

Łódź, 23 sierpnia 2023 roku

dr hab. inż. Piotr M. Szczypiński
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 10, 93-590 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej Metody elastycznego dopasowania obrazów medycznych w zastosowaniach do różnych technik obrazowania

**Rozprawa autorstwa mgr. inż. Pawła Bzowskiego
przygotowana pod opieką dr. hab. inż. Damiana Borysa**

Recenzja przygotowana na prośbę prof. dr hab. inż. Ewy Piętki,
Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynierii Biomedycznej Politechniki Śląskiej,
na podstawie pisma RDIB.002.78.2023 z 17. lipca 2023 roku.

Problem badawczy i cel rozprawy

Podjęty w pracy problem badawczy obejmuje przede wszystkim dopasowanie obrazów obiektów elastycznych, które podczas obrazowania podlegają znacznym deformacjom, i w których relacje przestrzenne wewnętrznych struktur podlegają znaczącym zmianom. Autor trafnie wskazuje obrazy piersi jako wyjątkowo trudne do wzajemnego dopasowania, ponieważ ich kształt ulega diametralnej zmianie w zależności od orientacji pacjentki podczas obrazowania. Autor rozważa przede wszystkim kwestię ułożenia pacjentki na brzuchu lub na plecach podczas obrazowania. Dopasowanie takich obrazów jest wyjątkowo trudne a metoda pozwalająca na ich dokładne i automatyczne dopasowanie dotychczas nie została opracowana. Podjęty problem badawczy należy więc uznać za istotny, a jego rozwiązanie mogłoby stanowić wkład w rozwój nawet kilku dyscyplin naukowych. W podrozdziale 1.3 autor wskazuje na utylitarny charakter podjętego problemu i jego szczególne znaczenie dla rozwoju diagnostyki medycznej nowotworów. Należy więc zauważyć, że **zarówno zagadnienie badawcze, jak i motywacja podjętych badań stanowią istotne atuty rozprawy.**

Cel pracy zdefiniowano w podrozdziale 1.4 jako *opracowanie metodologii oraz optymalizację dopasowania obrazów medycznych różnych modalności oraz w różnych ułożeniach ciała pacjenta*. Pomijając nieprecyzyjne użycie słowa *metodologia* (przedmiotem pracy są metody) należy uznać, że tak sformułowany cel wynika z wcześniej określonego problemu badawczego i jest odpowiedni dla naukowej pracy badawczej na poziomie doktoratu. Z analizy treści rozprawy wynika jednak, że **cel nie został osiągnięty**, wbrew stwierdzeniu zamieszczonemu w podsumowaniu, **a w części odnoszącej się do optymalizacji i dopasowania obrazów różnych modalności nie podjęto próby jego realizacji.**

Zgodnie z moim rozumieniem celu pracy, jednym z **oryginalnych osiągnięć rozprawy** powinno być **opracowanie nowej metody dopasowania obrazów medycznych**. Autor przedstawia „algorytmy postępowania przy dopasowaniu obrazów” w podrozdziale 2.4 stwierdzając, że algorytmy te zostały przygotowane przy użyciu programu Matlab. W pracy nie zamieszczono jednak skryptów, które by ten fakt dokumentowały. Algorytmy zostały zilustrowane czterema schematami blokowymi, z których kolejne odnoszą się do dopasowania sztywnego, elastycznego oraz deformacji z użyciem metody elementów skończonych (FEM).

Wcześniej w rozprawie (podrozdział 2.3.1) prezentowane są trzy metody przetwarzania wstępnego obrazów. Algorytmy wykrywania krawędzi oraz lokalnej normalizacji znane są od dziesięcioleci i powszechnie stosowane również do obrazów medycznych i ich dopasowania. Algorytm dominacji statystycznej opublikowano w 2016 roku. W rozprawie poświęcono jego opisowi jedynie 7 linijek tekstu. Połączenie algorytmu dominacji statystycznej z metodami dopasowania obrazów przejawia pewne oznaki oryginalności. Niestety autor nie dyskutuje celowości takiego połączenia, nie uzasadnia zastosowania tej metody do rozwiązania problemu naukowego i nie dokumentuje, że jest ono jego oryginalnym osiągnięciem. **Samo zastosowanie algorytmu dominacji statystycznej nie może być uznane za opracowanie nowej metody.**

Tekst dotyczący dopasowania sztywnego jest napisany na zbyt ogólnym poziomie (podrozdział 2.4.1). Również zamieszczony schemat nie wyjaśnia istoty algorytmu. Dla przykładu, brakuje informacji jak oblicza się wektory przesunięć na podstawie informacji wzajemnej i jak estymować przesunięcie oraz obrót obrazu na podstawie takich wektorów, jakie są parametry metody, i jak dobrano te parametry. Ponadto brakuje dyskusji wyboru kryterium kończącego proces iteracyjny. Opis algorytmu dopasowania elastycznego (podrozdział 2.4.3) jest również niejasny. Autor korzysta z rozwiązania zaproponowanego w książce J. Modersitzkiego *Numerical methods for image registration*. Biorąc pod uwagę, że źródłem jest książka z przeglądem różnych metod dopasowania obrazów, czytelnik **nie jest w stanie zidentyfikować konkretnej metody** wykorzystywanej przez autora rozprawy. Opis algorytmu deformacji z użyciem FEM (podrozdział 2.4.4) obejmuje zaledwie półtorej strony, w tym mieszczą się dwa schematy blokowe. Tekst nie wyjaśnia istoty metody, przedstawia natomiast kolejność w jakiej autor korzystał z gotowych programów w celu przygotowania i obróbki danych. Z podrozdziałów 2.3 i 2.4 wynika więc, że autor nabył umiejętność korzystania z gotowych rozwiązań i istniejących programów komputerowych, oraz na ogólnym poziomie rozumie ich działanie. Jednak na tej podstawie **nie można stwierdzić, że autor rozprawy opracował nową metodę lub metodologię dopasowania obrazów medycznych. Tym samym nie można uznać, że osiągnięty został cel pracy w tym zakresie.**

Drugim sformułowanym **celem rozprawy jest optymalizacja dopasowania obrazów medycznych różnych modalności**. Autor nie optymalizuje działania stosowanych metod w sensie matematycznym, np. poprzez modyfikowanie parametrów tych metod w celu minimalizacji lub maksymalizacji funkcji celu. Jedynym miejscem rozprawy, w którym znalazłem zastosowanie optymalizacji jest schemat z rysunku 2.11, w którym zastosowano proces iteracyjny do maksymalizacji wartości informacji wzajemnej podczas dopasowania sztywnego. Jednak w tekście pracy autor nie opisuje tej metody w sposób wystarczająco szczegółowy i nie prowadzi dyskusji tego rozwiązania. Ponadto optymalizacja stanowi integralną część znanego algorytmu dopasowania sztywnego i nie można w tym przypadku mówić o tym, że stanowi to osiągnięcie celu rozprawy. Autor przyznaje ponadto, że niezadowolające wyniki dopasowania metodą *Tool Of Croon* mogą wynikać z niewłaściwego doboru jej parametrów (str. 61), a więc dobór, a tym bardziej optymalizacja działania metody ze względu na wartości tych parametrów nie zostały przeprowadzone. Należy więc stwierdzić, że również w zakresie optymalizacji obrazów **cel pracy nie został osiągnięty**. Co więcej wydaje się, że **optymalizacja dopasowania obrazów nie była przedmiotem badań.**

Teza rozprawy

(1) Dopasowanie obrazów odpowiednio dobranymi metodami pozwala na lepsze porównywanie obrazów tych samych modalności jak i obrazów różnych modalności, niż w przypadku porównania obrazów wizualnie. (2) Skuteczne dopasowanie obrazów medycznych zwiększa wartość diagnostyczną badań, co z kolei przekłada się na jakość leczenia. (3) Dopasowanie obrazów daje lepszą informację komplementarną, czyli bardziej złożoną informację z połączonych badań, niż z każdego osobno. (4) Odpowiednio dobrany algorytm pozwala na poprawne dopasowanie obu zestawów danych obrazowych.

Teza pracy składa się z czterech zdań. W pierwszym i czwartym zdaniu mamy do czynienia z truizmami, mówiącymi że jeśli coś jest dobrze dobrane to pozwala na zrobienie czegoś poprawnie lub lepiej. Użyte sformułowania są nieprecyzyjne: obrazy również po dopasowaniu można porównać „wizualnie”, nie sprecyzowano czym jest „jakość leczenia”, co to jest „lepsza informacja” oraz o jakie „oba zestawy danych” chodzi. **Wartość naukowa tak sformułowanej tezy jest znikoma.** Ponadto w pierwszym zdaniu autor odnosi się do zagadnień dopasowania obrazów różnych modalności, co nie ma niestety odzwierciedlenia w przedstawionych wynikach badań. Autor w istocie nie przeprowadził eksperymentów ze wzajemnym dopasowaniem obrazów różnych modalności. Wszystkie wyniki dotyczą dopasowania par obrazów, w których dopasowywano obrazy tej samej modalności. W podrozdziale 3.2.2 mowa jest co prawda o obrazowaniu PET-CT ale dopasowanie wykonywane jest wyłącznie dla obrazów CT. W podrozdziale 3.3 dopasowywane są obrazy CT dla różnych czasów relaksacji T1 i T2. Jednak pomiędzy prezentowanymi obrazami T1 i T2 nie występuje odmienne przypisanie poziomów jasności do wewnętrznych struktur. Trudno jest więc uznać obrazy T1 i T2 za obrazy różnych modalności (zgodnie z definicją w ostatnim akapicie na str. 5). W drugim zdaniu tezy autor mówi o zwiększeniu wartości diagnostycznej danych po dopasowaniu obrazów i o wpływie dopasowania na jakość leczenia. Żadne z tych zagadnień nie znajduje odzwierciedlenia w dalszej części rozprawy. Autor nie rozważa, nie wykonuje eksperymentów i nie dokonuje analizy wpływu dopasowania obrazów na ich wartość diagnostyczną lub wynikającą z takiego dopasowania jakość leczenia. Należy zatem uznać, że w znacznej części **teza zawiera stwierdzenia oczywiste i nieprecyzyjne o znikomej wartości naukowej, natomiast w innej części prawdziwość tezy nie została w pracy wykazana w sposób należyty.**

Przegląd aktualnego stanu wiedzy

Przegląd aktualnego stanu wiedzy zawarty jest częściowo w rozdziale 1. rozprawy (Wstęp) a częściowo w rozdziale 2. (Materiały i metody). W podrozdziale 1.1 autor omawia to czym są obrazy cyfrowe oraz na czym polega dopasowanie obrazów. Brakuje jednak jednoznacznej i precyzyjnej definicji tego czym jest „dopasowanie obrazów”. Autor przedstawia w dalszej części podział metod dopasowania obrazów ze względu na wykorzystywane podczas tej procedury informacje (rozkład jasności, znaczniki oraz orientację i położenie obiektu podczas obrazowania) i rodzaj przekształcenia (sztywne lub elastyczne). **Mankamentem przeglądu jest brak odnośników literaturowych** – pierwszy pojawia się dopiero na czwartej stronie podrozdziału 1.1.

W drugim akapicie na str. 5. autor pisze na temat metod optymalizacji. Nie jest jednak jasne w jaki sposób metody te są wykorzystywane w dopasowaniu obrazów, nie są też przedmiotem rozważań w dalszej części rozprawy. W ostatnim akapicie podrozdziału 1.1 autor przywołuje metody głębokiego uczenia maszynowego, jednak w części eksperymentalnej autor ich nie stosuje i nie przeprowadza dyskusji ich użycia. W podrozdziale 1.2 przybliżone są metody obrazowania medycznego takie jak MRI, USG, mammografia, CT, PET oraz SPECT. Opis ten jest w zasadzie zrozumiały, jednak miejscami brakuje ciągłości logicznej lub precyzji. Wątpliwość budzi też przywoływanie źródeł literaturowych dopiero w końcowych fragmentach opisów, przy czym w przypadku SPECT brakuje takiego źródła.

Przegląd metod przetwarzania obrazów, dopasowywania obrazów oraz modelowania trójwymiarowego kontynuowany jest w podrozdziale 2.3. Przegląd wybranych metod wstępnego przetwarzania obrazu obejmuje wykrywanie krawędzi metodą Sobela, normalizację histogramu jasności oraz algorytm dominacji statystycznej. Opis wykrywania krawędzi jest jednak niekompletny, brak informacji o konieczności połączenia obrazów uzyskanych dla dwu prostopadłych kierunków, brakuje też odniesienia do źródła literaturowego. Opis algorytmu dominacji statystycznej jest nieprecyzyjny. Przegląd metod transformacji obrazu obejmuje transformację afiniczną, krzywe B-sklejane, metodę Naviera-Lamego i metodę Tool of Kroon implementującą koncepcję demona Maxwella.

W dalszej części przeglądu obejmuje metody oceny podobieństwa: sumę kwadratów różnic, informację wzajemną i współczynnik Sørensen-Dicea. W przeglądzie brakuje natomiast opisu metod dopasowania obrazów na podstawie lokalnych charakterystycznych cech obrazu takich jak *Scale-Invariant Feature Transform* – SIFT, *Speeded Up Robust Feature* – SURF oraz *Orientated FAST and Robust BRIEF* – ORB. Metody te są szeroko opisywane w literaturze i z powodzeniem wykorzystywane w dopasowywaniu obrazów również w zastosowaniach medycznych. W przeglądzie brakuje również krytycznej dyskusji dotyczącej celowości zastosowania omawianych metod do rozwiązania zagadnienia badawczego i wskazania zakresu zastosowań wzmiankowanych metod. Np. współczynnik Sørensen-Dicea może być zastosowany wyłącznie do obrazów binarnych o czym autor nie wspomina, a co jest ważne dla rozumienia dalszej części rozprawy.

Pewnym osiągnięciem rozprawy wydaje się propozycja zastosowania metody elementów skończonych do modelowania odkształceń piersi w wyniku działania siły ciężkości. Autor proponuje zastosowanie tej metody do dopasowania obrazów uzyskanych dla różnych orientacji ciała pacjentki poddawanej obrazowaniu. Trudno jest jednak ocenić oryginalność tej propozycji w świetle poniższych publikacji, które przedstawiają podobne rozwiązania, a których autor rozprawy nie uwzględnił w przeglądzie aktualnego stanu wiedzy:

Del Palomar, A. P., Calvo, B., Herrero, J., López, J., & Doblaré, M. (2008). *A finite element model to accurately predict real deformations of the breast. Medical engineering & physics*, 30(9), 1089-1097.

Azar, F. S., Metaxas, D. N., & Schnall, M. D. (2001). *A deformable finite element model of the breast for predicting mechanical deformations under external perturbations. Academic Radiology*, 8(10), 965-975.

Eder, M., Raith, S., Jalali, J., Volf, A., Settles, M., Machens, H. G., & Kovacs, L. (2014). *Comparison of different material models to simulate 3-D breast deformations using finite element analysis. Annals of biomedical engineering*, 42, 843-857.

W rozprawie wykorzystano łącznie 75 źródeł w języku angielskim i polskim, które są zarówno aktualne, jak i związane z tematyką pracy. Spośród tych źródeł, dwie pozycje to publikacje samego autora rozprawy, w których pełni on rolę pierwszego autora. Jednak w świetle wcześniejszej uwagi o braku przeglądu prac dotyczących zastosowania metody elementów skończonych do modelowania odkształceń piersi, braku przeglądu metod dopasowania obrazów na podstawie lokalnych cech obrazu, oraz braku odnośników w znaczącym fragmencie wstępu, przegląd aktualnego stanu wiedzy należy uznać za niekompletny. Pewnym mankamentem jest również przypadkowa kolejność materiałów źródłowych na liście bibliograficznej, niezgodna z kolejnością występowania odnośników w tekście, niealfabetyczna i niechronologiczna.

Oryginalność rozprawy

Tak jak oceniłem to w części dotyczącej celu pracy, nie można uznać, że autor opracował oryginalną metodę dopasowania obrazów, nie można też uznać, że dokonał połączenia istniejących algorytmów w oryginalny sposób rozwiązujący postawiony problem naukowy. Ponadto tak jak wskazałem w części dotyczącej przeglądu aktualnego stanu wiedzy, autor rozprawy nie uwzględnił w nim publikacji dotyczących zastosowania metody elementów skończonych do modelowania deformacji piersi. Tak więc zastosowanie tej metody w rozprawie również nie może być uznane za oryginalne.

Do **oryginalnych osiągnięć konstrukcyjnych należy zaliczyć podpórkę do badania piersi pacjentek w obrazowaniu PET-CT (podrozdział 2.5) oraz elastyczny fantom piersi (podrozdział 2.6)**. Niestety autor nie porównuje konstrukcji podpórki z innymi rozwiązaniami tego rodzaju i nie wyjaśnia, czy jego projekt pozwala rozwiązać istniejący problem naukowy. Podobna sytuacja dotyczy fantomu piersi. Autor rozprawy wzoruje się na projekcie przedstawionym w pracy J. Hebdena, *A soft tissue-equivalent phantom for diffuse optical tomography*. Pewne uzasadnienie zastosowania takiego fantomu znajdujemy w podrozdziale 4.5. Jednak brakuje wyjaśnienia w jakim zakresie skonstruowany przez autora fantom pozwala rozwiązać problem naukowy rozprawy i w czym należy upatrywać jego oryginalności. Co więcej, autor przedstawia jedynie wyniki obrazowania fantomu (podrozdział 3.5). Obrazy te nie zostały natomiast poddane dopasowaniu i nie posłużyły do osiągnięcia celu rozprawy lub wykazania prawdziwości tezy. Budowa i obrazowanie fantomu stanowi więc niedokończony wątek rozprawy. Oba rozwiązania, podpórka i fantom, mogą być uznane za **oryginalne rozwiązania o charakterze inżynierskim ale nie naukowym**.

Formalna i prezentacyjna strona rozprawy

Na ogólnym poziomie **rozprawa napisana jest w sposób zrozumiały, jednak fragmenty pracy są niejednoznaczne, nieprecyzyjne lub niekompletne**. Fragmenty prezentujące metody akwizycji, przetwarzania oraz dopasowania obrazów napisane są w niewystarczająco szczegółowy sposób i nie umożliwiają odtworzenia warunków przeprowadzonych eksperymentów. W rozprawie występują powtórzenia tych samych treści oraz braki cytowań, co jest szczególnie wyraźne we wstępie pracy.

Trudność podczas czytania sprawiają również **niewyjaśnione skróty występujące w tekście oraz niekonsekwentne ich użycie**. Spis skrótów i symboli załączony w końcowej części rozprawy jest niekompletny. Przykładami są oznaczenia MIRT, DICE oraz OTSU. Czytelnik może się jedynie domyśleć, że skrót DICE odnosi się do współczynnika Sørensen-Dicea, oznaczonego na str. 40. skrótem DSC. MIRT prawdopodobnie określa jedną z metod opisanych w książce *Numerical methods for image registration*. Skrót OTSU (str. 79) prawdopodobnie odnosi się do metody segmentacji opracowanej przez Nobuyuki Otsu. Należy zwrócić uwagę, że Dice i Otsu są nazwiskami i nie powinny być pisane w całości wersalikami.

Kolejnym **mankamentem rozprawy jest niewłaściwa forma odnośników do rysunków**, w których nie używa się słów „rysunek” lub „rys.” a jedynie numery. Dezorientuje to czytelnika, który nie wie czy autor odnosi się do rysunku czy podrozdziału. Szczególnie dezorientujący przykład występuje w ostatnim zdaniu podrozdziału 3.2.2 (str. 67), w którym odnośniki do rysunków podano w taki sposób jakby stanowiły wartości miar MI, SSD i DICE.

W rozprawie zamieszczono ponad dwadzieścia równań matematycznych związanych z akwizycją medycznych obrazów cyfrowych, transformacjami ich przestrzeni, oceną podobieństwa oraz modelowaniem naprężeń w metodzie elementów skończonych. W równaniach (2.5-2.7, 2.14-2.19) autor oznacza wektory kursywą, co błędnie sugeruje, że są to wartości skalarne. Równanie (1.1) jest niepotrzebnie powtórzone jako (2.4) i w obu przypadkach zapisane jest błędnie. Równanie to wykorzystuje zmienne jednorodne, o czym autor nie wspomina, z błędnym uzupełnieniem trzeciej współrzędnej zerem zamiast jedynką. Równanie ma definiować transformację afiniczną, jednak w istocie definiuje transformację ograniczoną do obrotu

i przesunięcia. Ponadto, w rozprawie rozważane jest dopasowanie obrazów trójwymiarowych, natomiast równania (1.1) i (2.4) ograniczają zagadnienie do przestrzeni dwuwymiarowej, nieadekwatnie do wymiarowości obrazów będących przedmiotem rozprawy. Równanie (2.5) jest błędnie zacytowane – brakuje w nim np. wektora u po symbolu ∇^2 . Przejście z postaci równania (2.5) do (2.6) nie jest wyjaśnione. Znaczenie indeksów dolnych i górnych w zapisie równania (2.7) nie jest objaśnione. Ponadto równanie to jest sformułowane jedynie dla przestrzeni dwuwymiarowej. W równaniach (2.9) i (2.10) nie objaśniono znaczenia zmiennych i oraz n . Wartości tych parametrów powiązane są z liczbą dyskretnych poziomów jasności obydwu obrazów i mają istotny wpływ na uzyskiwane wartości informacji wzajemnej. Wymaga to komentarza i dyskusji. W równaniach (2.14-2.19) rozpatrywany jest przypadek jednowymiarowy naprężeń między węzłami sieci. Przejście między równaniem (2.19) i (2.20) o ogólnej co do wymiarowości, macierzowej postaci, wymaga wyjaśnienia. Indeks górny e w równaniach (2.14-2.20) wskazuje konkretną „sprężynkę” i wydaje się, że powinien być pominięty w równaniu (2.20). W dalszej części brakuje równania definiującego współczynnik Poissona, co jest niekonsekwencją w stosunku do przedstawionych wcześniej równań (2.21) i (2.22) definiujących inne współczynniki. Nie wyjaśniono też jaki związek mają te współczynniki z metodą elementów skończonych. **Zamieszczone równania należy więc uznać za niezbędnie wymagające korekty i uzupełnienia.**

W podrozdziale 2.1 zamieszczono charakterystykę obrazów wykorzystanych w eksperymentach. Dane obejmują zbiór obrazów syntetycznych, 7. par obrazów T1 i T2 MRI kości nadgarstka, obrazy PET-CT jamy brzusznej 30. pacjentek oraz 10 par obrazów MRI piersi. W charakterystyce materiału brakuje informacji o wielkości i liczbie wokseli oraz typie danych kodujących poziomy jasności i liczbie tych poziomów. Brak tych informacji utrudnia interpretację przedstawionych w rozdziale 3. wyników, zwłaszcza jeśli chodzi o sumę kwadratów różnic, której wartość jest silnie uzależniona zarówno od liczby wokseli obrazu, jak i liczby poziomów jasności. **Należy więc uznać, że charakterystyka materiału badawczego jest niepełna i wymaga uzupełnienia.**

Rozdział 3. rozprawy przedstawia przebieg eksperymentów oraz uzyskane wyniki. Autor przedstawia eksperymenty dopasowania dwuwymiarowych obrazów syntetycznych, obrazów MRI kości nadgarstka, obrazów CT jamy brzusznej oraz obrazów MRI piersi. W eksperymentach tych porównane są trzy metody dopasowania obrazów MIRT, Tool of Kroon oraz dopasowania elastycznego z wykorzystaniem równania Naviera-Lamego. Prezentowane wyniki mają charakter zarówno jakościowy (obrazy po dopasowaniu i obrazy różnicowe) jak i ilościowy – za pomocą miar podobieństwa (informacja wzajemna, współczynnik Sørensen-Dicea) i różnic między obrazami (suma kwadratów różnic). Wyniki ilościowe prezentowane są w postaci wykresów pudełkowych oraz tabel. W opisie eksperymentów nie znalazłem jednak informacji o wartościach parametrów wykorzystanych w algorytmach dopasowania. A przecież wartości tych parametrów mają kluczowy wpływ na uzyskiwane wyniki. Ze względu na ten brak, interpretacja przedstawionych wyników ilościowych staje się problematyczna. **Należy również zauważyć, że w rozprawie brakuje dyskusji na temat doboru wartości tych parametrów. Nie przeprowadzono też prac dotyczących optymalizacji działania metod ze względu na wartości tych parametrów.**

Porównanie obrazów dopasowanych metodą elementów skończonych przedstawiono graficznie na rys. 3.29. Porównanie to przedstawia jedynie dwa nałożone na siebie profile dwuwymiarowych przekrojów, co stanowi nadmiernie uproszczony sposób prezentacji. Nie jest zrozumiałe dlaczego akurat w tym przypadku nie wykorzystano prezentacji danych w formie obrazów różnicowych, tak jak zostało to przedstawione wcześniej na rys. 3.8. Ponadto, pokazano jedynie wybrany dwuwymiarowy przekrój obrazu nie dokumentując zmiany kształtu piersi w trzech wymiarach. Wydaje się, że prezentacja wyniku w postaci trójwymiarowej siatki po zasymulowaniu jej deformacji, tak jak miało to miejsce na rys. 3.27, byłaby bardziej sugestywna i pozwoliłaby na jego pełniejszą interpretację. **Sposób prezentacji wyników uzyskanych metodą elementów skończonych należy więc skorygować i uzupełnić.**

Wszystkie rysunki dokumentujące uzyskane wyniki dopasowania przedstawiają obrazy dwuwymiarowe i wyniki dopasowania obrazów dwuwymiarowych. Po przeczytaniu rozprawy nie mam pewności czy obrazy, którymi dysponował autor rozprawy były dopasowane w pełni w trzech wymiarach, czy też dopasowywano jedynie ich dwuwymiarowe przekroje. Wymaga to jednoznacznego wyjaśnienia i udokumentowania w rozprawie.

Podsumowanie

Podsumowując należy stwierdzić, że zarówno zagadnienie badawcze, jak i motywacja podjętych badań, stanowią istotne atuty rozprawy. Jednak prawdziwość tezy w części dotyczącej dopasowania obrazów różnych modalności oraz zwiększenia wartości diagnostycznej badań nie została w rzeczywistości wykazana. W znacznej mierze nie podjęto nawet próby jej wykazania. Cel pracy, którym miało być opracowanie metodologii (metody) oraz optymalizacja dopasowania obrazów medycznych różnych modalności oraz w różnych ułożeniach ciała pacjenta nie został zrealizowany. Część rozwiązań konstrukcyjnych przedstawionych w rozprawie ma charakter oryginalnych osiągnięć na poziomie inżynierskim ale nie naukowym. Rozprawa **nie przedstawia zatem oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, nie przedstawia również oryginalnego rozwiązania w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej.** W mojej opinii przedstawiona do recenzji rozprawa nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim w Art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku.

Podpisał Piotr Szczypiński (podpis odręczny)