

Częstochowa, 16.02.2023 r.

dr hab. inż. Janusz Starczewski, prof. PCz
Katedra Inteligentnych Systemów Informatycznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowa

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Algorytmy przetwarzania i porównywania cyfrowych obrazów RTG**

Autor: **mgr inż. Jakub Romanowski**

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Rafał Scherer**

Przewód doktorski w dyscyplinie: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Dziedzina: nauki techniczne

Recenzja wykonana na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka i Telekomunikacja Politechniki Częstochowskiej nr 18/2021/22 z dnia 26 maja 2022 roku.

Podstawa prawna: art. 14 ust. 2, pt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn.: Dz. U. z 2017 r., poz.1789 ze zm.), par. 6 ust. 1. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. Z 2018r. Poz. 261), w zw. z art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U., poz. 1669 z późn. zm.).

Dziedzina problemowa oraz cel, zakres i charakter rozprawy

Wykrywanie tkanek miękkich i kości na zdjęciach rentgenowskich można przeprowadzić przy użyciu różnych technik obrazowania medycznego, z których najistotniejszymi są

- radiografia jako standardowa metoda generowania zdjęć rentgenowskich,
- tomografia komputerowa wykorzystująca promieniowanie rentgenowskie do stworzenia obrazu trójwymiarowego na podstawie wielu zdjęć rentgenowskich ciała pod różnymi kątami,
- absorpcjometria rentgenowska o podwójnej energii (DXA) stosowana do pomiaru gęstości mineralnej kości,
- rezonans magnetyczny wykorzystujący silne pole magnetyczne i fale radiowe do generowania szczegółowych obrazów, głównie tkanek miękkich,
- ultrasonografia używająca fal dźwiękowych o wysokiej częstotliwości do tworzenia obrazów wewnętrznych struktur ciała, w tym również tkanek miękkich.

Obrazowanie rentgenowskie (RTG) polega na ekspozycji obrazowanej części ciała na wiązkę promieni rentgenowskich, które przechodzą przez ciało i są absorbowane przez różne tkanki w różnych ilościach. Obraz jest odczytywany za pomocą urządzeń laserowych i wprowadzony do pamięci cyfrowej. Przedstawia on wewnętrzne struktury ciała z białymi kośćmi i ciemniejszymi tkankami miękkimi. Radiografia jest najpowszechniej stosowaną techniką w diagnostyce i leczeniu medycznym, przy czym nie jest ona wolna od błędów technicznych. Stąd w przypadku niewielkich błędów na obrazach RTG, radiografii się nie powtarza ze względu na szkodliwy wpływ dużych dawek promieniowania na człowieka.

Kluczowym narzędziem diagnostyki medycznej jest porównywanie obrazów rentgenowskich, zwłaszcza w przypadku urazów i schorzeń układu kostno-stawowego. Porównywania gdzie pozwala na diagnozę stanu, zmian chorobowych lub ocenę postępu leczenia. Poza porównywaniem wizualnym stosuje się metody automatyczne i półautomatyczne:

- metody porównywania poziomów szarości bazujące na histogramach przedstawiających rozkład intensywności pikseli w obrazie rentgenowskim.
- analizę różnicową poprzez odejmowaniu jednego obrazu rentgenowskiego od drugiego w celu wyodrębnienia obszarów, w których zachodzą zmiany.

Metody bazujące na poziomach szarości przewyższają metody wizualne w przypadku zdjęć o niskim kontraście. Analiza różnicowa dokładniej wychwytyje zmiany, jednak jest nieodporna na zaszumienie obrazów. Wspólną przeszkodą w wykorzystaniu tych metod jest nierównomierne naświetlenie obrazu, na którym widoczne są rozjaśnione lub przyciemnione fragmenty. Zarówno automatyczne metody bazujące na histogramie, jak i metody różnicowe, są w takim wypadku nieprzydatne. Konieczność poradzenia sobie z tym problemem jest główną motywacją Autora do wypracowania metody przetwarzania wstępnego odpornej na błędy akwizycji zdjęć RTG.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-empiryczny i obejmuje swoim zakresem badania nad systemami informatycznymi w kontekście metod cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Zawartość rozprawy

Rozprawa obejmuje dziewięć rozdziałów włączając w to podsumowanie. W rozdziale pierwszym wstęp wprowadza do tematyki rozprawy i prezentuje cel oraz zakres pracy. Celem pracy było: „opracowanie deskryptora reprezentującego obszar kości w oparciu o sekwencyjny zestaw algorytmów przetworzenia obrazów RTG oraz wykonanie badań dla zestawu opracowanych algorytmów, umożliwiających analizę i porównanie cyfrowych obrazów RTG kości”. Zakres rozprawy ogranicza ciąg czynności badawczych podejmowanych w ramach rozprawy do następujących:

- sformułowanie metody eliminacji tła (tkanek miękkich),
- modyfikację metody detekcji krawędzi dla obszarów kostnych w oparciu o właściwości zdjęć RTG,
- ograniczenie obszaru kostnego i jego opis.

Kolejny rozdział jest wprowadzeniem do obrazowania medycznego przez podstawowe techniki obrazowania, komputerowe wspomaganie diagnostyki, techniki akwizycji, po zakreślenie trendów i wyzwań dla komputerowego wspomaganie diagnostyki obrazowej RTG.

Rozdział trzeci jest zbiorem metod przetwarzania obrazów. Zbiór ten jest kompletny w odniesieniu do autorskich metod proponowanych w dalszej części pracy. Opisywana jest przestrzeń barw, metody detekcji oparte o filtry tj. Canny'ego, Prewitta, Sobela, Robertsa oraz z filtrem Laplace'a, a także metody detekcji punktów kluczowych SIFT i SURF.

W dalszej części prezentowany jest zarys metod rozpoznawania i dopasowywania kształtów, kategoryzację metod segmentacji oraz ekstrakcji. Nieco więcej uwagi poświęcone zostało metodom porównywania i przeszukiwania obrazów; wskazywane są tu metody odzyskiwania obrazu bazujące na tekście (TBIR), zawartości (CBIR), fuzji multimodalnej (MFIR), opisie semantycznym (SBIR) oraz w oparciu o informacje zwrotne dotyczące trafności (RFIR - ang. *relevance feedback image retrieval*). Koniec rozdziału prezentuje możliwość opisu semantycznego i porównywania semantycznego.

Pierwszy element osiągnięć Autora zaprezentowany został w rozdziale czwartym. Podstawowa wersja algorytmu opracowana została metodycznie z opisem problemu badawczego, określeniem celu algorytmu, opisem algorytmu, schematem blokowym i wskazaniem podstawowych kierunków rozwoju algorytmu. Heurystyczny algorytm służy iteracyjnej ekstrakcji tkanek miękkich, czyli tzw. tła. Działanie algorytmu polega na ochronie fragmentów obrazu przedstawiającego tkankę kostną przy tworzeniu maski wycinającej tło. Poszczególne iteracje wykonywane są przy zmniejszającym się poziomie ochrony. Natomiast wybór właściwej iteracji dla ekstrakcji tła dokonywany jest z wykorzystaniem maski różnicowej pomiędzy obrazami. Autor dostrzega wady tej metody wskazując potrzebę normalizacji oraz automatyzacji doboru poziomu ochrony (np. z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych) jako potencjalne kierunki rozwoju algorytmu.

Kolejny element autorskiego wkładu, zawarty w rozdziale piątym, dotyczy modyfikacji algorytmu detekcji krawędzi w cyfrowych obrazach RTG. Modyfikacja w skrócie polega na zastosowaniu filtra z dużym oknem, dzięki czemu przetwarzany jest stosunkowo duży fragment obrazu zawierające istotne elementy kostne, pozbywając się w ten sposób szumu. Stosowana jest tu technika skalowania filtra zamiast skalowania samego obrazu. Podobnie jak w poprzednim rozdziale opis jest metodyczny i kończy się schematem blokowym oraz potencjalnymi kierunkami rozwoju algorytmu.

Podsumowaniem poprzednich dwóch rozdziałów uzupełnionym o opis deskryptora obszaru kości jest rozdział szósty. Jest to kompletny i docelowy algorytm opisu obszaru kostnego cyfrowych obrazów RTG. Podobnie jak w poprzednich rozdziałach Autor prezentuje opis problemu badawczego, precyzuje cele algorytmu i przechodzi do opisu proponowanej metody. Algorytm eliminacji tła został tu wzbogacony o transformację Hougha. Transformacja ta to znana i wykorzystywana w obrazowaniu medycznym metoda wykrywania krawędzi w obrazach, która umożliwia wykrycie krzywych i okręgów w tzw. przestrzeni Hougha. Podejście uzupełnione jest o binaryzację z progowaniem. W dalszej

kolejności spójny obszar kości definiowany jest w oparciu o obszary nieregularne, po czym obszar ten sprowadzany jest do postaci geometrycznej. Postać geometryczna pozwala na zastosowanie deskryptora obszaru kości obejmującego takie informacje, jak istotne punkty krawędzi, powierzchnia obszaru, liczba znaczących obszarów. Deskryptor jest zatem wektorem o składowych w postaci punktów przecięcia krawędzi obszaru typu blob z półprostymi wyprowadzonymi ze środka ciężkości obszaru zamkniętego. W ten sposób obrazy mogą być porównywane z wykorzystaniem standardowej miary kosinusowej. Rozdział ten kończą (jak w poprzednich rozdziałach): schemat blokowy algorytmu i potencjalne kierunki rozwoju tegoż algorytmu.

Rozdział siódmy prezentuje badania symulacyjne w oparciu o testowe zbiory danych pozyskane z Wojewódzkiego Szpitala Specjalistycznego w Częstochowie oraz dane opracowane przez Stanford Machine Learning Group pod nazwą MURA-v1.1. Badania zorganizowane zostały wg ściśle opisanej metodologii zilustrowanej dodatkowo schematem blokowym. Środowisko badawcze zostało stworzone przez Autora. Badania mają charakter ilustracyjny, pokazują wizualnie dość dobre wyniki ekstrakcji tła, bardzo dobre rezultaty detekcji krawędzi oraz wektory deskrypcji dla wybranych obrazów. Wnioski ogólne z przeprowadzonych badań są raczej podsumowaniem zakresu stosowania algorytmów autorskiej metody.

Oryginalne osiągnięcia

Problem badawczy, któremu poświęcona jest praca, stanowi istotną przeszkodę w automatyzowaniu opisu i przetwarzania zdjęć rentgenowskich. W celu rozwiązania prawidłowo postawionego problemu w ujęciu sformułowanej tezy oraz sprecyzowanego celu Doktorant umiejętnie wykorzystuje wiedzę z zakresu przetwarzania obrazów cyfrowych. Wynikiem autorskich badań jest realizacja sekwencyjnego procesu przetwarzania obrazu RTG, który jest wartościowy od strony informatycznej oraz znaczący dla rozwoju automatycznych metod przetwarzania i porównywania obrazów w diagnostyce medycznej. W pracy Autor proponuje wykorzystanie następujących autorskich metod:

- metoda iteracyjnego usuwania tła z obrazów RTG,
- metoda detekcji krawędzi dedykowana dla przypadków, gdy tkanki miękkie charakteryzują się zbliżoną jasnością do tkanek twardych,
- oryginalny opis obszaru zawierającego kość na zdjęciu RTG.

Metoda iteracyjnego usuwania tła z obrazów RTG bazuje na oryginalnej koncepcji *wartości chronionej*, jako wartości w skali szarości zabezpieczającej (maskującej) piksele przetwarzanego obrazu w kolejnych iteracjach algorytmu ekstrakcji fragmentów, które nie są tkanką kostną. Algorytm z każdą iteracją wycina tło w postaci wykrytych tkanek miękkich pozostawiając tkankę twardą pomimo niejednorodnego akwizycji obrazu. W kolejnym etapie dla przejaśnionych i niewyraźnych obrazów proponowane jest zastosowanie maski różnicowej pomiędzy rezultatem wybranej iteracji a pierwotnym obrazem. Przeprowadzone badania wykazały, że poza przypadkami skrajnymi metoda skutecznie dokonuje ekstrakcji tkanek miękkich z obrazu RTG.

Autorska metoda detekcji krawędzi polega na zastosowaniu filtra z dużym oknem tak, aby obejmowało ono obszar zawierający znaczące elementy przetwarzanego obrazu. Zwiększenie rozmiaru filtra powoduje pomijanie nieistotnych szczegółów obrazu takich jak oderwane fragmenty krawędzi czy patologie struktury kostnej. Kluczowym z punktu widzenia szybkości tworzenia filtra, a przez to wydajności metody, jest algorytm obliczania wartości średniej z danego obszaru znany jako *Integral Image*, który pierwotnie został zastosowany do przetwarzania obrazów przez Violę i Jonesa. Autor słusznie stosuje ten algorytm jako szybki i efektywny sposób obliczania sumy wartości pikseli w prostokątnym obrazie. Co jest specyficzne dla propozycji autora, to wyliczenie wartości filtra krawędziowania. Proponowany jest zwiększony rozmiar komórek filtra. Skalowanie filtra zamiast skalowania obrazu jest znaną techniką z algorytmu SURF poprawiającą wydajność obliczeniową. Każda komórka skalowalnego filtra sprowadzana jest do wartości średniej interesującego obszaru. Proponowana metoda nie powoduje tak dużej utraty informacji jak klasyczne metody Canny'ego czy z filtrem Laplace'a w przypadku zdjęć RTG o niskiej jakości.

Oryginalny opis obszaru zawierającego kość na zdjęciu RTG jest połączeniem geometrycznego opisu z deskrytorem. Format deskryptora pozwala zarówno na wstępną klasyfikację obrazowanych kości, jak i bardzo szybkie wyszukiwanie podobnych obrazów. Deskryptor jest znikomo mały w stosunku do rozmiaru obrazu i posiada cechy opisu semantycznego.

Pracę charakteryzuje czytelność i przyrostowe przedstawianie wyników badań. Główne rezultaty badań zostały przedstawione w sposób klarowny. Wnioski płynące z pracy i plany dotyczące dalszego rozwoju metod przetwarzania obrazów RTG są słuszne.

Uwagi wymagające dyskusji

Poniższe uwagi mają charakter dyskusyjny względem rozprawy i wymagają odniesienia się do nich w trakcie obrony rozprawy doktorskiej.

1. Metoda iteracyjnego usuwania tła z obrazów RTG tworzy przyrostowo maskę nieistotnych tkanek miękkich. Maską tą jest zero-jedynkowa i w późniejszych iteracjach przycina również fragment kostny. Czy możliwe i korzystne byłoby zastosowanie pewnych „miękkich” operatorów maski różnicowej, która w stopniu niepewnym przycinałaby domniemane tkanki miękkie, które mogą być w rzeczywistości elementem kostnym?
2. Na rysunku 4.2 zaprezentowany został trudny przypadek obrazu RTG o nierównomiernej jasności. W konsekwencji iteracyjnej ekstrakcji tła usuwana jest także dolna część widocznej na rys A kości. Wydaje się korzystne przed zastosowaniem algorytmu ekstrakcji, użycie pewnego rodzaju operacji balansującej biel i utrzymującej/wzmacniającej kontrast. Z fizycznego punktu widzenia takie przejaśnienia mają charakter rozmytego skupiska. Nie negując potrzeby zastosowania metody ekstrakcji tkanek miękkich z obrazu, czy lokalny balans bieli na bazie choćby histogramu nie poprawiłby skuteczności pre-processingu?
3. Jak już wspomniałem, badania symulacyjne w rozprawie mają charakter ilustracyjny, zestawiają wizualnie dobre wyniki ekstrakcji tła z bardzo dobrymi rezultatami detekcji krawędzi oraz prezentują wektory deskrypcji dla wybranych obrazów. Jednak w rozprawach doktorskich oczekuje się porównania otrzymanych wyników do wartości poprawnych. Czy możliwe byłoby uzyskanie wzorcowych krawędzi, czy też poprawnych deskryptorów dla pewnego zestawu testowego obrazów RTG? Wówczas z łatwością można byłoby wyznaczyć błąd poprawności poszczególnych etapów metody na zbiorze testowym. Czy alternatywnie można skonstruować miary poprawności algorytmów lub oszacowania tych miar nie posiadając poprawnych wzorów w zbiorze testowym?

Pozostałe uwagi

Praca napisana została z dużą starannością i dbałością językową. Trudno wychwycić w pracy błędy językowe (jako odstępstwo od reguły można potraktować brak przecinka przed słowem „aby” w 9 linii na stronie 41). Ponadto na str. 108 niedopatrzenie dotyczy pozycji [10] i [11] Bibliografii; zapewne pakiet BibTEX mylnie zinterpretował imiona i zastosował skróty nazwisk bądź nazw własnych. Kompozycja pracy jest prawidłowa. Równomierne rozłożenie treści w rozdziałach ułatwia zapoznanie się przebiegiem pracy badawczej. Niemniej jednak bardzo wysoka ocena formy pracy niestety nie wpływa dodatkowo pozytywnie na ocenę merytoryczną pracy.

Wartość pracy poparta została niezależnie opublikowanymi artykułami naukowymi Doktoranta. Trzy artykuły konferencyjne z lat 2012-2013 są autocytowane. Nie zostało to zaprezentowane z korzyścią w kontekście aktualności prowadzonych badań. Bazy publikacji naukowych zawierają tymczasem 13 publikacji konferencyjnych ze współautorstwem mgr inż. Jakuba Romanowskiego, ostatnie z których z dziedziny systemów rekomendacyjnych zostały opublikowane w 2018 roku. Potwierdza to aktualny udział Doktoranta w działalności badawczej w obszarach sztucznej inteligencji, wielokrotnie adresowanych w rozprawie jako potencjalne kierunki dalszego rozwoju. W chwili pisania tej recenzji h-indeks autora wynosił 4 wg bazy Scopus, czego nie można pominąć w ocenie.

Opinia końcowa o rozprawie

Niniejszym stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pod tytułem *Algorytmy przetwarzania i porównywania cyfrowych obrazów RTG* przedłożona do oceny przez mgr inż. Jakub Romanowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowo badawczego oraz potwierdza specjalistyczną wiedzę teoretyczną powiązaną z wysokimi umiejętnościami stosowania metod przetwarzania sygnałów cyfrowych w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Pracę oceniam jednoznacznie pozytywnie. Moim zdaniem, recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone ustawowo i stanowi podstawę do **dopuszczenia rozprawy doktorskiej do publicznej obrony**.

Janusz T. Starczewski

