

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra Ali Soltani Sharif Abadi

pt. Design a Novel Control System to Solve Robotic Eye Surgery Challenges

Recenzja (poprawionej) rozprawy doktorskiej przygotowana na podstawie Uchwały nr 820/II/2024 r. Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 17 września 2024 roku.

1. Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problemu opracowania odpornego układu sterowania ruchem teleoperowanego systemu manipulacyjnego do celów realizacji chirurgicznych zabiegów okulistycznych (zwanego w rozprawie systemem DTRESS, ang. Delayed Teleoperated Robotic Eye Surgical System), z uwzględnieniem nałożonych ograniczeń związanych z jakością i bezpieczeństwem działania układu. Autor kładzie nacisk na zapewnienie stosownej jakości procesu sterowania wymaganej w zastosowaniach chirurgii okulistycznej, w szczególności na wysoką precyzję regulacji, unikanie drgań sterowania (ang. *chattering*), odporność na niepewność modelu obiektu sterowania oraz brak pomiaru pełnego wektora stanu, na zdolność do tłumienia wpływu pomiarowo niedostępnych zaburzeń zewnętrznych, a także na obecność opóźnień czasowych przy wymianie danych między podsystemami Master i Slave. Bez wątpienia jest to zagadnienie przynależne do obszaru tematycznego dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, a w szczególności do podobszaru automatyki. Warto tutaj podkreślić, że tematyka dysertacji jest związana z trudnym zagadnieniem technologicznym o istotnym znaczeniu społecznym.

Zasadniczym celem rozprawy jest projekt, analiza matematyczna oraz weryfikacja numeryczna i eksperymentalna algorytmów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym typu ślizgowego (ang. *sliding-mode control*) o ustalonym czasie zbieżności (ang. *fixed-time control*) dla układu teleoperacyjnego składającego się z zadajnika mechanicznego i manipulatora chirurgicznego, pracujących w układzie Master-Slave i połączonych łączem komunikacyjnym, które jest naturalnym źródłem opóźnienia czasowego wymiany danych.

W ramach teoretycznej części rozprawy Autor zaproponował trzy wersje algorytmów sterowania obiektem typu Master (zadajnik mechaniczny w formie joysticka / urządzenia haptycznego) oraz trzy wersje algorytmów sterowania obiektem typu Slave (manipulator chirurgiczny wyposażony w efektor). Algorytmy obejmowały trzy wybrane rodzaje warunków pracy systemu: (I) przy pełnej znajomości stanu układu dynamicznego i bezzwłocznej wymianie danych w układzie Master-Slave, (II) przy znajomości wyłącznie wyjścia pozycyjnego i estymacji za pomocą obserwatorów pozostałych zmiennych stanu oraz zagregowanego zaburzenia, (III) w warunkach analogicznych jak w wersji (II) przy jednoczesnej obecności opóźnienia czasowego występującego przy wymianie danych między obiektem typu Master i obiektem typu Slave. Następnie Doktorant dokonał formalnej analizy zbieżności uchybów w układzie DTRESS z algorytmem sterowania w wersji (III). W kolejnym etapie jakość pracy układu sterowania została numerycznie zweryfikowana w środowisku Matlab-Simulink dla dwóch wybranych scenariuszy sterowania; przeprowadzono także weryfikację algorytmu sterowania w trybie czasu rzeczywistego dla kolejnych trzech scenariuszy sterowania, w ramach których reakcje obiektu sterowania typu Slave były emulowane w tzw. trybie SIL (ang. *Software-In-the-Loop*) z wykorzystaniem jednostki obliczeniowej typu NovaCor. W ostatnim etapie zaproponowany (i zmodyfikowany w rozdziale 5) podukład sterowania dla obiektu typu Slave został zwalidowany doświadczalnie dla zadań regulacji stałowartościowej i regulacji programowej (tj. w zadaniu śledzenia trajektorii) na stanowisku laboratoryjnym składającym się z manipulatora ES5 Easy Robot o strukturze stawowej oraz układu sterowania pracującego w systemie ROS (ang. *Robot Operating System*). Do celów walidacyjnych układu sterowania w przestrzeni operacyjnej wykorzystano dwa rodzaje fizycznych modeli oka ludzkiego

spełniających rolę obiektu operacyjnego umieszczonego w przestrzeni zadaniowej robota. Treść recenzowanej pracy doktorskiej zawiera zatem wszystkie trzy komponenty powszechnie akceptowanej i rekomendowanej metodyki projektowania układów sterowania: analizę formalną (matematyczną), weryfikację symulacyjną oraz walidację eksperymentalną (choć w tym aspekcie tylko częściową, bo dotyczącą tylko podsystemu typu Slave i to w warunkach odmiennych od postulowanych w ramach celu rozprawy). Obecność wszystkich trzech wspomnianych komponentów należy zaliczyć do silnych stron dysertacji. Jednak po lekturze rozprawy można mieć ogólne wrażenie zdecydowanie zbyt szerokiego jej zakresu, co zwykle skutkuje mniej wnikliwym potraktowaniem pewnych istotnych szczegółów merytorycznych związanych z poruszaną problematyką. Tak też jest w przypadku recenzowanej rozprawy, w której liczne i różnorodne zagadnienia związane z technologiczną i praktyczną stroną prac badawczych ograniczyły w dużym stopniu uwagę Autora poświęconą subtelny ale ważnym szczegółom analizy dowodowej oraz własnościom sterowników zaproponowanych w dysertacji. Ten aspekt należy do zdecydowanie słabych elementów rozprawy.

2. Kompozycja i redakcja rozprawy

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim i liczy 337 stron; składa się z siedmiu rozdziałów poprzedzonych stroną tytułową, stroną podziękowania, streszczeniem (w wersji anglojęzycznej i polskojęzycznej), spisem treści, a kończy listą cytowanej bibliografii, spisem zastosowanych akronimów, spisami rysunków, tabel i dodatków, oraz czterema krótkimi dodatkami (trzema merytorycznymi i jednym z odnośnikiem do zewnętrznej bazy danych). Podział treści między poszczególne rozdziały jest logiczny i zgodny z ogólnie przyjętą metodyką badawczą w obszarze automatyki, zgodnie z którą najpierw przedstawiono cele badawcze i motywację podjęcia tematu (rozdział 1), potem przedstawiono zarys problematyki badawczej i stan wiedzy oraz technologii w zakresie poruszanej tematyki, a także otwarte problemy związane z robotyką chirurgiczną (rozdział 2), następnie zaproponowano i formalnie przeanalizowano oryginalny układ sterowania teleoperowanym robotem chirurgicznym (rozdział 3), po czym dokonano weryfikacji zaproponowanej metodyki sterowania w środowisku symulacyjnym i w środowisku czasu rzeczywistego (rozdział 4); w rozdziałach 5-6 przedstawiono wyniki (częściowej) walidacji eksperymentalnej podsystemu typu Slave zaproponowanego układu sterowania z wykorzystaniem rzeczywistego robota w warunkach laboratoryjnych i ostatecznie w rozdziale 7 podsumowano wyniki badań, a także zarysowano nadal otwarte problemy badawcze i możliwe przyszłe prace dotyczące potencjalnego dalszego rozwoju opracowanego systemu. Treści rozdziałów 2-6 poprzedzono ich streszczeniami i zakończono krótkimi podsumowaniami.

Pomimo zauważonych licznych usterek językowych i edycyjnych, rozprawa zasadniczo została przygotowana względnie poprawnie pod względem redakcyjnym, jednak układ treści dysertacji nie jest do końca spójny, ponieważ różne wersje proponowanych sterowników są rozproszone w ramach rozdziałów 3 i 5, wyniki symulacyjne poza rozdziałem 4 są dodatkowo łączone z wynikami doświadczalnymi w rozdziale 5, natomiast wyniki eksperymentów zostały niepotrzebnie rozdzielone na treści rozdziałów 5 i 6. Ścisłość i kompletność wywodów matematycznych zawartych w dysertacji jest bardzo ograniczona. Autor poza opisem matematycznym zaproponowanego układu sterowania zamieścił także opisy wykorzystanych stanowisk laboratoryjnych, opisy warunków prowadzenia testów weryfikacyjnych, podał wyniki testów w postaci licznych i szczegółowych wykresów przebiegów sygnałów oraz w postaci tabel zawierających wybrane wyniki ilościowe. Czytelność fragmentów dysertacji oraz płynność narracji są miejscami mocno ograniczone. Na przykład przejście do opisu powierzchni ślizgowych w rozdziale 3 nie zostało poprzedzone żadnym wprowadzeniem; dygresje związane z uwagami na temat szacowania górnych ograniczeń (por. np. uwagi 3.2 i 3.5 na stronie 65) są wyrwane z kontekstu; wiele elementów zawartych w równaniach rozdziału 3 nie jest stosownie skomentowana lub odwołana do stosownych równań definicyjnych lub wcześniejszych wyprowadzeń. Treści rozdziałów 5 i 6 nawiązują do tematyki rozdziałów 3 i 4, ale sprawiają wrażenie odrębnej części poświęconej nie całemu systemowi DTRESS, a przede wszystkim sterowaniu obiektem typu Slave w warunkach nie w pełni zgodnych z założeniami systemu DTRESS (z oddzielną listą wymieniającą składniki wkładu twórczego podaną na stronie 185 - takie zestawienie powinno być podane wspólnie dla wszystkich rozdziałów na początku rozprawy). Wybrane szczegółowe uwagi krytyczne dotyczące strony edycyjnej oraz jakości prezentacji treści rozprawy podano w punkcie 4 niniejszej recenzji.

Cytowana w pracy bibliografia jest liczna i składa się z 276 pozycji. Została ona dobrana w przekonujący sposób i zawiera odniesienia zarówno do światowej literatury inżynierskiej, jak i do literatury medycznej, co jest zasadne w kontekście interdyscyplinarnej problematyki poruszanej w rozprawie. Są to w przeważającej części artykuły konferencyjne oraz publikacje pochodzące z czasopism fachowych (w tym z renomowanych periodyków indeksowanych w bazie JCR) poświęconych wybranym zagadnieniom medycznym i biomedycznym, robotyce, mechatronice, technologii sterowania, sensoryce i pomiarom, telekomunikacji oraz medycznemu i pozamedycznemu aplikacjom robotyki. Doktorant cytuje nie tylko współczesne prace, ale także prace pionierskie/fundamentalne i opracowania przeglądowe z ostatnich prawie 30 lat, co pozwala na szerszy wgląd w problematykę i współczesną historię rozwoju robotyki medycznej. Należy w tym miejscu zauważyć, że w zakresie sterowania odpornego (np. w ramach łódzkiej szkoły sterowania ślizgowego) oraz sterowania w czasie skończonym opublikowano wiele prac polskich autorów, z których zaledwie jedną udało się znaleźć w zestawieniu literatury podanym przez Doktoranta.

3. Ocena zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

Problem badawczy i cele badawcze sformułowane przez Doktoranta w rozdziale 1 są zasadne, ambitne i dobrze wpisują się w aktualne trendy badawcze, zarówno z kontekście problematyki wybranych koncepcji sterowania odpornego jak i w kontekście zastosowania tej metodyki sterowania w robotyce medycznej. Postawione wysokie wymagania ze względu na oczekiwaną jakość sterowania w projektowanym układzie sterowania (podane luźno w punkcie 1.2 na str. 13) zostały sformułowane bardziej szczegółowo w postaci dziesięciu zadań/celów sterowania podanych w punkcie 3.5 dysertacji. Niestety część z nich jest sformułowana bardzo niejasno i nieprecyzyjnie, np. nie wiadomo w jaki sposób i w jakim sensie układ sterowania ma zaadresować opóźnienia komunikacyjne ujawniające się podczas wymiany danych między podsystemami Master i Slave; nie wiadomo jak należy rozumieć w sensie ilościowym wymaganą dokładność regulacji wobec potencjalnego zastosowania systemu DTRESS w chirurgii oka (ten aspekt jest uszczegółowiony dopiero na końcu rozprawy w punkcie 6.8). Autor nie wyjaśnił też w jaki sposób generowana jest trajektoria referencyjna dla podsystemu Master. W efekcie zadanie sterowania nie jest precyzyjnie określone, co prowadzi do trudności oceny jakości uzyskanych wyników. Wykorzystanie metodyki trybów ślizgowych, zarówno do celów sterowania jak i obserwacji stanu, z gwarancją zbieżności w czasie ustalonym (ang. *fixed-time convergence*) zostały jednak trafnie wybrane w celu uzyskania odporności na błędy modelowania, niedostępność pomiarową zmiennych stanu oraz zaburzenia zewnętrzne pojawiające się w torze sygnału sterującego (tzw. zaburzenia dopasowane). Uzyskanie zbieżności w czasie ustalonym (zarówno dla fazy osiągania powierzchni ślizgowej jak i samej fazy ślizgu wzdłuż powierzchni) skutkuje generalnie zmniejszeniem wrażliwości układu zamkniętego na niepewności modelowania oraz na warunki początkowe (w tym drugim przypadku jednak tylko lokalnie, w pewnym otoczeniu uchybu zerowego, z powodu fizycznie ograniczonych sygnałów sterujących robota). Lapunowskie techniki analizy stabilności i szacowania czasów zbieżności wykorzystane w rozdziałach 3 oraz 5 zostały zasadnie wybrane ze znanej literatury przedmiotu. Obszerna numeryczna weryfikacja zaproponowanych algorytmów sterowania oraz (częściowa) ich walidacja eksperymentalna wpisują się w szeroko przyjęty i właściwy schemat tzw. metodycznej złotej triady (*teoria-symulacja-eksperyment*) prowadzenia badań w obszarze automatyki i technologii sterowania. Na uwagę zasługuje realizacja szeregu testów empirycznych z wykorzystaniem laboratoryjnego stanowiska z manipulatorem ES5, która wymagała od Doktoranta stosownych umiejętności programistycznych i doświadczenia inżynierskiego.

Analizując zawartość rozdziałów 3-6 nasuwają się jednak liczne istotne uwagi krytyczne, pytania i wątpliwości. Przede wszystkim strona matematyczna dysertacji nie jest przedstawiona wystarczająco rygorystycznie, a miejscami jest bardzo niejasna, nieprecyzyjna i częściowo błędna. Prawo sterowania DTRESS podane w rozdziale 3, będące przedmiotem twierdzenia 3.1 (str. 79), a także jego zmodyfikowana wersja dla podsystemu Slave z rozdziału 5, są kontrowersyjne ponieważ zawierają pochodne funkcji, które albo są nieciągłe (składniki typu *sign(.)*) albo nie są ciągłe w sensie Lipschitza w zerze, co może skutkować nieograniczonymi wartościami tych pochodnych dla argumentów zerowych. Dowód twierdzenia 3.1 jest w niektórych miejscach przedstawiony bardzo nieprecyzyjnie, z licznymi uproszczeniami w procesie wnioskowania, co czyni daremną próbę szczegółowej oceny tej analizy w rozsądnym czasie (nie jest rolą recenzenta prowadzenie dochodzenia

matematycznego, a obowiązkiem Autora jest prezentacja analizy dowodowej w sposób wystarczająco szczegółowy, dokładny i przejrzysty). Można jednak zauważyć istotnie kontrowersyjne elementy analizy dowodowej. Mianowicie, Doktorant próbuje obejść problem potencjalnego osiągania osobiowości pochodnych funkcji nieróżniczkowalnych w zerze poprzez wprowadzenie pewnego niezerowego otoczenia ε , dla którego prowadzi analizę zbieżności (zamiast analizy stabilności) bez podania, co się dzieje wewnątrz tego otoczenia (w efekcie stabilność punktu zerowego nie może zostać jednoznacznie stwierdzona). Autor podaje implikacje dowodowe w (3.86) dla otoczenia ε lecz nie wiadomo ile takie otoczenie wynosi, dlaczego jest takie samo dla wszystkich uchybów oraz co dzieje się wewnątrz tego otoczenia zarówno z uchybami jak i z sygnałami sterującymi (szczególnie w efekcie dalszego wyznaczania sygnałów sterujących zbliżających się do potencjalnie osobliwego punktu zerowego, tj. punktu nieograniczonych pochodnych składników 'nie-lipschitzowskich'). Co więcej, podana w (3.86) implikacja, wg której z ograniczonego uchybu pozycji ma wynikać ograniczona pochodna tego uchybu jest logicznie zawodna. Ponadto nie jest jasne jaki był cel wprowadzania zmodyfikowanego prawa sterowania na stronach 82-85 (czy ma ono jakieś szczególne zalety nad wersją sterownika z twierdzenia 3.1?) i dalej jaki był cel formułowania twierdzenia 3.2 - brakuje tutaj uzasadnienia podanych modyfikacji i wyjaśnienia różnic między sterownikiem z twierdzenia 3.1 a sterownikiem z twierdzenia 3.2 (zmodyfikowany sterownik posiada podobnie kontrowersyjne składniki jak ten poprzedni, a postępowanie dowodowe zawiera podobnie niewłaściwe kroki wnioskowania co w dowodzie twierdzenia 3.1). Schematy funkcjonalne z rys. 3.5 i 3.6, pozbawione stosownego komentarza, również nie wyjaśniają tej kwestii. Nie jest też jasne czy stabilność analizowana w twierdzeniach 3.1-3.2 ma być słuszną dla dowolnie długich stałych opóźnień komunikacyjnych między podsystemami Master i Slave czy też nie (z treści założenia 3.4 można wnioskować ich dowolną długość). Uzyskanie gwarancji stabilności dla dowolnie długich opóźnień (które w praktyce wpływają na sygnały zależne od stanu podsystemów Master i Slave) wydaje się tutaj nierealistyczne. W końcu nie jest jasne czy układ sterowania gwarantuje ograniczenie siły interakcji dla efektora manipulatora Slave (postulowane na stronie 63, w punkcie 10a), bo tego elementu nie uwzględniają treści twierdzeń 3.1 i 3.2. W konsekwencji główny formalny rezultat podany w rozdziale 3 nie może być oceniony jako przejrzysty i wiarygodny wynik naukowy i w tym kontekście wnioski sformułowane w punkcie 3.8 dysertacji brzmią nazbyt optymistycznie.

Weryfikacja numeryczna przeprowadzona w rozdziale 4 dla pięciu wybranych scenariuszy sterowania ilustruje pewien praktyczny potencjał zaproponowanego układu sterowania, w którym obserwuje się postulowaną wcześniej zbieżność w czasie ustalonym (z dokładnością do błędów numerycznych zastosowanego *solvera*) oraz odporność układu na zaburzenia zewnętrzne oraz niepewności modelu i stanu robotów. Jednak i tutaj należy zwrócić uwagę na kilka kontrowersyjnych lub dyskusyjnych elementów. Po pierwsze odkształcenie tkanki operowanego oka (i tym samym siły oddziaływania tej tkanki na efektor robota Slave) modelowane są w równaniach (4.1), (4.6), (4.10), (4.14) i (4.18) jako funkcje wyłącznie zależne od czasu, co nie jest zgodne z naturą zjawiska interakcji *robot-tkanka* zachodzącego w rzeczywistych zrobotyzowanych operacjach chirurgicznych, gdzie interakcja taka zależy przede wszystkim od stanu robota (a dokładniej od relacji przestrzennej między tkanką a końcówką efektora robota wchodzącą w fizyczny kontakt z tą tkanką). W mojej ocenie przyjęcie takiego założenia jest koncepcyjnie błędne w świetle założonych wcześniej celów aplikacyjnych systemu DTRESS i sprowadza tak modelowaną siłę interakcji do dodatkowego oddziaływania (nieдоступnego pomiarowo i nieestymowanego) zewnętrznego zaburzenia zależnego tylko od czasu. W konsekwencji nie jest jasne jak rozumieć spełnienie warunków 'bezpiecznej' teleoperacji w proponowanym układzie sterowania oraz odporność na opóźnienia komunikacyjne obecne w systemie DTRESS, o których Doktorant wspomina w różnych miejscach rozprawy. Opóźnianie bowiem zaburzenia zewnętrznego nie wpływa na stabilność układu w tak krytyczny sposób, jak opóźnienie sygnałów zależnych od dynamicznych sprzężeń skrośnych między podsystemami Slave i Master (co miałyby miejsce, gdyby siła interakcji była zależna od stanu). Po drugie wartości momentów napędowych przedstawione na rys. 4.35-4.37 oraz 4.89 i 4.143 uzyskane dla robota Slave w stanie quasi-ustalonym są bardzo duże (rzędu kNm i więcej), co nasuwa pytanie o praktyczną użyteczność zaproponowanego rozwiązania. Ponadto dodatkowe wyniki symulacyjne pokazane na stronach 316-318 są niepokojące, ponieważ wykazują narastanie uchybów śledzenia z upływem czasu (co prawda są to efekty obserwowane w bardzo małej skali, jednak nie wiadomo jaki byłby przebieg tych uchybów po dłuższym czasie symulacji). Po trzecie strojenie zaproponowanego

układu sterowania wydaje się wysoce złożone i niewygodne w praktyce ze względu na dużą liczbę parametrów projektowych poszczególnych podsystemów układu sterowania i mało konstruktywny schemat procesu strojenia podany na rysunku 4.1 (str. 93). W dużej mierze schemat ten opiera się o metodykę prób i błędów.

Rozdział 5 jest poświęcony badaniu sterownika czasu ustalonego dla pojedynczego manipulatora szeregowego, gdzie prawo sterowania jest tylko częściowo związane z technikami rozważanymi w rozdziałach 3-4. Niezgodnie z tytułem, treść rozdziału 5 dotyczy zarówno wyników eksperymentalnych jak i symulacyjnych oraz badań porównawczych sterownika czasu ustalonego ze sterownikami czasu skończonego i sterownikiem czasu nieskończonego (typu PID). Do celów porównawczych słusznie wykorzystano wartości wybranych wskaźników ilościowych zarówno dla określenia precyzji jak i kosztu regulacji. Zasadniczo wykonanie eksperymentów w celu sprawdzenia odporności zaproponowanego sterownika w różnych scenariuszach obciążenia manipulatora nieznanym ładunkiem jest właściwym podejściem, a porównanie ilościowe wyników z alternatywnymi sterownikami jest uzasadnione. Jednak po lekturze rozdziału 5 nasuwa się szereg dodatkowych kontrowersji. Po pierwsze nie jest w pełni jasne, w jakim celu rozdział 5 został wprowadzony do rozprawy, ponieważ jego związek z celem badawczym dysertacji jest tylko częściowy, a modyfikacja prawa sterowania wykorzystanego w tym rozdziale (w porównaniu ze sterownikiem z rozdziału 3) nie jest klarownie uzasadniona i posiada podobne mankamenty, jak sterowniki z rozdziału 3 (por. (5.8)-(5.9)). Po drugie strona matematyczna opisu jest nieprecyzyjna, niejasna, a miejscami jej poprawność jest wątpliwa (np. symbole w założeniach (5.4) nie są spójne z symbolami wprowadzonymi wcześniej, co wprowadza konfuzję; postulowana przed (5.13) różniczkowalność funkcji Lapunowa jest wątpliwa w obliczu definicji (5.8)-(5.9); wzór (5.15) wydaje się błędny, a przejście między (5.15) a (5.16) jest niejasne; ponownie w analizie zbieżności Autor wprowadza sztucznie otoczenie ε dla pokazania zbieżności uchybów, lecz nie wyjaśnia co dzieje się wewnątrz tego otoczenia, a ostatnie dwie implikacje w (5.19) są logicznie zawodne). Ilościowa analiza porównawcza podana na stronach 200-203, 216-219 oraz 229-232 jest częściowo dyskusyjna, ponieważ nie zawsze zaproponowany sterownik wypada korzystniej (w sensie precyzji regulacji) w porównaniu z innymi układami sterowania (por. rys. 5.25-5.26 oraz 5.36-5.37), a tam gdzie zalety w precyzji są widoczne koszty sterowania często przewyższają koszty ponoszone przez alternatywne sterowniki. W konsekwencji nie można jednoznacznie orzec czy polepszenie jakości precyzji regulacji wynika tu z samej strategii sterowania czy też może z tendencyjnie dokonanej syntezy parametrycznej sterowników. Aby móc miarodajnie stwierdzić przewagę jednego sterownika nad drugim należało tak dobrać parametry układów sterowania, aby zapewnić albo zbliżone koszty sterowania i dla nich porównać uzyskiwane precyzje regulacji, albo zapewnić porównywalne precyzje regulacji i wtedy porównać koszty sterowania. Niestety porównanie nie zostało tak przeprowadzone, a wnioski wysuwane przez Doktoranta na stronach 203-204, 233 oraz 245-246 nie są w pełni uzasadnione lub są zdecydowanie nadmiernie optymistyczne (co więcej, stwierdzenia na stronie 245 są częściowo niezgodne w prawdą – por. wyniki w tabelicy 5.29 na stronie 243 dla złączy o numerach 2 i 3).

Wyniki badań eksperymentalnych dla zadania śledzenia trajektorii programowej manipulatora typu Slave Doktorant prezentuje w rozdziale 6. Podano wyniki dla dwóch scenariuszy ruchu - tj. z małą i większą prędkością maksymalną robota - zrealizowanych dla dwóch różnych fizycznych modeli oka różniących się wymiarami. W zbiorze wyników przedstawiono zarówno uchyby uzyskane w przestrzeni przegubowej jak i wartości przeliczone do przestrzeni zadaniowej (operacyjnej). Sposób przeliczania uchybów wg wzoru (6.1) jest jednak dyskusyjny, ponieważ jacobian zwykle przekształca prędkości a nie zmienne pozycyjne (ta kwestia wymaga wyjaśnienia). Należy zaznaczyć, że eksperymenty przeprowadzono dla zmodyfikowanego sterownika z rozdziału 5 (brak wykorzystania obserwatora stanu) i tylko dla podsystemu typu Slave, a nie dla oryginalnego sterownika systemu DTRESS wprowadzonego w rozdziale 3. Poza tym w ogóle nie testowano sterownika z uwzględnieniem wymogu ograniczania siłowej interakcji efektora z fizycznym modelem oka. Analiza licznych wyników podanych na stronach 253-273 nasuwa kilka poważnych wątpliwości. Mianowicie, wyniki nie uwypuklają kluczowej własności zbieżności w czasie ustalonym, a przebiegi momentów napędowych wykazują liczne piki, w niektórych przypadkach sięgające kilkudziesięciu Nm (np. na rys. 6.9). Jak jest źródło tych gwałtownych zmian sygnałów sterujących i czy jest ono związane z potencjalnymi osobliwościami sterownika? Ponadto niektóre składowe uchyby pozycyjnego wyznaczone dla przestrzeni operacyjnej wyraźnie przekraczają w każdym przypadku (w sensie kresu górnego wartości bezwzględnej) poziom 1 mm, co dla zastosowań w teleoperowanej chirurgii oka wydaje się

dyskwalifikujące. Mimo tego, Autor na stronie 274 pisze (cytuje) *'The experimental results confirm that the proposed controller achieves sub-millimeter tracking accuracy in both the joint and operational spaces'* z czym zdecydowanie nie można się zgodzić (jest to jawnie sprzeczne z faktami empirycznymi). W konsekwencji powyższych uwag nie można przyjąć za uzasadnione optymistycznego w swoim wyrazie podsumowania podanego przez Doktoranta w punkcie 6.9 na stronie 274, a także fragmentów optymistycznych wniosków sformułowanych w punkcie 7.2. Tym samym nie można stwierdzić, że zaprezentowane wyniki doświadczalne potwierdzają osiągnięcie celów badawczych postawionych w rozdziale 1 dysertacji.

4. Szczegółowe uwagi krytyczne i pytania

- [U1] W punkcie 2.5.4 (tabela 2.5, str. 48) Autor podaje jako wady sterowników typu ADRC wymaganie liniowych modeli dynamiki systemów/procesów oraz zastosowanie liniowego estymatora siły, co nie jest prawdą. Układy sterowania ADRC dopuszczają silnie nieliniowe i wysoko niepewne modele (zarówno parametrycznie jak i strukturalnie), a zastosowanie nieliniowych estymatorów stanu rozszerzonego jest powszechnie znane. Poza tym bibliografia przytoczona w rozprawie na temat koncepcji i zastosowań metodyki ADRC jest skąpa.
- [U2] W punkcie 2.5.4 można znaleźć dyskusyjne stwierdzenia. Mianowicie, nie jest prawdą, że algorytm PID nie zapewnia odporności układu zamkniętego na zewnętrzne zaburzenia - to jest zbyt ogólnikowe i tym samym mylące stwierdzenie. W treści punktu 2.5.4 Autor stosuje niezręczne lub nieprecyzyjne (niejasne) sformułowania np.: *'Smooth tracking means that the surgical system tracks the desired trajectory without any overshoot'* (wydaje się, że raczej istotne jest śledzenie bez oscylacji, w tym brak przeregulowania); *'MPC is an another common control algorithm used in robotic systems'* (dziś nadal raczej głównie w laboratoriach badawczych); *'[...] smooth control are the major disadvantages'* (raczej 'non-smooth').
- [U3] Definicje i lematy przytoczone na stronach 55-56 są w niektórych miejscach sformułowane nieściśle, np. 'non zero numbers' są większe lub równe zero w lemacie 3.2; w definicji 3.2 powinno być 'equilibrium' (zamiast liczby mnogiej 'equilibria'); czas ustalania T powinien być skończony (podobnie w definicji 3.3); zakres wartości funkcji $V(x)$ w lemacie 3.3 powinien obejmować zero. Ponadto źródłem lematu 3.1 powinna być np. praca autorstwa Shuanghe Yu et al. opublikowana w czasopiśmie Automatica (41) z roku 2005, a nie praca [175], bo to nie jest autorski wynik Doktoranta.
- [U4] Nie jest jasne jakie jest źródło trajektorii referencyjnej dla podsystemu typu Master. Na jakiej podstawie jest wyznaczana ta trajektoria i czy jest ona modyfikowana na bieżąco w funkcji wartości siły interakcji efektora robota Slave z tkanką oka? Jakie własności matematyczne (np. stopień ciągłości) zakłada się dla takiej trajektorii? Ten aspekt został potraktowany zbyt ogólnikowo.
- [U5] Zaproponowane przez Autora na stronach 65-77 układy sterowania mają kontrowersyjne struktury. Po pierwsze niektóre składniki praw sterowania (por. (3.31), (3.38), (3.47), (3.58), (3.76)) zależą od pochodnych po czasie sygnałów, które to pochodne są osobiliwe w zerze. Nie jest zatem jasne czy takie składniki są numerycznie dobrze określone i fizycznie realizowalne w warunkach praktycznych. Po drugie wymaganie użycia pochodnych po czasie zaproponowanych powierzchni ślizgowych (por. (3.35), (3.44), (3.55), (3.63), (3.73)) wymaga wykorzystania przyspieszeń manipulatorów, co jest mało praktyczne w przypadku większości robotów przemysłowych (trudności jakościowe związane z pomiarem przyspieszeń lub niedostępność czujników przyspieszeń). Po trzecie użycie pochodnych sygnałów ' Z_i ' (por. (3.41), (3.50), (3.69), (3.79) oraz definicje (3.34), (3.43), (3.60), (3.71)) wymaga pomiaru zrywów (tj. pochodnych przyspieszeń), wyznaczania pochodnych momentów napędowych, a także użycia pochodnych sygnałów typu *sign(.)* (por. (3.71) i (3.53)), co czyni równania sterowników jeszcze bardziej kłopotliwymi w zastosowaniach. Jak takie kontrowersyjne składniki wyznacza Autor podczas implementacji? Ta kwestia nie została wyjaśniona w rozprawie. Sposób implementacji powyższych składników układów sterowania na platformie sprzętowej także wymaga wyjaśnienia, w szczególności jakie aproksymacje i pomiary wykorzystano w przypadku tych problematycznych komponentów? Takiego wyjaśnienia nie można znaleźć w tekście dysertacji, co czyni wyniki niereprodukowalnymi.
- [U6] Wydaje się, że obecność opóźnienia czasowego w systemach teleoperacyjnych z interakcją ze środowiskiem

zewnętrznym przy dwukierunkowym przesyłaniu danych między obiektami Master i Slave (tzw. *interconnected systems*) może doprowadzić do destabilizacji układu zamkniętego, jeżeli wartość tego opóźnienia będzie zbyt duża. Treści twierdzeń 3.1 oraz 3.2 nie uwzględniają wprost tego problemu, co może sugerować, że zbieżność do tunelu ε zachodzi pomimo obecności dowolnie długiego stałego opóźnienia. Taki wniosek wydaje się nierealistyczny i tym samym kontrowersyjny. Jaki konkretny mechanizm stabilizacyjny zastosowany w zaproponowanym sterowniku gwarantuje tak dużą odporność na opóźnienia komunikacyjne przy wymianie sygnałów zależnych w praktyce od stanu podsystemów Slave i Master?

- [U7] W nawiązaniu do poprzedniej uwagi: w badaniach symulacyjnych (rozdział 4, definicje (4.1), (4.6), (4.10), (4.14), (4.18)) Autor zakłada składnik interakcji jako jawnie i wyłącznie zależny od czasu zamiast zależny od stanu robota typu Slave. Przy takim założeniu trudno mówić o realistycznej interakcji końcówki robota z otoczeniem, jaka ma miejsce w zadaniach chirurgicznych, gdzie chwilowa siła interakcji *narzędzie – tkanka* nie jest (wyłącznie) jawną funkcją czasu, a jest przede wszystkim funkcją stanu robota Slave (będącego przyczyną interakcji). Być może takie nierealistyczne założenie (w kontekście oryginalnie postulowanej aplikacji chirurgicznej) umożliwia zachowanie stabilności układu zamkniętego pomimo opóźnienia, ponieważ tak generowana składowa 'interakcji' symuluje raczej tylko dotatkowe zewnętrzne zaburzenie niezależne od stanu robota. Zgodnie z komentarzem podanym na stronie 182 w punkcie 4.3.15 zaburzenie to nie podlega estymacji przez obserwator zaburzeń ('DO'). Zatem wnioski formułowane w dysertacji na temat odporności zaproponowanego układu sterowania DTRESS na opóźnienia powinny być istotnie osłabione, nie dotyczą one bowiem zagadnienia faktycznej fizycznej interakcji *narzędzie – tkanka*, która jest typowa w zadaniach zrobotyzowanej chirurgii.
- [U8] Dlaczego w konstrukcji obserwatorów, w ostatnich liniach wzorów (3.40), (3.49), (3.68) i (3.78) nie ma składnika korekcyjnego? (jest użyty tylko składnik predykcyjny wynikający z modelu)
- [U9] We wzorach (3.39) i (3.48) użyto funkcji z daszkami i bez daszków. Dlaczego nie wszystkie elementy modelu są zapisane z daszkami? Czy Autor zakłada pełną znajomość tych elementów modelu, które nie są oznaczone daszkami?
- [U10] Wprowadzane równania sterowników i obserwatorów proponowanych przez Autora są często pozostawione w tekście bez komentarzy wyjaśniających/uzasadniających takie a nie inne struktury równań, co bardzo utrudnia percepcję tych fragmentów rozprawy.
- [U11] Wnioskowanie o istnieniu zerowego punktu równowagi bez podstawienia równań sterownika do równań obiektu sterowania nie jest uzasadnione. Zatem stwierdzenia podane w uwagach 3.4 (str. 66) i 3.6 (str. 73) są dyskusyjne. Nie jest zatem jasne, czy punkty zerowe są punktami równowagi układów zamkniętych rozważanych w rozprawie.
- [U12] Założenia 3.2 i 3.3 podane na stronie 65 są dość silne, choć akceptowalne, lecz powinny być skomentowane i uzasadnione.
- [U13] Przeciwnie do twierdzeń autora funkcje podane we wzorach (3.53), (3.67), (3.77) nie są gładkie; one nie są nawet ciągłe (użyto tam funkcji typu $\text{sign}(\cdot)$).
- [U14] Zastosowanie kryteriów typu IAE oraz ITAE do oceny uchybów w stanie (quasi-)ustalonym nie jest do końca zasadne, jeżeli nie zostało ograniczone tylko do 'końcowego' horyzontu czasowego (tj. po zaniknięciu składowych przejściowych).
- [U15] Akapit dotyczący opisu funkcji nieciągłych w sensie Lipschitza (str. 77-78) jest dyskusyjny. Problem ze stabilnością nie wynika bowiem z użycia tego typu funkcji w sterowniku, tylko z wykorzystania pochođnej takiej funkcji, która argumentu zerowego jest nieograniczona.
- [U16] Poprawność szacowań podanych we wzorach (3.24) i (3.61) nie jest jasna, bo nie podano odniesień do wszystkich koniecznych tutaj wcześniejszych założeń lub wyprowadzeń. Pochodzenie niektórych stałych współczynników tam występujących nie zostało wyjaśnione.
- [U17] Wyznaczone na podstawie parametrów sterownika górne ograniczenia czasów zbieżności (podane na stronie 115) są bardzo konserwatywne (kilka rzędów dłuższe) w porównaniu do faktycznych czasów zbieżności uzyskanych w wynikach symulacyjnych. Jaka zatem jest przydatność tak szacowanych górnych ograniczeń czasów zbieżności w warunkach praktycznych?

- [U18] W dodatkowych wynikach symulacyjnych podanych w dodatku A na rysunkach A3.1-A3.5 można zauważyć powolny ale zauważalny trend wzrostowy uchybów z upływem czasu. Jak można wyjaśnić ten niepokojący trend? Czy wydłużenie czasu symulacji (powyżej 2 sekund) pogłębia ten efekt i w konsekwencji może prowadzić do niestabilności w układzie zamkniętym? Ponadto czym można wytłumaczyć 'zaszumienie' sygnałów z rysunków A3.8 oraz A3.12?
- [U19] Sformułowanie twierdzenia 5.1 na stronie 189 jest nieprecyzyjne, ponieważ powinno dotyczyć punktu równowagi $e=0$. (jeżeli taki istnieje, czego nie wykazano).
- [U20] Realizacja w rozdziale 5 zadania regulacji stałowartościowej przy skokowej zmianie sygnału zadanego nie jest do końca zasadna dla manipulatorów robotów, ponieważ w robotyce manipulacyjnej nawet ruch do punktu jest zasadniczo realizowany wzdłuż trajektorii przegubowej o stosownej klasie ciągłości.
- [U21] W sterowniku (5.11) ponownie zakłada się użycie pochodnych funkcji, które nie są ciągłe w sensie Lipschiza, co jest kontrowersyjne. Jak Autor zaimplementował te pochodne podczas realizacji eksperymentów?
- [U22] Jaka jest przyczyna bardzo dużych (raczej nierealizowalnych w praktyce) pików momentów napędowych widocznych na przebiegach symulacyjnych z rys. 5.8 na stronie 198?
- [U23] Nie wyjaśniono w stosownym miejscu po co wprowadzono sterowniki w propozycjach 5.1 i 5.2 na stronie 191 (czytelnik jest w tym miejscu skonfundowany liczbą kolejnych szczególnych przypadków sterowników wprowadzanych przez Autora; wyjaśniająca uwaga 5.1 podana na stronie 192 pojawia się zdecydowanie za późno); własności sterowników pomocniczych ze strony 191 nie zostały formalnie (tj. matematycznie) przeanalizowane w dysertacji.
- [U24] Format tablic z parametrami podanych na stronach 193-194 oraz 206-207 jest nieczytelny, ponieważ w niektórych przypadkach liczba wartości parametrów nie odpowiada liczbie samych parametrów – jak należy rozumieć zapisy w tych tabelach? Poza tym dlaczego wartości parametrów ρ podane w tabelach 5.2, 5.3 oraz 5.12 i 5.13 są tak małe? Czy składniki sterowania występujące przy tych parametrach mają jeszcze jakiś istotny wpływ na jakość sterowania?
- [U25] Wyniki eksperymentalne podane na stronie 213 ukazują drgania/oscylacje sygnałów napięciowych dla złączy 4, 5 i 6. Z czego te drgania wynikają? Ile wynoszą współczynniki przełożenia przekładni manipulatora ES5 wykorzystanego w eksperymentach?
- [U26] Czy wyraźne piki widoczne na przebiegach momentów sił na rys. 6.9, 6.14, 6.19, 6.24, 6.29, 6.34, 6.39 i 6.44 są akceptowalne w praktyce chirurgicznej? Czy nie generuje to nadmiernych drgań końcówki roboczej, co potencjalnie mogłoby mieć poważny wpływ na bezpieczeństwo operacji?
- [U27] Wybór sposobu przeliczania uchybów z przestrzeni przegubowej do przestrzeni zadaniowej podany we wzorze (6.1) wymaga wyjaśnienia, ponieważ jacobian zasadniczo przekształca prędkości a nie pozycje.
- [U28] Opis eksperymentów w rozdziale 6 jest niepełny - nie podano przyjętych wartości parametrów sterownika oraz nie określono wartości okresu próbkowania sygnałów w zaimplementowanym układzie sterowania. Nie wiadomo, jak (na jakiej podstawie) były generowane sygnały referencyjne dla obiektu typu Slave. Ponownie (podobnie jak w przypadku rozdziału 5) treść rozdziału 6 tylko nawiązuje do rozdziałów 3 i 4, ponieważ nie dotyczy całego systemu DTRESS a jedynie zagadnienia sterowania obiektem typu Slave i to w bardzo ograniczonych warunkach (w stosunku do bardzo ambitnych celów sformułowanych w punkcie 1.2 i dalej rozszerzonych w punkcie 3.5).
- [U29] Zauważone dyskusyjne kwestie terminologiczne: 'manipulator robots' (robot manipulators?); 'gravity vector' (vector of generalized gravitational forces?); 'smooth functions' dla funkcji nieciągłych; 'sample time' (sampling time?).
- [U30] Zauważone inne usterki edycyjne, usterki w notacji matematycznej, błędy i niezręczności językowe oraz nieścisłości w tekście (wybór): Autor nie stosuje zasad interpunkcji do równań wyróżnionych w tekście; '[...] surgery. And [...]' na str. 13; 'journal of IET...' ; 'dynamic' na str. 54; sformułowanie treści lematów 3.3 i 3.4; '[...] respectively. And [...]' na str. 58; 'has been in described' na str. 59; skrót RCM nie jest wyjaśniony na str. 247; przy podawaniu czasów opóźnienia ' ψ ' w rozdziale 4 brakuje jednostek; jednostki sygnałów na wielu wykresach w rozdziale 4 są podane nieprawidłowo (np. 4.5, 4.7, 4.19, 4.28-4.31, 4.41, 4.77, 4.79, 4.93, 4.95, 4.97, 4.99, 4.101, 4.103); górne wartości ograniczeń czasów zbieżności podano na str. 115 bez

jednostek; notacja w rozdziale 4 dla zbioru warunków początkowych i zbioru czasów opóźnienia jest niewłaściwa (powinny być zastosowane nawiasy klamrowe i symbol przynależności do zbioru); definicje zaburzeń we wzorach (4.8)-(4.9) są mało czytelne.

[U31] W wielu pozycjach bibliograficznych podanych na str. 277-293 tytuły czasopism niepoprawnie podano małymi literami (np. [1,2,3,6,9,10,12-19,22,36,40,41,43,...,60,70,71,72,83,...,94,107,109,193,194,227]), w wielu pozycjach brakuje miejsca publikacji (np. [81,105,118,169,187,203,234,239]), w innych brakuje pełnych danych bibliograficznych (np. [126,161,233,267]).

5. Ocena spełnienia warunków wymaganych zapisami Ustawy (zgodnie z zaleceniami sformułowanymi w [RDN:22])

(a) Zgodnie z treścią punktu 1.5 rozprawy Doktorant przedstawił wybrane wyniki własnych badań związane z tematyką dysertacji w siedmiu artykułach opublikowanych w latach 2020-2025 w recenzowanych czasopismach fachowych (w tym w uznanych periodykach z listy JCR) oraz w ramach konferencji MMAR; we wspomnianych publikacjach Doktorant był ich pierwszym współautorem, a jedna z wyżej wspomnianych prac jest w pełni autorską publikacją Doktoranta. Poza jednym czasopismem wskazanym w punkcie 6 na str. 16, wszystkie pozostałe miejsca publikacji wyników zostały dobrze wybrane w kontekście powiązania ich zakresu tematycznego z przedmiotem doktoratu. Należy zatem stwierdzić, że Doktorant wykazał, iż potrafi prowadzić prace badawcze samodzielnie i w ramach zespołu badawczego.

(b) Znaczenie podjętego w rozprawie tematu badawczego jest dobrze widoczne w kontekście przekonującego przeglądu aktualnego stanu wiedzy i stosowanej technologii w obszarze sterowania robotów chirurgicznych, które Autor zaprezentował w rozdziale 2. Przegląd ten nie jest ograniczony wyłącznie do aspektów algorytmiki sterowania czy rodzajów zadań sterowania definiowanych w chirurgii okulistycznej, ale dotyczy także rozwiązań robotycznych, sensorów i elementów wykonawczych oraz protokołów komunikacyjnych stosowanych w systemach robotyki chirurgicznej. Analizy porównawcze podane zbiorczo w rozdziale drugim w tablicach od 2.1 do 2.5 mają swego rodzaju walor poznawczy i umożliwiają czytelnikowi szerszy ogłęd i ocenę aktualnego stanu technologii stosowanej lub testowanej w obszarze robotyki chirurgicznej. W mojej ocenie przegląd podany w rozdziale 2 ukazuje dobrą i uporządkowaną wiedzę Autora w zakresie technologicznych aspektów tematu rozprawy, a także ujawnia jej interdyscyplinarny charakter. Jednak formalna analiza matematyczna przedstawiona przez Autora w rozdziałach 3 i 5 (miejscami kontrowersyjna albo wręcz błędna) tylko częściowo potwierdza wiedzę i umiejętności Doktoranta w zakresie zrozumienia i wykorzystania wybranych twierdzeń i narzędzi analizy stabilności/zbieżności stosowanych w nieliniowej teorii sterowania. Z drugiej strony umiejętność przygotowania złożonego stanowiska doświadczalnego oraz realizacja badań eksperymentalnych na tym stanowisku świadczą o umiejętnościach praktycznych Doktoranta i jego zdolności do prowadzenia badań empirycznych, co w naukach inżyniersko-technicznych jest bardzo istotne.

(c) Tematyka projektowania odpornych układów sterowania dla systemów robotycznych, w tym algorytmów sterowania czasu ustalonego (ang. *fixed-time control*), jest nadal aktualnym obszarem badań w światowej literaturze z zakresu automatyki, a efektywne zastosowania wspomnianych technologii sterowania w robotyce nadal wymagają intensywnych prac badawczych i rozwojowych. Zatem zagadnienie badawcze poruszane w dysertacji dobrze wpisuje się w aktualny trend rozwojowy technologii układów sterowania. Na podstawie celów badawczych sformułowanych przez Doktoranta w punkcie 1.2, a następnie bardziej szczegółowo rozwiniętych w punktach 3.5 i 3.6 rozprawy można stwierdzić, że oryginalne rozwiązanie problemu badawczego (wymaganego zapisami Ustawy) miało wynikać z opracowania i analizy układu sterowania DTRESS (ang. *Delayed Teleoperated Robotic Eye Surgical System*) charakteryzującego się następującymi właściwościami:

- A) odpornością układu zamkniętego na niepewności modelowania podsystemów Master i Slave oraz na obecność pomiarowo niedostępnych zaburzeń zewnętrznych działających w torze sygnałów sterujących (zaburzeń dopasowanych),
- B) wysoką dokładnością regulacji w przestrzeni operacyjnej (doprecyzowaną na stronie 274 jako submilimetrowa, co ma uzasadnienie aplikacjami w chirurgii oka) oraz szybką zbieżnością uchybów w układzie zamkniętym w zadaniu śledzenia trajektorii wyrażaną wystarczająco krótkimi czasami ustalania,
- C) brakiem drgań sygnałów sterujących,

- D) odpornością układu na brak dostępności pomiarowej wszystkich zmiennych stanu,
- E) odpornością na obecność opóźnień podczas wymiany danych w czasie rzeczywistym poprzez tor komunikacyjny pomiędzy podsystemami Master i Slave,
- F) bezpieczną pracą zapewniającą ograniczenie wartości siły oddziaływania efektora robota typu Slave podczas wchodzenia w kontakt z operowanymi tkankami w przestrzeni operacyjnej robota.

Tak postawiony problem badawczy jest bardzo ambitny, dotyczy aplikacji krytycznej ze względu na bezpieczeństwo i tym samym jest bardzo trudny w skutecznej realizacji w ramach jednej dysertacji. W mojej ocenie Doktorant niestety nie zdołał przekonująco wykazać w rozprawie realizacji powyższego celu choćby w dostatecznym zakresie. Główne zarzuty podsumowujące w tym kontekście uwagi krytyczne podane w punkcie 3 recenzji są następujące:

- Z1. Wszystkie zaproponowane przez Doktoranta sterowniki (będące przedmiotem twierdzeń 3.1, 3.2 i 5.1) zawierają składniki wymagające pochodnych po czasie funkcji, które albo nie są ciągłe w sensie Lipschitza w zerze albo są nieciągłymi funkcjami typu *sign(.)* i tym samym potencjalnie mogą prowadzić do osobliwości algorytmów sterowania przy osiąganiu zerowych argumentów tych funkcji (tutaj: zerowych uchybów lub zerowych prędkości). Takie podejście nie jest zgodne ze sztuką projektowania algorytmów sterowania, ponieważ nie wiadomo jak zachowa się dynamika układu zamkniętego przy zbliżaniu się do osobliwości (lub w samej osobliwości) i czy można zagwarantować stabilność oraz bezpieczeństwo funkcjonalne układu w takich przypadkach. Jest to tym bardziej problematyczne w przypadku stosowania takiego układu sterowania do realizacji zadań krytycznych ze względu na bezpieczeństwo, a takie zadanie Doktorant rozważa w rozprawie. Próba obejścia tego problemu poprzez analizę tylko zbieżności uchybów do otoczenia epsilon nie rozwiązuje problemu, ponieważ algorytm sterowania po wejściu w to otoczenie nie został zmodyfikowany i niebezpieczeństwo wejścia w osobliwość nadal istnieje. Ponadto analizy dowodowe twierdzeń 3.1, 3.2 i 5.1 zawierają podobne błędy logiczne (zbieżność jednego uchybu do otoczenia epsilon nie musi implikować zbieżności innych uchybów do tego samego otoczenia), które czynią uzyskane wnioski z tych analiz niewiarygodnymi. Pojawia się też pytanie o fizyczną realizowalność sygnałów sterujących w otoczeniu potencjalnej osobliwości i w niej samej. W mojej ocenie nie można tutaj stwierdzić, że zaproponowane sterowniki gwarantują stabilność, bezpieczeństwo i wystarczającą precyzję regulacji w całej dziedzinie uchybów i prędkości ruchu, a w szczególności w dowolnie bliskim otoczeniu zera i w samym zerze. Poza tym przebiegi niektórych uchybów podanych w rozdziale 4 uzyskane w ramach badań symulacyjnych wykazują niepokojące wzbudzone oscylacje (por. np. rys. 4.57, 4.58, 4.59, 4.61, 4.63); podobnie przebiegi uchybów podanych na stronach 316-318, uzyskanych dla pierwszego scenariusza symulacyjnego, mogą budzić wątpliwości co do dalszej stabilnej ich ewolucji w przypadku dłuższego horyzontu czasu trwania symulacji.
- Z2. Stwierdzenie postulowanej odporności układu sterowania DTRESS na stałe (i w domyśle dowolnie długie, bo nieograniczone wprost przez Autora) opóźnienie komunikacyjne przy wymianie danych związanych z siłami interakcji *efektor-tkanka* między podsystemami Master i Slave w systemie DTRESS budzi poważne wątpliwości, ponieważ nie podano jaki konkretny mechanizm stabilizacyjny miałby tę odporność zapewniać. Co więcej, w badaniach symulacyjnych Doktorant przyjmuje, że sygnały podlegające opóźnieniu są tylko zależne od czasu, a nie od stanu podsystemu Slave, co nie jest zgodne z faktycznym zjawiskiem fizycznej interakcji *efektor-tkanka*. W mojej ocenie Doktorant w ten sposób sprowadza zagadnienie odporności na opóźnienia komunikacyjne obecne w sygnałach zależnych od stanu do prostszego zagadnienia odporności na dodatkowe zakłócenia zewnętrzne działające w torze sterowania podsystemów Slave i Master. Takie założenie nie jest zatem poprawne w przypadku modelowania rzeczywistych efektów związanych z opóźnieniami komunikacyjnymi występujących w systemach teleoperowanych, gdzie dynamiczne sprzęganie się obu podsystemów (Master i Slave) zachodzi poprzez sygnały zależne od stanu, a nie tylko od czasu, co krytycznie wpływa na stabilność całego układu teleoperacyjnego. Wspomniany wyżej koncepcyjny błąd w modelowaniu uniemożliwia stwierdzenie, że zaproponowane układy sterowania są odporne na opóźnienia komunikacyjne występujące podczas zadania teleoperacji i tym samym nie można stwierdzić, że gwarantują bezpieczeństwo oraz wysoką precyzję działania w takich warunkach pracy. Co więcej, przedstawione wyniki numeryczne w ogóle nie

ilustrują skuteczności ograniczania siły interakcji *efektor-tkanka*, co jest postulowanym w rozprawie warunkiem zachowania bezpieczeństwa systemu DTRESS.

- Z3. Badania eksperymentalne wykonane przez Doktoranta nie potwierdziły w sposób przekonujący w zasadzie żadnych istotnych cech jakościowych wymaganych przez założone cele badawcze, tj. oczekiwanych cech systemu DTRESS w kontekście zastosowań do zrobotyzowanych operacji chirurgicznych. Po pierwsze wyniki porównawcze z rozdziału 5 nie prezentują wyraźnego polepszenia jakości regulacji podsystemu Slave w stosunku do tej uzyskiwanej dla alternatywnych sterowników (czasami zaprezentowane wyniki są bardzo podobne, a w pewnych przypadkach nawet gorsze dla sterowników czasu ustalonego – por. np. wykresy na rysunkach 5.15, 5.17, 5.25, oraz wartości liczbowe w tablicach 5.23, 5.29). Ponadto ilościowa analiza porównawcza nie jest do końca miarodajna, ponieważ poprawie jakości śledzenia towarzyszą zwykle większe koszty sterowania i tym samym nie wiadomo czy uzyskana poprawa regulacji wynika faktycznie z lepszej strategii sterowania czy też tylko z tendencyjnego doboru nastaw poszczególnych sterowników (nie zastosowano tu po prostu miarodajnej metodyki porównawczej). Trudno zatem na podstawie tych wyników wyciągnąć jednoznaczne wnioski świadczące na korzyść proponowanych algorytmów sterowania. Poza tym wyniki jakości śledzenia trajektorii przedstawione w punkcie 6.7 wskazują, że dla wszystkich analizowanych scenariuszy sterowania uzyskiwana precyzja śledzenia w przestrzeni operacyjnej jest wyraźnie gorsza niż spodziewana submilimetrowa, a w przebiegach sygnałów sterujących (tj. momentów napędowych) można zauważyć niepokojące liczne piki niewiadomego pochodzenia, czasem osiągające nawet kilkadziesiąt Nm. Trudno zatem stwierdzić, że uzyskane wyniki doświadczalne potwierdzają osiągnięcie celów związanych z wysoką precyzją regulacji i *gładkością* sygnałów sterujących wymaganymi w zastosowaniach zrobotyzowanej chirurgii okulistycznej.
- Z4. Przeprowadzone badania eksperymentalne nie umożliwiły sprawdzenia pracy najważniejszych funkcjonalności układu DTRESS ani w trybie teleoperacji, ani w trybie ograniczania siły interakcji efektora z fizycznym modelem oka, ani z wykorzystaniem obserwatorów stanu robota typu Slave. Wydaje się, że część z tych eksperymentów mogła być wykonana na dostępnym stanowisku doświadczalnym pomimo pewnych ograniczeń sprzętowych przywoływanych przez Doktoranta w treści rozprawy. Zatem znaczenie przedstawionych w rozdziale 6 wyników doświadczalnych w kontekście oczekiwanej walidacji kluczowej funkcjonalności i jakości działania zaproponowanego układu sterowania DTRESS jest wręcz pomijalne.
- Z5. Sposób prezentacji oryginalnych treści autorskich jest w wielu miejscach rozprawy bardzo niejasny, podany z wieloma skrótami myślowymi, z naruszeniem właściwej logiki wyводу i bez należytej dbałości o szczegóły matematyczne, tak istotne w tego rodzaju badaniach. Ponadto Autor dysertacji niestety nie stosuje (przynajmniej w przypadku kilku ważnych komentarzy i wniosków sformułowanych w rozprawie) zasady racjonalnego uznawania przekonań, której stosowanie jest kluczowe dla zapewnienia wiarygodności badań naukowych. Przykładowo w drugim zdaniu w punkcie 5.6.1 Autor przesadnie gloryfikuje jakość regulacji uzyskaną dla zaproponowanego sterownika pomimo niejednoznacznych wyników. Podobnie jest w pierwszym zdaniu punktu 5.7.2, w pierwszym zdaniu na stronie 233 oraz w kilku sformułowaniach obecnych w punkcie 5.7.6 na stronach 245-246. Wyjątkowo rażącym w mojej ocenie przykładem naruszenia zasady racjonalnego uznawania przekonań są stwierdzenia o uzyskaniu submilimetrowej dokładności śledzenia w przestrzeni operacyjnej sformułowane w punktach 6.8 i 6.9, mimo iż zaprezentowane wcześniej wyniki wyraźnie temu przeczą (kresy górne bezwzględnych wartości składowych uchybu pozycji wyraźnie przekraczają poziom milimetra). Formułowanie tego typu nieuzasadnionych stwierdzeń/wniosków jest niedopuszczalne w opracowaniach naukowych, ponieważ prowadzi do dewastacji wiarygodności badań naukowych.

[RDN:22] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik, Rada Doskonałości Naukowej, 2022.

6. Podsumowanie i konkluzja końcowa

Recenzowana rozprawa doktorska porusza ważne i nadal aktualne zagadnienie projektowania odpornych układów sterowania dla złożonych, dynamicznie sprzężonych, systemów nieliniowych pracujących w obecności

niepewności modelowania, deficytu informacji pomiarowej, oddziaływania zaburzeń zewnętrznych oraz w obecności znaczących opóźnień czasowych w torze interakcji dynamicznych. W rozważanym przypadku zagadnienie to pojawia się w kontekście próby opracowania, analizy i weryfikacji kompletnego systemu sterowania DTRESS dla zastosowań w obszarze zrobotyzowanej teleoperowanej chirurgii okulistycznej, co narzuca dodatkowe wysokie wymagania związane z koniecznością uzyskania gwarancji bezpieczeństwa i wystarczającej precyzji działania takiego systemu. W ramach recenzowanej rozprawy Doktorant podjął się rozwiązania tak ambitnego zagadnienia, lecz pomimo częściowo zasadnych, a w pewnym zakresie nawet obiecujących, prób nie podołał realizacji tak wysoko postawionych celów. W mojej ocenie zakres badań został tutaj od samego początku sformułowany zbyt szeroko i zbyt ambitnie, co poskutkowało potraktowaniem wielu kluczowych elementów zaproponowanej koncepcji rozwiązania w sposób niedokładny, niepełny lub błędny. W efekcie część zaprezentowanych wyników jest kontrowersyjna, niepoprawna lub nieskończona i tym samym nie pozwala na stwierdzenie osiągnięcia założonych celów badawczych, choćby częściowo ale w sposób zadowalający. Pomimo pewnych mocnych stron rozprawy (wynikających głównie z podjęcia aktualnego i nietrywialnego problemu badawczego oraz z przyjęcia słusznej trójetapowej metodyki badawczej *teoria-symulacja-eksperyment*), istotne zaniedbania i uchybienia popełnione przy prezentacji, analizie formalnej i nierzetelnej ocenie uzyskanych wyników, kontrowersyjne podejście projektowe zastosowane w rozdziałach 3 i 5, mało znaczące wyniki przedstawionej walidacji doświadczalnej, a także popełnione błędy koncepcyjne podczas realizacji badań nie pozwalają na sformułowanie pozytywnej konkluzji końcowej dopuszczającej rozprawę do publicznej obrony. Wobec istotnych zarzutów sformułowanych z punkcie 5 niniejszej recenzji i wobec faktu, że ocenie podlega tu skorygowana wersja rozprawy (tj. po uprzednio wnioskowanych poprawkach), należy stwierdzić, że zawartość przedłożonej rozprawy doktorskiej niestety nie spełnia standardów jakości badań naukowych w stopniu oczekiwanym na etapie doktorskim, w tym nie wypełnia w zadowalającym stopniu warunku ustawowego dotyczącego oryginalnego rozwiązania postawionego problemu badawczego. Po rozważeniu wszystkich argumentów, zarówno tych o charakterze pozytywnym jak i tych krytycznych, moja końcowa ocena dysertacji jest negatywna.



prof. dr hab. inż. Maciej Marcin Michałek