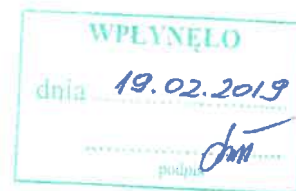


dr hab. inż. Adam G. Polak, prof. PWR
Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław

Wrocław, dnia 14 lutego 2019 r.



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Adriana Gorala
pt.: „Mobile optical tracking system in computer-assisted surgery”
(Mobilny lokalizator wizyjny w komputerowym wspomaganiu chirurgii)

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Józef Kozak

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję wykonano w odpowiedzi na uchwałę Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH z dnia 13 grudnia 2018 r. (pismo Dziekana Wydziału z 17 grudnia 2018 r.).

1. Rozwiązywany problem naukowy

Tematyka przedstawionej pracy doktorskiej dotyczy bezkontaktowego, komputerowego wspomaganie zabiegów chirurgicznych za pomocą mobilnego lokalizatora wizyjnego, niewymagającego stosowania markerów optycznych, a w szczególności wspomaganie zabiegu alloplastyki stawu biodrowego z wykorzystaniem systemu łączącego standardową kamerę wideo z kamerą głębi, wyposażonego w zaawansowane algorytmy przetwarzania obrazów. Tego typu zabiegi chirurgiczne należą do często wykonywanych, a precyzja umieszczenia implantu decyduje o ich efektywności i przyszłej jakości życia pacjenta. Motywacją badań Doktoranta były ograniczenia istniejących systemów komputerowego wspomaganie operacji ortopedycznych wykorzystujących przede wszystkim metody kontaktowe lub oparte na markerach optycznych. Z powyższego wynika, że prace badawcze w tym obszarze mają duże znaczenie praktyczne. **Rozwiązywany problem naukowy było opracowanie mobilnego lokalizatora narzędzi chirurgicznych stosowanych w alloplastyce biodra z wykorzystaniem kamery mierzącej czas propagacji światła (ToF) i zbadanie dokładności wyników uzyskiwanych za jego pomocą.** Tak postawiony problem ma charakter nowatorski, ponieważ obecnie nie ma systemów wspomaganie bazujących na zaproponowanej idei, a publikacje analizujące taką możliwość są bardzo nieliczne. Jest on właściwy dla pracy na stopień doktora w dziedzinie *nauk technicznych*, w dyscyplinie *biocybernetyka i inżynieria biomedyczna*.

Celem pracy było zmniejszenie stopnia skomplikowania zabiegów chirurgicznych wykorzystujących wspomaganie komputerowe i ograniczenie potrzebnej na to przestrzeni poprzez rezygnację z metod opartych na markerach optycznych i zastosowanie systemu mobilnego.

Teza pracy – typowy element rozpraw doktorskich, stanowiący oś badań mających na celu wykazanie prawdziwości nieoczywistej na początku hipotezy (lub hipotez) – nie została, niestety, sformułowana. Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych eksperymentów, mogłoby nią być np. stwierdzenie dotyczące wykazanego potencjału (choć jeszcze nie ostatecznej stosowalności) zaproponowanej metody z kamerą ToF. W mojej ocenie, brak tezy w rozprawie doktorskiej stanowi uchybienie w klasycznym sposobie planowania i prowadzenia badań naukowych.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca ma charakter badań stosowanych (inaczej – przemysłowych). Zawiera elementy z zakresu konstrukcji i oprogramowania elektronicznej aparatury biomedycznej, identyfikacji systemów, przetwarzania obrazów, badań eksperymentalnych oraz analizy ich wyników.

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Goral, obejmująca (poza elementami wstępnymi i końcowymi) 114 stron tekstu, składa się z 14 wyróżnionych części, w tym z 7 rozdziałów numerowanych.

We **Wstępie** Autor wprowadza czytelnika w problematykę pracy, formułuje jej cel oraz przedstawia zawartość i układ, co znacznie ułatwia dalszą analizę rozprawy. Wartościowym elementem **Wstępu** – jak wspomniano – byłoby sformułowanie i zamieszczenie w nim również *tezy pracy*.

Rozdział 1 poświęcony został ogólnemu opisowi komputerowego wspomaganie zabiegów operacyjnych, ze zwróceniem szczególnej uwagi na zagadnienia rejestracji i przetwarzania danych pozwalających na wspomaganie pracy chirurga. Wiele z zaprezentowanych tu metod zostało następnie wykorzystanych w warstwie programistycznej zbudowanego systemu.

Rozdział 2 i 3 szczegółowo przedstawiają problematykę chirurgicznej wymiany stanu biodrowego oraz podstawowe elementy komputerowego wspomaganie tego procesu. Na szczególne podkreślenie zasługuje głęboka i szeroka wiedza, którą dysponuje Doktorant w tym zakresie, w tym obejmująca zagadnienia czysto medyczne, oraz umiejętność systematycznego i jasnego jej przedstawienia. Rozdziały te stanowią bardzo cenną część pracy, dającą odpowiednie tło do dalszych rozważań i działań o charakterze technicznym.

Rozdział 4 zawiera omówienie podstawowych wymagań stawianych systemom komputerowego wspomaganie ortopedycznych zabiegów chirurgicznych, ze zwróceniem uwagi na zagadnienia dotyczące dokładności śledzenia położenia narzędzi chirurgicznych i metod jej oceny, uwzględniający dobrze opracowany przegląd stosowanych metod. Kończy się on specyfikacją wymagań wobec konstruowanego lokalizatora mobilnego.

Rozdział 5 (wraz z **Rozdz. 6 i 7**) prezentuje główny element oryginalnego osiągnięcia Doktoranta, jakim jest budowa i oprogramowanie optycznego lokalizatora narzędzi chirurgicznych, niewymagającego stosowania markerów. Opisana tu została zasada przestrzennego pomiaru odległości z wykorzystaniem kamery ToF i rekonstrukcji 3D obserwowanych powierzchni, kalibracja systemu oraz poszczególne elementy przetwarzania danych, w tym procedury detekcji narzędzi i określania ich pozycji. Ważną częścią rozdziału jest opis możliwości pomiaru dynamicznego, gdy zbudowany lokalizator znajduje się w ręce operatora.

Rozdziały 6 i 7 omawiają przeprowadzone eksperymenty weryfikujące działanie zbudowanego systemu w warunkach laboratoryjnych i zbliżonych do klinicznych (*post mortem* i z użyciem fantomu), wraz z analizą uzyskanej dokładności i dyskusją otrzymanych wyników. Pokazują one zalety i wady obecnego rozwiązania.

Rozprawę rozpoczynają *Streszczenia* w j. angielskim i polskim, *Podziękowania* i *Spis treści*, a kończą: *Podsumowanie*, *Bibliografia*, *Wykaz skrótów* oraz *Spisy rysunków i tabel*.

Praca napisana została w języku angielskim, ze znikomą liczbą błędów gramatycznych i dosyć licznymi drobnymi błędami językowymi (zaznaczonymi w tekście do wglądu Autora). Przed jej publikacją w części lub całości, powinna być przejrzana przez biegłego anglistę lub *native speaker*a. Tym niemniej należy stwierdzić, że jej treść jest w pełni komunikatywna i odpowiednio precyzyjna, poza Rozdz. 7.2, co zostanie poruszone w dalszej części recenzji. Układ pracy jest logiczny i dobrze odzwierciedla metodykę przeprowadzonych badań. Została ona zredagowana na wysokim poziomie edytorskim. Wielkim walorem dysertacji są rysunki ilustrujące jej treści, a zwłaszcza różnego rodzaju diagramy, które znacząco ułatwiają zrozumienie przedstawianych zagadnień. Wartościowe są też części kończące wiele rozdziałów, omawiające ograniczenia przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników. Natomiast wadą jest częsty brak odnośników do źródeł prezentowanych informacji, zwłaszcza w *Rozdz. 1, 2 i 5*, co zwłaszcza jest problematyczne w przypadku zależności matematycznych, zastosowanych metod i wielu rysunków (które zapewne nie były autorstwa Doktoranta).

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Analiza stanu wiedzy

Doktorant dokonał szerokiego rozeznania literaturowego w wielu obszarach powiązanych tematycznie z realizowaną pracą, obejmujących zarówno zagadnienia medyczne jak i techniczne. Zaowocowało to bogatym wykazem bibliograficznym zamieszczonym w dysertacji, obejmującym 134 pozycje, z których znakomita większość została opublikowana w ostatnich latach. Świadczy to o aktualności wiedzy wykorzystanej przy realizacji pracy. Biorąc pod uwagę ścisłą tematykę rozprawy (zastosowanie kamery ToF we wspomaganiu zabiegów alloplastyki stawu biodrowego), warto było też wykorzystać jeden z nowszych artykułów Putzera i in. (*Biocyb. Biomed. Eng.*, 2016, 36, 182-192).

Na szczególne podkreślenie zasługuje szeroka wiedza zaprezentowana w pracy, a obejmująca wiele aspektów, począwszy od anatomii stawu biodrowego, przez medyczne podstawy zabiegów ortopedycznych i ich wspomaganie komputerowe, aż do aspektów naukowo-technicznych, jak metody optoelektronicznej rejestracji obrazów czy techniki: modelowania matematycznego, przetwarzania obrazów, optymalizacji, ekstrakcji cech, klasyfikacji, filtracji Kalmana. Pozyskana wiedza pozwoliła mgr. inż. A. Goralowi na identyfikację z jednej strony istniejących potrzeb medycznych, a z drugiej pojawiających się możliwości technicznych w obszarze tematyki pracy.

Metodyka pracy

Metodyka pracy jest w pełni prawidłowa. Obejmuje opis problemu, rozeznanie aktualnej wiedzy w obszarze tematycznym, przedstawienie stosowanych metod, wybór rozwiązania problemu, konstrukcję i oprogramowanie systemu pomiarowego, jego eksperymentalne przebadanie, analizę uzyskanych wyników i końcowe wnioski.

Ponownie, na uznanie zasługuje umiejętność poruszania się Kandydata w wielu obszarach nauki i techniki, których znajomość i wykorzystanie były konieczne do właściwej realizacji pracy, a przede wszystkim w zakresie metod i procedur przetwarzania wielowymiarowych danych pomiarowych pozyskiwanych za pomocą kamer. Pozwoliło to na sformułowanie odpowiednich wytycznych i konstrukcję zaawansowanego technicznie urządzenia. Kolejnym wartościowym elementem pracy jest opracowanie zautomatyzowanego stanowiska przeznaczonego do badań laboratoryjnych

zbudowanego lokalizatora oraz przeprowadzenie eksperymentów w warunkach laboratoryjnych jak i zbliżonych do klinicznych.

Pewnym niedociągnięciem jest natomiast niewystarczające przedstawienie informacji, poza faktem użycia bibliotek środowisk *OpenCV* i *Matlab*, dotyczących algorytmicznej implementacji zastosowanych metod: w jakim języku były one pisane (C++, Python czy np. Java), dla jakiego systemu operacyjnego, które konkretnie gotowe procedury wykorzystano, czy pisane były własne, istotne fragmenty kodu, ile wynosił czas przetwarzania danych itp.

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego

Postawiony problem naukowy – opracowanie mobilnego lokalizatora narzędzi chirurgicznych stosowanych w alloplastyce biodra z wykorzystaniem m.in. kamery mierzącej czas propagacji światła (ToF) i zbadanie dokładności wyników uzyskiwanych za jego pomocą – jest dobrze zidentyfikowanym zadaniem z obszaru *inżynierii biomedycznej*. Trafność wyboru problematyki wynika przede wszystkim z istoty problemu, istniejącego zapotrzebowania oraz faktu, iż obecnie stosowane systemy wspomaganie zabiegów chirurgicznych są kontaktowe lub wymagają stosowania markerów, a w szczególności nie wykorzystują jednej z nowszych i nadal rozwijanych technologii, jaką są kamery ToF.

Na tym tle widoczna jest oryginalności rozwiązania zaproponowanego przez Doktoranta, która koncentruje się przede wszystkim w następujących aspektach:

- i) zaproponowanie koncepcji połączenia informacji uzyskiwanych ze standardowej kamery wideo i kamery ToF w celu rekonstrukcji powierzchni 3D, a na tej podstawie wykrywania i określania położenia narzędzi chirurgicznych;**
- ii) skonstruowanie mobilnego lokalizatora zgodnie ze sformułowanymi wymaganiami w formie pierwszego prototypu;**
- iii) opracowanie możliwości pomiaru dynamicznego z mobilnym lokalizatorem trzymany w ręce przez operatora;**
- iv) zaplanowanie i przeprowadzenie dużej liczby eksperymentów na opracowanym stanowisku laboratoryjnym i w warunkach zbliżonych do klinicznych;**
- v) analiza uzyskanych wyników eksperymentalnych pod kątem określenia dokładności pomiarów i ich jakości w porównaniu ze stawianymi wymaganiami.**

Podsumowując, opracowana przez Kandydata optoelektroniczna metoda wykrywania i określania położenia narzędzi chirurgicznych bez stosowania markerów ma charakter w pełni oryginalny. Ponadto, oryginalność wkładu w dyscyplinę *biocybernetyki i inżynierii biomedycznej* dokumentują publikacje, których Doktorant jest współautorem: 1 artykuł w czasopiśmie z JCR, 1 w innym czasopiśmie międzynarodowym i 6 referatów na konferencjach międzynarodowych.

Pomimo innowacyjnej koncepcji oraz zastosowania zaawansowanych technologii i technik, uzyskane wyniki, zwłaszcza te w badaniach *post mortem* (najbardziej przypominających warunki kliniczne), cechują się mniejszą dokładnością, niż można było się spodziewać. Prowadzi to do wniosku, wyrażonego również przez Autora, że opracowane urządzenie w aktualnej wersji nie jest jeszcze odpowiednie do zastosowania klinicznego. Doktorant podjął próbę przeanalizowania przyczyn uzyskanego poziomu dokładności, scharakteryzował niektóre z nich i zaproponował kierunki dalszych prac, w tym połączenie kamery ToF z innymi technikami, jak nawigacja ultradźwiękowa. Zdaniem

recenzenta, istnieją też dalsze możliwości zwiększenia dokładności związane ze sposobem przetwarzania danych.

4. Uwagi krytyczne, pytania do Kandydata i zagadnienia do dyskusji

Dysertacja doktorska mgr inż. Adriana Gorala wymaga kilku dodatkowych komentarzy. Poniżej zamieszczam najważniejsze z nich.

- 1) Określenie odległości za pomocą kamery ToF wymaga wyznaczenia przesunięcia fazowego φ (i przy okazji amplitudy a) – wzory (5.5), (5.6). W pracy opisano metodę estymacji tych parametrów na podstawie czterech pomiarów (5.4) (bez cytowania źródła). Z drugiej strony oczywistym jest, że można byłoby wykorzystać tylko dwa, np. $\varphi = \arctan(A_1/A_0)$. Proszę o wyjaśnienie zastosowanego podejścia jak i o ustosunkowanie się do zasadności użycia jeszcze większej liczby próbek podczas estymacji φ . Ponadto, biorąc pod uwagę znaki w (5.4), w równaniu na φ w (5.5) powinien pojawić się minus przed \arctan .
- 2) W opisie użytej kamery ToF (Rozdz. 5.2) nie podano częstotliwości modulacji. Ile ona wynosiła? Jaka wynika z niej maksymalna odległość obiektu od kamery?
- 3) W Rozdz. 1.3.3 omówiono metody optymalizacji w przestrzeni L_2 , natomiast we wzorze (5.18) na minimalizowany funkcjonał użyto metryki w L_1 . Czy rzeczywiście rozwiązywano taki problem optymalizacyjny? Jeżeli tak – to jaką metodą?
- 4) Z eksperymentów określających systematyczny błąd pomiaru odległości (Rozdz. 5.3.4) wynika, że dochodził on do 4 mm. Czy rzeczywiście wolno było go pominąć? Jak (i o ile) można byłoby zwiększyć dokładność systemu uwzględniając charakterystykę z Rys. 5.7? Podobnie, jako metodę odniesienia użyto pomiary wykonywane systemem *Polaris Spectra*. Jaka była jego dokładność? – ma to znaczenie przy analizach dokładności proponowanej metody.
- 5) Przy opisie zastosowanego filtra Kalmana w pomiarach dynamicznych pominięto informacje o macierzach kowariancji szumu procesowego i pomiarowego. Jaki mają one wpływ na wynik estymacji i jak dobrano ich parametry?
- 6) W Rozdz. 6 i 7, podczas analizy dokładności pomiarów z wykorzystaniem metody odniesienia, nie zastosowano wykresów Blanda-Altmana, które typowo używa się w tego typu analizach.
- 7) Doktorant prawidłowo zauważył, że wyniki działania procedur przetwarzających dane pomiarowe zależą od ich wewnętrznych parametrów i metodą „prób i błędów” postarał się zidentyfikować najważniejsze z nich, a następnie zoptymalizować właściwe procedury. Istnieją jednak znane, algorytmiczne metody optymalizacji wielowymiarowej, które stosuje się w tego typu sytuacjach. W czasie obrony warto byłoby krótko przedstawić wybrane z nich.
- 8) W Rozdz. 7.2 dotyczącym eksperymentów z fantomem, w tekście i opisie rysunków pojawiają się nazwy kilku narzędzi pomiarowych, jak „tested prototype”, „reference tracking system”, „navigated ultrasound system”, czy „navigated pointer”. Ostatni z nich nie został nigdzie szczegółowo opisany. Być może niektórych terminów używano zamiennie, ale ostatecznie ta część pracy pozostaje niejasna. Proszę o wyjaśnienie, które narzędzia były ostatecznie wykorzystane i testowane, i jakie miało to znaczenie dla całej pracy.

5. Wnioski końcowe

Zawartość dysertacji pokazuje, że praca została wykonana w obszarze dyscypliny **biocybernetyka i inżynieria biomedyczna**, a jej cel został osiągnięty. W pracy nie sformułowano jawnie hipotezy badawczej. Przyjęta metodyka, zakres prac oraz uzyskane wyniki świadczą o pracowitości, wielkim zaangażowaniu, kreatywności i umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych przez Doktoranta.

Biorąc pod uwagę powyżej sformułowaną ocenę dysertacji, wykazującą oryginalność rozwiązania postawionego problemu naukowego jak i zawierającą uwagi krytyczne oraz problemy warte publicznego przedyskutowania, uważam, że praca doktorska pt. *„Mobile optical tracking system in computer-assisted surgery”* spełnia wymagania, jakie stawia rozprawom doktorskim *Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (z późniejszymi zmianami), w związku z czym **stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Adriana Góra do publicznej obrony przedłożonej pracy.**

