

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kowalczuk
profesor zwyczajny
Katedra Systemów Decyzyjnych i Robotyki
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

10 kwietnia 2025

**KO-RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

PhD Thesis: **Design a novel control system to solve robotic eye surgery challenges**
Keywords: Robotic eye surgery, Control, Sliding Mode Control, Force estimator, Time-delay

Autor rozprawy: **Ali Soltani Sharif Abadi, M.Sc.**

Promotor: **dr hab. inż. Andrzej Ordys**

Promotor pom.: **dr inż. Barbara Pierścioneł**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedmiotem rozprawy doktorskiej poddanej recenzji jest ważny oraz społecznie istotny i interesujący technicznie problem projektowania systemów wspomagania operacji chirurgicznych, w szczególności chirurgii oka.

Podobnie jak w przypadku innych zastosowań inżynierii systemów, chirurgia robotyczna przeżywa ogromny postęp, otwierając nowe możliwości w zakresie precyzji i skuteczności operacji na oczach. Rozwój w dziedzinie fizyki, mechatroniki, elektroniki i technik komputerowych oraz innych technologiach, znajduje zastosowanie w konstrukcji kolejnych generacji zrobotyzowanych systemów wspierania operującego chirurga. Stanowi też naturalną motywację do podejmowania nowych wyzwań na podstawie najnowszych osiągnięć teoretycznych i praktycznych w dziedzinie.

Znaczenie tego zagadnienia, związane z koniecznością ciągłego podnoszenia skuteczności i bezpieczeństwa zabiegów chirurgicznych na oku, jest niepodważalne i całkowicie uzasadnia celowość obranego w niniejszej rozprawie kierunku badań.

Rozprawa doktoranta Alego Soltaniego Sharifa Abadiego dotycząca problemów w systemach robotycznej chirurgii oka z propozycją ich rozwiązania poprzez **zaprojektowanie innowacyjnego systemu operowania z chirurgiem w pętli sterowania**, oprócz tego, że ma ogromne znaczenie, jest – w świetle obecnych wyników teoretycznych i praktycznych – w pełni uzasadniona i aktualna.

Tytuł rozprawy rozumiany jako „Projektowanie innowacyjnego systemu sterowania w celu sprostania wyzwaniom zrobotyzowanej chirurgii oka” lepiej by brzmiał w języku angielskim jako „*Designing an innovative control system to meet the challenges of robotic eye surgery*”.

Po wstępie dotyczącym motywacji, celu, zakresu i opisu problematyki rozprawy oraz wskazaniu (5) własnych przyczynków naukowych, autor charakteryzuje siedem wybranych własnych publikacji żurnalowych w zakresie tematyki rozprawy oraz wykazuje ponad 20 innych cennych publikacji i wystąpień konferencyjnych.

Głównym celem badań doktoranta było poprawienie funkcjonalności systemów robotycznych stosowanych w chirurgii oka w zakresie dokładności, bezpieczeństwa i jakości chirurgicznej; w szczególności: precyzyjnej manipulacji instrumentami, adaptacji w czasie rzeczywistym do dynamiki oka pacjenta i minimalizacji inwazyjności w celu maksymalizacji wskaźników sukcesu chirurgicznego.

W swojej doktorskim projekcie autor zaproponował dobór metod, które wdrożył oraz przeanalizował w środowisku symulacyjnym. Cała koncepcja została oparta na dogłębnej wiedzy z zakresu robotycznej chirurgii oka oraz osiągalnych technologii, które w szczególności dotyczyły czujników, członów wykonawczych, manipulatorów, robotów, protokołów komunikacyjnych, obserwatorów stanu i sygnałów, jak też metod projektowania układów automatyki, w tym sterowania w skończonym czasie, regulacji PID, sterowania modelowo-predykcyjnego (MPC), sterowania z reżimie ślizgowym (ze zmienną strukturą), filtracji wygładzającej, strategii adaptacyjnych i odpornych, które gwarantują jakość sterowania, w obecności uwzględnieniu zakłóceń oraz niepewności.

Biorąc pod uwagę techniczne, inżynierskie i medyczne znaczenie rozważanego zagadnienia projektowania zaawansowanego systemu manipulatora chirurgicznego, temat rozprawy doktorskiej pana Alego Soltaniego Sharifa Abadiego należy zatem zakwalifikować jako ważny pod względem społecznym, naukowym i technologicznym.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono analizę źródeł we właściwy sposób (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle), świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autor rozprawy zastosował bardzo obszerne wprowadzenie do rozprawy w postaci dwóch rozdziałów. Elementy głębszego wprowadzenia w tematykę rozprawy pojawiają się także na początku kolejnych rozdziałów merytorycznych. Uwzględniwszy własny, bogaty dorobek publikacyjny, uznać należy, że doktorant dokonał prawidłowej analizy źródeł naukowych i literatury światowej z tej dziedziny oraz umiejętnie wykorzystał te wyniki w badaniach własnych. Materiał poglądowy dobrze odzwierciedla rozległą wiedzę zdobytą przez doktoranta.

Części wprowadzające są całkowicie wystarczające. Dobrze określono podjętą tematykę, podano cele badawcze, przyjęte założenia i zakres działania, jak również szczegóły proponowanych składowych rozwiązań. Jasne są zamierzenia opisywanego projektu i ramy badawcze oraz struktura raportu.

Koncepcje autorskich rozwiązań są solidnie udokumentowane wieloma naukowymi publikacjami. Wnioski zaczerpnięte ze źródeł bibliograficznych nie budzą zastrzeżeń. Również sposób wykorzystania cytowanych pozycji literaturowych w dysertacji jest całkowicie poprawny. Drobne wątpliwości wzbudza sposób prezentacji treści w języku angielskim dotyczący uwypuklenia elementów nowatorskich.

Poprawiona praca liczy łącznie 337 stron, merytoryczne rozdziały rozprawy zajmują ponad 220 stron, zaś mało użyteczna, niealfabetycznie uporządkowana bibliografia obejmuje 276 pozycji (z własnymi włącznie). Większość rozdziałów części merytorycznej została zmodyfikowana, uzupełniona i rozszerzona o kilka stron, natomiast doktorant znacząco rozbudował rozdziały z wynikami symulacji (rozdział 5) o około 70 stron oraz z wynikami eksperymentalnymi (rozdział 6) o ponad 30 stron.

3. Czy autor rozwiązał postawione zadania, czy użył właściwej do tego metody, oraz czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W ramach rozpatrywanego zagadnienia projektowego doktorant proponuje autorski układ sterowania, realizujący założony zbiór racjonalnych celów i zadań stojących przed systemem robotycznej chirurgii oka.

Autor dokonał przeglądu wybranych aspektów projektowych związanych z robotyczną chirurgią oka, do których należy: czas operacji, krzywa uczenia, opóźnienie komunikacyjne, drżenie ręki chirurga, zakłócenia zewnętrzne, siła narzędzia chirurgicznego, dokładność śledzenia trajektorii, dostępność systemów robotycznych, metod sterowania oraz technologii elektronicznej i komunikacyjnej. Na podstawie analizy doktorant określił konkretne cele i warunki pracy sterownika, na które składają się: (a) niewrażliwość na drgania ręki chirurga, (b) odporność na niewiedzę/niepewność modelowania układu i zakłóceń zewnętrznych, (c) istotność modelu siły przyłożonej w regule sterowania, (d) realizowalność projektu w rzeczywistym systemie robotycznym, (e) dokładność robota przy istnieniu opóźnienia czasowego w kanale komunikacyjnym, (f) szybkość działania oraz (g) płynność sterowania.

Biorąc pod uwagę, że głównym zadaniem autora było opracowanie manipulatora do zrobotyzowanej chirurgii oka, które zostało gruntownie zweryfikowane w badaniach symulacyjnych z wykorzystaniem środowiska MATLAB oraz na platformie czasu rzeczywistego i w testach eksperymentalnych na różnych modelach oka ludzkiego, należy uznać, że doktorant rozwiązał postawione zadanie projektowe, przedstawiając przy tym obszerny raport o silnych cechach wdrożeniowych.

Na podstawie szczegółowej lektury rozprawy należy również stwierdzić, że doktorant wykazał się: znajomością analizowanego problemu, opanowaniem materiału teoretycznego i technicznego, bardzo dobrze rozwiniętymi warsztatami naukowym i inżynierskim, umiejętnością doboru założeń badawczych, definiowania kierunków badań, projektowania i wdrażania systemów, formułowania wniosków i rozwiązywania postawionych zadań, doskonałą znajomością inżynierskich środowisk projektowania (informatycznego, obliczeniowo-projektowego, symulacyjno-inżynierskiego), jak też biegłością w implementacji algorytmów oraz umiejętnością weryfikacji uzyskanych wyników w warunkach symulacyjnych i laboratoryjnych.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oprócz licznych dowodów potwierdzających kwalifikacje naukowe, inżynierskie i społeczne doktoranta, pozwalające na pracę zarówno indywidualną, jak i zespołową, opanował on także warstwę merytoryczną z zakresu podstaw szeroko pojętej robotyki medycznej, a także umiejętności w zakresie jej wdrażania i badań eksperymentalnych.

Po zdefiniowaniu podstawowych założeń doktorant skupił się na projekcie innowacyjnego systemu sterowania dla robota wspomagającego operację oka, który składa się z trzech zasadniczych części: głównej, podrzędnej i środka komunikacji.

Wymienione funkcje systemu zaprojektowano tak, aby były niewrażliwe na różnego rodzaju szkodliwe zjawiska, takie jak: drżenie ręki chirurga, zakłócenia zewnętrzne, niepewność modelowania i opóźnienia czasowe w komunikacji. Model siły zastosowanej użyty w projekcie sterowania oceniony odrębnie. Zaprojektowany system sterowania oparto na strategii sterowania ślizgowego z wykorzystaniem obserwatora stanu oraz modelu niepewności i zakłóceń zewnętrznych. Pozwala to na użycie wiedzy o stanach systemu i zakłóceniach w prawie sterowania, które osiąga też cel stabilizacji w ustalonym czasie, tj. gwarantuje górną granicę czasu ustalania w systemie. Ważnym rezultatem tego projektu są wolne od drgań i płynne sygnały sterujące. Obserwator stanu systemu i obserwator zakłóceń, a także kaskadowe powierzchnie ślizgowe sterowania, stanowią podstawę do osiągnięcia postawionego celu.

Opracowany sterownik poddano ocenie systemowej w warunkach symulacji (pakiet MATLAB-Simulink). W celu przetestowania podstawowych cech działania układu sterowania wykorzystano dwa scenariusze, które dotyczą typowego zastosowania robota do chirurgii oka w chirurgii rogówki. Modelując odrębnie część nadrzędną/zadającą oraz podrzędną/wykonawczą, zasymulowano urządzenie zadające (*joystick*) oraz robota z manipulatorem 3-DOF. W badaniach tych uwzględniono telekomunikacyjne opóźnienie czasowe (w dwukierunkowym łączu typu *master-slave*). Zaprojektowany przez doktoranta system charakteryzuje się dużą dokładnością (reakcji) przy spełnieniu postawionych wymagań (jak odporność i brak drgań).

Symulacyjne badanie systemu w czasie rzeczywistym oparto na cyfrowym symulatorze czasu rzeczywistego (RTDS), który pozwolił na ocenę odpowiedzi systemu w zdefiniowanych scenariuszach. Testy w czasie rzeczywistym potwierdziły osiągnięcie założeń ilościowych i jakościowych wykonanego systemu manipulatora chirurgicznego.

Doktorant porównał wdrożoną przez siebie metodę z dwiema innymi metodami, które również należą do klasy kontrolerów ślizgowych opartych na obserwatorach, z technikami stabilizacji skończonej i asymptotycznej. Przy eksperymentalnej weryfikacji kontrolera ruchy wykonywano w oparciu o dwa sposoby modelowania oka ludzkiego.

Proponowane podejście zostało praktycznie zweryfikowane w eksperymentach z wykorzystaniem laboratoryjnej manipulacji robotycznej 6-DOF jako zdalnego systemu chirurgicznego. Kontroler został zaimplementowany na tym robocie przy użyciu funkcjonalności systemu operacyjnego ROS. Badania wykazały, że proponowany system charakteryzuje się bardzo wysoką dokładnością śledzenia (tj. robot śledzi żądane punkty trajektorii dokładnie, płynnie, bez drgań i szybko).

W toku prac projektowych, zgodnie z zamierzonymi celami badawczymi rozprawy doktorskiej, jej autor, pan Ali Soltani Sharif Abadi, osiągnął szereg oryginalnych wyników dotyczących naukowych i badawczych aspektów rozprawy, które można w skrócie opisać jako:

- (1) W części poświęconej studium literatury – przekrój najważniejszych wyzwań i zagadnień związanych z robotyczną chirurgią oka, tj. systemami robotycznymi, dostępnymi technologiami, czasem trwania operacji, stosowanymi protokołami komunikacyjnymi i systemami sterowania, a także wymaganiami dla systemów sterowania stosowanych w robotycznej chirurgii oka.

- (2) W części dotyczącej treści teoretycznej – projekt oryginalnego układu sterowania dla zrobotyzowanego systemu do chirurgii oka w zadanych warunkach: Autor opanował materiał i zaprojektował układ sterowania (w trybie ślizgowym opartym na obserwatorze) odporny na drgania rąk chirurga oraz niepewności, zakłócenia i opóźnienia czasowe w kanale telekomunikacyjnym. Gwarancja stabilizacji w zadanym czasie została wykazana przy użyciu funkcji Lyapunowa, z uwzględnieniem siły przykładanej do ludzkiego oka podczas operacji na nim.
- (3) W części symulacyjnej – ocena zaprojektowanego sterownika w środowisku Matlab-Simulink i na symulatorze czasu rzeczywistego: Zrobotyzowany system chirurgii oka z zaprojektowanym sterownikiem zasymulowano na platformie Simulink oraz na symulatorze czasu rzeczywistego. Wyniki badań uzyskano dla dwóch scenariuszy symulujących rzeczywiste warunki operacji oka.
- (4) W części eksperymentalnej – testy praktyczne na 6-przegubowym manipulatorze laboratoryjnym: Projekt badanego układu sterowania został zaimplementowany na manipulatorze robotycznym. Co do sterowania i dokładności osiągnięcia wymaganych punktów opracowany sterownik okazał się konkurencyjny dla dwóch innych znanych rozwiązań.

Przedstawiony raport stanowi dowód na imponującą skuteczność doktoranta w prowadzeniu innowacyjnych prac badawczych i projektowych, w których uwzględnia się elementy teoretyczne i narzędzia inżynierskie niezbędne do modelowania i projektowania systemów robotycznych wspomagających chirurgię oka.

Uwzględniając wymienione wyżej oryginalne przyczynki naukowo-badawcze oraz fakt zaistnienia autora w licznych publikacjach, specjalistycznych dla szeroko rozumianej automatyki, elektroniki i elektrotechniki:

(IET Control Theory and Applications, IET/100 pkt; Int. J. of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Wiley/70 pkt (x2); J. of Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, IFAC/140 pkt; Int. J. of Robust and Nonlinear Control, Wiley/140 pkt; Int. J. of Automotive Technology, Springer/100 pkt; J. of Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems, Wiley/20 pkt; jak również: Int. J. of Control, Automation and Systems, Springer/100 pkt; J. of Automatic Control and Computer Science, Springer/20 pkt; Archives of Control Science, PAN/100 pkt; Asian Journal of Control, Wiley/70 pkt; Discrete Dynamics in Nature and Society, Hidavi/40 pkt),

uważam, że Pan Ali Soltani Sharif Abadi osiągnął cel rozprawy doktorskiej **z nadmiarem** i wykazał się (bezprecedensową na poziomie wdrożeniowo-teoretycznego doktoratu) wiedzą i umiejętnością rozwiązywania problemów naukowych w projektowaniu systemów robotycznych, które w szczególności stanowią podstawę współczesnej chirurgii oka.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Można stwierdzić, że doktorant osiągnął bardzo wysoki poziom umiejętności wykorzystywania teorii i technik zaczerpniętych z literatury oraz wnoszenia własnego wkładu badawczego, a także dużą umiejętność prezentowania uzyskanych wyników w sposób zwięzły i przejrzysty (w wersji udosконаłonej).

Przegląd literatury i bibliografia zostały dobrze napisane. Cały raport wystarczająco dokumentuje wkład doktoranta i uzyskane przez niego wyniki. Ogólnie rzecz biorąc, praca prezentuje się teraz bardzo wiarygodnie. Zewnętrzna struktura i redakcja pracy są poprawne. Zazwyczaj autor przedstawia przegląd niezbędnego tła i wprowadza wstęp. W obecnej wersji treść jest znacznie lepiej zrównoważona. Raport dotyczący badań symulacyjno-eksperymentalnych został znacznie rozszerzony. Poszczególne rozdziały merytoryczne i cała praca zostały odpowiednio podsumowane.

Kolejność rzeczy w poszczególnych rozdziałach jest dobrze ustrukturyzowana. Raport został starannie przygotowany w języku angielskim. Użyty język techniczny jest ogólnie zrozumiały – zwłaszcza teraz, po poprawkach autora. Długość zdań jest zazwyczaj dobrze dobrana. Akapity posiadają zazwyczaj akceptowalny rozmiar.

Główna część badawczo-laboratoryjna uległa zmianie pod względem objętości (ze 100 do obecnych 210 stron) i bardzo dobrze dokumentuje wykonaną pracę, osiągnięte wyniki oraz skuteczność proponowanego rozwiązania.

Ogólnie rzecz biorąc, omawiana rozprawa doktorska, dotycząca innowacyjnej dziedziny robotyzacji chirurgii oka, z perspektywą społecznie ważnych zastosowań, została przedstawiona w silnym kontekście techniczno-wdrożeniowym, a pod względem treści systemicznych prezentuje się bardzo dobrze oraz jest obficie udokumentowana świeżymi publikacjami naukowymi.

Podsumowanie pracy przedstawiono w zwięzły sposób. Otwarte problemy są teraz (słusznie) skupione na kwestiach technicznych istotnych dla rozważanego zastosowania medycznego. Nie jest też zaskakujące, że po tak dogłębnym i wyczerpującym badaniu propozycje dalszych badań wydają się mało ekscytujące.

6. Jakie są inne słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Wysoko oceniając merytoryczną zawartość rozprawy, poprzednio wskazałem na słabą jakość oryginalnego przekazu ambitnego doktoranta (posiadającego szerokie horyzonty naukowe), przypisując mu pośpiech i przesadną samodzielność. Choć intencje autora są czytelne, nie zawsze było wiadomo, do czego zmierza autor i dlaczego, a także jakie są argumenty za metodą prowadzenia dyskusji. Podczas lektury pracy uwidaczniały się też nieciągłości przekazu, niedopowiedzenia i niejasności oraz inne usterki techniczne.

W obszernej reakcji (którą generalnie akceptuję) doktorant odpowiedział na zarzuty i w dużej mierze zmodyfikował i rozszerzył rozprawę – pod względem materiału z teorii sterowania, w tym opóźnień komunikacyjnych, jakości zaprojektowanego systemu, terminologii i nomenklatury, a także struktury, stylu i sposobu prezentacji oraz literatury i wykorzystania cytowań. Dlatego poniżej ograniczam się do podania jedynie kilku przykładowych komentarzy.

Dokonane przez autora uzupełnienia i poprawki dobrze służą rozprawie, a użyty język opisu jest obecnie bardziej zrozumiały. Widać też teraz tylko bardzo drobne niedociągnięcia pod względem spójności i jakości opisu lub redundancji (takich jak „tuning can affect the performance”)..., jak również w zakresie gramatyki, użycia czasów i przedimków/rodzajników.

W mojej opinii część eksperymentalna dotycząca wybranych trzech scenariuszy testowanych w analizowanym badaniu jest obecnie nadmiernie rozbudowana. Wiele z przedstawionych analiz i wyników numerycznych i graficznych zasługuje co najwyżej na umieszczenie w załączniku do pracy (w ten sposób, w aktualnej wersji rozszerzono rozdziały 4 i 5 odpowiednio o około 65 i 34 strony). W świetle faktycznego przebiegu tej rozprawy takie zachowanie doktoranta jest oczywiście zupełnie zrozumiałe.

Mam nadzieję, że wszystkie przekazane uwagi pomogą autorowi w uzyskiwaniu lepszej jakości doniesień naukowych i dydaktycznych oraz publikacji podoktorskich z cennych prac naukowych i wdrożeniowych, przy których przygotowaniu warto zwracać szczególną uwagę na strukturę raportu, kompletność informacji, logiczne rozumowanie, poprawność stylistyczną, spójność matematyczną, jasność wypowiedzi i stosowanie innych dobrych praktyk.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Podsumowując, rozprawa dotyczy systemów robotycznych, w szczególności wyzwań związanych z manipulatorami używanymi przez chirurga podczas operacji oka. Kompleksowo zaprojektowany system opiera się m.in. na strategii sterowania trybem ślizgowym (SMC), estymatorze siły i obserwatorze stanu. Wyniki uzyskane podczas symulacji i testów eksperymentalnych zaprojektowanego systemu oraz przy dobrze dobranych scenariuszach działania wykazały poprawność rozwiązania i dostarczyły racjonalnych podstaw do poprawy wydajności istniejących robotów w chirurgii oka.

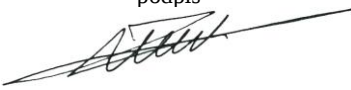
Wyniki pracy w postaci zweryfikowanego rozwiązania inżynierskiego opartego na zaawansowanych metodach sterowania mają duże znaczenie w dziedzinie nauk technicznych. Wymienione krytyczne uwagi redakcyjne i edytorskie nie wpływają na wysoką ocenę zakresu i oryginalnych osiągnięć naukowo-badawczych doktoranta, zawartych w recenzowanej rozprawie, oraz pozytywną ocenę tej pracy, która w pełni odpowiada wymaganiom naukowej rozprawy doktorskiej (jak również wypełnia kryteria projektu wdrożeniowego).

Rozległość zagadnienia oraz przeprowadzonych prac, liczba własnych publikacji na wysokim poziomie naukowym oraz rozwiązania techniczne zastosowane w proponowanym rozwiązaniu stanowią bardzo mocną stronę rozprawy doktorskiej Pana Alego Soltaniego Sharifa Abadiego nad robotem wspomagającym chirurga oka.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- (a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim,
- (b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- (c) spełniająca całkowicie wymagania,
- (d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,**
- (e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.



podpis

ZKowalczyk