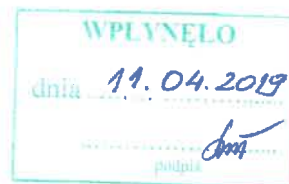


prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński
Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny
Instytut Automatyki, Robotyki i Inżynierii Informatycznej



Poznań, 28 lutego 2019 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I
INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
AKADEMII GÓRNICZO HUTNICZEJ W KRAKOWIE

Tytuł rozprawy: **Mobile optical tracking system in computer-assisted surgery**
(Mobiny lokalizator wizyjny w komputerowym wspomaganie chirurgii).

Autor rozprawy: **mgr inż. Adrian Goral**

1. Obszar problemowy rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest nowa metoda pomiaru orientacji narzędzi chirurgicznych przy użyciu mobilnego, wizyjnego systemu śledzącego, złożonego z klasycznej, cyfrowej kamery optycznej sztywno połączonej z kamerą wyznaczającą głębokość punktów w polu widzenia (ToF camera – Time of Flight camera) w zastosowaniu do wspomaganie nawigacji śródoperacyjnej w chirurgii. W szczególności badania dotyczą wspomaganie operacji chirurgicznych wszczepiania endoprotezy stawu biodrowego, a przeznaczeniem systemu wizyjnego jest śledzenie położenia i orientacji wybranych narzędzi chirurgicznych celem kontroli poprawności kątów osadzenia protezy w kości udowej i miednicy. Ściśle biorąc, przedmiotem analizy przedstawionej w rozprawie jest naprowadzana za pośrednictwem systemu zaproponowanego przez Autora implantacja komponentu panewkowego w zabiegu alloplastyki stawu biodrowego, gdzie parametrami kontrolnymi wyniku operacji są kąty jakie oś osadzonej panewki tworzy z płaszczyznami anatomicznymi człowieka. Należy w tym miejscu podkreślić, że zdecydowana większość operacji tego typu jest nadal wykonywana bez komputerowego wspomaganie nawigacji śródoperacyjnej m.in. z powodu niedogodności związanych ze stosowaniem matryc markerowych w polu operacyjnym. Eliminacja markerów poprzez pasywne, wizyjne śledzenie relacji przestrzennych pomiędzy narzędziami chirurgicznymi a obiektem operacji wydaje się na pierwszy rzut oka krokiem we właściwym kierunku. Należy jednak przy takim podejściu wykazać, że uzyskiwane tą metodą dane pomiarowe

charakteryzują się akceptowalną wg standardów dokładnością oraz rozwiązać liczne problemy związane z ograniczeniami widoczności pola operacyjnego wskutek przesłoneń.

Istotną cechą zaproponowanego systemu jest możliwość swobodnego przemieszczania przyrządu pomiarowego względem obszaru śledzenia w trakcie operacji oraz wykorzystanie kombinacji fotometrycznych i geometrycznych danych pomiarowych do rozpoznania i estymacji orientacji przestrzennej narzędzi chirurgicznych stosowanych w tego typu operacjach. Swoboda przemieszczania przyrządu, jego stosunkowo niewielkie rozmiary, częściowo pozwalają przezwyciężyć problemy wynikające z przesłaniania pola operacji przez przeprowadzający ją zespół.

Istotą pomysłu Autora jest odejście od współcześnie stosowanych w wizyjnej nawigacji śródoperacyjnej metod optycznych opartych o matryce markerów mocowanych na sztywno do narzędzi chirurgicznych i do kości pacjenta (co stanowi poważną niedogodność) na rzecz dopasowywania przestrzennego modelu narzędzia do chmury punktów uzyskanej przy użyciu zaproponowanego przyrządu śledzącego. Taka możliwość pojawiła się stosunkowo niedawno wraz z pojawieniem się kamer ToF, o wydawaloby się wystarczającej z punktu widzenia rozpatrywanej aplikacji rozdzielczości przestrzennej.

W rozprawie przedstawiono sposób kalibracji przyrządu, związki pomiędzy poszczególnymi układami współrzędnych odniesienia oraz szczegółową analizę metrologiczną proponowanej metody wspomaganie nawigacji przeprowadzoną w oparciu o szereg eksperymentów w laboratorium oraz w sali operacyjnej (w tym ostatnim przypadku - eksperymentów na fantomie i zwłokach). Eksperymenty miały za zadanie zweryfikowanie dokładności metody w aspekcie statycznym (w laboratoryjnym, powtarzalnym eksperymencie) i dynamicznym (w warunkach symulujących realia operacji, z użyciem fantomu oraz zwłok).

2. Ocena merytoryczna rozprawy.

W tym punkcie dokonam oceny następujących elementów rozprawy: oceny przedmiotowego stanu badań (state of art.) dokonanej przez Autora, przyjętych założeń proponowanej metody, przyjętej metodologii badań, proponowanych sposobów redukcji zakłóceń danych pomiarowych, a także stopnia realizacji celów pracy.

Specyficzną cechą recenzowanej rozprawy jest brak jawnie wyrażonej tezy badawczej, która podlegałaby w dalszej części weryfikacji. W miejsce klasycznej tezy, Autor proponuje nową metodę pozyskiwania danych istotnych z punktu widzenia celu wybranej operacji chirurgii ortopedycznej, w sposób odbiegający od metod dotychczas stosowanych w komputerowo-wspomaganych systemach nawigacji śródoperacyjnej. *A priori* metoda ta wydaje się charakteryzować brakiem szeregu

niedogodności występujących w znanych systemach nawigacji chirurgicznej. Jej innowacyjność wynika z zastosowania w systemie kamery ToF w tandemie z kamerą optyczną wysokiej rozdzielczości i przejścia na pasywną obserwację wizyjną pola operacji. Pozostaje zatem wykazać, że metoda pozwala uzyskać wystarczająco dokładne wyniki pomiarowe, zgodnie ze standardowymi wymaganiami stawianymi rozważanej procedurze medycznej. Wybór operacji wszczepienia panewki endoprotezy biodra jako przedmiotu badań i pola walidacji proponowanej metody nawigacji śródoperacyjnej jest uzasadniony ze względu na jej powszechny charakter, istniejące doświadczenia związane z dotychczasowym stosowaniem komputerowo wspomaganą nawigacji opartej na innych podejściach oraz ze względu na szczególne cechy obiektu operowanego (sztywność struktur kostnych, możliwość unieruchomienia pacjenta). Ewaluacja zaproponowanej, innowacyjnej metody jest zatem zasadniczym przedmiotem recenzowanej rozprawy, a sformułowane w jej wyniku wnioski odnośnie jej ograniczeń, nawet jeśli negatywne, to mają istotne znaczenie dla wskazania kierunków dalszych prac, prowadzących do ewentualnego wykorzystania opracowanego przyrządu i zaproponowanej metody w praktyce medycznej. Wobec powyższego można przedstawioną rozprawę uznać za dysertację doktorską pomimo braku jawnej tezy.

Rozprawę można podzielić na dwie części. Rozdziały 1- 4 stanowią preliminaria właściwej rozprawy i nie zawierają oryginalnych elementów. Zwięzły przegląd współczesnych systemów komputerowego wspomaganie chirurgii przedstawiony w rozdziale 1 rozprawy cechuje się aktualnością. Autor opisał ewolucję tych systemów od ich pojawienia się w końcu lat 80-tych XX w. W szczególności opisał postęp, który dokonał się w pierwszej dekadzie XXI w. w zakresie wspomaganie nawigacji w interwencjach ortopedycznych, prowadząc do metod nawigacji nie wymagających przestrzennego, śródoperacyjnego zobrazowania anatomii pacjenta oraz do tzw. semi-aktywnych systemów wspomaganie chirurga. Autor przedstawił taksonomię metod komputerowego wspomaganie chirurgii z podziałem na aktywne, semi-aktywne, pasywne, robotyczne, dopasowane do pacjenta, mechanicznie naprowadzane oraz nawigacyjne (a te, na wymagające, albo nie wymagające zobrazowania 3D). W przedstawionym ogólnym *organigramie* operacji wspomaganie komputerowo Autor podkreślił znaczenie techniki pomiarowej użytej do śledzenia śródoperacyjnego narzędzi chirurgicznych, a także rolę wybranej metody dopasowania pozy modelowego narzędzia do sytuacji śródoperacyjnej (obrazu pola operacyjnego). Te elementy proponowanej koncepcji lokalizatora są bowiem zasadniczym przedmiotem rozprawy.

W kolejnym rozdziale zwięzle i elegancko omówiono zagadnienie rejestracji (dopasowania zmiennie-aspektowych obrazów) metodą geometryczną w oparciu o punkty kontrolne. Przedstawiono teorię rozszerzonej, liniowej transformacji dopasowującej, z uwzględnieniem niekompatybilności skali obrazów dopasowywanych oraz zniekształceń skośnych i perspektywicznych akwizycji.

Przedstawiono metodę wyznaczania parametrów operatora transformacji w postaci jawnej oraz w wyniku optymalizacji (minimalizującej sumę kwadratów odległości między odpowiadającymi sobie punktami z obrazów dopasowywanych) metodą iteracyjną Levenberga-Marquardta. Szczegółowo przedyskutowano uwarunkowania podejścia do lokalizacji obiektu w polu widzenia polegającego na rozpoznaniu, a następnie dopasowaniu obiektu do modelu (narzędzia), wybierając stosunkowo nowy sposób deskrypcji cech punktowych w postaci tzw. zorientowanych punktów oraz schemat RANSAC ograniczający liczbę testowanych próbek (porównywanych par cech). Celem redukcji błędów stochastycznych zaproponowano użycie procedury optymalizacyjnej ICT (Iterative Closest Point). Podsumowując, rozdział 1 stanowi zwięzły opis podstaw matematycznych zastosowanych w dalszej części algorytmów przetwarzania danych pomiarowych uzyskanych z obrazów. Wybór reprezentacji oraz algorytmów przetwarzania przestrzennych danych pomiarowych jest prawidłowy i odpowiada aktualnemu stanowi wiedzy w tym przedmiocie. Rozdział 1 zamyka krótki, usystematyzowany przegląd interoperacyjnych technik pomiarowych stosowanych współcześnie.

W rozdziale 2 zawarto podstawowe informacje odnoszące się do operacji wszczepienia endoprotezy stawu biodrowego. Opisano anatomię stawu biodrowego i przedstawiono charakterystyki geometryczne w anatomicznym układzie współrzędnych (w tym zakresy ruchu). Przedstawiono przyczyny degeneracji stawu i wynikające z tego rekomendacje kliniczne, wzbogacając obraz o tło demograficzne (dane statystyczne odnoszące się do poszczególnych krajów). Opisano w uproszczony sposób budowę endoprotezy stawu biodrowego. W dalszej części scharakteryzowano procedurę operacji stawu biodrowego dla trzech stosowanych sposobów dojścia do stawu: przedniego (*anterior*), bocznego (*lateral*) i tylnego (*posteror*), przy ułożeniu pacjenta odpowiednio: na plecach i na boku. Ma to znaczenie dla proponowanej w rozprawie metody lokalizacji narzędzi chirurgicznych, gdyż skutkuje swoistymi ograniczeniami dostępności dla przyrządu pomiarowego (lokalizatora), w zależności od wariantu operacji. Następnie przedstawiono scenariusz operacji wraz z opisem stosowanych narzędzi chirurgicznych, a konkretnie rozwiertaka chirurgicznego (*reamer*) i impaktora. W dalszej części Autor scharakteryzował rezultaty operacji wszczepienia endoprotezy z punktu widzenia oceny klinicznej i biomechanicznej, aby podkreślić znaczenie prawidłowego pomiaru orientacji osi współpracujących części protezy względem miednicy oraz prawidłowej lokalizacji środka obrotu przegubu protezy. Omówił kąty wykorzystywane do oceny prawidłowości implantacji panewki (kąty *anteversion* i *inclination*) oraz trzonu endoprotezy (kąta *antetorsion*), przy czym zwrócił uwagę na różnice w definicji tych kątów w rozumieniu anatomicznym, radiologicznym i śródoperacyjnym. Przedstawiając dane na temat komplikacji pooperacyjnych podkreślono konsekwencje błędnego wzajemnego zorientowania osi współpracujących elementów protezy w wyniku nieudanej operacji, skutkujące traumą,

ograniczeniem zakresu ruchu kończyny, szybszym zużyciem endoprotezy, a nawet koniecznością przeprowadzenia ponownej operacji korekcyjnej. Autor uwzględnił również wpływ zmian degeneracyjnych układu kostno-szkieletowego związanych ze starzeniem się pacjenta, na wartości kątów kontrolnych implantacji endoprotezy. Rozdział 2 stanowi zwarte kompendium wiedzy na temat ogólnego przebiegu i skutków operacji wszczepienia endoprotezy stawu biodrowego. Świadczy o znajomości realiów medycznych przez Autora dysertacji oraz uzasadnia motywy i sensowność wyboru zaproponowanej metody pomiaru parametrów kontrolnych.

Rozdział 3 stanowi szczegółową dyskusję czynników wpływających na stosowalność i skuteczność zaproponowanej metody śródoperacyjnej lokalizacji konkretnych narzędzi chirurgicznych na tle szczegółowego scenariusza operacji obejmującego fazę planowania, wykonywania i walidacji rezultatów operacji wszczepienia endoprotezy stawu biodrowego. Autor rozróżnia pasywne (aktualnie dominujące) systemy nawigacyjne, wspomagające komputerowo operacje wszczepiania protezy stawu biodrowego oraz tzw. alternatywne systemy naprowadzające. Dyskusja odnosi się do specyfiki różnych, aktualnie stosowanych systemów CAS, związanych z nimi źródeł błędów oraz ich immanentnych ograniczeń.

Ewolucja pasywnych systemów nawigacyjnych przebiega w kierunku stopniowego oferowania kompaktowych i przenośnych wersji, integrujących funkcje systemu wspomagającego nawigację z nowoczesnymi instrumentami chirurgicznymi. Tej tendencji zdaje się odpowiadać koncepcja przyrządu zaproponowanego przez Autora rozprawy. Ważnym elementem proponowanej metody pomiaru jest odrzucenie markerów mocowanych do układu kostno-szkieletowego i instrumentów chirurgicznych, co upraszcza i skraca interwencję chirurgiczną. Istotne dla nawigacji proponowaną metodą jest określenie (kalibracja) relacji przestrzennych pomiędzy układami współrzędnych odniesienia związanymi z panewką, kością udową oraz ciałem pacjenta np. w ułożeniu bocznym. Autor przeprowadza dyskusję różnorodnych definicji tych układów oraz postępowanie przedoperacyjne i śródoperacyjne mające na celu wyznaczenie położenia anatomicznych punktów referencyjnych (landmarków). Natomiast w trakcie samej operacji, szczególne znaczenie mają wzajemne relacje dynamiczne pomiędzy wymienionymi układami odniesienia wynikające ze śledzenia instrumentów.

Ograniczenia zastosowań komputerowych systemów nawigacyjnych w chirurgii mogą wynikać z patologicznych zmian anatomicznych konkretnego pacjenta (np. zniekształceń geometrii układu kostno-szkieletowego), bolesności testów kinematycznych, degeneracji organizmu związanej np. z wiekiem. Zmiany te mogą uniemożliwiać poprawne zidentyfikowanie punktów odniesienia oraz ograniczeń kinematycznych. Należy wziąć pod uwagę również inne czynniki hamujące masowe stosowanie CAS w praktyce takie jak wydłużenie czasu operowania przez dodatkowe czynności (np.

związane z mocowaniem i kalibracją systemu markerów), rozpraszenie uwagi chirurga pomiędzy ekranem nawigacyjnym i polem operacyjnym, czy koszt dodatkowego wyposażenia sali operacyjnej. Postulowana od pewnego czasu indywidualizacja zabiegów implantacji endoprotezy ze względu na szczególne cechy pacjenta jest uwarunkowana dostępnością narzędzi pozwalających zmierzyć po-zabiegowe parametry kontrolne. Proponowana w rozprawie koncepcja pośredniego pomiaru hipotetycznie pozwala przezwyciężyć w/w bariery z racji wyeliminowania markerów i ekranu nawigacyjnego oraz niskiego kosztu proponowanego, mobilnego lokalizatora.

Rozdział 4 poświęcono charakterystyce szczegółowych wymagań stawianych systemowi nawigacji w przypadku operacji wszczepienia endoprotezy stawu biodrowego. Kluczowe są wymagania odnośnie dokładności zarówno całego systemu jaki i jego poszczególnych elementów. Rezultaty klinicznej oceny dokładności każdej nowej metody nawigacji są jednak utrudnione z uwagi na mało liczny zbiór przypadków (operacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danej metody). Jej dokładność może być jednak ewaluowana poprzez porównanie z dokładnością innych metod naprowadzania narzędzi chirurgicznych. Dokładność metody pomiaru jest oceniana na podstawie błędów, czyli różnic pomiędzy wynikiem pomiaru uzyskanego ewaluowaną metodą, a wynikiem oczekiwanym. Dotyczy to błędów wymiarowania (wyznaczania odległości) oraz błędów kątowych (błędów orientacji odpowiednich osi). Błędy poszczególnych modułów systemu oraz poszczególnych etapów operacji kumulują się wskutek ich propagacji. W systemach pasywnych dominujące błędy generuje operujący. Dokładność każdego etapowego pomiaru charakteryzuje łącznie trafność i precyzja. Precyzja (charakterystyka stochastyczna) dotyczy każdego wyniku pomiaru uzyskanego ewaluowaną metodą, gdy trafność (inaczej obciążenie, błąd systematyczny) oceniana jest przez odniesienie do wyniku uzyskanego metodą referencyjną. Autor przytacza również alternatywne miary dokładności wywodzące się z zarządzania jakością wyrobów, w postaci heurystycznych tzw. wskaźników wydolności. Są one bardziej adekwatne, gdy cel operacji (dopuszczalny wynik pomiaru parametru kontrolnego) jest zdefiniowany przedziałowo, a to najczęściej ma miejsce w przypadku rekomendacji medycznych. W rozprawie, za podstawę oceny dokładności proponowanej metody przyjęto błąd orientacji osi wszczepianej panewki mierzony przy pomocy dwóch kątów: *anteversion angle* i *inclination angle*. Tym samym analiza ma charakter częściowy.

W celu porównania opracowanego lokalizatora z układami naprowadzania innych systemów CAS, na podstawie literatury przyjęto jednakowe ograniczenia dopuszczalnego błędu metody pomiaru obu kątów na poziomie ± 5 deg, co odpowiada wartości maksymalnej absolutnego błędu orientacji osi na poziomie 3.6 deg oraz określono wartości graniczne kątów zapewniające przewagę

tej metody nad systemami bez wspomaganie nawigacji. Określono również wartości progowe wskaźników wydolności gwarantujące utrzymanie statystycznej kontroli nad błędami metody.

Druga część rozprawy, składająca się z rozdziałów 5-7 i podsumowania, stanowi rdzeń rozprawy i odnosi się do dziedziny nauk technicznych, w szczególności mieści się w obrębie dyscypliny naukowej *inżynieria biomedyczna*. W rozdziale 5 omówiono szczegóły techniczne metody oraz budowę przyrządu pomiarowego. Podstawą śledzenia instrumentów chirurgicznych w trakcie operacji jest ich kształt przestrzenny i wygląd. Dane na ich temat dostarczają odpowiednio kamera ToF i kamera optyczna sztywno połączone i skalibrowane we wspólnym układzie współrzędnych. Śledzenie instrumentu polega na wyekstrahowaniu go z obrazu w sekwencji 3D, a następnie na wykonywaniu dopasowania reprezentującej go chmury punktów do modelu 3D narzędzia, celem określenia jego pozycji i orientacji w referencyjnym układzie współrzędnych. Podkreślić należy, że akwizycja sekwencji obrazów 3D/2D jest w tym przypadku prowadzona przy użyciu urządzenia mobilnego, co podnosi stopień trudności zadania. Proces ten ma charakter dynamiczny i jest nadal przedmiotem badań w robotyce, w odniesieniu do różnorodnych obiektów, scen i uwarunkowań dynamicznych. Z tego punktu widzenia rozprawa wpisuje się w aktualny nurt badań nad przestrzennymi (3D) systemami wizyjnymi. Autor przedstawił zasadę pomiarów odległości do powierzchni nieprzezroczystych obiektów na scenie, wykonywanych przez kamerę ToF z ciągłą modulacją emitowanej fali NIR. Wyniki pomiarów podlegają korekcie zniekształceń odwzorowania perspektywicznego i przyjmują postać zorganizowanych chmur punktów, określających ewolucję przestrzennego kształtu widzialnej powierzchni obiektu lub postać tzw. mapy głębi. Istotną cechą jest to, że chmury punktów mogą być generowane z częstotliwością właściwą dla sekwencji video, a więc ToF nadaje się do śledzenia obiektów na umiarkowanie dynamicznej scenie. Sama zasada działania takiej kamery silnie ogranicza zakres mierzonych odległości. Kamera ToF jest również wrażliwa na zakłócenia fotometryczne i geometryczne w punktach skanowanych powierzchni odbijających oraz na efekty odbić wtórnych i rozpraszania fal. Zatem szczególnie cenną część rozprawy stanowi dokonana przez Autora staranna analiza przyczyn błędów systematycznych, losowych i artefaktowych pomiaru odległości przy użyciu kamery ToF. Niekorzystną cechą użytej kamery ToF jest jej stosunkowo niewielka rozdzielczość obrazowa (224x171) skutkująca wysokim udziałem szumu kwantyzacji w wynikach pomiarów. W dalszej części Autor przedstawił metodę kalibracji systemu wizyjnego, przekształcającej dane obrazowe w dane geometryczne w wybranym lokalnym układzie współrzędnych. Wykorzystał w tym celu znany algorytm Bougueta. Przy kalibracji analizowanego lokalizatora (określającej odwzorowania wyników pomiarowych kamery ToF na wyniki pomiarowe kamery optycznej

wysokiej rozdzielczości) uwzględniono szereg parametrów wewnętrznych kamer, zniekształcenia geometryczne obiektywu, zniekształcenia odwzorowania perspektywicznego oraz parametry zewnętrzne określające wzajemną relację przestrzenną układów współrzędnych związanych z każdą z kamer. Uwzględniono zatem czynniki generujące błędy systematyczne obciążające dane pomiarowe uzyskiwane przy zastosowaniu proponowanego przyrządu – mobilnego lokalizatora. Parametry wyznaczono z dużą dokładnością na podstawie serii obrazów kalibracyjnych, w procedurze optymalizacyjnej minimalizującej tzw. błąd wstecznej projekcji. W osobnej procedurze wyznaczono systematyczny błąd pomiaru odległości (mapy głębi sceny) przez kamerę ToF. Jego wartość okazała się nieznacząca w obszarze operacji lokalizatora (1:1.5 m odległości od obiektu). Algorytm rozpoznawania obiektu i dopasowywania do modelu wykorzystywany do śledzenia narzędzi obejmował etap usuwania tła. Zastosowana metoda, a szczególnie wybór wektora cech oraz schemat porównania pikseli w algorytmie klasyfikatora nie został w mojej opinii wystarczająco uzasadniony. Etap rozpoznawania składa się z dwóch części: off-line stage, w którym ekstrahowane są pary zorientowanych punktów obiektu i modelu spełniające ograniczenie z dołu ich wzajemnej odległości. Wybrane pary są zapisywane w tablicy skojarzeniowej. Ograniczenie jej rozmiaru uzyskuje się poprzez arbitralną kwantyzację jej elementów. On-line stage polega na wyszukaniu za pomocą klucza w tablicy parametrów pary odpowiadających sobie zorientowanych punktów i na wyznaczeniu na tej podstawie wiążącej je transformacji, wykorzystywanej jako wstępna podstawa (hipoteza) do manipulacji modelem w taki sposób, by wpisywał się on w aktualną chmurę punktów generowaną przez kamerę ToF. Stopień dopasowania modelu i obiektu mierzony jest dwuskładnikową funkcją akceptacji, uwzględniającą wskaźnik widoczności obiektu oraz wskaźnik penalizujący (uwzględniający ewentualne przesłanianie obiektu). Dopasowanie następuje zgodnie ze schematem RANSAC. W dalszej części rozprawy Autor skoncentrował się na zagadnieniu wyznaczania dynamicznego układu współrzędnych odniesienia (DRF). Użyto w tym celu macierze markerów obserwowanych w paśmie NIR. Wyznaczana jest macierz transformacji odwzorowująca współrzędne przestrzenne centroidów markerów do lokalnego układu współrzędnych kamery ToF, czyli macierz DRF. Dla ustabilizowania rezultatów estymacji pozy obiektu (zaburzanych wskutek czasowych przesłoneń sceny) Autor zaproponował filtrację kalmanowską drugiego rzędu, z liniowym modelem procesu dla wyznaczanych położenia i orientacji macryc markerów. Brak jednak w rozprawie rozwinięcia tej idei. W rozdziale 6 omówiono charakterystyki techniczne zaproponowanego systemu, w szczególności jego dokładność statyczną oraz niezawodność śledzenia (dokładność dynamiczną) zbadane w warunkach laboratoryjnych. Jako systemu referencyjnego użyto akceptowanego w systemach nawigacyjnych CAS systemu śledzenia ruchu NDI Polaris Spectra. Omówiono również

symulacyjny eksperyment czynnikowy, oparty na rzeczywistych danych pomiarowych celem zbadania wpływu parametrów wewnętrznych procedury estymacji pozy na dokładność i niezawodność śledzenia. Pierwszy eksperyment przeprowadzono w warunkach statycznych testując przestrzeń orientacji poprzez równomierne kwantowanie horyzontalnego kąta obrotu i kąta pochylenia dla trzech odległości przyrządu od obiektu estymacji. Eksperyment dynamiczny (obserwator przemieszczał ręcznie lokalizator, utrzymując stałą odległość od obiektu) przeprowadzono wyłącznie z rozwiertakiem chirurgicznym. Do oceny wykorzystano wartości następujących błędów: absolutnego, całkowitego błędu pomiaru orientacji osi narzędzia; dwuskładnikowego błędu zmierzonego kąta odchylenia tylnego i nachylenia osi (domyślnej) panewki, zdefiniowanych względem radiologicznego układu odniesienia. Wyniki eksperymentu potwierdziły równomierny rozkład błędów pomiarów obu kątów w badanym zakresie parametrów rejestracji. Wykazały pogorszenie zarówno dokładności jak i precyzji pomiaru ze wzrostem odległości lokalizatora od obiektu. Wyniki symulacji wykazały odwrotnie proporcjonalną zależność stopy poprawnych rozpoznań obiektu od maksymalnej liczby iteracji procedury RANSAC (determinującej szybkość etapu rozpoznania). Symulacyjne badania zależności stopy poprawnych rozpoznań od założonej a priori wartości dopuszczalnego średniego, absolutnego błędu orientacji wykazały, że silne ograniczenie błędu kąтового nie pozwala uzyskać wysokiej stopy poprawnych rozpoznań. Najbardziej istotnym wewnętrznym czynnikiem procedury estymacji okazała się w wyniku badań symulacyjnych zakładana odległość minimalna porównywanej pary punktów zorientowanych obiektu i modelu. Powyższe wnioski mają walor poznawczy i stanowią cenną rekomendację dla dalszych projektów systemów nawigacji z kamerami ToF. Badania dokładności lokalizatora wykazały jej zaskakująco zbliżoną wartość w przypadku eksperymentu statycznego i dynamicznego. Kwestia ta wymaga dokładniejszego zbadania. Pomiary przeprowadzone w trakcie eksperymentu statycznego wykazały systematyczne niedoszacowanie kątów kontrolnych, co wymaga dalszych badań.

W rozdziale 7 opisano eksperyment walidacyjny w warunkach możliwie zbliżonych do realiów sali operacyjnej. Uwzględniono w tym wypadku takie czynniki zakłócające jak obniżona stabilność ruchu narzędzi chirurgicznych oraz nieuniknione przesłonięcia pola operacyjnego przez członków zespołu operującego i elementy wyposażenia Sali operacyjnej. Walidację przeprowadzono na fantomie i na zwłokach z udziałem wykwalifikowanego chirurga ortopedy i jego asystentów. Oba eksperymenty przeprowadzono pod kontrolą referencyjnego systemu śledzenia ruchu (Polaris Spectre). Eksperyment na zwłokach miał na celu odtworzenie realistycznych warunków w zakresie relacji przestrzennych pomiędzy przedmiotem operacji, usytuowaniem personelu operującego oraz lokalizacją śledzonych instrumentów chirurgicznych.

Eksperyment na fantomie pozwolił modyfikować ułożenie „pacjenta” i dobrać optymalne punkty widzenia dla lokalizatora. Przy użyciu lokalizatora wyznaczona trzy kąty kontrolne zdefiniowane w rozdziale 6 odpowiednio dla rozwiertaka i impaktora.. Uzyskane wyniki znacząco przekraczały zakresy wartości uzyskanych w eksperymencie statycznym. Wyniki porównano również z wymaganiami dokładnościowymi stanowiącymi rekomendację dla operacji przeprowadzanych z użyciem systemu nawigacji wspomagającej chirurga oraz dla operacji przeprowadzanych „z wolnej ręki”. Wyniki porównań są niejednoznaczne.

W podsumowaniu rozprawy Autor charakteryzuje swój oryginalny wkład w rozwój nowych metod nawigacji wspomagających tę szczególną i często wykonywaną operację chirurgiczną. Jest to wkład znaczący i wystarczająco udokumentowany. Autor zwraca również uwagę na konieczność uzupełnienia dalszych badań nad systemem oraz na ograniczenia metody, co świadczy o rzetelności podejścia. Kończąc merytoryczną ocenę rozprawy należy podkreślić ścisłą współpracę Autora z ekspertem-chirurgiem oraz jego praktyczną wiedzę wynikającą z odbycia staży w dziale badań i rozwoju czołowego, światowego producenta narzędzi chirurgicznych.

3. Ocena strony formalnej i uwagi szczegółowe.

Rozprawa przedstawiona w języku angielskim na 114 stronach jest napisana i zredagowana starannie. Zawiera spis używanych symboli, skrótów, tablic i ilustracji.. Podkreślić należy zwarte i eleganckie przedstawienie podstaw matematycznych zaproponowanej metody oraz staranny opis techniczny właściwości urządzeń, z których się składa przyrząd pomiarowy. Ilustracje w tekście są liczne, dobrze dobrane do kontekstu i o dobrej jakości graficznej. Rozprawa jest zwarta, jakkolwiek zawiera pewną liczbę minimalnych powtórzeń we wprowadzeniach do poszczególnych rozdziałów. Bibliografia obejmuje 134 publikacje, w większości z ostatnich kilku lat. Odwołania w tekście są poprawne. Język rozprawy jest komunikatywny, poprawny stylistycznie i pod względem używanej terminologii.

Niemniej, recenzent zauważył kilka stosunkowo drobnych usterek i błędów:

- Pewne wykorzystywane skróty np. DRF, PST albo nie zostały objaśnione w jawny sposób, albo zostały zdefiniowane lokalnie dużo wcześniej, niż wystąpiły w odwołaniach.
- Na str. 22, w. 12d jest błędne odwołanie.
- Zdanie na str. 26 w. 20g budzi moją wątpliwość: czy naprawdę wyższa wartość wskaźnika HNR zapewnia mniejsze prawdopodobieństwo dyslokacji?
- Na str. 39 skrót THR powinien zastąpić skrót TKR.
- Na str, 63, w. 2d występuje błędne odwołanie do rys. 5.16.


- Na str. 72, w. 6g (pod tytułem podpunktu 5.4.3) proponuję użyć terminu self-occlusion w miejsce self-obstruction.
- Na str. 73, w.1g w zdaniu brakuje podmiotu.

4. Konkluzja:

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, z akcentem na aspekty techniczne. Sytuuje się w obrębie dyscypliny naukowej inżynieria biomedyczna. Wpisuje się w aktualny nurt prac nad zastosowaniami komputerowych systemów wizyjnych do wspomagania nawigacji, w tym w komputerowych systemach wspomagania chirurgii. Dotyczy ważnych zagadnień praktycznych. Potwierdza duże interdyscyplinarne kompetencje i erudycję Autora.

Niejawna teza rozprawy o przewadze proponowanej metody wynikającej z użycia m.in. kamery ToF nad znanymi systemami nawigacji śródoperacyjnej nie została jednoznacznie potwierdzona eksperymentalnie. Niemniej, częściowo negatywne wyniki są wartościowe zarówno w aspekcie analizy ograniczeń stosowalności tej metody w praktyce jak i wskazania czynników wyznaczających kierunki ewentualnych dalszych prac. Cele pracy, które Autor sformułował na wstępie zostały osiągnięte w tym sensie, że przeprowadzono staranną i poprawną metodologicznie ewaluację zaproponowanej metody i opracowanego przyrządu pomiarowego. Rozprawa stanowi tym samym wartościowy przyczynek do rozwoju nieinwazyjnych metod nawigacji śródoperacyjnej w wybranych operacjach ortopedycznych.

Wobec powyższego uważam, że opiniowana dysertacja Pana mgr inż. Adriana Gorała spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę o stopniach i tytułach naukowych*, gdyż przedstawia oryginalną koncepcję rozwiązania istotnego problemu technicznego i jej zaawansowaną realizację. Wzorowa analiza właściwości metrologicznych zaproponowanego rozwiązania stanowi wartość samą w sobie. Uzyskane wyniki nawiązują do aktualnego nurtu prac nad systemami wspomagającymi nawigację śródoperacyjną i świadczą o dobrym przygotowaniu kandydata do pracy naukowej. Wnioskuje zatem o dopuszczenie p. mgr inż. Adriana Gorała do publicznej obrony.


(prof. dr hab., inż. Andrzej Kasiński)

