

Gliwice, 26.05.2025 r.

Dr hab. inż. Adam Gałuszka, prof. PŚ
Politechnika Śląska,
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Katedra Automatyki i Robotyki
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice
adam.galuszka@polsl.pl

RECENZJA
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ POPRAWIONEJ

Tytuł rozprawy: Design a Novel Control System to Solve Robotic Eye Surgery Challenges.

Autor rozprawy: mgr inż. Ali Soltani Sharif Abadi.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Ordys, Politechnika Warszawska.

Drugi promotor rozprawy: dr Barbara Pierscionek, Anglia Ruskin University, United Kingdom.

Dziedzina: nauki inżynierjno-techniczne.

Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej

Dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Politechniki

Warszawskiej, prof. dr. hab. inż. Pawła Szczepańskiego, pismem z dnia 07.03.2025r. Recenzja

jest zmodyfikowaną wersją recenzji rozprawy pierwotnej, przedstawionej w dniu 29.05.2024 r.

1. Cel i zakres rozprawy

Celem rozprawy jest zwiększenie precyzji, zdolności adaptacyjnych i aspektów bezpieczeństwa zrobotyzowanej chirurgii oka poprzez opracowanie innowacyjnego systemu sterowania. Badania mają również na celu wprowadzenie mechanizmów sterowania opartych na obserwatorach, umożliwiających dostosowanie parametrów chirurgicznych w czasie rzeczywistym w środowisku dynamicznie zmiennym. Cel rozprawy Autor osiąga poprzez opracowanie i walidację nowego algorytmu sterowania, który zapewnia według Jego opinii szybkie, dokładne, płynne i bezpieczne trajektorie narzędzia chirurgicznego, minimalizujące ryzyko niespełnienia celów operacji chirurgicznej oka. Zaproponowane przez Autora rozwiązania zostały zaimplementowane z wykorzystaniem systemu MATLAB Simulink, a także przetestowane z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego i rzeczywistego robota. Oczekiwanym wynikiem rozprawy jest podniesienie standardów w dziedzinie zrobotyzowanej



chirurgii oka, oferując naukowe podstawy dla lepszych wyników chirurgicznych, zwiększonej zdolności adaptacji i podwyższonych standardów bezpieczeństwa.

Motywacją Autora do podjęcia badań w tej dziedzinie jest jej obecny stan, tj. zidentyfikowanie istotnej luki badawczej, rozwojowej i wdrożeniowej w osiąganiu poziomu dokładności wymaganego do delikatnych operacji oczu, pomimo znacznego rozwoju metod i zrobotyzowanych systemów zwiększających precyzję i zmniejszających inwazyjność zabiegów chirurgicznych oka. Chirurdzy często napotykają ograniczenia w zakresie możliwości sterowania narzędziami w czasie rzeczywistym, co utrudnia im poruszanie się w złożonym środowisku oka. Co więcej, kwestie bezpieczeństwa, zwłaszcza w dynamicznie zmiennych warunkach chirurgicznych, wymagają opracowania systemu sterowania, który integruje zaawansowane funkcje w celu szybkiego wykrywania i reagowania na potencjalne zagrożenia. Tak postawione cel i motywacja są bardzo ambitne.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska poprawiona liczy 337 strony i obejmuje siedem rozdziałów, trzy dodatki oraz spis literatury. Praca napisana jest w języku angielskim i jej znacznie rozszerzona w porównaniu do rozprawy pierwotnej, przedstawionej do recenzji, która liczyła 192 strony. W opinii recenzenta tak znaczne rozszerzenie rozprawy poprawionej, uzupełnione głównie o wyniki symulacji, które dokumentują postawione tezy w rozprawie, nie wnosi znaczącego wkładu do treści przedstawionej w rozprawie pierwotnej, której jedną z zalet był jasny i zrozumiały przekaz dla czytelników prac z dziedziny nauk technicznych. W rozprawie poprawionej jasność przekazu wg opinii recenzenta została nieco rozmyta.

Zasadnicza część rozprawy poprawionej liczy łącznie 276 stron bez bibliografii, a spis bibliografii liczy 276 pozycji literaturowych w porównaniu do 253 pozycji cytowanych w poprzedniej wersji. Zasadnicza struktura pracy poprawionej została zachowana, tj. praca rozpoczyna się wstępem, w którym przedstawiono motywację i tezę postawioną w rozprawie, ale także przedstawieniem dorobku naukowego Autora, liczącego teraz 29 pozycji, z czego 8 jest ściśle związana z tematyką rozprawy, tak więc podczas poprawiania rozprawy Autor został współautorem dwóch nowych artykułów w czasopiśmie, bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy. Każda pozycja jest opatrzona kilkudziesięciowym streszczeniem jej zawartości. W tym kontekście łatwo jest zauważyć, że przedstawiona rozprawa doktorska jest w pewnym sensie przewodnikiem po publikacjach, co zresztą Autor sam zaznacza, wskazując



rozdziały rozprawy powiązane z daną publikacją. I tak np. artykuł 3. (przeglądowy) stanowi zawartość rozdziału 2.

Rozdział 2 opisuje najważniejsze problemy związane ze zrobotyzowaną chirurgią oka, takie jak koszty, czas operacji, cechy różnych robotów i technologii, a także systemy sterowania i algorytmy. Niektóre systemy zrobotyzowane, takie jak system chirurgiczny Da Vinci, są technicznie doskonałe, ale bardzo drogie. W rozdziale tym Autor opracował analizę porównawczą czujników i opis warunków odpowiednich algorytmów sterowania dla robotów chirurgicznych oka. Opisano cechy odpowiedniej metody sterowania dla zrobotyzowanej chirurgii oka. Powinna ona być solidna, płynna, dokładna i wolna od drgań. Najważniejszy wynik tego rozdziału to konkluzje, że zaprojektowano kilka robotów chirurgicznych dla oka, natomiast system, który jest przystępny cenowo i precyzyjny, o prostej konstrukcji, z odpowiednim sterownikiem dla szeregu procedur okulistycznych, nie jest jeszcze dostępny.

W rozdziale 3 Autor omawia założenia, definicje i własności zaproponowanego nowego systemu sterowania opartego na strukturze master-slave, tzw. DTRESS, a następnie przedstawia oryginalny projekt systemu sterowania dla tego systemu. W szczególności, dane z systemu nadrzędnego zostały przesłane kanałem komunikacyjnym do części podrzędnej. Założono, że kanał komunikacyjny opóźnia wysyłanie danych w obu kierunkach (od urządzenia nadrzędnego do podrzędnego i odwrotnie). Model joysticka z trzema stopniami swobody jest uważany za konsolę nadrzędną, a robot manipulacyjny z trzema stopniami swobody jako robot podrzędny. Proponowany system sterowania wykorzystuje technikę opartą na sterowaniu poślizgowym i uwzględnia własności systemu, jak odporność na niepewności i zakłócenia zewnętrzne, wolne od zakłóceń, implementowalne sygnały sterujące, płynność i szybkość nadążania oraz skuteczność jako metoda stabilizacji w ustalonym czasie. Rozdział ten stanowi najważniejszy wynik rozprawy, który następnie zostaje poddany symulacjom i testom.

Rozdział 4 przedstawia oprogramowanie i wyniki symulacji w czasie rzeczywistym. W celu oceny proponowanego sterownika rozważono dwa scenariusze. Wyniki obu symulatorów wykazały bardzo dobre odpowiedzi w rzeczywistych warunkach niektórych operacji. Pierwszy scenariusz symuluje warunki, w jakich przeprowadzane są operacje, takie jak uszkodzenie rogówki, przeszczep rogówki i szycie i szycie rogówki. Drugi scenariusz symuluje operację nacięcia rogówki w chirurgii zaćmy.

W rozdziale 5 zaprezentowano odporny na drgania kontroler oparty na sterowaniu poślizgowym, który został sprawdzony w metodzie stabilizacji stałoczasowej i zaimplementowany w rzeczywistym 6-przegubowym manipulatorze robota. Symulacje i testy eksperymentalne wykazały, że zaproponowana metoda sterowania działa bardzo dobrze.

Zaproponowany kontroler został porównany z dwoma innymi solidnymi metodami końcowymi i asymptotycznymi. Do porównania wykorzystano dwa wskaźniki jakości IAE i ITAE. Odporność regulatora na niepewności i zakłócenia zewnętrzne została przetestowana w scenariuszu eksperymentalnym. Eksperymenty zostały przeprowadzone w celu osiągnięcia pewnych punktów i zatrzymania się w nich. Jest to tzw. pierwszy rodzaj ruchu w zrobotyzowanej chirurgii oka.

W rozdziale 6 Autor przedstawił wyniki eksperymentów dla dwóch różnych scenariuszy poprzez testowanie na dwóch różnych zbiorach trajektorii referencyjnych przy użyciu zaproponowanego w rozprawie układu sterowania zaimplementowanego w robocie ES5. Eksperymenty przeprowadzono na dwóch modelach oczu o różnych średnicach. Najpierw omówiono wyzwania związane z testem eksperymentalnym, a następnie przedstawiono wyniki. Zaproponowany kontroler zapewnił submilimetrowy zakres dokładności, który jest wystarczająco dobry dla zrobotyzowanej chirurgii oka.

Rozdział 7 przedstawia wnioski oraz kierunki przyszłych prac.

W porównaniu do poprzedniej wersji rozprawy, rozdziały 4, 5 oraz 6. uległy największemu rozszerzeniu o nowe scenariusze symulacyjne, w których Autor wykazuje stabilność zaprojektowanego układu sterowania dla założonych, skończonych wartości opóźnień w torze komunikacyjnym pomiędzy warstwami sterowania master - slave. Wykazanie i zapewnienie stabilności układu sterowania wynika z przyjętego założenia 3.4, które mówi o tym, że kanał komunikacyjny systemu ma dwa rodzaje opóźnień czasowych: jedno związane z wysyłaniem danych z części nadrzędnej, a drugie z wysyłaniem danych z części podrzędnej oraz że zakłada się, że te opóźnienia czasowe są nieznanne, ale stałe i skończone.

3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Biorąc pod uwagę zawartość pracy, za główne osiągnięcia Autora należy uznać:

- Przegląd najbardziej krytycznych wyzwań zrobotyzowanej chirurgii oka omówiony w rozdziale 2. Badane zagadnienia obejmują systemy robotyczne, dostępne technologie, czas operacji, protokoły komunikacyjne i systemy sterowania.
- Określenie wymagań dla odpowiedniego systemu sterowania dla zrobotyzowanej chirurgii oka.
- Zaprojektowanie nowego systemu sterowania dla zrobotyzowanej chirurgii oka w oparciu o określone wymagania. Stworzono oparty na obserwatorach system sterowania trybem ślizgowym, odporny na niepewności, zakłócenia, drżenie rąk chirurga i opóźnienia

czasowe w kanale komunikacyjnym. Stabilność w ustalonym czasie jest również gwarantowana za pomocą odpowiednio dobranej funkcji Lyapunova, co omówiono w rozdziale 3.

- Ocena zaprojektowanego kontrolera przy użyciu Simulink/MATLAB i symulatora czasu rzeczywistego, przedstawiona w rozdziale 4. Zrobotyzowany system chirurgiczny oka z zaprojektowanym kontrolerem jest symulowany w Simulink/MATLAB, a następnie w symulatorze czasu rzeczywistego, z przeprowadzonymi eksperymentami w dwóch scenariuszach naśladujących rzeczywiste warunki zrobotyzowanej chirurgii oka.
- Wykorzystanie prawdziwego manipulatora z 6 przegubami do badań eksperymentalnych. W rozdziale 5 zaprojektowany kontroler został zaimplementowany w manipulatorze robota. Dla problemu osiągania punktów, zaproponowany kontroler został porównany z dwiema innymi technikami. Problem śledzenia trajektorii został zbadany przy użyciu robota manipulatora i zaimplementowanego kontrolera. Przeprowadzono cztery rodzaje testów na dwóch modelach ludzkiego oka o różnych średnicach, aby ocenić metodę sterowania w śledzeniu pożądanej trajektorii przy różnych prędkościach robota.
- Wykazanie i zapewnienie stabilności układu sterowania przy założeniu, że kanał komunikacyjny systemu ma dwa rodzaje opóźnień czasowych: jedno związane z wysyłaniem danych z części nadrzędnej, a drugie z wysyłaniem danych z części podrzędnej oraz że zakłada się, że te opóźnienia czasowe są nieznane, ale stałe i skończone.

Powyższe, najważniejsze elementy rozprawy decydują o jej wartości naukowej i badawczej. Należy zauważyć, że Autor podjął się realizacji bardzo ciekawego oraz istotnego z punktu widzenia praktycznych zastosowań tematu badawczego. Poszczególne wyniki badań zostały opublikowane w kilku współautorskich pracach (i jednej samodzielnej) w języku angielskim, co świadczy pozytywnie o dużej wiedzy Autora rozprawy w zakresie poruszanej tematyki badawczej.

Uważam, że opiniowana rozprawa podejmuje ważny i aktualny problem naukowy. Elementy nowości przejawiają się w autorskim układzie sterowania wykorzystującym architekturę master-slave oraz metodę sterowania poślizgowego. Podjęcie przedstawionej problematyki jest uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak i możliwości wdrożenia układu sterowania jako elementu automatyzacji operacji chirurgicznych oka.



4. Poprawność pracy i uwagi krytyczne

Poprawność treści rozprawy nie wzbudza zastrzeżeń, a stwierdzenia w niej zawarte stanowią podstawę do kontynuowania badań, co wynika w szczególności z przedstawionych podstaw teoretycznych popartych wynikami przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Praca jest bardzo dobrze przygotowana pod względem edytorskim

Brak znaczących uwag krytycznych. Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym:

- 1) W pracy widoczne są różne czasy symulacji: 120s, 150s, 40s, 60s. Skąd dobór takich granic symulacji? Czy mają one związek z czasem osiągnięcia punktu równowagi dla warunków stabilności w skończonym czasie?
- 2) W pracy wykorzystano wskaźniki jakości IAE i ITAE, oparte na całkowaniu wartości błędu. Czy taki wskaźnik nie jest niewrażliwy na chwilowe skoki wartości błędu, które mogą wykraczać poza dopuszczalne wartości, wymagane przez specyfikę operacji?
- 3) Skąd wzięły się średnice oczu: 4cm i 14 cm?
- 4) W formułach 5.30 oraz 5.31 zaproponowano zbiory trajektorii modelujących niepewność oraz zakłócenia. Czy założone wartości odnoszą się do rzeczywistych, które można spotkać podczas operacji chirurgicznych oka?
- 5) Dla symulacji z modelem oka założono, że oko jest nieruchome, a znany jest jego model z analogiem mechanicznym (rys.3.3). Podczas operacji np. zaćmy czy siatkówki, pacjent może okiem poruszać – jak to jest uwzględnione w układzie sterowania?

5. Podsumowanie

Przytoczone wyżej uwagi dyskusyjne nie umniejszają zasług Autora ani nie kwestionują przedstawionych osiągnięć, a opisywana w pracy problematyka dotyczy aktualnych i interesujących zagadnień naukowych. Recenzowana poprawiona rozprawa ma charakter naukowy, rozwojowy oraz wdrożeniowy, zasługuje na wysoką ocenę merytoryczną i wnosi istotny oraz oryginalny wkład w dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, przy czym w opinii recenzenta rozprawa pierwotna również posiadała ww. cechy, a była bardziej przejrzysta w odbiorze przez czytelników.

Postawione cele i zadania pracy zostały zrealizowane, a jej tematyka wpisuje się we współczesny nurt badań w tym zakresie. Warto zauważyć, że Autor posiada imponujący, jak na etap kariery naukowej, dorobek. Wg bazy Base of Knowledge Warsaw University of



Technology mgr inż. Ali Soltani Sharif Abadi jest współautorem lub autorem 40 artykułów opublikowanych w czasopismach lub rozdziałach książek. Wskaźniki bibliometryczne są również bardzo dobre i wynoszą: h-index (Scopus Citations) =10, h-index (WoS Citations) =8. Cały dorobek jest wskazany w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Podtrzymując moją poprzednią opinię stwierdzam, że przedstawiona do recenzji poprawiona rozprawa mgr inż. Ali Soltani Sharif Abadi pt. „Design a Novel Control System to Solve Robotic Eye Surgery Challenges” zawiera samodzielne rozwiązanie ważnego i istotnego problemu naukowego. Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, tak więc wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Dodatkowo, biorąc pod uwagę dorobek naukowy bezpośrednio związany z tematyką rozprawy, wnioskuję o jej wyróżnienie.



Adam Gałuszka