

**Instytut Automatyki i Robotyki**  
**Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki**  
**Politechnika Poznańska**

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgra inż. Ali Soltani Sharif Abadi

*pt. Design of a novel control system to solve robotic eye surgery challenges*

Recenzja została przygotowana na podstawie Uchwały nr 723/II/2024 r. Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 19 marca 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 czasowych 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, a także na zdolność do tłumienia wpływu zaburzeń zewnętrznych i praktyczną implementowalność sygnałów sterujących. Bez wątplenia 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 praktycznym zagadnieniem o istotnym znaczeniu społecznym.

Zasadniczym celem rozprawy jest projekt, analiza formalna oraz weryfikacja numeryczna oraz 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 typu Phantom Omni) 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 stabilności zerowego punktu równowagi dynamiki uchybu uzyskanego po zastosowaniu algorytmu w wersji (III). W kolejnym etapie jakość pracy układu sterowania została numerycznie zweryfikowana w środowisku Matlab-Simulink; przeprowadzono także weryfikację algorytmu sterowania w trybie czasu rzeczywistego, w ramach której reakcje obiektu sterowania 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 na stanowisku laboratoryjnym składającym się z manipulatora ES5 Easy Robot o strukturze stawowej, sterownika pracującego w systemie ROS (ang. Robot Operating System), panelu sterującego, joysticka typu Phantom Omni oraz dwóch rodzajów fizycznych modeli oka ludzkiego spełniających rolę obiektu operacyjnego umieszczonego w przestrzeni zadaniowej robota. Treść recenzowanej pracy doktorskiej zawiera 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), co niewątpliwie należy do silnych stron rozprawy.

## 2. Kompozycja i redakcja rozprawy

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim i liczy 192 strony numerowane; 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 trzema krótkimi dodatkami (dwoma 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 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 kolejnych rozdziałach 5-6 przedstawiono wyniki 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 w kierunku rozwoju opracowanego systemu. Treści rozdziałów 2-6 poprzedzono ich streszczeniami i zakończono krótkimi podsumowaniami.

Zasadniczo rozprawa została przygotowana względnie poprawnie pod względem edycyjnym. Autor poza opisem matematycznym zaproponowanego układu sterowania zamieścił także opisy wykorzystanych stanowisk laboratoryjnych, opisy warunków prowadzenia testów weryfikacyjnych, podał wyniki testów w postaci licznych wykresów oraz tabel zawierających wybrane wyniki ilościowe. Jednak pewne fragmenty dysertacji są niejasne lub zaprezentowane zbyt lakonicznie, bez wymaganych szczegółów i bez oczekiwanej formalnej ścisłości strony matematycznej. Treść rozdziału 5 nawiązuje do tematyki rozdziałów 3 i 4, ale sprawia wrażenie odrębnej części poświęconej nie całemu systemowi DTRESS, a przede wszystkim sterowaniu obiektem typu Slave (z oddzielną listą wymieniającą składniki wkładu twórczego podaną na stronie 99). W treści pracy wiele wartości liczbowych lub wykresów sygnałów podawana jest bez jednostek fizycznych, można zauważyć usterki w numeracji rysunków, w wielu miejscach dane bibliograficzne są podane w sposób niespójny lub niepełny i z usterkami językowymi. Ponadto cały tekst rozprawy zawiera wiele niezręczności i błędów językowych oraz niejasnych lub nieprecyzyjnych sformułowań (w tym sformułowań kolokwialnych), a także usterki typograficzne (także we wzorach matematycznych). Szczegółowe uwagi krytyczne dotyczące strony edycyjnej oraz jakości prezentacji treści rozprawy podano w punkcie 4 niniejszej recenzji.

Cytowana w pracy liczna bibliografia składa się z 253 pozycji i zasadniczo została dobrana w przekonujący sposób. Zawiera ona 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 medycznym 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. Około 18% (tj. 46 na 253) pozycji bibliografii odnosi się do najnowszych prac opublikowanych w latach 2020-2023. Jednak w kontekście zagadnienia projektowania odpornych układów sterowania (punkt 3.2 na str. 48-51) zdecydowanie brakuje cytowań ważnych prac dotyczących takich metod jak *robust output feedback control* oraz *Active Disturbance Rejection Control (ADRC)*, w tym prac takich znanych autorów jak prof. Hassan Khalil i prof. Alberto Isidori ze współautorami czy prof. Zhiqiang Gao ze współautorami. Ponadto w zakresie sterowania odpornego (w tym sterowania ślizgowego) opublikowano także wiele prac polskich autorów, z których tylko jedną udało się znaleźć w zestawieniu literatury podanym w dysertacji. Szkoda, że polski

wątek publikacyjny nie znalazł należnego mu szerszego miejsca w zbiorze literatury cytowanej przez Doktoranta. Brakuje też cytowania klasycznych dziś podręczników w zakresie modelowania i sterowania manipulatorów robotów, jak książki profesorów Siciliano, Sponga, Craiga i współautorów.

### 3. Ocena zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

Problem badawczy i cele badawcze sformułowane przez Doktoranta w rozdziale 1 są zasadne i dobrze wpisują się w aktualne trendy badawcze, zarówno z kontekście problematyki sterowania odpornego jak i w kontekście zastosowania tej metodyki sterowania w robotyce medycznej. Jednak niektóre stwierdzenia podane w punkcie 1.2 dotyczące oczekiwanej jakości sterowania, a w szczególności dokładności, gładkości i bezpieczeństwa minimalizującego ryzyko operacyjne, są nieścisłe i tym samym trudne do wykazania w treści pracy. Nie jest bowiem podane czy sub-milimetrowa dokładność dotyczy przestrzeni operacyjnej robota chirurgicznego (można się domyślić, że tak), a jeżeli tak to takiej analizy w pracy nie podano (zilustrowano tylko dokładność w przestrzeni konfiguracyjnej). Poza tym zarówno wspomniany stopień gładkości jak i kryterium bezpieczeństwa nie zostały ściśle zdefiniowane ani przeanalizowane wprost w treści kolejnych rozdziałów. Zdecydowanie lepiej byłoby w punkcie 1.3 ograniczyć wymagania do konkretnych, ściśle zdefiniowanych cech projektowanego systemu sterowania, które mogłyby być sprawdzone i wykazane w dalszej części rozprawy.

Wykorzystanie metodyki trybów ślizgowych z gwarancją zbieżności w czasie ustalonym (ang. fixed-time convergence) zostały trafnie wybrane w celu uzyskania odporności na błędy modelowania oraz zaburzenia zewnętrzne pojawiające się w torze sygnału sterującego (są to tzw. zaburzenia dopasowane). Uzyskanie zbieżności w czasie ustalonym (zarówno dla fazy osiągnięcia powierzchni ślizgowej jak i samej fazy ślizgu wzdłuż powierzchni) skutkuje generalnie istotnym zmniejszeniem wrażliwości układu zamkniętego na niepewności modelowania oraz warunki początkowe (jednak tylko lokalnie, w pewnym otoczeniu uchybu zerowego, z powodu fizycznie ograniczonych sygnałów sterujących robota). Lapunowskie techniki analizy stabilności i szacowania czasów zbieżności zostały zasadnie dobrane ze znanej literatury oraz właściwie wykorzystane w rozdziałach 3 i 5. Numeryczna weryfikacja zaprojektowanych algorytmów sterowania oraz częściowa ich walidacja eksperymentalna wpisują się w szeroko przyjęty schemat tzw. 'złotej triady' metodyki prowadzenia badań w obszarze automatyki i technologii sterowania. W szczególności na uwagę zasługuje realizacja testów z wykorzystaniem laboratoryjnego stanowiska z manipulatorem ES5, która wymagała od Doktoranta stosownych umiejętności informatycznych i doświadczenia inżynierskiego.

Analizując zawartość rozdziałów 3-6 nasuwają się jednak istotne uwagi krytyczne i pytania. Dotyczą one nieprecyzyjnego zdefiniowania przedmiotowego problemu sterowania, w tym niejasnego pochodzenia oraz interpretacji trajektorii referencyjnej wprowadzonej dla obiektu typu Master, a także prawdopodobnie przesadnie optymistycznego sformułowania twierdzenia 3.1 w kontekście uzyskiwanego zakresu odporności układu sterowania DTRESS oraz gwarancji braku drgań sterowania i globalnego (w domyśle) wyniku sterowania w czasie ustalonym (jest to dyskusyjne w obliczu fizycznych ograniczeń sygnałów sterujących występujących w każdym rzeczywistym obiekcie sterowania). Ponadto prawo sterowania DTRESS podane w rozdziale 3 (a także jego zmodyfikowana wersja dla podsystemu Slave z rozdziału 5) zawierają pochodne funkcji, które nie są ciągłe w sensie Lipschitza w zerze, co skutkuje nieograniczonymi wartościami tych pochodnych i tym samym brakiem możliwości ich realizacji w praktyce (pomimo stwierdzenia Autora zawartego w punkcie 3.7 na stronie 72). Weryfikacja symulacyjna przeprowadzona w rozdziałach 4 i 5 została wykonana ze stałym okresem próbkowania, co nie do końca umożliwia ocenę uzyskanej jakości sterowania w przypadku sterownika DTRESS zaprojektowanego w dziedzinie czasu ciągłego. Jest to szczególnie istotne wobec powyższych zarzutów dotyczących nieograniczonych pochodnych niektórych sygnałów wchodzących w skład reguły sterowania. Ilościowa analiza porównawcza podana na stronach 114 i 126 jest niepełna i tym samym nie do końca zgodna ze sztuką, ponieważ w przypadku porównywania różnych układów sterowania (szczególnie nieliniowych) należy także pokazać koszt sterowania, z jakim prezentowana jakość regulacji została uzyskana. W przeciwnym wypadku takie niepełne porównanie może być mylące. Wyniki wszystkich testów symulacyjnych i doświadczalnych zostały zilustrowane wyłącznie w przestrzeni konfiguracyjnej, a w przypadku zastosowań chirurgicznych kluczowa jest ostateczna dokładność uzyskiwana w przestrzeni zadaniowej. Nie jest zatem jasne czy sub-milimetrowa dokładność postulowana w celach

rozprawy została osiągnięta w zaproponowanym układzie sterowania czy też nie (czyli czy wykazano spełnienie założeń realizacji zadania badawczego postawionego w rozprawie). Ponadto w wielu miejscach albo brakuje komentarzy przy okazji prezentacji wyników, albo treść komentarzy sformułowanych przez Autora jest dyskusyjna lub nieprecyzyjna, niepoparta w przekonujący sposób wynikami zawartymi w rozprawie, zbyt ogólnikowa i przesadnie optymistyczna, co nie jest zgodne z zasadą racjonalnego uznawania przekonania<sup>1</sup>, której stosowanie obowiązuje we współczesnej działalności naukowej. Wszystkie powyższe zastrzeżenia sprawiają, że po lekturze rozprawy nie jest oczywiste dla czytelnika czy cele badawcze postawione przez Doktoranta na początku rozprawy zostały osiągnięte, a jeżeli tak to w jakim sensie i w jakim zakresie. Wspomniane wyżej kwestie krytyczne wymagają precyzyjnego wyjaśnienia w formie pisemnej na podstawie szczegółowych uwag i pytań sformułowanych w punkcie 4 niniejszej recenzji.

#### 4. Szczegółowe uwagi krytyczne i pytania

- [U1] W rozprawie nie podano ścisłej definicji zadania sterowania, które Doktorant starał się rozwiązać; sformułowano za to bardzo nieprecyzyjnie pożądane cechy sterowania stosując takie określenia jak: smooth, proper, accurate, fast. Zadanie sterowania, wraz z głównymi założeniami dotyczącymi np. zakresu znajomości modelu obiektu sterowania, nałożonych ograniczeń na amplitudy i zmienność sygnałów sterujących, miarę gładkości sterowania, działanie siły interakcji tylko w osi 'z' układu narzędzia robota itp., powinno zostać sformułowane na początku rozdziału 3 z użyciem języka matematyki, aby w sposób ścisły określić założenia i oczekiwania projektowe, a w dalszym etapie umożliwić jednoznaczną weryfikację zaproponowanego rozwiązania postawionego zadania sterowania na podstawie twierdzeń podanych w rozdziałach 3 i 5 oraz na podstawie uzyskanych wyników. Proszę o takie ścisłe zdefiniowanie zadania (zadań) sterowania. Jak konkretnie należy rozumieć 'bezpieczeństwo' zaproponowanego układu sterowania (wspomniane w punkcie 1.2 na str. 11) w kontekście narzuconej przez Autora jakości sterowania?
- [U2] Autor zakłada w punkcie 3.4 ograniczenie obiektu typu Master i obiektu typu Slave do trzech stopni swobody, co oznacza, że orientacja narzędzia chirurgicznego nie może być swobodnie zmieniana w przestrzeni roboczej manipulatora chirurgicznego. Jest to istotne założenie, które powinno zostać uzasadnione, ponieważ tylko osiowo symetryczne narzędzia chirurgiczne będą dopuszczalne w takim układzie. Czy takie założenie jest akceptowalne w praktyce chirurgii okulistycznej?
- [U3] Nie jest jasne w jakim celu obiekt Master musi śledzić trajektorię referencyjną, skoro jest to element będący zadajnikiem trajektorii dla obiektu typu Slave – czytelnik spodziewa się, że trajektoria obiektu Master oraz zadana siła nacisku  $F_z$  będą generowane na bieżąco przez operatora-chirurga. Schemat blokowy z rys. 3.4 na stronie 71 także nie wyjaśnia tej sprawy.
- [U4] Czy przesył wartości siły  $F_{eye}$  na stronę Mastera i jej uwzględnienie w równaniu (3.10) ma na celu uzyskanie haptycznego sprzężenia zwrotnego dla operatora-chirurga? Ta kwestia nie została wyjaśniona.
- [U5] Wydaje się, że obecność opóźnienia czasowego w systemach teleoperacyjnych przy dwukierunkowym przesyśle danych między obiektami Master i Slave może doprowadzić do destabilizacji układu zamkniętego, jeżeli wartość tego opóźnienia będzie zbyt duża. Z treści twierdzenia 3.1 wynika, że układ zamknięty zachowuje stabilność i inne pożądane cechy jakościowe niezależnie od wartości tego opóźnienia, co wydaje się nierealistyczne i tym samym dyskusyjne. Czy np. przy skrajnie długim opóźnieniu równym 5 minut twierdzenie 3.1 jest nadal w mocy? Czy twierdzenie 3.1 zakłada obecność opóźnienia przy przesyśle dwukierunkowym danych w torze Master-Slave i Slave-Master? Jeżeli tak, to jaki konkretny mechanizm stabilizacyjny zastosowany w zaproponowanym sterowniku gwarantuje tak dużą odporność na opóźnienia komunikacyjne?
- [U6] W regule sterowania (3.45), a także w równaniach (5.11), (5.24) i (5.28), wymagane jest wyznaczenie pochodnej po czasie z elementu 'A(.)', który przy jego zdefiniowaniu z wykładnikiem ułamkowym nie jest w zerze funkcją ciągłą w sensie Lipschitza. Zatem taka pochodna jest nieograniczona, gdy argument tej funkcji jest równy zero. Jak zatem w praktyce (ale także i w symulacji) zrealizować ten składnik sterowania w otoczeniu zerowego uchybu? Jeżeli przyjmiemy, że będziemy realizować tylko skończoną aproksymację tego

1 Rozumianej następująco: *stopień przekonania, z którym jest formułowany wniosek/osqd nie powinien przekraczać stopnia jego uzasadnienia.*

typu składników, to jak to wpłynie na zasadność twierdzenia 3.1? Poza tym wymaganie użycia pochodnych nieskończonych nie jest zgodne z ogólnie przyjętą zasadą projektowania algorytmów sterowania. Czy zatem można przyjąć, że twierdzenia 3.1 i 5.1 są prawdziwe, jeżeli ich spełnienie wymaga takich nieograniczonych pochodnych? Ta kwestia jest w mojej ocenie bardzo kontrowersyjna. Podobny problem występuje w przypadku różniczkowania nieciągłej w zerze funkcji  $H_{2j-1}(\cdot)$  w regule (3.55) oraz we wzorze (3.75). Jak to należy zaimplementować i jakie są tego konsekwencje praktyczne? Użycie stałego okresu próbkowania przy implementacji sterownika (zarówno w ramach eksperymentów jak i podczas symulacji) może powodować, że niektóre niepożądane efekty zostaną niejako 'ukryte' (tj. nie ujawnią się tak, jak miałyby to miejsce w przypadku realizacji sterowania w dziedzinie czasu ciągłego), ale formalnie problem pozostaje (problem ten będzie się prawdopodobnie coraz intensywniej ujawniał przy zmniejszaniu stałego okresu próbkowania, także w praktycznych zastosowaniach).

- [U7] We wzorach (3.38), (3.47), (3.67) i (3.77) należy użyć pochodnych po czasie składników typu 'Z(.)'. Patrząc na definicje tych składników we wzorach (3.40), (3.57), (3.69) wydaje się, że wymagają one znajomości lub wyznaczenia pochodnych estymat zmiennych stanu, nieliniowych funkcji modelu obiektu oraz pochodnej samego sygnału sterującego, co wydaje się bardzo karkołomne i może prowadzić do bardzo dużej wrażliwości na potencjalne zakłócenia pomiarowe obecne w sprzężeniu zwrotnym. Poza tym np. funkcje (3.70) są jawnie nieciągłe (składniki typu 'sign(.)') i tym samym ich pochodne są nieograniczone w zerze. W mojej ocenie jest to kolejna bardzo słaba strona zaproponowanego układu sterowania. Jak Autor liczył te pochodne i czy nie zauważył problemów z dużą wrażliwością na zakłócenia pomiarowe? Czy zatem twierdzenie 3.1 jest zasadnie sformułowane w obliczu obecności takich nieciągłych składników, których pochodne są wymagane w algorytmie sterowania? W tym kontekście trudno się zgodzić ze stwierdzeniem podanym na stronie 72 o implementowalności sygnałów sterujących i gwarancjach 'gładkości śledzenia' w zaproponowanym układzie sterowania.
- [U8] W definicjach (3.42), (3.52) i (3.72) występują składniki, które po wymaganym zróżniczkowaniu po czasie będą miały interpretację przyspieszeń. Taka sytuacja może być bardzo ograniczająca w praktycznych zastosowaniach, ponieważ pomiar lub rekonstrukcja przyspieszeń jest bardzo wrażliwa numerycznie na potencjalne wysokoczęstotliwościowe składowe szumowe (zakłócenia) obecne w sygnałach rzeczywistych. Jak Autor zaimplementował te składniki w układzie sterowania?
- [U9] Niektóre składniki sterowania wymagają całkowania numerycznego wykonywanego w czasie rzeczywistym. Czy te operacje całkowania muszą być wykonywane ze zmiennym krokiem i czy muszą być wykonywane bardzo precyzyjnie? Jak Autor zrealizował te operacje całkowania w przypadku badań eksperymentalnych? Jaka jest wrażliwość metody sterowania na dokładność procesu całkowania?
- [U10] Doktorant na podstawie wykresów sygnałów z rozdziałów 4, 5 i 6 zasadniczo wnioskuje, że jakość śledzenia sygnałów referencyjnych z wykorzystaniem zaproponowanych algorytmów sterowania jest 'dokładna' (str. 96), 'doskonała' (str. 97), 'wysoko dokładna' (str. 126 i 127) lub 'bardzo dokładna' (str. 151). Takie określenia nie są ani precyzyjne, ani naukowo informatywne i mają charakter subiektywny. Aby obiektywnie ocenić jakość śledzenia należałoby przedstawić wykresy bezwzględnych wartości uchybów w skali logarytmicznej. Wtedy dopiero można byłoby wykazać wartość błędu końcowego oraz charakter zbieżności uchybów, a także odczytać skończoną wartość czasu zbieżności. Niestety prezentacja wyników w tym zakresie jest mało czytelna, ponieważ tylko w rozdziale 5 pokazano wykresy uchybów i tylko w relatywnie dużej skali liniowej. Dodatkowo przy zastosowaniu dość grubych linii na wykresach, precyzyjna ocena jakości śledzenia nie jest możliwa. Ponadto, aby zilustrować zbieżność typu 'fixed-time' należałoby przedstawić cały zbiór wyników zbieżności dla różnych warunków początkowych, a nie tylko dla jednego wybranego przypadku. W konsekwencji trzeba stwierdzić, że wnioski Autora w tym kontekście nie są przekonująco poparte stosownymi wynikami. Podobnie silne stwierdzenia podane na stronie 127 na temat cech zaproponowanego sterownika wydają się częściowo nadmiernie optymistyczne, ponieważ nie mają wystarczającego potwierdzenia w przedstawionych wynikach.
- [U11] Dlaczego w konstrukcji obserwatorów, w ostatnich liniach wzorów (3.46), (3.66) i (3.76) nie ma składnika korekcyjnego (jest zatem użyty tylko składnik predykcyjny wynikający z modelu)?

- [U12] We wzorach (3.41) i (3.70) użyto funkcji modelu z daszkami i bez daszków. Jak należy rozumieć te elementy z daszkami i jak są one obliczane? Dlaczego nie wszystkie elementy modelu są zapisane z daszkami? Czy Autor zakłada pełną znajomość tych elementów modelu, które nie są oznaczone daszkami?
- [U13] Autor zakłada linearyzację sprzężeniem zwrotnym modelu obiektu we wzorze (5.11) poprzez składnik  $-f_i$  (ale także wcześniej we wzorach (3.45) i (3.65)), aby uzyskać redukcję modelu. Czy w tym celu zakłada się dokładną znajomość modelu robota we wzorze (5.11)? To nie jest wyjaśnione.
- [U14] Model interakcji układu 'narzędzie robota - powierzchnia oka' (podane we wzorze (3.16)) nie jest zgodne z dwumasowym modelem fizycznym zaznaczonym na rys. 3.3 na stronie 56. Jak zatem należy odnieść model (3.16) do rysunku 3.3?
- [U15] W rozdziale 4 przyjęto modele ruchu oka (4.1) i (4.5) jako jawnie zależne od czasu, ale niezależne od fizycznej interakcji między okiem a narzędziem chirurgicznym. To jest duże uproszczenie i wydaje się ono mało realistyczne. Jak można obronić tak przyjęte modele ruchu oka?
- [U16] Przyjęcie modelu drgań rąk operatora-chirurga w postaci gładkich sygnałów sinusoidalnych (str. 74 i 76) wydaje się kontrowersyjne i raczej nierealistyczne. Na jakiej podstawie Autor przyjął taki model? Czy to jest poparte wynikami modelowania tego typu zjawiska znanymi z literatury lub z własnych doświadczeń Doktoranta?
- [U17] Nie jest do końca jasne, jaki jest zysk poznawczy z prezentacji wyników podanych w punkcie 4.5 w stosunku do wyników symulacji przedstawionych w punkcie 4.4. Czy tory analogowe modułu NovaCor były wykorzystywane przy emulacji RT w punkcie 4.5? Proszę wyjaśnić pochodzenie składowych 'szumowych' (tj. wysokoczęstotliwościowych) zauważalnych na wykresach momentów sił na stronach 92 i 95.
- [U18] Sformułowanie twierdzenia 5.1 na stronie 103 jest nieprecyzyjne, ponieważ powinno dotyczyć punktu równowagi  $e=0$ . Czy sprawdzono, że  $e=0$  jest (jedynym?) punktem równowagi dynamiki układu zamkniętego? W dowodzie twierdzenia 5.1 nie ma analizy świadczącej o braku drgań sterowania (ang. chattering) postulowanym w treści tego twierdzenia. Na jakiej podstawie zatem Autor twierdzi, że proponowane sterowanie jest 'chatter-free'?
- [U19] Algorytm sterowania (5.11) zakłada użycie składnika  $f_i$  zależnego od modelu manipulatora (obiektu typu Slave). Skuteczność działania tego składnika zależy zatem od znajomości modelu. Jak Autor uzasadni tutaj deklarowaną w treści twierdzenia 5.1 odporność algorytmu sterowania w przypadku występowania niepewności modelu manipulatora?
- [U20] Realizacja w rozdziale 5 zadania regulacji stałowartościowej przy skokowej zmianie sygnału zadanego nie jest do końca zasadna dla manipulatorów robotów (nawet ruch do punktu w przypadku manipulatorów jest zasadniczo realizowany wzdłuż trajektorii przegubowej), choć faktycznie taki scenariusz regulacji może lepiej ilustrować charakter zbieżności sygnałów. Poza tym wydaje się, że Autor wziął do obliczeń sterownika numeryczne pochodne sygnałów zadanych, skutkujące w tym przypadku składowymi sterowania podobnymi do delt Diraca (bardzo wątpliwa praktyka).
- [U21] Przyjęcie założenia (3.20) oraz założenia (5.4) powinno być skomentowane i dobrze uzasadnione.
- [U22] Nierówności podane w uwadze 3.1 na str. 57 i w uwadze 3.3 na stronie 64 powinny być wyprowadzone w treści pracy (np. w dodatku).
- [U23] W lemacie 3.3 na stronie 52 Autor powołuje się na wynik pracy [229], który wykorzystuje pochodną Dini funkcji Lapunowa. Zatem czy w treści dowodu na stronach 69-70 nie powinna być użyta pochodna Dini? [Funkcja Lapunowa analizowana w dowodzie nie jest różniczkowalna w zerze.]
- [U24] Nie jest podane w rozprawie jak z implikacji (3.84) ma wynikać postulat (3.78). Proszę to wyjaśnić.
- [U25] Nigdzie w rozprawie nie podano analizy występowania/braku efektu drgań sterowania (ang. chattering) w układzie zamkniętym z wykorzystanym sterownikiem zaproponowanym przez Doktoranta. Na jakiej zatem podstawie Autor wnioskuje o braku tego efektu już w rozdziale 3? (por. np. tekst w liniach 6-7 od góry strony 71 oraz tekst na str. 72)
- [U26] Sterowanie w czasie ustalonym wymaga użycia wykładników ułamkowych w prawie sterowania, co przy implementacji takiego sterowania zwykle oznacza, że osiągnięcie zera w czasie skończonym jest możliwe tylko teoretycznie, natomiast w praktyce (a nawet w przypadku wykonywania symulacji numerycznych)

wymaga jednak określenia pewnego niezerowego tunelu wokół zera, do którego zbieżność badamy. Jak Autor rozwiązał to zagadnienie w badaniach symulacyjnych a jak w badaniach eksperymentalnych? Proszę to wyjaśnić i pokazać przebieg wybranych uchybów (w sensie ich wartości bezwzględnej) w skali logarytmicznej, aby zilustrować faktyczną zbieżność i zachowanie tych sygnałów w otoczeniu zera.

- [U27] Porównanie ilościowe podane przez Autora w formie wartości wskaźników IAE oraz ITAE na stronach 114 i 126 jest niepełne i nieprzekonujące. Miarodajne porównanie (zwłaszcza sterowników nieliniowych) wymaga dużej ostrożności i zapewnienia wspólnej bazy porównawczej algorytmów, np. podobnego kosztu sterowania w celu porównania jakości śledzenia, albo podobnej jakości śledzenia w celu porównania kosztu sterowania. Takiej wspólnej bazy zabrakło. W konsekwencji wnioski podane na stronach 126 i 127 o przewadze metody CFCSMC nad dwiema alternatywnymi metodami sterowania są wysoce dyskusyjne. Ponadto jednoznaczne stwierdzenie, że metoda CFCSMC prowadzi do korzystniejszych (tu: mniejszych) wartości wskaźników IAE oraz ITAE nie jest w pełni zgodne z prawdą, ponieważ w tabelach 5.10 i 5.11 w czterech wierszach widać korzystniejsze wartości wskaźników dla metody CTCSCMC lub/i CACSCMC. Jak to wyjaśnić?
- [U28] Wyniki eksperymentalne podane na stronie 123 ukazują drgania/oscylacje sygnałów napięciowych dla złączy 4, 5 i 6. Z czego te drgania wynikają? Czy są to efekty wzbudzone obecnością 'szpilek' momentów sterujących obserwowanych na stronie 122 na wykresach w 4., 8. i 12. sekundzie? Jak obecność tych drgań to się ma do postulowanego wymagania braku efektu 'chattering'?
- [U29] Czy wyraźne piki widoczne na przebiegach momentów sił na rys. 6.8, 6.12, 6.16, 6.20, 6.24, 6.28, 6.32, 6.36, są akceptowalne w praktyce chirurgicznej? Czy nie generuje to nadmiernych drgań końcówki roboczej?
- [U30] 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 i gdzie 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. Dyskusja wyników i wnioski podane w punkcie 6.8 na stronie 151 wydają się zbyt optymistyczne, są one częściowo nieściśle i nie mają wystarczającego potwierdzenia w zaprezentowanych wynikach. Na jakiej podstawie Autor wnioskuje, że *'SMC-based controller is good enough to be used in a real robotic eye surgical system to perform corneal surgeries'*? Przecież wyniki przedstawione w tym rozdziale dotyczą tylko sterowania obiektem typu Slave, a ponadto ich prezentacja nie świadczy o akceptowalnej jakości sterowania w przestrzeni zadaniowej.
- [U31] Szkoda, że w rozdziałach 4, 5 i 6 nie pokazano jaka jest relacja między obliczonym górnym ograniczeniem ustalonego czasu zbieżności (ang. fixed-time) na podstawie twierdzeń 3.1 i 5.1 a rzeczywistymi czasami ustalania uzyskanymi w symulacjach i podczas eksperymentów (chodzi o kwestię ilustracji potencjalnej konserwatywności wartości czasów zbieżności szacowanych we wzorach (3.78) i (5.12)).
- [U32] W punkcie 2.5.4 można znaleźć dyskusyjne stwierdzenia. Mianowicie, strojenie regulatora PID nie koniecznie jest łatwe ('easy'), jeżeli ma być wykonane w sposób profesjonalny, ponieważ wymaga oszacowania dominujących własności obiektu sterowania (w praktyce nadal wiele pętli PID jest niewłaściwie nastrojonych, na co wskazują dostępne opracowania statystyczne). Poza tym nie jest prawdą, że algorytm PID nie zapewnia gładkości sygnału sterującego czy odporności układu zamkniętego na zewnętrzne zaburzenia - to jest zbyt ogólne i mylące stwierdzenie. W treści punktu 2.5.4 Autor stosuje niezręczne lub nieprecyzyjne (niejasne) sformułowania typu: 'suitable control methods' (co to znaczy?), 'must have certain conditions' (raczej 'properties'), 'internal disturbances' (jak to rozumieć?), 'MPC is an another common control algorithm used in robotic systems' (raczej tylko w laboratoriach badawczych), 'smooth control are the major disadvantages' (raczej 'non-smooth'), 'good controller' (jak to określenie rozumieć?).
- [U33] W przeglądzie algorytmów sterowania na stronach 44-45 nie wspomniano o bardzo popularnej w ostatnich 10 latach metodzie ADRC (ang. Active Disturbance Rejection Control), która wykazuje wysoką odporność układu sterowania na znaczne niepewności modelu i niemierzalne zaburzenia zewnętrzne. Czy w literaturze

można znaleźć zastosowanie metody ADRC do sterowania robotami chirurgicznymi?

- [U34] Definicje i lematy przytoczone na stronach 51-52 są w niektórych miejscach sformułowane nieściśle (np. brakuje argumentu 't' przy zapisach granicy; brakuje zależności czasu ustalania od warunku początkowego w definicji finite-time stability; 'non zero numbers' są większe lub równe zero w lemacie 3.2; w (3.6) powinno być raczej  $y(0)=y_0$ ; treść lematu 3.3 raczej powinna dotyczyć systemów autonomicznych, a nie tych z równania (3.3)). 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.
- [U35] Składnik interakcji z otoczeniem typu  $J^T F(t)$  w równaniach (3.10) i (3.14) zwykle jest zapisywany ze znakiem minus po prawej stronie. Dlaczego Autor zapisuje ten składnik ze znakiem dodatnim po prawej stronie równania?
- [U36] Jak należy rozumieć składniki  $\tau_d$  w równaniu (3.10) i  $\tau_{ds}$  w równaniu (3.14)? Jakiego typu niepewności ('uncertainties') są przez te składniki reprezentowane? To nie zostało wyjaśnione. Czy są to niepewności strukturalne czy parametryczne modelu? Czy tutaj zostały narzucone jakieś ograniczenia co do charakteru tych niepewności? Jeżeli nie, to dlaczego nie można było zaliczyć do tych składników wszystkich pozostałych elementów modelu poza składnikami typu ' $m_{ii}\theta_i$ '?
- [U37] Dlaczego w równaniu (3.28) nie jest  $\tau_j = -f_{jm} + K_j - \tau_{jd}$  poprzez analogię do postaci równania (3.36)? Proszę o podanie motywacji dla tej rozbieżności w definicjach sygnałów.
- [U38] Wprowadzane równania sterowników i obserwatorów proponowanych przez Autora są często pozostawione w tekście bez komentarzy wyjaśniających czy uzasadniających takie a nie inne propozycje, co bardzo utrudnia percepcję tych fragmentów rozprawy. Ponadto, znaczenie symboli wielu zmiennych wprowadzanych w równaniach nie jest wyjaśnione w tekście.
- [U39] Jakie dodatkowe wnioski wynikają z wykorzystania podczas badań eksperymentalnych dwóch różnych modeli fizycznych oka? Jaki by cel badawczy zastosowania dwóch różnych modeli?
- [U40] Dlaczego wartości  $\rho_j$  użyte w rozdziale 5 (podane w tabelach na str. 107 i 118) są tak małe? Czy składniki sterowania związane z tymi parametrami mają w ogóle wpływ na jakość sterowania przy tak małych przyjętych wartościach parametrów?
- [U41] Zauważone nieściśłości lub usterki w notacji matematycznej: aby zachować właściwy kontekst definicyjny prawa i lewa strona równań (3.17) powinny być zamienione; Autor nie używa symbolu 'równe z definicji' co utrudnia rozpoznanie intencji niektórych wzorów; cel notacji z daszkiem dla elementów macierzy w (3.32) i (3.41) nie jest zrozumiały; symbole  $d_j$ ,  $e_j$ , oraz  $f_j$  użyte w (3.33) i (3.34) mogą być mylące (wcześniej wykorzystano już symbole  $d$ ,  $e$  oraz  $f$  do innych celów); w równaniu (3.61) wydaje się, że brakuje daszka przy  $x_{2jm}$  a daszek przy  $f_{js}$  jest niewłaściwy, podobnie jest w (3.71); w formułach (3.78) i (5.12) jest zastosowana równość przybliżona - czy to jest aproksymacja czy wynik dokładny?; notacja z przeniesieniem do kolejnej linii i nawiasem, jak np. w (3.79)-(3.82), nie jest właściwa; nieprawidłowe odniesienie do lematu 4 w (3.84); macierz 'C' w (5.1) nie reprezentuje 'sił' ponieważ dopiero jej iloczyn z wektorem  $d\mathbf{q}/dt$  ma wymiar siły uogólnionej; przed składnikiem  $\tau_{di}$  w (5.5) i (5.7) brakuje czynnika  $1/m_{ii}$ ; symbol 'u(t)' użyty (5.31) jest mylący (wcześniej używano symbolu  $u_i$  do innych celów); nie zostało wyjaśnione znaczenie współczynników 'k' w równaniu (A1.1); nie wyjaśniono pochodzenia wzorów (A1.4) i czym są parametry 'L'; brakuje jednostek fizycznych w (A1.5) i (A2.6); brakuje wyjaśnienia znaczenia parametrów użytych w równaniach (A2.2)-(A2.5).
- [U42] Zauważone dyskusyjne kwestie terminologiczne: 'stability speed' (convergence rate?); 'setting time' (settling time?); 'tracking trajectory' (trajectory tracking?); 'setting the reaching time' (?); 'manipulator robots' (robot manipulators?); Kalman filter is not a control method; 'system's speed' (reaction rate?); 'states reach zero values' (dlaczego tylko zero?); 'gravity vector' (vector of generalized gravitational effects?); 'smooth functions' dla funkcji nieciągłych; 'sample time' (sampling time?); 'positive symmetric definite matrix' (symmetric positive definite matrix); 'second derivation' (second order time derivative); 'derivation' (derivative); 'fast tracking' (fast convergence?).
- [U43] Zauważone inne usterki edycyjne i nieściśłości w tekście (wybór): Autor nie stosuje zasad interpunkcji do



równań wyróżnionych w tekście; 'have been implemented experimentally in the real robots and have been tested only in simulations' (sprzeczność w zdaniu); prędkość podana w Hz w tabeli 2.1; skrót MIS na str. 42 nie jest wyjaśniony; 'the proposed designed controller' na str. 51 podczas, gdy jeszcze nie podano równań sterownika; '[...] respectively. And [...]' na str. 53; 'values for the elements of the matrices' (raczej 'forms of the matrix components'); skróty SO i DO nie są wyjaśnione na stronie 58; nie podano jakie wartości parametrów modelu (3.16) użyto do symulacji w punkcie 4.3; numeracja wielu rysunków jest błędna; niepoprawne są odniesienia do numerów wzorów w tablicach 4.1-4.4; schemat blokowy podany na stronie 87 jest nieczytelny; nie wyjaśniono co oznaczają strzałki zaznaczone na wykresach na stronach 108-110 oraz 119-121; skrót RCM nie jest wyjaśniony na str. 128.

[U44] Zauważone błędy i niezręczności językowe (wybór): 'discontinuous usage of signum function'; 'proper control signals'; 'increasing topic'; 'show the power'; 'next plan'; 'big enough' (sufficiently large?); 'states vector is as'; 'scenarios that present the real conditions' (realistic conditions?); 'reformed' (redesigned?); 'power of the proposed control method'; 'the controller's power in accurately tracking'; 'It is tried to find'.

[U45] Link podany w dodatku A3 nie działa (nie można przejrzeć zawartości repozytorium).

[U46] W wielu pozycjach bibliograficznych podanych na str. 155-179 brakuje niektórych danych, jak np.: brak numerów wolumenu/wydania w [6, 10, 121, 124, 189, 197, 198], brak numerów stron w [121, 124, 126, 189, 197, 198], brak nazwy wydawcy w [81]. W prawie wszystkich pozycjach odnoszących się do materiałów konferencyjnych nie podano miejsca konferencji. Poza tym zastosowano niespójny styl pisowni nazw czasopism (w niektórych przypadkach wszystkie słowa tworzące tytuły czasopism są pisane z dużych liter, a w innych duże litery są stosowane tylko do pierwszego słowa nazwy – patrz [3, 5, 10, 11-19, 22, 24-25, 29-31, 41, 43, 48, 55, 60-61, 82-83, 85-86, 88, 90, 160, 163, 165-166, 193-194, 202, 212-213, 219, 229]). Nie jest jasne jaki charakter mają cytowane pozycje [57, 125, 207, 234]. Zauważono inne błędy edycyjne w pozycjach [48, 67, 94, 135].

## 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 badań zawarte dysertacji w sześciu artykułach opublikowanych w latach 2020-2023 w recenzowanych czasopismach fachowych (w tym w renomowanych 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 czasopismem wskazanym w punkcie 4 na str. 13, wszystkie pozostałe miejsca publikacji wyników mieszczą się w głównym nurcie tematyki doktoratu. Należy zatem stwierdzić, że Doktorant udowodnił, iż potrafi samodzielnie prowadzić prace badawcze, a rozwiązania problemów badawczych zaproponowane przez Doktoranta znalazły akceptację (przynajmniej części) środowiska naukowego.

(b) Znaczenie podjętego w rozprawie tematu badawczego jest dobrze widoczne w kontekście przekonującego przeglądu aktualnego stanu wiedzy i technologii stosowanej w układach sterowania robotów chirurgicznych, które Autor zaprezentował w rozdziale 2. Nie ogranicza się on wyłącznie do aspektów algorytmiki sterowania czy problematyki rodzajów zadań sterowania definiowanych w chirurgii okulistyce, 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 pewien walor poznawczy i umożliwiają czytelnikowi szerszy ogląd i ocenę aktualnego stanu technologii stosowanej lub testowanej w obszarze robotyki chirurgicznej. Pomimo braku odwołań do metodyki ADRC (lub podobnych technik sterowania odporne znanych z literatury) w mojej ocenie przegląd podany w rozdziale 2 ukazuje dobrą i uporządkowaną wiedzę Autora w tematyce rozprawy, a także ujawnia jej interdyscyplinarny charakter. Formalna analiza przedstawiona przez Autora w rozdziałach 3 i 5 (mimo, iż miejscami nie w pełni rygorystyczna) potwierdza wiedzę Doktoranta w zakresie wybranych twierdzeń i narzędzi analizy stabilności stosowanych w nieliniowej teorii sterowania. Poza tym umiejętność przygotowania złożonego stanowiska doświadczalnego oraz realizacja szeregu badań eksperymentalnych na tym stanowisku świadczą o znacznych umiejętnościach praktycznych Doktoranta i jego zdolności do prowadzenia niebanalnych 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 aktualna 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. W mojej ocenie do zasadniczych wyników rozprawy pretendujących do miana składowych oryginalnego rozwiązania problemu badawczego (wymaganego zapisami Ustawy) należą:

- opracowanie, analiza formalna oraz weryfikacja symulacyjna (w tym weryfikacja typu SIL w warunkach czasu rzeczywistego) układu sterowania czasu ustalonego dla systemu DTRESS z wykorzystaniem obserwatora stanu i obserwatora zaburzenia zewnętrznego, będące przedmiotem twierdzenia 3.1 na stronie 68,
- modyfikacja podukładu sterowania czasu ustalonego dla obiektu typu Slave, jego analiza formalna będąca treścią twierdzenia 5.1 na stronie 103, a także jego weryfikacja symulacyjna i walidacja eksperymentalna (w warunkach laboratoryjnych) podane w rozdziałach 5-6.

Zatem poprawność i jakość wyżej wymienionych wyników jest kluczowa z punktu widzenia oceny spełnienia trzeciego ustawowego warunku stawianego rozprawom doktorskim. Niestety po analizie równań zaproponowanego sterownika oraz na podstawie wyników zaprezentowanych w rozprawie (w ich bieżącej formie) nie można jednoznacznie stwierdzić (a w pewnych aspektach wręcz należy poddać w wątpliwość) czy postawiony problem badawczy został w istocie rozwiązany, a jeżeli tak to w jakim sensie. Treści twierdzeń 3.1 i 5.1 wymagają zbieżności do zera uchybów śledzenia, podczas gdy sygnały sterujące wymagane do uzyskania takiego wyniku wydają się nierealizowalne nawet w sensie numerycznym (wymagane są pochodne składników nieciągłych). Zastosowanie stałego kroku próbkowania przy weryfikacji symulacyjnej niejako 'zakrywa' w pewnym stopniu problem użycia pochodnych składników nieciągłych, jednak go nie usuwa (przy sukcesywnym zmniejszaniu okresu próbkowania lub po zastosowaniu zmiennego okresu próbkowania i dużej precyzji całkowania numerycznego *solvera* programu Matlab-Simulink prawdopodobnie można spodziewać się uwypuklenia niekorzystnych efektów wynikających z obecności tego typu składników w sygnale sterującym). Projektowanie praw sterowania, które zakładają obecność nieograniczonych składowych sygnałów sterujących jest zasadniczo niezgodne ze sztuką. Brak możliwości realizacji sygnałów sterujących będzie wymagał albo osłabienia wymowy twierdzeń 3.1 i 5.1 przy wprowadzaniu realistycznych założeń co do aproksymacji nieograniczonych składowych sygnałów sterujących, albo sformułowania w sposób jawny silnych założeń, przy których twierdzenia 3.1 i 5.1 w ich bieżącej formie mogą być słuszne oraz skomentowanie jak zmieni się (pogorszy się) jakość śledzenia, gdy te silne założenia nie będą spełnione (to wymaga jednak dodatkowej analizy). Ponadto na podstawie zamieszczonych wykresów sygnałów uzyskanych podczas testów symulacyjnych nie można jednoznacznie ocenić czy uchyby zmierzają **do numerycznego zera** w czasie skończonym i czy odbywa się to w czasie **ustalonym** (brak wyników dla całego zbioru warunków początkowych) przy zastosowaniu **realizowalnych** (ograniczonych) sterowań. Ponadto jakość śledzenia została sprawdzona w rozprawie tylko w przestrzeni przegubowej, a nie w przestrzeni zadaniowej robota typu Slave, mimo iż problem poruszany w rozprawie motywowano potencjalnymi zastosowaniami wyników w chirurgii okulistycznej. W konsekwencji powyższych wątpliwości wiele optymistycznych wniosków sformułowanych przez Autora w punktach 3.7, 4.6-4.7, 5.7 oraz 6.8 nie jest niestety przekonująca, a niektóre z nich są wręcz kontrowersyjne. Stwierdzenia Autora takie, jak: *'In conclusion, it can be mentioned that the proposed SMC-based controller is good enough to be used in a real robotic eye surgical system to perform corneal surgeries'* (str. 151) czy *'The proposed controller has provided a sub-millimeter accuracy range that is good enough for robotic eye surgery'* (str. 152) wydają się nieuzasadnione. Wspomniane wyżej argumenty krytyczne niestety nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie czy Doktorant spełnił trzeci warunek stawiany rozprawom doktorskim w zapisach Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

[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 algorytmów sterowania dla systemów nieliniowych, motywowane potencjalnymi zastosowaniami w obszarze zrobotyzowanej chirurgii okulistycznej. Wykorzystanie w tym celu metodyki trybów ślizgowych, w połączeniu z zastosowaniem sprzężenia od wyjścia, obserwatora zaburzeń zewnętrznych oraz koncepcji stabilizacji w czasie ustalonym jest zasadne i dobrze wpisuje się w aktualne trendy projektowania układów sterowania dla wysoce niepewnych systemów nieliniowych. Silną stroną rozprawy jest bez wątpienia przyjęcie metodyki 'złotej triady' zalecanej w tego typu badaniach, gdzie wynik formalny (matematyczny) jest najpierw weryfikowany symulacyjnie (powinien on potwierdzać uzyskany wynik formalny), a następnie weryfikowany eksperymentalnie w celu sprawdzenia praktycznej skuteczności zaproponowanego rozwiązania (także przy częściowym naruszaniu założeń formalnych). Treść rozprawy oraz przywołana bibliografia (w tym także wspomniane prace opublikowane z udziałem Autora dysertacji) świadczą, że Doktorant dysponuje uporządkowaną wiedzą w obszarze algorytmiki i układów sterowania systemów nieliniowych oraz potrafi samodzielnie prowadzić prace badawcze w obszarze automatyki i robotyki. Jednak istotne zaniedbania popełnione przy prezentacji, analizie i ocenie uzyskanych wyników oraz kontrowersyjne podejście metodyczne zastosowane w rozdziałach 3 i 5 nie pozwalają na tym etapie na sformułowanie jednoznacznie pozytywnej konkluzji końcowej dopuszczającej rozprawę do publicznej obrony. **Wobec powyższego oraz argumentów krytycznych sformułowanych a punkcie 5c niniejszej recenzji, wnioskuję o uzupełnienie rozprawy mgra inż. Ali Soltani Sharif Abadi (i ewentualną korektę jej fragmentów), w szczególności poprzez:**

- A) wyjaśnienie przy jakich założeniach twierdzenia 3.1 i 5.1 są słuszne (w szczególności czy wymagają realizacji nieograniczonych sygnałów sterujących pomimo ograniczonych uchybów), a także czy spełnienie tych założeń jest realistyczne i jakiej jakości śledzenia należy się spodziewać przy naruszeniu tych założeń; alternatywnie (jeżeli założenia będą nieakceptowalne) np. poprzez modyfikację treści twierdzeń 3.1 i 5.1 (i być może modyfikację samych równań sterowników), tak aby gwarantowały ograniczone (realizowalne) sygnały sterujące przy ograniczonych uchybach regulacji,
- B) pokazanie przykładowych wyników symulacji numerycznych w środowisku Matlab-Simulink przy zastosowaniu zmiennego okresu próbkowania *solvera* typu 'ode45' i przy wymuszeniu dużej precyzji obliczeń, aby sprawdzić czy nie wystąpią niekorzystne efekty wynikające z użycia pochodnych funkcji nieciągłych w sensie Lipschitza,
- C) przykładowe zilustrowanie w testach symulacyjnych charakteru zbieżności uchybów i dokładności śledzenia w skali logarytmicznej dla wybranego zbioru warunków początkowych (aby pokazać tutaj zbieżność w czasie ustalonym – niezależną od warunków początkowych),
- D) dla uzyskanych przebiegów uchybów w przestrzeni przegubowej wyznaczenie uchybów śledzenia w przestrzeni operacyjnej robota typu Slave, aby pokazać postulowaną sub-milimetrową dokładność prowadzenia narzędzia robota,
- E) rzetelną i obiektywną ocenę uzyskanych wyników stosując zasadę racjonalnego uznawania przekonań.

Podczas przygotowania uzupełnienia proszę także o wzięcie pod uwagę oraz ustosunkowanie się na piśmie do uwag od [U1] do [U41] sformułowanych w punkcie 4 niniejszej recenzji.

.....  
dr hab. inż. Maciej Marcin Michałek, prof. PP