

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski
 Wydział Inżynierii Mechanicznej
 Wojskowa Akademia Techniczna
 ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
 00-908 Warszawa
 Tel.: +48 261 839 140
 E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, dn. 19.09.2022 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Muchy
 pt. „*Opracowanie i badania robotycznego narzędzia laparoskopowego z siłowym sprzężeniem zwrotnym*”

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo (sygn.. RDIMe.512.30.2022) z Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej sygnowane przez Panią Przewodniczącą prof. dr hab. inż. EWE MAJCHRZAK i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. ŁUKASZA MUCHY pt. „*Opracowanie i badania robotycznego narzędzia laparoskopowego z siłowym sprzężeniem zwrotnym*”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. JANUSZ ŚLIWKA, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. KRZYSZTOF LIS.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, łącznie na 174 stronach maszynopisu formatu A4. Składa się ona z następujących rozdziałów: (1) Wstęp; (2) Cel i zakres pracy; (3) Badania wstępne sił wywieranych na narzędzie – założenia konstrukcyjne; (4) Koncepcja narzędzi; (5) Plan badań; (6) Badania symulacyjne; (7) Wykonanie prototypu efektora instrumentu chirurgicznego; (8) Badania eksperymentalne – budowa stanowiska pomiarowego; (9) Analiza uzyskanych wyników badań; (10) Testy z użyciem robota; (11) Podsumowanie i wnioski i dalsze kierunki badań oraz wykazu literatury (233 pozycje), spisu rysunków, spisu tabel, 10 załączników, uwag ogólnych/podziękowań oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

Inspiracją do podjętych badań było opracowanie innowacyjnego narzędzia chirurgicznego przeznaczonego dla robota chirurgicznego Robin Heart (robot, a właściwie rodzina robotów, tworzona w Polsce od roku 2000 przez zespół Pracowni Biocybernetyki Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze kierowany przez Zbigniewa Nawrata, który to jest pierwszym europejskim robotem kardiochirurgicznym wspomagającym operacje bezinwazyjne i składa się z modułów pozwalających na skonfigurowanie sprzętu do różnych operacji umożliwiając

wiarygodny pomiar siły wywieranej przez narzędzie podczas realizowanych funkcjonalności). Przyjęte do realizacji przez Doktoranta opracowanie narzędzia pozwala na przekazanie chirurgowi dodatkowych informacji z pola operacyjnego w postaci wartości siły zapewniając tym samym siłowe sprzężenie zwrotne podczas wykonywania operacji z użyciem robota Robin Heart i konsoli sterującej. Autor dla realizacji tego głównego celu zaplanował rozprawę doktorską wpisując w nią szereg celów szczegółowych, a które są zarazem odwzorowaniem treści zwartych w poszczególnych rozdziałach. I tak, wykonana została w pierwszym etapie bardzo dogłębna analiza literaturowa podjętego zagadnienia. Doktorant na tej podstawie zaproponował innowacyjny projekt narzędzia laparoskopowego z miniaturowymi czujnikami siły usytuowanymi w efektorze instrumentu i przeprowadził studium rozwiązań stosowanych obecnie w chirurgii wykorzystującej minimalnie inwazyjne narzędzia laparoskopowe. Na kolejnym etapie badawczym, bazując na informacjach zawartych w literaturze oraz własnych doświadczeniach, przeprowadził badania sił oddziaływujących na narzędzie podczas jego funkcjonowania, co pozwoliło na opracowanie konstrukcji narzędzia. Wykonany został projekt i konstrukcja narzędzia wyposażonego w dwa miniaturowe czujniki siły. Zaproponowana konstrukcja zakładała stworzenie specjalnego narzędzia dla robota chirurgicznego umożliwiającego pomiar sił wywieranych na część wykonawczą instrumentu laparoskopowego. Następnie Doktorant opracował plan badań nowej koncepcji instrumentu laparoskopowego. Badania zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap dotyczył badań symulacyjnych w celu określenia sił wywieranych na trzpień pomiarowy czujników siły usytuowanych w efektorze instrumentu. W drugim etapie Autor zrealizował badania doświadczalne mające na celu walidację opracowanego modelu symulacyjnego. W kolejnym kroku wykonane zostały badania symulacyjne pozwalające na określenie sił oddziaływujących na trzpień pomiarowy czujnika siły z uwzględnieniem silikonowej warstwy osłaniającej czujnik. Wszystkie opracowane modele i otrzymane wyniki posłużyły Doktorantowi do wykonania prototypu narzędzia oraz oryginalnego stanowiska testowego umożliwiającego sprawdzenie funkcjonalności działania poszczególnych podzespołów wykonanego instrumentarium. Samo stanowisko doświadczalne pozwoliło także na kalibrację czujników siły oraz weryfikację poprawności montażu. Finalny etap skupił się w dużej mierze na przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, które umożliwiły sprawdzenie poprawności wykonania instrumentu oraz potwierdził powtarzalność realizowanych pomiarów. Rozprawa kończy się dyskusją powstałych do tej pory prac nad innowacyjnym narzędziem laparoskopowym. Dodatkowo Doktorant nakreślił przyszłe kierunki działania dla dalszych prac mających na celu wdrożenie narzędzia.

Mgr inż. Łukasz Mucha jest autorem i współautorem 56 prezentacji naukowych, w których zostały przedstawiane wyniki prac naukowo-badawczych. Doktorant w bazie Scopus posiada zarejestrowanych 6 publikacji. Jest to publikacyjność na poziomie przekraczającym wymagania

stosownej ustawy przy składaniu rozprawy doktorskiej. Dane naukometryczne Pana mgr. inż. Łukasza Muchy według bazy Scopus to 11 cytowań z łącznym indeksem Hirscha wynoszącym 2 na dzień powstania recenzji. Należy jednak dodać i podkreślić, a także wyróżnić działalność wynalazczo-wdrożeniową Autora dysertacji, na którą składają się: 4 patenty zarejestrowane w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej (UP RP), 6 patentów zarejestrowanych w European Patent Office (EPO), 4 patenty przyznane przez United States Patent and Trademark Office (USPTO) oraz 3 przyznane wzory użytkowe przez UP RP.

3. Pytania merytoryczne oraz uwagi dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie:

- 1) W realizacji badań eksperymentalnych widoczna jest rozbieżność w zakresie liczby przeprowadzonych badań w poszczególnych testach. Czasami były to pomiary jednostkowe, a czasami powtarzano je nawet dziesięciokrotnie (np. test penetracji igłą). Z czego wynikało takie podejście? Jakie procedury statystyczne użyte zostały do obróbki i analizy wyników?
- 2) Autor opracował rozdział „4.2. Kinematyka narzędzia”. W opinii Recenzenta ta nazwa jest trochę mylna, gdyż w samej treści zawarte są także równania równowagi sił występujących w układzie szczęk efektora i są one analizowane dla poszczególnych wybranych położeń.
- 3) W rozdziale „6. Badania symulacyjne” Recenzent widzi następujące dyskusyjne kwestie:
 - a. Przyjęcie liniowego modelu konstytutywnego do opisu zachowania silikonu. Jakie badania i testy zadecydowały o takim sposobie modelowania, a nie jako materiału nieściśliwego?
 - b. W jaki sposób dobrano gęstości siatek dla poszczególnych elementów efektora mając na względzie realizację modelowego opisu zagadnienia kontaktu? W opinii Recenzenta w tym zakresie winno się przeprowadzić analizy pod kątem tzw. studium wrażliwości. Jest to szczególnie ważny aspekt w momencie, gdy stosuje się w opisach modelowych ciał wchodzących w kontakt różnego typu elementów skończonych. Zagadnienie kontaktu z punktu widzenia mechaniki jest problemem nieliniowym, a jednym z kluczowych parametrów w jego rozwiązaniu staje się dobór (oszacowanie) sztywności kontaktowej.
 - c. W realizacji numerycznej zagadnienia kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami czujnika Autor przyjął brak występowania zjawiska tarcia. Czym był

ten fakt uzasadniony? Czy prowadzono dodatkowe analizy, które uzasadniały takie podejście?

- 4) Autor decydując się wykonać prototyp urządzenia efektora przyjął technologię druku 3D. Brak jednak szerszych (dokładnych) informacji w tym zakresie mając na uwadze dokładność wymiarową wykonanych elementów oraz powtarzalność.
- 5) Doktorant w rozdziale ósmym zawarł formuły do wyznaczenia sił składowych w czujniku na oryginalnym opracowanym stanowisku badawczym. Czy są one wynikiem własnych badań i dociekań, czy może jednak zostały zaczerpnięte z literatury lub od producenta samych czujników?
- 6) Czym było spowodowane przyjęcie różnych funkcji aproksymacyjnych do opisu wyników eksperymentalnych i numerycznych? Co warunkowało takie ujęcie?
- 7) W opinii Recenzenta, przedstawione charakterystyki na rys. 141 i ich opis aproksymacyjny funkcją wykładniczą lub wielomianową wskazują, iż do opisu modelu konstytutywnego warstw silikonu winien być użyty opis jak dla materiału nieściśliwego, czyli z wykorzystaniem funkcji gęstości energii odkształcenia, a nie bazujący na prawie Hooke'a.
- 8) Na rys. 142 widać silne lokalne niestabilności w zakresie charakterystyki mierzonej wartości siły na czujniku S_A - odmiennie niż wartości uzyskane z analiz numerycznych. Co było przyczyną tych lokalnych zmienności? Czy może przyjęcie założeń modelowych nie wiązało się ze zbytnimi uproszczeniami (np. jakością siatki dyskretnej MES lub opisu konstytutywnego materiałów)?

Do uwag natury edycyjnej poprawiających interpretację wyników, jak też przyjętych założeń, Recenzent pragnie zaliczyć następujące elementy:

- 1) Na rys. 85 winien zostać dodany układ współrzędnych.
- 2) W opisie rys. 95 i 103 użyto słowo „odkształcenia”, a winno być napisane „deformacja”. Dodatkowo obie grafiki charakteryzuje się bardzo niską czytelnością.

Recenzent pragnie zauważyć, iż w dysertacji występują także inne drobne błędy edycyjne, ale one nie mają wpływu na jakość merytoryczną recenzowanej rozprawy.

Należy dodać, że zaprezentowana metodologia badawczo-wdrożeniowa wskazuje na potrzebę sprzężenia badań numerycznych z testami eksperymentalnymi oraz finalnymi testami. Przedłożone powyżej uwagi mają w dużej mierze charakter pytań (czasami wątpliwości), ale także wskazują potrzebę sprawdzenia innych metod lub udokładnienia pewnych procedur testowych wypracowanych na obecnym etapie, w tym badań numerycznych. Recenzent widzi w nich także

podstawę dla Doktoranta do wytyczenia i rozwijania nowych wątków udokładniających poszczególne fazy projektowo-badawcze.

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się przede wszystkim istotnym aspektem aplikacyjnym. W dysertacji Autor podjął się bardzo ważnego zagadnienia, które wynika z dynamicznego rozwoju technik małoinwazyjnych w chirurgii. Rozwój ten pozwala na wprowadzenie nowych metod leczenia skracając w ten sposób czas hospitalizacji, zmniejszając liczbę powikłań oraz poprawiając efekt kosmetyczny poprzez zmniejszenie wielkości blizn pooperacyjną. Stąd też za bardzo słuszne należy uznać m.in. rozwój nowoczesnych systemów operacji laparoskopowych poprzez ich wsparcie techniczne przy użyciu robotów –telemanipulatorów chirurgicznych. Opracowanie przez Autora nowoczesnego instrumentu chirurgicznego (dedykowanego dla robota Robin Heart) umożliwia wykonywanie operacji pozwalającej na realizację siłowego sprzężenia zwrotnego, a tym samym przyczynia się do zwiększenia precyzji manipulacji. Realizacja zabiegu przez lekarza-chirurga z wykorzystaniem narzędzia sensorycznego w robotycznej operacji chirurgicznej pozwala „przywrócić zmysł czucia”, a tym samym dostarcza dodatkowych informacji z miejsca operacji. Wszystko to wskazuje jak bardzo ważnego do rozwiązania problemu podjął się Doktorant.

Realizacja niniejszej rozprawy pozwoliła wypracować szereg unikalnych wniosków i oryginalnych elementów, do których Recenzent zalicza głównie:

- Opracowanie i wykonanie w ramach rozprawy narzędzia do operacji minimalnie inwazyjnych z powodzeniem współpracuje z robotem chirurgicznym Robin Heart umożliwiając efektywny pomiar sił w trakcie realizowanego zabiegu.
- Opracowanie modelu symulacyjnego końcówki laparoskopu (efektora), który pozwala określić m.in. wpływ położenia czujnika, rodzaj i grubość warstwy osłaniającej na wyniki pomiarów.
- Opracowanie stanowiska eksperymentalnego do weryfikacji czujników umożliwiającego zadawanie siły pod dowolnym kątem wokół stałego punktu (trzcienia pomiarowego czujnika) dającego możliwość weryfikacji wieloosiowych czujników siły poprzez wywarcie nacisku pod zadanym kątem i o zadanej wartości.
- Realizacja badań walidacyjnych (eksperymentalnych) opracowanego efektora, które zostały przeprowadzone z udziałem 5 osób na robocie Robin Heart i uzyskały wysoki poziom wiarygodności, a tym samym Doktorant potwierdził słuszność zastosowanej koncepcji dla narzędzia wyposażonego w dwa czujniki siły usytuowane w części

wykonawczej instrumentu chirurgicznego, dostarczające tym samym chirurgowi dodatkowych informacji z pola operacyjnego.

Badania i osiągnięte rezultaty przedstawione przez Pana mgr. inż. Łukasza Muchę wykazały, że istnieje możliwość wypracowania wiarygodnej ścieżki projektowej w opracowaniu sensorycznego urządzenia laparoskopowego rozszerzającego możliwości robota chirurgicznego Robin Heart. Autor niewątpliwie wykazał się umiejętnościami analitycznymi, projektowymi, prowadzenia badań symulacyjnych oraz przygotowania i przeprowadzenia eksperymentu badawczego. Za bardzo cenny należy także uznać fakt, że Autor już zaplanował dalsze etapy rozwoju opracowanego rozwiązania technologicznego. Niewątpliwie przełoży się to z pewnością na poszerzenie Jego osiągnięć publikacyjnych i wynalazczych, a co za tym idzie wpłynie bardzo korzystnie na rozwój tej części medycyny, która związana jest z operacjami chirurgicznymi.

Opracowany zakres prac i analiz pozwolił Doktorantowi osiągnąć postawiony cel badawczo-aplikacyjny dysertacji, czego najlepszym potwierdzeniem są zaprezentowane wyniki badawcze i uzyskane patenty świadczące o oryginalności wdrażanych pomysłów.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną Ustawę i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr. inż. ŁUKASZA MUCHY.

