

Gliwice, 5 czerwca 2017 roku

dr hab. inż. Krzysztof Cyran, prof. nzw. w Pol. Śl.
Instytut Informatyki
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Politechnika Śląska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Redukcja błędu dopasowania położenia pacjenta do przedoperacyjnego modelu anatomicznego w małoinwazyjnych zabiegach jamy brzusznej

Autor rozprawy: mgr inż. Sylwester Fabian

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Dominik Spinczyk, prof. nzw. w Pol. Śl.

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: biocybernetyka i inżynieria biomedyczna

Cel, zakres i tezy rozprawy

Cel naukowy pracy jak również tezę rozprawy wraz z elementami, które Autor rozwiązał by wykazać jej słusność, zamieszczono we Wprowadzeniu. Istotnym elementem tezy rozprawy jest wskazanie na znaczenie pola deformacji uzyskanego w oparciu o krzywe sklejące, którego zastosowanie wraz ze śledzeniem położenia markerów ma umożliwić redukcję, w stosunku do dotąd wykorzystywanych metod, błędu dopasowania punktu docelowego do przedoperacyjnego modelu anatomii pacjenta. By uzasadnić tę hipotezę, Doktorant przeprowadził spójny metodologicznie ciąg badań, począwszy od zaprojektowania rekordu pacjenta, w którym zbierał dane eksperymentalne, poprzez propozycję dostosowania metod obliczania pola deformacji do zastosowań związanych z określaniem deformacji jamy brzusznej (zmieniającej kształt przede wszystkim poprzez cykl oddechowy pacjenta), a skończywszy na integracji systemu, przeprowadzeniu doświadczeń i opracowaniu statystycznym otrzymanych wyników.

Ocena zawartości pracy

Praca składa się z pięciu rozdziałów, w tym oznaczonego jako rozdział 1 Wprowadzenia, oraz stanowiącego rozdział 5 Podsumowania. Całość rozpoczyna się spisem treści, a kończy wykazem literatury, użytych skrótów, ilustracji i tabel. Struktura pracy jest czytelna, logiczna i nie budzi zastrzeżeń.

We wprowadzeniu, Autor czytelnie przedstawił koncepcję problemu, którym się zajmował w pracy, tj. poszukiwaniem odwzorowania pomiędzy przedoperacyjnym układem współrzędnych anatomicznego modelu pacjenta a jego pozycją na bloku operacyjnym, przy czym, ze względu na ruch ciała wywołany przez oddech, odwzorowanie takie powinno uwzględniać powstałe z tego powodu deformacje. W dalszej części Wprowadzenia, co przedstawiłem szerzej wyżej, Autor zawarł cel pracy, jej tezę oraz listę problemów

cząstkowych, koniecznych do wykazania tezy. Pewnym niedostatkim jest brak we Wprowadzeniu opisu struktury pracy – można tę strukturę wyczytać ze spisu treści, jednakże kilka zdań dotyczących każdego z kolejnych rozdziałów, ułatwiłoby lekturę.

W rozdziale drugim przedstawiono zwięzłe opis systemów nawigacji obrazowej stosowanych w zabiegach małoinwazyjnych jamy brzusznej. Wyróżniono przy tym dwie, kluczowe dla rozprawy, klasy odwzorowań wykorzystywane w dopasowaniu pozwalającym na określenie przestrzennej odpowiedniości pomiędzy dwoma zbiorami danych obrazowych: rejestrację sztywną oraz niesztywną. Kolejne podrozdziały tej części przedstawiają podłoże teoretyczne wykorzystanych w pracy metod:

- formalne opisy podstawowych przekształceń obrazów (przesunięcia, skalowania, rotacji i pochylenia) wraz z ich macierzami dla współrzędnych jednorodnych,
- rodzaje transformacji (sztywna, przez podobieństwo, afiniczna, elastyczna), oraz
- sposoby ewaluacji dokładności w systemach nawigacji obrazowej (w tym kluczowe dla rozprawy błędy: FLE, FRE, TRE).

Rozdział ten jest napisany jako całość jasno i poprawnie, zaś zauważone niedoskonałości, przedstawione w części recenzji dotyczącej wad rozprawy, mają charakter drobny i/lub dyskusyjny. Tutaj zwróć uwagę tylko na fakt, że w rozdziale zawarto również wiadomości elementarne (jak macierze podstawowych przekształceń), jednakże dla kompletności rozprawy jest to akceptowalne, zwłaszcza, że ilość tekstu, które Autor przeznaczył na te opisy nie przekracza kilku stron.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił szczegóły metod tworzenia pola deformacji za pomocą krzywych sklepanych. Rozważał metodę bazującą na krzywych sklepanych wyznaczanych w oparciu o model TPS (Thin Plate Spline) w wersji interpolacyjnej oraz model EBS (Elastic Body Spline) w wersji interpolacyjnej i ekstrapolacyjnej. Pierwsza część rozdziału, dotycząca powyższych kwestii, napisana jest na podstawie literatury. W zdecydowanej większości jest to opis formalnie poprawny, znaleziono bardzo nieliczne i bardzo nieistotne pomyłki, jednakże może warto byłoby w opisie tym, przy okazji podawania modeli w ogólnej postaci literaturowej, dodatkowo odnieść się do kwestii jak pewne jego parametry (np. wymiarowość d) dostosowują model do rozpatrywanego w pracy przypadku (gdzie $d=3$). Z jednej strony ułatwiłoby to skupienie uwagi na analizowanym problemie, z drugiej nie zmniejszałoby ogólności rozważań. Końcowa część rozdziału przechodzi od rozważań literaturowych do raportowania wyników badań prowadzonych przez Doktoranta. Uznać bowiem należy, że zaproponowana przez Autora pracy idea optymalizacji parametrów pola deformacji za pomocą algorytmów rojowych (Particle Swarm Optimization PSO) jest oryginalnym zastosowaniem tych ostatnich w istotnym problemie naukowym, tj. minimalizacji błędu dopasowania rejestracji z użyciem pola deformacji. Po omówieniu zagadnień optymalizacji, Autor opisał szczegółowo sposób przeprowadzania eksperymentów i wynikającą z ilości danych koniecznych do zapamiętania, zaproponowaną przez siebie strukturę rekordu pacjenta.

Rozdział czwarty stanowi szczegółowy raport z przeprowadzonych doświadczeń. W początkowej części Doktorant przedstawił informacje wspólne dla kolejnych sześciu podrozdziałów. Jest to właściwe rozwiązanie, gdyż wspomniane podrozdziały mają tę samą strukturę i posługują się tymi samymi oznaczeniami, wobec czego wyodrębnienie tych wspólnych informacji i podanie ich przed samymi podrozdziałami usuwa niepotrzebne duplikacje tekstu. W tejże części wspólnej, Autor przedstawia też (na stronie 47) sześć scenariuszy badań porównawczych z wykorzystaniem różnych metod rejestracji. Każdy scenariusz zakłada porównanie metody rejestracji globalnej (sztywnej dla pierwszych trzech scenariuszy i afinicznej dla trzech kolejnych) z metodą lokalną powstałą przez złożenie danej

rejestracji globalnej z polem deformacji wyznaczanym poprzez krzywe TPS (scenariusz pierwszy i czwarty), EBS (scenariusz drugi i piąty), oraz EBS z optymalizacją parametrów w algorytmie rojowym PSO (scenariusz trzeci i szósty).

Autor konsekwentnie raportował otrzymane wyniki w identyczny sposób dla każdego z wymienionych wyżej scenariuszy. Przedstawiał między innymi: rozkłady błędów TRE, przebiegi czasowe pozycji markerów faz błędów rejestracji FRE oraz TRE, wykresy przestrzenne TRE (metodą izolinii), histogramy rozkładu FRE i TRE, oraz wyniki testów statystycznych na równość median otrzymywanych przy danej rejestracji w różnych fazach cyklu oddechowego, oraz przy porównywalnych warunkach dotyczących cyklu oddechowego dla dwóch różnych typów rejestracji (globalnej vs. lokalnej wykorzystującej pole deformacji). W przedostatnim podrozdziale Doktorant przedstawił zestawienie zbiorcze, w którym zebrał najistotniejsze wyniki ośmiu rozważanych rejestracji dwóch globalnych (sztywnej i afinicznej) oraz sześciu lokalnych powstałych z tych dwóch globalnych poprzez dodanie do każdej z nich pola deformacji typu TPS, EBS, oraz EBS z optymalizacją PSO. Zaś podrozdział ostatni to opis wniosków jakie wynikają z przeprowadzonych serii doświadczeń.

W opinii recenzenta cała zawartość rozdziału czwartego (najdłuższego w rozprawie) oraz końcowa część rozdziału trzeciego – to najważniejsze fragmenty pracy, świadczące nie tylko o oryginalności rozwiązania przez Doktoranta problemu naukowego, ale o zmierzeniu się (z sukcesem) z takim problemem, który jest niezwykle istotny z praktycznego punktu widzenia, gdyż daje perspektywy na wdrożenie opracowanej metodologii w praktyce klinicznej przy przeprowadzaniu małoinwazyjnych zabiegów jamy brzusznej.

W Podsumowaniu, stanowiącym rozdział piąty, Autor przedstawił konkluzję wskazującą, iż przeprowadzone przez niego doświadczenia wykazały poprawność tezy rozprawy. Ponadto wskazał na wykonanie wszystkich badań cząstkowych, koniecznych do uzyskania prezentowanych wyników. Przedstawił także kierunki dalszego rozwoju opracowanego systemu tak aby mógł być wykorzystywany zgodnie ze standardami wyrobu medycznego i dzięki temu, aby opracowana metoda mogła zostać skomercjalizowana. W końcu, przedstawił także istotną informację o uzyskaniu zgody Komisji Bioetycznej Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego na przeprowadzone eksperymenty kliniczne.

Zalety pracy

Recenzowana praca świadczy, że Kandydat w szerokim zakresie opanował warsztat metod transformacji obrazów oraz dopasowań różnych układów współrzędnych (w tym takich odwzorowań, które wymagają zastosowania pól deformacji lokalnych). W tym kontekście, na uwagę zasługuje m.in. poprawny i czytelny opis przechodzenia transformacji aproksymacyjnej w interpolacyjną przy wartości parametru $\lambda \rightarrow 0$, oraz w transformację globalną (afiniczną) przy $\lambda \rightarrow \infty$. Autor przetestował zaproponowane przez siebie metody na danych klinicznych pacjentów z nowotworem wątroby, uzyskując wymaganą zgodę Komisji Bioetycznej. Ma również dobrą znajomość problematyki dotyczącej optymalizacji, zwłaszcza z wykorzystaniem algorytmów rojowych, oraz potrafił twórczo połączyć te dziedziny w proponowanej metodzie tworzenia pola deformacji z parametrami α i λ optymalizowanymi metodą PSO (patrz str. 39, sekcja 3.1.5, oraz sekcja 4.3 i 4.6 – gdzie podano statystycznie istotne rezultaty optymalizacji), co stanowi o istotnym elemencie oryginalności pracy. Cennym elementem jest również wykorzystanie przez Doktoranta opracowanej metodologii do stworzenia praktycznego systemu z wykorzystaniem optycznego śledzenia wspomagającego nawigację w małoinwazyjnych zabiegach jamy brzusznej. Przedstawiona

metodologia ma perspektywy komercjalizacji, choć wymagane do tego są badania na większej niż przedstawiono w rozprawie ilości pacjentów. Cenne jest także planowanie rozszerzenia stosowalności systemu do innych typów zabiegów, niż tylko do zabiegów brzucha. Recenzowana praca ma również pewne wady i uchybienia przedstawione poniżej. Jednakże należy podkreślić, że choć ich liczba być może mogłaby być mniejsza, to jednak żadna z krytycznych uwag nie ma w opinii recenzenta znaczenia pierwszorzędnego, zdecydowana większość to typowe pomyłki (w tym literówki, przeoczenia, duplikowania), a niektóre z nieco poważniejszych (choć i tak nie mających wpływu na ogólnie bardzo pozytywny wydźwięk końcowy pracy) uchybień są dyskusyjne i zapewne doczekają się polemiki Doktoranta w trakcie obrony.

Wady i słabe strony rozprawy oraz krytyczne uwagi szczegółowe

Znaczących wad rozprawy, które mogłyby rzutować na jej negatywny odbiór, recenzent nie doszukał się. Do wad mniej istotnych pracy można zaliczyć:

- Ostatnie zdanie sekcji 2.1.2 zawiera błędne współrzędne wynikowe punktu po skalowaniu (s_x, s_y, s_z) zamiast $(s_x x, s_y y, s_z z)$
- Opis transformacji afinicznej na stronie 23 nie jest niepoprawny, aczkolwiek bardziej spójny (zwłaszcza w kontekście zamieszczonej ilustracji 2.4) byłby opis posługujący się jako bazą transformacją przez podobieństwo, rozszerzoną przez operację pochylenia.
- Na str. 24, pierwsze zdanie w przedstawionej postaci jest niepoprawne gramatycznie „... przy założeniu, że deformacja nie zależą one od położenia w układzie współrzędnych” – pewnie brakuje w nim czegoś po słowie deformacja.
- W definicji błędu FRE na str. 25 nie podano że x_i, y_j dotyczą markerów – tak podany opis sugeruje że dotyczą dowolnych punktów źródłowych i docelowych, dopiero dalsza lektura rozprawy wyjaśnia, że chodzi o markery.
- W sekcji 3.1.4.1. pierwsze zdanie kończy się „o d -wymiarach”. Jest to poprawne, lecz dodanie informacji, choćby w nawiasie, że w rozpatrywanym przypadku $d=3$, od razu wskazałoby, że chodzi o wymiarowość zwykłej przestrzeni, nie zaś pewnej abstrakcyjnej przestrzeni.
- Na str. 33, bezpośrednio nad wzorem (3.35) powinno chyba być „równań różniczkowych cząstkowych” zamiast „równań różniczkowych”. Jeśli tak, to oznaczenie PDE (Partial Differential Equation) – które pojawia się w tekście dopiero w pierwszym akapicie sekcji 3.1.4.2. na str. 35– powinno być wprowadzone już tutaj.
- Na str. 34, druga linia jest błąd typograficzny „otzymywana”.
- Na str. 34, nie jest do końca jasne co oznacza sformułowanie „do rzędu $m-1$ ” w zdaniu „...które tworzą podprzestrzeń przestrzeni $\prod (\mathbb{R}^d)^{m-1}$ wszystkich wielomianów \mathcal{R}^d do rzędu $m-1$...” – czy chodzi o wielomiany rzędu nie wyższego niż $m-1$, czy o coś innego (co?)?
- Czy we wzorze (3.39) po prawej stronie równości, nie powinno być raczej p_i zamiast p ?
- Na str. 36, pierwsze zdanie w obecnej formie zawiera błąd gramatyczny: „W podejściu interpolacyjnym, przemieszczenie musi być określone w taki sposób, że są równe przemieszczeniom w punktach ze zbioru p_i ” – zapewne czegoś w nim brakuje.
- Jeśli we wzorze (3.49) trójwymiarowe pole wektorowe sił rozkłada się na trzy składowe, to po prawej stronie równości chyba nie powinno być już symbolu wektora nad oznaczeniami f_1, f_2, f_3 , które w tym zapisie stanowią współrzędne (skalary) wektora siły, odpowiednio w kierunkach x, y, z .

- Na str. 37 w tekście „Suma z równania (3.55)...” pod wzorem (3.59) jest błędne odniesienie do równania (3.55). Powinno być raczej odniesienie do (3.57).
- Na str.38 tekst „...a s_{ij} określone jest wzorem:” znajdujący się nad wzorem (3.66) powinien być „...a s_{ij} określone jest wzorem:”.
- Na str. 39, w wyjaśnieniu wzoru (3.71) podano „a x, y, z określają cząstkowe równania różniczkowe pierwszego rzędu”. Recenzent nie potrafi odnaleźć gdzie owe rzekome „równania różniczkowe” się znajdują ani we wzorze (3.70) ani (3.71).
- Na str. 40 w linii 8 podano „...operatorów ewolucyjnych takich jak mutacja, krzyżowanie, reprodukcja” – bardziej poprawne byłoby odwołanie się do selekcji zamiast reprodukcji jako trzeciego operatora z tej listy. Reprodukacja bowiem ma zbyt szerokie znaczenie i przeważnie obejmuje też w sobie krzyżowanie i mutację, które się dokonują w czasie reprodukcji właśnie.
- Nie bardzo wiadomo, dlaczego we wzorach (3.73) i (3.74) operuje się indeksami dolnymi „ i, d ” zamiast „ i ”.
- Na str. 42 w opisie wzoru (3.76) dwa razy podano to samo wyjaśnienie „ t_j – znacznik czasowy j -tej próbki”.
- Na str. 46, nad ryc. 4.14 podano „...pierwsza grupa jest rozłączna względem trzech grup pierwszych” – co raczej nie ma sensu.
- Na str. 48 – przy opisie znaczenia TRE z różnymi indeksami podaje się „wartość błędu markerów ...” – czy raczej nie powinno być „wartość błędu dla punktu docelowego ...”?
- Na str. 49 – opis parametrów Alfa i Sztynność jest identyczny.
- W opisach ryc. 4.18 i kolejnych jest „Przebieg czasowe...” zamiast „Przebiegi czasowe ...”.
- W opisie na ryc. 4.24 błąd typograficzny „sztywnej” zamiast „sztywnej”, podobnie na str. 54 u góry „pprzestawiono” zamiast „przedstawiono”.
- W podsumowaniu podano, że „opracowano system wizualizacji w czasie rzeczywistym”, szkoda, że w rozprawie nie pokazano żadnego obrazka z takiej wizualizacji.
- Szkoda także, że doktorant nie powołał się ani raz w pracy na ani jeden swój artykuł przez co utrudnił ocenę swego dorobku. Tymczasem opublikował artykuł w czasopiśmie z JCR Computerized Medical Imaging and Graphics wydawanym przez Elsevier (5-Year IF 1.716).

Wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Sylwestra Fabiana w sposób oryginalny rozwiązuje istotny dla chirurgii małoinwazyjnej problem naukowy, świadczy o dobrej wiedzy Doktoranta w zakresie bioinżynierii, w tym wiedzy dotyczącej metod odwzorowania położenia ciała pacjenta do przedoperacyjnego modelu anatomicznego oraz wykazuje umiejętność Autora samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W związku z tym, a także uwzględniając wagę rozwiązywanego problemu naukowego i jego potencjał komercjalizacyjny w postaci produktu spełniającego wymogi wyrobu medycznego, uważam, że rozprawa spełnia z nadmiarem wymagania odnośnej Ustawy i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto, w przypadku jeżeli dorobek publikacyjny Autora zostanie uznany za wystarczający według zwyczajowych norm Wydziału Inżynierii Biomedycznej, wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy.