięśniowe jako człony dynamiczne drugiego rzędu, inercyjne lub oscylacyjne. Taka ocena właściwości dynamicznych pozwoliła w dalszej części pracy na przyjęcie modelu matematycznego pneumatycznego siłownika mięśniowego w postaci równania różniczkowego drugiego rzędu o nieznanach parametrach. Rozwiązanie modelu matematycznego otrzymano analitycznie, korzystając z oprogramowania Mathematica. Nieznane parametry modelu wyznaczono metodą identyfikacji, korzystając z otrzymanych wcześniej charakterystyk dynamicznych. W ten sposób powstał stabelaryzowany zestaw parametrów modelu matematycznego dla każdego z badanych punktów pracy. Uzyskane wartości parametrów modelu aproksymowano następnie za pomocą wielomianów dwóch zmiennych, otrzymując zależności analityczne pozwalające wyznaczyć wartości tych parametrów w pozostałych punktach charakterystyki statycznej.

Następnie, korzystając z przyjętego równania ruchu oraz jego rozwiązania analitycznego, wyprowadzono dwa modele odwrotne pneumatycznego siłownika mięśniowego, określone jako „odwrotny model dynamiczny” i „odwrotny model statyczny”. Modele odwrotne zweryfikowano doświadczalnie w zamkniętych układach sterowania nieliniowego bez korekcji uchybu, uzyskując dobrą zgodność otrzymanych odpowiedzi układu z przebiegami zadanymi.

W dalszej części pracy opisano dwa układy sterowania nieliniowego z korekcją uchybu. Układy te zastosowano w opracowanym prototypie serwonapędu z pneumatycznymi siłownikami mięśniowymi. Pierwszy z tych układów to układ sterowania położenia kąтового, a drugi - układ sterowania momentu obrotowego serwonapędu. W opisywanych układach sterowania zastosowano otrzymane wcześniej modele odwrotne siłowników mięśniowych, a do korekcji uchybu wprowadzono dodatkowe regulatory typu PID. Układy sterowania zrealizowano w oparciu o sterownik dSpace i zweryfikowano eksperymentalnie, otrzymując dokładność odtwarzania zadanej trajektorii na poziomie 0,01 rad (0,03 rad) oraz 0,08 Nm (0,18 Nm) odpowiednio w układzie sterowania położeniem kątowym i w układzie sterowania momentem obrotowym. Podane wartości dotyczą dokładności odtwarzania trajektorii zadanej o przebiegu sinusoidalnym (bez nawiasu) oraz prostokątnym (w nawiasie).

Ostatnia, obszerna część pracy zawiera opis konstrukcji oraz testowania wykonanego prototypu manipulatora równoległego typu delta, w którym do napędu ramion wykorzystano 6 przedstawionych wcześniej serwonapędów z pneumatycznymi siłownikami mięśniowymi. Sformułowano model kinematyczny manipulatora i podano rozwiązania zadania prostego i odwrotnego kinematyki oraz konfiguracje osobliwe. Wybrane rozwiązania zadania odwrotnego zilustrowano w trakcie wykonanych badań symulacyjnych, demonstrując przebiegi zmiennych konfiguracyjnych manipulatora otrzymane w ruchu końcówki roboczej według kilku zadanych trajektorii. Wyznaczono także kształt przestrzeni roboczej manipulatora. Podano szczegóły realizacji sprzętowej układu sterowania układem sześciu pneumatycznych serwonapędów mięśniowych. Przeprowadzono obszerne badania eksperymentalne wykonanego prototypu manipulatora, otrzymując średnią dokładność odtwarzania trajektorii na poziomie ok. 1 mm oraz średnią dokładność odtwarzania zadanego położenia na poziomie ok. 0,18 mm i 0,001 rad.

Podsumowując, należy stwierdzić, że tematyka pracy jest aktualna i prezentuje autorskie rozwiązanie w zakresie tzw. robotyki podatnej (ang. *flexible robotics*). Prowadząc badania zagadnień cząstkowych, takich jak: właściwości statyczne i dynamiczne pneumatycznych siłowników mięśniowych, projektowanie i badanie serwonapędów mięśniowych oraz rozwiązanie zadań kinematyki manipulatora, zaprojektowano, wykonano i przetestowano eksperymentalnie w pełni funkcjonalny prototyp manipulatora równoległego typu delta z elementami napędowymi w postaci pneumatycznych serwonapędów mięśniowych.

Należy podkreślić znaczenie praktyczne rozwiązania problemu postawionego w celu pracy - w wyniku realizacji tego celu pojawia się realna szansa na opracowanie produktu - manipulatora - który może być zastosowany do bezpiecznej manipulacji delikatnymi obiektami o niewielkiej sztywności lub o nieregularnych kształtach.

Ocena merytoryczna pracy

Praca prezentuje dobry poziom merytoryczny. Autor wykazał się wiedzą i umiejętnościami praktycznymi z zakresu prowadzenia badań symulacyjnych i eksperymentalnych, planowania pomiarów, identyfikacji parametrycznej modelu, projektowania i wykonania nieliniowego układu sterowania złożonego, sześciooosiowego manipulatora przestrzennego o zamkniętym łańcuchu kinematycznym. Oryginalny i wartościowy wkład Autora stanowią:

1. Autorska konstrukcja pneumatycznych siłowników mięśniowych o strukturze mięśni McKibbena, zapewniająca lepsze charakterystyki siłowe, niż seryjnie produkowane siłowniki mięśniowe o tych samych parametrach geometrycznych, w tym: zwiększenie wartości generowanej siły o ok. 400 N oraz zwiększenie skrócenia bezwzględnego o ok. 13%.
2. Zweryfikowane doświadczalnie charakterystyki statyczne i dynamiczne opracowanych pneumatycznych siłowników mięśniowych, które stanowią podstawę do identyfikacji parametrycznej modelu ich dynamiki oraz wyznaczone funkcje aproksymujące wartości parametrów modelu we wszystkich punktach charakterystyki statycznej. Kompletny model dynamiki siłowników jest niezbędny do poprawnego zaprojektowania nieliniowego sterownika pneumatycznego serwonapędu mięśniowego.

3. Przebadany doświadczalnie, autorski prototyp pneumatycznego serwonapędu mięśniowego z nieliniowym układem sterowania położenia kąowego oraz nieliniowym układem sterowania momentu obrotowego. Otrzymana dokładność odtwarzania trajektorii zadanej przez wykonany prototyp serwonapędu wynosi:

a) dla trajektorii sinusoidalnej 0,01 rad oraz 0,08 Nm,

b) dla trajektorii prostokątnej 0,03 rad oraz 0,18 Nm,

odpowiednio w układzie sterowania położeniem kąowym i w układzie sterowania momentem obrotowym.

4. Przebadany doświadczalnie, autorski prototyp manipulatora równoległego typu delta z sześcioma pneumatycznymi serwonapędami mięśniowymi. Parametry charakteryzujące dokładność opracowanego manipulatora są następujące:

a) średnia dokładność odtwarzania trajektorii ok. 1 mm,

b) średnia dokładność odtwarzania zadanego położenia ok. 0,18 mm i 0,001 rad.

W porównaniu do serwonapędów elektrycznych, zapewniających dokładność pozycjonowania na poziomie pojedynczych mikrometrów, otrzymane dokładności opracowanych serwonapędów pneumatycznych nie są oczywiście imponujące. W odniesieniu jednak do napędów pneumatycznych uzyskane dokładności pozycjonowania należy uznać za bardzo dobre, co przy podstawowej przewadze takich serwonapędów, którą jest odporność na przeciążenia, jest niewątpliwą zaletą opracowanej konstrukcji.

Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne

W trakcie czytania opiniowanej pracy nasuwają się następujące wątpliwości lub uwagi krytyczne:

1. Niezbyt poprawny układ rozdziału 2: we wstępnej części tego rozdziału prezentowane są charakterystyki statyczne wykonanych prototypów pneumatycznych siłowników mięśniowych, nie jest jednak wyjaśnione, jak otrzymano te charakterystyki. Dopiero w rozdziale 2.1 zostaje wyjaśniona budowa stanowiska pomiarowego, sposób wyznaczania tych charakterystyk oraz otrzymane wyniki. Wnioski podane na str. 30-33, wynikające z otrzymanych doświadczalnie charakterystyk statycznych, powinny zatem znaleźć się dopiero w lub po rozdziale 2.2.

2. W pierwszej części pracy brakuje przeglądu literatury nt. metod modelowania pneumatycznych siłowników mięśniowych. Przegląd taki jest niezbędny, gdyż w dalszej części pracy Autor stosuje tylko jedną z takich metod, a mianowicie identyfikację parametryczną. Czytelnik może odnieść wrażenie, że jest to jedyna metoda otrzymania modelu dynamiki siłownika; nie znajduje także uzasadnienia, dlaczego wybrano właśnie tę metodę modelowania.

3. W przeglądzie literatury powinny zostać szerzej omówione algorytmy sterowania, które mogą być stosowane w pneumatycznych serwonapędach mięśniowych. Opisy zamieszczone na str. 18-19 są zbyt krótkie. W dalszej części pracy Autor stosuje nieliniowy układ sterowania z odwrotnym modelem obiektu i kompensacją uchybu; nie podaje jednak uzasadnienia dla wyboru takiej właśnie struktury układu sterowania. Czytelnik może również odnieść wrażenie, że tylko taka struktura układu sterowania jest poprawna i dopuszczalna.

4. Z niedostatkami wskazanymi w punkcie 3. wiąże się także następująca uwaga, związana z tym, że w pracy brakuje wyraźnego porównania osiągnięć wykonanego serwonapędu oraz manipulatora z osiągnięciami prezentowanymi w pracach naukowych innych autorów. Czytelnik traci w ten sposób możliwość obiektywnej oceny osiągniętych rezultatów.

5. Podstawowym kryterium poprawności zaprojektowania dowolnego układu sterowania jest zapewnienie stabilności takiego układu. W pracy brakuje analizy stabilności proponowanego układu sterowania położenia kątownego oraz momentu obrotowego. Powstaje zatem pytanie, czy Autor zna metody badania stabilności, jakie mógłby zastosować do jednoznacznej oceny opracowanych przez siebie układów sterowania.

6. Proponowana metoda wyprowadzenia modelu dynamiki siłownika mięśniowego na drodze identyfikacji parametrycznej ma szereg istotnych ograniczeń. Autor powinien znać te ograniczenia i poinformować o nich czytelnika. Ograniczenia te powinny być przedstawione na tle innych metod identyfikacji/modelowania dynamiki siłownika mięśniowego.

7. W rozdziale 3.1 brakuje informacji o tym, jakie konkretnie metody zostały użyte do dopasowania rozwiązania równania ruchu siłownika do danych eksperymentalnych. Krótka informacja, że użyto do tego celu oprogramowania Wolfram Mathematica jest niewystarczająca.

8. Opracowany układ elektroniczny do transmisji danych pomiarowych z przetworników pomiarowych wprowadza istotne opóźnienia czasowe w transmisji tych sygnałów do sterownika. Czy Autor analizował wpływ tych opóźnień na otrzymane właściwości dynamiczne serwonapędu/manipulatora?

9. W rozdziale 2. pominięto całkowicie szczegóły konstrukcyjne opracowanego pneumatycznego siłownika mięśniowego. Prawdopodobnie szczegóły te są objęte zgłoszeniem patentowym/patentem, jednak w pracy brakuje takiego wyjaśnienia. Czy Autor mógłby rozwiać wątpliwości w tym zakresie?

10. W rozdziale 2.3 prezentowane są tylko odpowiedzi skokowe. Czy Autor rozważał wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych i czy widziałby dla nich zastosowanie w trakcie projektowania układu sterowania?

Drobniejsze uwagi krytyczne

Str. 31: Wykresy na rys. 2.2 i 2.3, prezentujące charakterystyki statyczne mięśni, powstały na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych, poprzez połączenie linią ciągłą określonych punktów pomiarowych (dla kilku stałych skróceń mięśnia ^ε). Warto więc na wykresach z rys. 2.2 i 2.3 zaznaczyć te punkty pomiarowe (np. kółkami/krzyżykami). Niniejsza uwaga dotyczy także pozostałych wykresów prezentujących otrzymane eksperymentalnie charakterystyki statyczne mięśni pneumatycznych (np. rys. 2.4, 2.5, 2.8).

Str. 42: W rozdziale 2.3 prezentowane są charakterystyki skokowe (rys. 2.19-2.22) opracowanych mięśni pneumatycznych, otrzymane przy założeniu stałej wartości siły F obciążającej mięsień. Należy jednak zwrócić uwagę (o czym jest zresztą mowa w rozdz. 2.3), że siła obciążająca nie jest stała, lecz zmienia się w czasie wyznaczania charakterystyk

skokowych (co pokazano na rys. 2.17 i 2.18). Warto byłoby zatem choć krótko skomentować wpływ zmian siły obciążającej F na przebieg otrzymanych charakterystyk skokowych.

Str. 42 i 43: Na stronie 42 podano, że przebiegi siły obciążającej w układzie sterowania siły (rys. 2.17, 2.18) wyznaczono przy częstotliwości próbkowania 10 kHz, na stronie zaś 43 wyjaśniono, że charakterystyki skokowe mięśni (rys. 2.19-2.22) otrzymano przy częstotliwości 1 kHz. Czy zatem przebiegi siły z rys. 2.17 i 2.18 otrzymano za pomocą tego samego tensometrycznego czujnika siły CL21ms-rs i tej samej karty pomiarowej, za pomocą których rejestrowano przebiegi siły z rys. 2.21 i 2.22?

Str. 48-52: W jakich jednostkach podano wartości współczynników b , c , d równań (3.1) i (3.2) w Tab. 3.1-3.4? Niniejsze pytanie dotyczy także jednostek użytych do wykreślenia współczynników na osiach pionowych wykresów na rys. 3.3-3.5.

Podobne pytania można także sformułować do jednostek wartości współczynników b , c , d równań (3.6) i (3.7) w Tab. 3.6 na str. 64 oraz wykresów na rys. 3.14-3.16.

Str. 57: Rozważania pod zależnościami (3.4) i (3.5) są początkowo niezrozumiałe, gdyż nie wiadomo, która zależność jest określana jako „model odwrotny statyczny”, a która jako „model odwrotny dynamiczny”. Sytuację komplikuje fakt, że na rys. 3.7 (str. 58) także nie wyjaśniono który model to „model statyczny”, a który - „model dynamiczny”. Należy również zwrócić uwagę, iż obie zależności, zarówno (3.4), jak i (3.5) przedstawiają model dynamiczny mięśnia (w obu zależnościach skrócenie mięśnia x zależy od czasu t) - zastosowane nazewnictwo modeli nie jest zatem prawidłowe. Funkcje współczynników b , c , d , u_a obu modeli powinny być raczej zależne od F , x , a nie od F_a i x_a , czyli w równaniach (3.4), (3.5) powinno wystąpić raczej $b(F, x)$, $c(F, x)$ itd., a nie $b(F_a, x_a)$, $c(F_a, x_a)$. Oczywiście funkcje współczynników modeli zmieniają się w zależności od punktu pracy F_a , x_a - może zatem właściwsze byłoby oznaczanie tych funkcji jako $b_a(F, x)$, $c_a(F, x)$ itd.?

Podobne uwagi odnoszą się także do opisu zależności (3.9) i (3.10) na str. 67 oraz do rys. 3.18

Str. 58: Wyjścia obiektu na rys. 3.7 powinny być chyba oznaczone jako F , x , a nie F_a , x_a - wyjściami obiektu są przecież bieżące wartości siły i przemieszczenia mięśnia, a nie wartości tej siły i przemieszczenia w punkcie pracy. Analizując równanie (3.4), wydaje się, że w układzie sterowania pokazanym w górnej części rys. 3.7 (z modelem odwrotnym „statycznym”) brakuje sprzężenia zwrotnego od bieżącej pozycji mięśnia x (drugie wyjście obiektu) - sterowanie u (czy u_a) można przecież otrzymać z równania (3.4) na podstawie znanej wartości $x(t)$.

Podobne uwagi odnoszą się także do rys. 3.18 na str. 68.

Str. 76-79: Na rys. 4.3a) do 4.9a) nie oznaczono koloru linii zadanej i bieżącej pozycji kątowej serwonapędu (czerwony to pozycja zadana?).

Podobna uwaga dotyczy także rys. 4.11a)-4.17a) na str. 83-86.

Str. 75: „Nastawy regulatora PID dobrano podczas testów serwonapędu na stanowisku badawczym.” - w pracy warto zamieścić wartości nastaw regulatora PID dla serwonapędu pozycji kątowej.

Podobna uwaga dotyczy także nastaw regulatora PID dla serwonapędu momentu obrotowego (str. 81).

Str. 80: Sygnał prostokątny (rys. 4.9a) powinien być opisany ścisłą zależnością matematyczną zamiast lakonicznym „step” w Tab. 4.1 (zob. również opis w Tab. 4.2, str. 87).

Str. 103: Co znajduje się w lewym górnym rogu rys. 5.10?

Str. 121: Blok pomarańczowy na rys. 5.22 powinien być opisany jako „Zadanie odwrotne kinematyki”, zamiast „Zadanie kinematyki”.

Str. 157: „... model pozycyjny, pozwala obliczyć długość muskułu $x_{a,zad}$ na podstawie wartości sygnału sterującego u_a , aktualnej długości muskułu x_a ...” - ten opis jest niezrozumiały - po co obliczać długość muskułu na podstawie aktualnej długości muskułu? Błąd w opisie wynika stąd, że brakuje konsekwencji w oznaczeniach oraz nazewnictwie sygnałów x , x_a oraz $x_{a,zad}$.

Podobny błąd występuje również w następnym zdaniu „Podsumowania” na str. 157.

Str. 158: „Jego dokładność pozycjonowania, mimo, że niższa od dokładności pozycjonowania podobnych urządzeń napędzanych napędami elektrycznymi...” - w pracy nie porównano dokładności pozycjonowania opracowanego manipulatora z napędem pneumatycznym oraz innych manipulatorów z napędem elektrycznym, stąd wniosek niniejszy zawarty w „Podsumowaniu” jest nieuzasadniony.

Uwagi do redakcji pracy

Praca jest zredagowana bardzo starannie. Odwołania do pozycji literatury, rysunków, tabel są poprawne. Rysunki są czytelne i bardzo dobrze ilustrują przekazywane treści.

Należy podkreślić poprawność stylistyczną i gramatyczną języka pracy - drobne błędy wskazane poniżej występują naprawdę wyjątkowo. Uwagę zwraca poprawność stosowanej terminologii technicznej, precyzja języka w opisach, dokładność w redakcji równań matematycznych i oznaczeń.

Dostrzeżone błędy językowe:

Str. 18: „...(Sliding Mode Controll)...” -> „...(Sliding Mode Control)...”

Str. 23: „... układów sterownia napędami...” -> „... układów sterowania napędami...”

Str. 25: „... zasady pracy wirtualnej...” -> „... zasady prac wirtualnych (przygotowanych)...” - w terminologii polskojęzycznej stosuje się raczej określenie „zasada prac przygotowanych (wirtualnych)”

Str. 31, podpis pod rys. 2.3: „Wybrane charakterystyki opracowanych izobaryczne mięśniów...” -> „Wybrane charakterystyki izobaryczne opracowanych mięśniów...”

Str. 32: „... wynosi $x = 109,4$ mm , co odpowiada...” - zbędny odstęp przed przecinkiem, po „mm”

Str. 40: „Natomiast na rys. 2.15 przedstawiono... .. Natomiast na rys. 2.16 przedstawiono...” - dwa zdania; jedno po drugim rozpoczynające się niemal identycznie.

Str. 36, 37, 38, 42 i in.: Lepiej byłoby pominąć tytuły wykresów (pogrubione, nad wykresami), gdyż dublują one informacje podane w podpisach rysunkowych np. rys. 2.8, 2.9, 2.11, a ponadto mogą wprowadzać w błąd, np. tytuły nad rys. 2.17, 2.18 „Wartość siły obciążającej...” powinny znaleźć się raczej w podpisach pod rys. 2.17, 2.18 i brzmieć „Przebieg siły obciążającej w układzie sterowania siły” - niniejsza uwaga dotyczy całej pracy.

Str. 119: „... pracujących w trybie single ended...” - w terminologii polskojęzycznej stosuje się raczej określenie „tryb asymetryczny”, zamiast „tryb single ended”.

Str. 123: „... oraz z dodatkowym obciążaniu efektora.” -> „... oraz z dodatkowym obciążeniem efektora.”

Str. 157: „... rozprawa jako opisuję realizację...” -> „... rozprawa jako całość opisuje realizację...”

Str. 159: „... dokonanie zmian w kształcie samej konstrukcji mechanicznej manipulatora...” -> „... dokonanie zmian w konstrukcji mechanicznej manipulatora....”

Str. 161-168: Niekonsekwentne stosowanie małych i wielkich liter w opisach poszczególnych pozycji bibliograficznych.

Podsumowanie

Opiniowana praca stanowi samodzielne rozwiązanie zagadnienia naukowo-badawczego z zakresu projektowania i badania nieliniowego układu sterowania złożonego, silnie nieliniowego obiektu technicznego. Tematyka pracy znajduje się zatem w zakresie szeroko rozumianej automatyki i robotyki.

Należy podkreślić niezaprzeczalny walor praktyczny pracy, w postaci opracowanego, przetestowanego doświadczalnie prototypu manipulatora równoległego o bardzo dobrych właściwościach użytkowych.

Pomimo wymienionych wyżej niedociągnięć, uważam, że przedstawiona praca spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i proponuję dopuścić p. mgr inż. Dawida Sebastiana Pietrałę do jej publicznej obrony.

Mam nadzieję, że moje wątpliwości i uwagi krytyczne zostaną zadowolająco wyjaśnione na piśmie oraz w trakcie publicznej obrony pracy, a także uwzględnione w dalszych badaniach i publikacjach naukowych Autora.