

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Pawła Obala
zatytułowanej
Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym
w warunkach niepewności więzów

Recenzja została opracowana na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej wystosowaną 26 marca 2025 r. w związku z powołaniem przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna PRz recenzentów rozprawy mgra inż. Pawła Obala.

1. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Obala, zatytułowana ***Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów***, została opublikowana na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej w 2025 roku. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Dariusz Szybicki, prof. uczelni.

Rozprawa jest napisana w języku polskim. Dzieło liczy 200 stron, w tym 141 stron tekstu zasadniczego, poprzedzonego podziękowaniami, spisem treści i wykazem oznaczeń. Po tekście zasadniczym rozprawy umieszczono trzyczęściowy dodatek, spis ilustracji, spis tabel i dwa streszczenia (po polsku i po angielsku). Główna część rozprawy zawiera 10 rozdziałów oraz bibliografię liczącą 125 pozycji. **Struktura dzieła jest przejrzysta, logicznie uporządkowana i typowa dla tego rodzaju opracowań.** Muszę tu jednak wspomnieć, że dodatki B i C, składające się z niemal 40 stron wzorów, są moim zdaniem nieprzydatne dla czytelnika.

W rozdziale 1 (*Wstęp*) autor zwięźle odnosi się do aktualnego stanu i roli robotyki w kontekście technicznym i społecznym, umieszczając na tle tych rozważań informacje o obszarze tematycznym, którego dotyczyć będzie rozprawa – wskazuje zagadnienia sterowania pozycją i siłą w zadaniach zrobotyzowanej obróbki mechanicznej odlewów jako wymagające prowadzenia dalszych badań naukowych.

W rozdziale 2 (*Przegląd literatury*) na przestrzeni 14 stron zaprezentowany został przegląd stanu wiedzy poświęcony szerokiemu wachlarzowi zagadnień, a wśród nich: klasyfikacji metod sterowania interakcją robota ze środowiskiem, czujnikom dostarczającym informacji o stanie otoczenia robota, pośrednim i bezpośrednim metodom sterowania siłą, matematycznym modelom kontaktu robota z otoczeniem, różnym sformułowaniom zadań dotyczących ruchu robota w interakcji z otoczeniem. Najobszerniejsza część rozdziału dotyczy sterowania robotem oddziałującym na otoczenie i obejmuje metody sterowania podatnością, tłumieniem, impedancją oraz metody hybrydowe. Przegląd kończy

konkluzja, że badania nad metodami tego typu są prowadzone nieustannie od początków istnienia robotyki.

W rozdziale 3 (*Motywacja, cel i zakres pracy*) autor omawia problemy techniczne dotyczące obróbki odlewów, które skłoniły go do obrania za cel prac zaproponowanie nowej wersji sterowania pozycyjno-siłowego, a także przedstawia listę oryginalnych osiągnięć opisanych w rozprawie.

W rozdziale 4 (*Budowa stanowiska badawczego*) czytelnik odnajdzie informacje o używanym do eksperymentów robocie ABB (wyposażonym w fabryczny system sterowania siłą), pozycjonerze współpracującym z robotem oraz o sterowniku IRC5. Autor omawia także interfejs EGM pozwalający na zadawanie ruchu robota z zewnętrznego urządzenia oraz przedstawia możliwości wykorzystania oprogramowania Matlab/Simulink do sterowania ruchem robota, szczególnie dyskutując dostępne możliwości komunikowania się komputera PC ze sterownikiem IRC5.

W rozdziale 5 (*Model matematyczny robota*) znajduje się szczegółowo przedstawiony model kinematyki i dynamiki robota ABB IRB 2400, przy czym dynamika jest analizowana dwukrotnie – z zastosowaniem formalizmu lagranżowskiego i newtonowskiego. W końcowej części rozdziału przedstawione są oszacowania wartości liczbowych parametrów modelu, część z nich została zweryfikowana eksperymentalnie.

W rozdziale 6 (*Sterowanie pozycyjno-siłowe z uwzględnieniem niepewności więzów*) autor opisał zaproponowaną przez siebie strukturę układu sterowania pozycyjno-siłowego, bazującą na wcześniejszych pracach promotora, umożliwiającą uwzględnienie niepewności więzów geometrycznych, czyli – w praktyce – występowania niedokładności kształtu powierzchni obrabianej przez robota. Rozdział kończy analiza stabilności zaproponowanego układu sterowania.

W rozdziale 7 (*Badania symulacyjne*) odnajdujemy informacje o przyjętych w przeprowadzonych symulacjach szczegółowych założeniach dotyczących nominalnej trajektorii i zmienności zadanych sił kontaktu, a także o wzmocnieniach wykorzystywanych w układzie sterowania. Zaprezentowane są również wyniki symulacji robota współpracującego z obrabianym elementem, ilustrujące działanie opracowanych algorytmów.

W rozdziale 8 (*Badania eksperymentalne*) autor opisał i skomentował wyniki trzech testów: testu odpowiadającego symulacjom z rozdziału 7, testu klasycznej metody sterowania pozycyjno-siłowego oraz dwuetapowego testu zrobotyzowanej obróbki skrawaniem, w którym wykorzystany został opisany w rozdziale 6 algorytm sterowania z różnymi ustawieniami współczynnika kooperacji.

W rozdziale 9 (*Wnioski*) autor podsumowuje zaprezentowane w rozprawie osiągnięcia i wskazuje, że postawiony cel został zrealizowany.

W rozdziale 10 (*Kierunki dalszych badań*) autor przedstawia plan prac zmierzających do przeniesienia opracowanych metod z warunków laboratoryjnych, wymagających m.in. stosowania pakietu Simulink, do warunków zastosowań przemysłowych, wymagających pełnego zintegrowania opracowanych metod ze środowiskiem sterownika robota.

Po liczącej 125 pozycji bibliografii autor rozprawy umieścił wspomniane już wcześniej dodatki, z których pierwszy zawiera pseudokod programu sterowania siłą, a dwa pozostałe zawierają duże objętościowo wzory wynikające z pracownitego wymnażania – w postaci symbolicznej – macierzy zastosowanych w opisie kinematyki i dynamiki manipulatora.

2. Omówienie i ocena elementów rozprawy

W tym punkcie recenzji odnoszę się do wybranych, moim zdaniem najistotniejszych, elementów rozprawy.

2.1. Przegląd stanu wiedzy

Przegląd literatury odnosi się do kilku istotnych aspektów dotyczących sterowania robotem w kontakcie z otoczeniem. Autor dosyć płynnie przechodzi od tematu do tematu, niekiedy powracając do omawianych wcześniej zagadnień (na przykład fundamentalne prace Raiberta i Craiga omawiane są zarówno na stronie 15, jak i 24). Czytelność i uporządkowanie przeglądu literatury wzrosłoby, gdyby tekst został logicznie podzielony na wyodrębnione w postaci podrozdziałów lub śródtytułów części.

Literatura jest na ogół dobrze dobrana, widać wyraźnie, że autor dogłębnie przestudiował publikacje dotyczące tematyki doktoratu. Jednak niektóre artykuły, w szczególności cytowane prace przeglądowe, budzą pewne zdziwienie. Na przykład praca [28], obrazująca stan wiedzy, datowana jest na rok 1985. Podobnie rzecz się ma z pracą [17] (rok 1993) i kilkoma innymi. Odwoływanie się do źródeł pierwotnych, które powstały przed wielu laty, jest oczywiście uzasadnione i nie budzi sprzeciwu. Jednak źródła wtórne, a takimi są prace przeglądowe, powinny pochodzić z ostatnich lat, a zatem obrazować aktualny stan wiedzy. W opisie klasycznych – używanych w robotyce od lat – metod sterowania należało się być może posłużyć uznanymi podręcznikami, których nie brak w literaturze przedmiotu.

Na 125 pozycji przeglądu literatury jedynie około 20 to artykuły napisane w roku 2020 i później. Dużo więcej jest prac z dwóch ostatnich dekad XX wieku, kiedy powstawały metody sterowania pozycyjno-siłowego i tematyka ta była intensywnie obecna w badaniach. Doktorant skrupulatnie przeanalizował te prace. Stosunkowo mały udział artykułów prezentujących postępy z ostatnich lat może świadczyć o gasnącym zainteresowaniu tą tematyką badawczą. Autorowi rozprawy udało się jednak wskazać obszar wymagający dalszych badań.

Przegląd stanu wiedzy wskazuje na dobrą orientację autora w kwestiach związanych z różnymi wariantami sterowania pozycją i siłą oraz modelowaniem interakcji robota z otoczeniem. Doktorant wykazał się znajomością zarówno prac pionierskich, jak i najnowszych osiągnięć w obszarze jego zainteresowań naukowych. **Przegląd stanu wiedzy należy uznać za wystarczający i miarodajny.**

2.2. Cel pracy

Cel pracy badawczej mgra Pawła Obala został zainspirowany przez praktyczne problemy ze stosowaniem zrobotyzowanej obróbki powierzchni odlewanych elementów, wiążące się z dużymi nieregularnościami odlewanych elementów poddawanych obróbce. Dostępne komercyjnie metody sterowania siłą wywieraną przez robota nie przynoszą zadowalających rezultatów. Na podstawie analizy literatury, autor wykazał, że istnieje potrzeba opracowania dostosowanych do specyfiki zadania metod sterowania robotem.

Cel pracy, omówiony w punkcie 3.2 rozprawy, **dotyczy opracowania układu sterowania łączącego zalety sterowania pozycją z zaletami sterowania siłą w sposób nieco odmienny od dotychczas stosowanych.** Autor formułuje ponadto cztery cele szczegółowe, zmierzające do umiejętnego połączenia istniejących dotychczas algorytmów w sposób umożliwiający uzyskanie nowych, niezbędnych w rozpatrywanym zadaniu technicznych, możliwości.

Cel pracy należy uznać za dość **ambitny i wymagający wszechstronnych kompetencji.** Warto podkreślić, że od strony naukowej realizacja celu wymagała przeanalizowania wyników kilkudziesięciu

lat pracy wielu ośrodków badawczych zajmujących się robotyką i opracowaniu własnego podejścia, wnoszącego jakościowo nowe rezultaty. Od strony technicznej niezbędna była dogłębna znajomość warsztatu inżyniera, w tym umiejętności konfigurowania i obsługi złożonych systemów robotycznych oraz biegłości w posługiwaniu się oprogramowaniem inżynierskim.

2.3. Zastosowane metody badawcze i omówienie wyników badań

Modelowanie matematyczne i symulacja stanowią główne metody badawcze wykorzystane w pracy. Bazuje na nich zasadnicza część rozprawy, tj. rozdziały 5, 6 i 7. Natomiast w rozdziale 8 oraz w podrozdziale 5.5 odnajdujemy **badania eksperymentalne**. W pracach nad rozprawą autor zastosował zatem cały wachlarz metod badawczych typowych dla nauk inżyniersko-technicznych. Budując stanowisko badawcze, wykazał się także kompetencjami inżynierskimi.

Do modelowania kinematyki manipulatora autor wykorzystał formalizm Denavita-Hartenberga, wyprowadzając niezbędne wzory na poziomie położeń, prędkości i przyspieszeń. Osobno wyprowadził także wzory opisujące elementy jakobianu manipulatora. Wykorzystane przez autora podejście jest powszechnie stosowane w robotyce, autor – stosując je do robota ABB IRB 2400 – wykazał dobre opanowanie warsztatu inżyniera robotyka.

Formalizm Lagrange'a został wykorzystany do opracowania modelu dynamiki robota – autor skrupulatnie wyprowadził niezbędne wzory, stosując metodę opisywaną w podręcznikach z obszaru robotyki. Kolejna wersja modelu dynamiki robota została opracowana przy użyciu formalizmu Newtona-Eulera, by – według słów autora – dokonać weryfikacji poprawności równań wyprowadzonych wcześniej inną metodą. To ambitne podejście (zapewne łatwiej byłoby do weryfikacji wykorzystać model robota opracowany w dowolnym programie do obliczeń metodą układów wieloczłonowych, jak np. ADAMS) pozwoliło autorowi wykazać się znajomością dwóch, prawdopodobnie najczęściej stosowanych, metod budowania matematycznego modelu dynamiki manipulatora.

Na szczególną uwagę zasługują działania zmierzające do określenia parametrów modeli matematycznych, w tym **seria eksperymentów** prowadzących do oszacowania tarcia. Model bez dobrze oszacowanych parametrów byłby bezużyteczny. Autor przeprowadził też serię testów porównawczych, analizując zgodność przewidywań modelu dynamiki z rzeczywistym zachowaniem robota.

Modele matematyczne kinematyki i dynamiki robota zostały opracowane z użyciem właściwie dobranych metod i poddane weryfikacji. Ich rzetelność i poprawność działania (w granicach wyznaczonych przez przyjęte założenia upraszczające) **nie budzi zastrzeżeń**. Modele te zostały z powodzeniem wykorzystane w badaniach symulacyjnych robota, a także w zaproponowanym układzie sterowania robotem.

Na osobne omówienie zasługuje model matematyczny układu sterowania. Model ten odzwierciedla autorski algorytm sterowania, będący jądrem rozprawy doktorskiej. Opracowany algorytm bazuje na wcześniejszych osiągnięciach w zakresie sterowania pozycyjno-siłowego i ma na celu uzyskanie lepszych niż dotychczas dostępne efektów współdziałania robota z otoczeniem, w sytuacji, gdy znajomość kształtu powierzchni, z którą współpracuje robot jest obciążona niepewnością. Autor przeprowadził również analizę stabilności zaproponowanego układu sterowania.

Algorytm sterowania **jest precyzyjnie opisany i został należycie zbadany** na drodze symulacji, a następnie – po zaimplementowaniu w formie programu sterującego – przetestowany eksperymentalnie.

W rozdziale poświęconym badaniom symulacyjnym autor przedstawił zaledwie jeden test, ale został on wybrany w sposób dobrze przemyślany, tak aby umożliwić wszechstronną analizę opracowanych algorytmów i modeli. Do symulacji wykorzystany został pakiet Simulink. Dobór narzędzia oraz sposób jego wykorzystania nie budzą zastrzeżeń. **Autor wykazał się biegłością w budowaniu modeli symulacyjnych oraz umiejętnością analizowania uzyskiwanych wyników.**

Badania eksperymentalne zaprezentowane w rozprawie (rozdział 8) obejmowały trzy różne przypadki testowe, zaplanowane w taki sposób, by przetestować zaproponowany przez autora algorytm sterowania oraz dostarczyć materiału do porównań nowej metody sterowania z typową, dostępną w oprogramowaniu robota, metodą sterowania pozycyjno-siłowego. Wyniki eksperymentów zostały szczegółowo omówione, a ich interpretacja jest poprawna. Do przeprowadzenia badań autor wykorzystał opracowane przez siebie stanowisko badawcze udokumentowane w rozdziale 5. **Autor udowodnił umiejętność planowania, wykonywania i analizy wyników eksperymentów.**

Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że dobór narzędzi badawczych i sposób ich wykorzystania w rozprawie był poprawny i – na poziomie ogólnym – nie budzi wątpliwości. Do pewnych wątpliwości na poziomie szczegółów odnoszę się w dalszej części recenzji.

2.4. Rezultaty prac i ich potencjał aplikacyjny

Zaplanowane i przeprowadzone prace należy uznać za istotne, szczególnie ze względu na ich aplikacyjny charakter. Opisane w rozprawie **wyniki prac zawierają elementy nowości naukowej i wnoszą wkład w stan techniki w obszarze inżynierii mechanicznej**, w szczególności zaś w metody sterowania robotami wykonującymi zadania obróbki mechanicznej. Za najistotniejsze uważam następujące rezultaty.

- Opracowanie i zbudowanie stanowiska badawczego umożliwiającego testowanie i dokonywanie porównań różnych algorytmów sterowania robotem obsługującym narzędzie skrawające.
- Opracowanie i zastosowanie dostosowanej do możliwości pomiarowych oferowanych przez stanowisko badawcze metodyki szacowania parametrów fizycznych robota i jego otoczenia, w tym szacowania sił kontaktu i oporów ruchu.
- Umiejętne połączenie znanych metod sterowania w sposób umożliwiający osiągnięcie parametrów pracy robota lepiej dostosowanych do realizacji rozpatrywanej w rozprawie grupy zadań technologicznych związanych z obróbką odlewów o dużych odchyłkach od nominalnych kształtów.

Istotną częścią badań zrelacjonowanych w rozprawie były eksperymenty przeprowadzone z wykorzystaniem robota przemysłowego. Autor wykazał, że opracowane przez niego metody mogą wzbogacić możliwości robota i okazać się bardzo przydatne w procesach technologicznych związanych z obróbką mechaniczną odlewów. **Praca ma zatem duży potencjał aplikacyjny – zasadność zaproponowanej koncepcji została potwierdzona.** Wprowadzenie nowych metod do praktyki przemysłowej wymagać będzie jednak zaimplementowania opracowanych algorytmów bezpośrednio w sterowniku robota (co jest jednym z kierunków dalszych prac wskazanych przez autora w podsumowaniu rozprawy).

3. Uwagi o edycji pracy

Rozprawa jest przejrzysto napisana oraz jednolicie i bardzo schludnie zredagowana. Autorowi udało się połączyć szczegółowość wywodu z jego zrozumiałością. Polszczyzna rozprawy jest dobra, autor ma dar jasnego przedstawiania myśli. Zdarzają się literówki, ale nie ma ich zbyt wiele. Drobne zarzuty można mieć do interpunkcji, jednak pojawiające się sporadycznie błędy nie utrudniają lektury. **Wysoko oceniam edycję i walory językowe rozprawy.**

Jakość i dobór materiału ilustracyjnego również zasługują na pochwałę. Rysunki są przejrzyste, ukierunkowane na uwypuklenie istotnych informacji i w znacznym stopniu ułatwiają śledzenie tekstu. Materiał ilustracyjny jest bogaty i bardzo czytelny.

4. Wątpliwości, zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

4.1. Zagadnienia do dyskusji

1. W rozdziale 5, a następnie w dodatkach, wiele wzorów czytelnie i przejrzysto zapisanych w postaci macierzowej, prezentowanych jest następnie w rozwlekłej formie niewymagającej obliczeń macierzowych. Wzory te powstają przez wymnożenie macierzy zapisanych symbolicznie (jak miemam, w przekształceniach pomógł jakiś program do obliczeń symbolicznych) i osiągają niekiedy absurdalne rozmiary, zupełnie nieprzystępne dla czytelnika rozprawy. Nasuwa się cała seria pytań. Jaki był powód wykonywania tych symbolicznych obliczeń? Czy opracowane programy korzystają z wyprowadzonych szczegółowo wzorów? Dlaczego nie poprzestano na obliczeniach numerycznych (komputer jest wszak w stanie bardzo szybko przemnożyć te kilka macierzy)? Jeśli powodem wyprowadzenia symbolicznych formuł była próba skrócenia czasu obliczeń, to jaki przyniosła zysk? Jak wiadomo, nie zawsze zastąpienie metod numerycznych obliczeniami symbolicznymi przynosi skrócenie czasu obliczeń.
2. W podrozdziale 5.1 odnajdujemy wzory opisujące prędkość liniową i kątową efektora w zależności od współrzędnych i ich pochodnych (prędkości złączowych). Odpowiednie uporządkowanie tych wzorów (względem prędkości złączowych) pozwoliłoby na wyznaczenie elementów jakobianu manipulatora. Jednak w podrozdziale 5.2 jakobian manipulatora obliczany jest niejako „od nowa”. Proszę o umotywowanie takiego postępowania.
3. Przedstawiony w rozdziale 5 opis matematyczny kinematyki manipulatora można zastosować bezpośrednio do rozwiązywania zadania prostego kinematyki. Autor pisze jednak (str. 45) „opis kinematyki został wykorzystany do generowania trajektorii efektora końcowego”. Do generowania kartezyjskiej trajektorii efektora, np. prostoliniowej, konieczne jest na ogół rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki. Jak zatem rozwiązywano to zadanie?
4. W jaki sposób w modelu dynamiki robota uwzględniane są momenty bezwładności napędów oraz przekładnie redukcyjne pomiędzy silnikami a napędzanymi przez nie członami? Czy przyjęty model dynamiczny robota uwzględnia momenty gيروسkopowe pojawiające się, kiedy szybko wirujący silnik obraca się wraz z członem robota, na którym jest zamontowany?
5. Moment jest na ogół definiowany jako iloczyn wektorowy ramienia i siły (w tej właśnie kolejności). Jednak we wzorach w podrozdziale 5.4 kolejność mnożenia jest inna: siła razy ramię. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
6. W modelu lagranżowskim występują siły/momenty tarcia, natomiast w modelu newtonowskim ich nie ma. Dlaczego?

7. Jak zmierzono momenty w złączach robota pokazane na rysunku 5.8? Nie potrafiłem znaleźć tej informacji.
8. Na stronach 69-72 są opisane (niestety dość skąpo) testy zmierzające do zbadania zgodności modelu robota z rzeczywistym zachowaniem robota. Pokazane na wykresach czasy ruchu są różne dla różnych osi. Czy słuszne jest domniemanie, że testy były przeprowadzane osobno dla każdej z osi (przy unieruchomieniu pozostałych)? Jeśli tak, to nie był to chyba najszcześniejszy wybór – przy takim podejściu trudno zbadać sprzężenia dynamiczne występujące w robocie. Zakwestionować można również wybór przedziałami stałej prędkości – znikają z pola widzenia niektóre efekty związane z przyspieszeniami członów. Dlaczego nie przetestowano modelu na jakiejś zdefiniowanej w przestrzeni zadaniowej trajektorii, wymagającej jednoczesnego ruchu wszystkich osi i to ze zmiennymi prędkościami?
9. W podrozdziale 6.2 czytamy, że „określono właściwości strukturalne modelu matematycznego”. Na czym polegało to określenie? Czy właściwości $I - V$ zostały udowodnione, czy zaczerpnięte z literatury?
10. Jak traktować znak nierówności między macierzami występujący w równaniu (6.31)? Macierze I są diagonalne, natomiast macierz A nie.
11. Gdzie jest zdefiniowana $\tilde{\omega}$ występująca w równaniach (6.44) i (6.52)? Jaki jest związek $\tilde{\omega}$ z równaniem (6.38)?
12. Opisując opracowany w rozprawie algorytm/układ sterowania autor odwołuje się do wcześniejszych prac nad podobnymi algorytmami, w tym do prac macierzystego zespołu. Nie jest jednak do końca jasne, czym różni się zaproponowany algorytm od wcześniejszych. Proszę o wskazanie istotnych różnic pomiędzy przedstawionym w rozprawie układem sterowania a układami opisywanymi w pracach [113], [68], [116].
13. Nawiązując do zdania ze strony 94 „gdy efektor robota nie porusza się, wartości sił oporu λ_{r1} i λ_{r2} wynoszą 0”, zapytam: co się wtedy dzieje z siłą normalną λ_n ? Czy siła ta maleje do zera, kiedy przy zatrzymanym efektorze trwa proces skrawania? Czy, w związku z tym, współczynnik K_e nie powinien zależeć od prędkości przemieszczania wrzeciona w kierunku stycznym?
14. Pokazane na rys. 7.11 wielkości sygnałów związanych ze sterowaniem odpornym są bardzo małe w porównaniu z sygnałami odpowiadającymi innym trybom sterowania. Czy można zaryzykować stwierdzenie, że sterowanie odporne jest zbędne w zaproponowanym układzie sterowania?
15. Na rysunkach 8.48a i 8.61a pokazano odchylenie punktu TCP od założonej trajektorii. Jest ono bardzo małe, rzędu 0.1 mm. Jak zmierzono to odchylenie? Do tak precyzyjnego określenia położenia TCP nie wystarczą zapewne odczyty z enkoderów osi robota i obliczenia kinematyczne (elementy robota są však wykonane i zmontowane ze skończoną dokładnością, człony łańcucha kinematycznego nie są idealnie sztywne itd.). Czy wiadomo jak duże – w porównaniu z wielkościami na rysunkach 8.48a i 8.61a – są amplitudy drgań narzędzia, o których wspomina autor?
16. Na str. 132 odnajdujemy zdanie odnoszące się do rys. 8.55a: „przebieg siły pokazuje, że narzędzie utrzymało kontakt z powierzchnią detalu, jednak siła nie osiągnęła zadanej wartości”. Czy rysunek 8.55a nie został pomyłony z innym? Sugeruje on bowiem, że – istotnie – siła była mniejsza od zakładanej, jednak w pewnej fazie ruchu (w okolicach 30. sekundy) nastąpiło oderwanie narzędzia od powierzchni.
17. Czy rzeczywista trajektoria narzędzia może być oszacowana (a posteriori) na podstawie raportów metrologicznych, takich jak zilustrowane na rysunkach 8.62 lub 8.63?

4.2. Uwagi krytyczne

1. W przeglądzie literatury sporo miejsca poświęcono na przedstawienie zaproponowanego przez Raiberta i Craiga w pracy [37] podziału więzów na naturalne i sztuczne. W przypadku zagadnienia zilustrowanego na rys. 2.3 zabrakło jednak jakiegokolwiek komentarza dotyczącego szczególnego przypadku więzów siłowych, opisywanych wyjątkowo przez nierówności, a nie przez równości, jak w pozostałych przypadkach. Z matematycznego punktu widzenia jest to bardzo istotna różnica.
2. Opis słowny zmodyfikowanych parametrów Denavita-Hartenberga przedstawiony na początku rozdziału 5 zawiera kilka nieścisłości. Po pierwsze, warunek prostopadłości osi x_i do osi z_{i-1} odpowiada klasycznym, a nie zmodyfikowanym parametrom D-H (zauważmy, że na rys. 5.1. oś x_2 nie jest prostopadła do osi z_1). Po drugie, warunek prostopadłości osi x_i do osi z_i jest oczywisty i nic nie wnosi do kwestii usytuowania układów odniesienia. Po trzecie, zabrakło warunku przecinania się pod kątem prostym osi x i z sąsiadujących układów odniesienia (sama prostopadłość nie wystarczy).
3. W przypadku zastosowania formalizmu Denavita-Hartenberga w połączeniu z wykorzystaniem macierzy jednorodnych zapis wzorów dotyczących obliczania prędkości i przyspieszeń ma zwięzłą i elegancką formę (pod warunkiem pozostania przy notacji macierzowej). Niestety, w rozdziale 5 przy obliczaniu prędkości i przyspieszeń zapis macierzowy nie został wykorzystany. Czytelnik nie ma wglądu w wykonywane obliczenia – musi uwierzyć, że ostateczny wynik jest poprawny. A – pomimo przytłaczającej liczby wzorów – nie wszystko zostało pokazane. Na przykład wzory takie jak (5.45) (obliczenie \mathbf{v}_3^B) powstały zapewne przez zróżniczkowanie odpowiednich fragmentów macierzy T_i^B . Rzecz w tym, że macierze T_i^B nie są nigdzie pokazane (z wyjątkiem T_7^B).
4. W rozdziale 6 pojawia się drobne zamieszanie związane z kwestią niecałkowalności prędkości kątowej. Może należało zacząć od omówienia kwaternionów i ich pochodnych, a dopiero potem napisać równania kinematyki (6.2) i (6.3), stosując oznaczenia \mathbf{c} i \mathbf{v} (zob. równanie (6.21))? Pozwoliłoby to na uniknięcie niezręcznego tłumaczenia (zob. str. 77), że – wbrew powszechnie przyjętemu rozumieniu symboli – $\dot{\mathbf{c}}$ nie jest pochodną \mathbf{c} . Lektura podrozdziału 6.1 wskazuje, że autor zdaje sobie sprawę z niecałkowalności prędkości kątowej i konsekwencji tego faktu, jednak – formalnie rzecz biorąc – rozpatrywane łącznie równania (6.2) i (6.3) są niepoprawne (lub – co najmniej – występuje w nich konflikt oznaczeń).
5. W wielu miejscach rozprawy podawane są wyniki pomiarów. Nie udało mi się jednak znaleźć informacji o dokładności tych pomiarów.

4.3. Pomyłki, nieścisłości i mankamenty dostrzeżone w rozprawie

Z recenzenckiego obowiązku odnotuję jeszcze pomyłki i nieścisłości dostrzeżone w rozprawie. Może poniższe uwagi okażą się pomocne podczas przygotowywania publikacji naukowych bazujących na rozprawie doktorskiej.

- Str. 11 – osławiony (robot da Vinci) to nie to samo, co sławny.
- Str. 20 – rysunki 2.4 i 2.5 mają identyczne nazwy.
- Str. 21 – „odporność układu kontroli” – powinno być „odporność układu sterowania”; tego typu błędów (kontrola zamiast sterowania) jest w rozprawie więcej.
- Str. 21– „największej ilości ustawień” – powinno być „największej liczbie ustawień”.
- Str. 37 – w nagłówku Tabeli 5.1 powinien być kąt Θ_i , a nie q_i (z obecnego zapisu wynika na przykład, że $q_5 = q_5 + \pi$).
- Str. 46 – wzór (5.84) jest błędny (a konkretnie, pierwsza równość nie jest spełniona).

- Str. 60-61 – na rysunku 5.3 pokazano wektory r_s , a w tekście występują wektory r_c .
- Str. 68 – w trzecim wierszu podano liczbę 9.3 rad/s. Analiza informacji słownych i rysunków wskazuje, że zamiast radianów powinny być miliradiany.
- Str. 68 – w ostatnim wierszu powinno być: Stribecka.
- Str. 91 – skala czasowa na rys. 7.4b (zakres 50 s) jest dobrana w sposób uniemożliwiający analizę procesu narastania siły (trwającego 0.2 s); przydałoby się powiększenie fragmentów wykresu.

5. Podsumowanie oceny i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska lokuje się tematycznie w dyscyplinie **inżynieria mechaniczna** i wnosi wkład do stanu wiedzy w obszarze zastosowań robotów do wykonywania operacji technologicznych. Jak wskazałem w punkcie 2 recenzji, rozprawa podejmuje ważne z technicznego punktu widzenia problemy, w spójny i klarowny sposób przedstawia przeprowadzone badania, przynosząc wartościowe wyniki. **Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Pytania, zagadnienia dyskusyjne oraz krytyczne uwagi sformułowane w poprzednich punktach recenzji stanowią naturalną konsekwencję uważnej lektury i nie umniejszają wartości rozprawy. Osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie, omówione w punkcie 2 recenzji, upoważniają autora do ubiegania się o stopień doktora.

Podsumowując recenzję stwierdzam, że przedłożoną pracę oceniam **bardzo pozytywnie**. Rozprawa **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną autora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna**, a jej przedmiotem jest **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** dotyczącego wzbogacenia metod sterowania pozycyjno-siłowego wykorzystywanych przez roboty technologiczne. Oceniane dzieło **spełnia zatem wymagania** przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującym prawie. Dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Obala zatytułowanej *Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów.***