MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
4-M/2011
ZESZYT 7
ROK 108
ISSUE 7
YEAR 108

RAFAŁ PETRYNIAK*

ZASTOSOWANIE METOD NAKŁADANIA OBRAZÓW W WYBRANYCH PROBLEMACH Z ZAKRESU INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

APPLICATION OF IMAGE REGISTRATION METHODS TO SOLVE SELECTED BIOMEDICAL ENGINEERING PROBLEMS

Streszczenie

Algorytmy nakładania obrazów pomimo tego, że są wykorzystywane w wielu zastosowaniach nie tylko teoretycznych, ale również praktycznych, to szczególne znaczenie mają w inżynierii biomedycznej. W artykule omówiono najpopularniejsze techniki i narzędzia stosowania metod nakładania obrazu oraz przedstawiono trzy przykłady z zakresu badań prowadzonych przez autora.

Słowa kluczowe: *komputerowa analiza obrazu, inżynieria biomedyczna, metody nakładania obrazów, segmentacja bazująca na atlasie*

Abstract

The image registration algorithms, despite the fact that they are used in many applications - not only theoretical but also practical, there are particularly important in biomedical engineering. The paper discusses the most popular techniques and tools of image registration and presents three examples of research conducted by the author.

Keywords: computer image analysis, biomedical engineering, image registration methods, segmentation based on the atlas

* Mgr inż. Rafał Petryniak, Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Przedstawienie problematyki i potencjalnych zastosowań metod nakładania obrazu

W wielu problemach przetwarzania obrazu występuje potrzeba analizy zdjęć tych samych obiektów, których akwizycja została wykonana za pomocą różnych urządzeń lub w różnych odstępach czasu. Zapotrzebowanie na tak zróżnicowane pomiary może wynikać z faktu niewystarczającej ilości informacji pozyskanej jednym urządzeniem rejestracji obrazu lub też wtedy, kiedy obiekt badań zmienia swoje położenie lub kształt w czasie. To, co dla człowieka jest naturalne podczas analizy takich zdjęć, a mianowicie fakt, że ma do czynienia z tym samym obiektem widzianym z różnej perspektywy, nie jest już oczywiste dla komputera. W najprostszym przypadku maszyna jest w stanie stwierdzić, że ma do czynienia z tym samym obiektem badań, jeśli wszystkie piksele na poszczególnych obrazach mają taką samą wartość lub ta wartość zmienia się proporcjonalnie (np. z powodu zmiany oświetlenia). Natomiast kiedy obiekt znajduje się w różnych miejscach obrazu, a tym bardziej ma zmieniony kształt, może się okazać celowe zastosowanie zaawansowanych algorytmów nakładania obrazów, które umożliwiają wyznaczenie wektora transformacji jednego obrazu w drugi. Algorytmy tego typu znajdują szczególne zastosowanie w następującej klasie problemów:

1. Techniki śledzenia obiektów na obrazach rejestrowanych za pomocą kamery.
   Obrazy pozyskane za pomocą kamer mogłyby okazać się bezwartościowe z punktu widzenia ich cyfrowego przetwarzania, gdyby nie techniki analizy ruchu. Techniki te umożliwiają śledzenie wybranych obiektów i badanie, jaki wpływ miało otoczenie na ich ruch. Znajdują one ważne zastosowanie w systemach monitoringu, sterowania oraz kontroli jakości.
2. Aktualizacja zdjęć lotniczych i satelitarnych.
   Ilość wykonywanych zdjęć terenu – zarówno przez satelity, jak i specjalistyczne samoloty – przyrasta w bardzo szybkim tempie. Do ich cyfrowej obróbki nie wystarczają informacje geolokacyjne, ale również wykorzystywane są specjalistyczne algorytmy łączące te zdjęcia oraz dopasowujące do wcześniej zgromadzonych w kartograficznej bazie danych.
3. Diagnostyka obrazowa.
   Potrzeba stałej kontroli stanu zdrowia pacjenta, szczególnie w wypadku postępującej choroby lub też monitoringu pooperacyjnego, może wymagać okresowych badań radiologicznych. Ich skuteczna analiza za pomocą systemów komputerowych może wymagać wcześniejszego zestawienia odpowiadających sobie organów i dopiero późniejszą ocenę występujących zmian. Podobna sytuacja występuje w przypadku badania tych samych obiektów za pomocą różnych urządzeń akwizycyjnych (np. łączenie informacji z pozytonowej emisyjnej tomografii komputerowej – PET i tomografii komputerowej – CT podczas analizy zmian w mózgu).

Pomimo że opisane przykłady mają wiele cech wspólnych (dotyczą analizy tych samych obiektów na wielu obrazach), mają one również cechy różniące je między sobą:

1. Analizowane obiekty na zdjęciach z kamery często zmieniają swoje położenie względem siebie, jednak ta zmiana na poszczególnych klatkach filmu nie jest znaczna.
2. Na zdjęciach satelitarnych obiekty rzadko zmieniają położenie względem siebie. Są one natomiast fotografowane z różnej perspektywy i mogą znajdować się w zupełnie innych miejscach na kolejnych obrazach.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Na obrazach radiologicznych obiekty badań często mają zmieniony kształt, a rzadko położenie. Zazwyczaj zestawiane są dwa obrazy ze sobą do porównania.

Z powodu różnej specyfiki przedstawionych przykładów wypracowano różne algorytmy sprawdzające się najlepiej w konkretnym zastosowaniu. W niniejszym artrykule zostaną omówione nie tylko najpopularniejsze techniki i narzędzia nakładania obrazów, lecz także zostaną przedstawione zastosowania, w których autor korzystając z tego typu metod podejmuje się rozwiązania problemów przetwarzania obrazów z zakresu inżynierii biomedycznej.

2. Przegląd algorytmów nakładania obrazów

Metody nakładania obrazów zazwyczaj operują na dwóch obrazach wejściowych, z których jeden jest obrazem odniesienia, a drugi jest obrazem nakładanym. Głównym celem algorytmów nakładania jest określenie wektora transformacji jednego obrazu względem drugiego za pomocą dopasowania wybranych cech wspólnych obu obrazów. Na przestrzeni ostatnich lat powstało wiele algorytmów tego typu. Próbę ich klasyfikacji podjęto w opracowaniach [4, 7]. Na potrzeby niniejszeego artykułu zostanie przyjęty jedynie uproszczony podział tych metod ze szczególnym wskazaniem na te, które mogą mieć istotne zastosowanie w przypadku obrazów medycznych.

Algorytmy nakładania obrazów ze względu na rodzaj przyjętej transformacji podczas poszukiwania optymalnego dopasowania można podzielić na dwie grupy:

– algorytmy globalne, które zachowują wzajemne położenie poszczególnych pikseli względem siebie – pozwalają na stosowanie liniowych przekształceń, zwanych również przekształceniami sztywnymi (ang. *rigrid registration*), do których można zaliczyć operacje obracania, skalowania i inne,
– algorytmy lokalne – umożliwiają deformację (ang. *non-rigrid registration*, *warping registration*, *deformable registration*) obrazu nakładanego, aby umożliwić lepsze dopasowanie poszczególnych obiektów.

Algorytmy globalne, które nie przemieszczają pikseli względem siebie – przez co działają szybciej – zaleca się stosować tam, gdzie położenie poszczególnych obiektów względem siebie nie uległo zmianie, a jedynie zmieniła się perspektywa obserwacji tych obiektów. Taka sytuacja zazwyczaj ma miejsce, jeśli akwizycja obiektów odbywała się z użyciem innych urządzeń lub obiekt był obserwowany z różnych miejsc – zmienił się kąt widzenia. Natomiast algorytmy lokalne najlepiej używać, jeśli dodatkowo zmianie uległ kształt/forma badanego obiektu.

Niezależnie od tego, czy algorytm będzie nakładał obrazy, stosując podejście lokalne czy globalne, przygotowując jego implementację, można bazować na wcześniej wyznaczonych cechach charakterystycznych obrazu (ang. *feature-based image registration*) lub też na wartościach intensywności wszystkich pikseli (ang. *intensity-based image registration*). Wśród cech charakterystycznych pomocnych podczas nakładania obrazów można wyróżnić punkty i linie zaznaczone przez użytkownika lub naniesione automatycznie przez dodatkowo skonstruowany algorytm. Przydatny może być również wynik detekcji krawędzi lub wstępna detekcja obiektów na obu obrazach. Natomiast w podejściu opierającym się na intensywności pikseli korzysta się z pełnej informacji o obrazie. W tym podejściu możliwe jest uzyskanie większej dokładności nałożenia obrazów, ale odbywa się to kosztem zwiększonego zapotrzebowania na moc obliczeniową.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Testy oprogramowania wspomagającego nakładanie obrazów

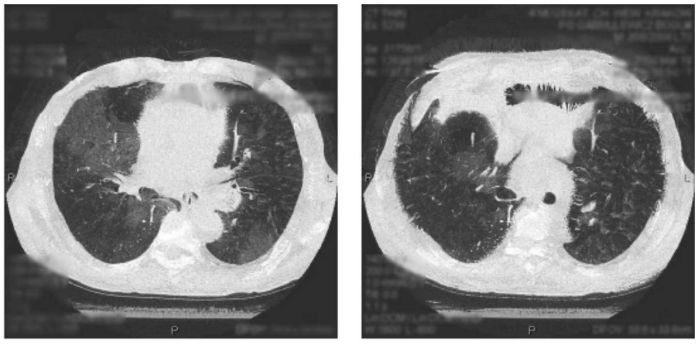
Spośród przedstawionych powyżej algorytmów nakładania obrazów najbardziej ogólny charakter, a zarazem najwyższą dokładność, pozwalają uzyskać algorytmy lokalne bazujące na intensywności punktów. Algorytmy tego typu znajdują szczególne zastosowanie w analizie obrazów, na których badany obiekt zmienia swój kształt oraz w nieznacznym stopniu położenie (przykładowe obrazy testowe widoczne są na rysunku 1).

a) b) c)

Rys. 1. Przykładowe obrazy płuc pozyskane za pomocą tomografii komputerowej
Fig. 1. Sample lung images from computed tomography (CT)

W celu dobrania odpowiedniego algorytmu nakładania obrazu, a zarazem skrócenia etapu jego poszukiwania, zawężono zakres algorytmów do implementacji zawartych w narzędziach Insight Toolkit (http://itk.org) i ImageJ (http://rsbweb.nih.gov/ij) Wymienione narzędzia mają największy zestaw zaimplementowanych algorytmów nakładania obrazów wśród narzędzi znanych autorowi pracy i dostępnych za darmo razem z kodem źródłowym. Dla każdego z tych narzędzi przetestowano wszystkie dostępne w nich algorytmy i najlepsze wyniki działania zostaną pokrótce omówione i pokazane na rysunkach.

a) b)

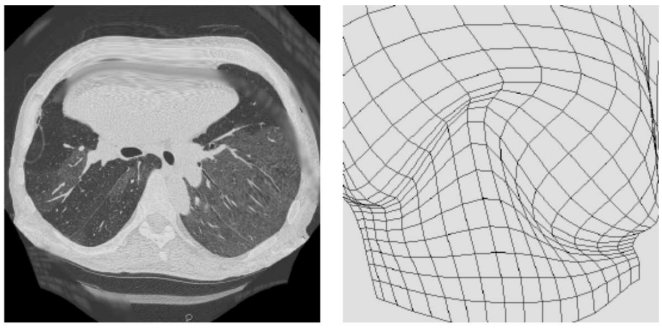


Rys. 2. Przykłady poprawnego i błędnego działania algorytmu nakładania obrazu [6] z zastosowaniem narzędzia Insight Toolkit
Fig. 2. Examples of correct and incorrect results obtained using Insight Toolkit implementation of image registration method described in [6]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. W Insight Toolkit najlepsze rezultaty udało się uzyskać z wykorzystaniem algorytmu opartego na ruchu poziomic (ang. *level set motion*) opisanego w pracy [6]. Jak można zobaczyć na rysunku 2, próba dopasowania obrazu 1a do obrazu 1b zakończyła się satysfakcjonującym wynikiem (rys. 2a), czego nie można już powiedzieć o drugim przykładzie, w którym obrazem odniesienia był obraz 1c. Wykonana deformacja zupełnie zniekształciła obraz nakładany 1a, przez co metoda ta nie może zostać uznana za użyteczną dla analizowanych obrazów testowych (rys. 2b).
2. Z kolei w ImageJ najlepsze rezultaty udało się osiągnąć z użyciem dodatku bUnwarpJ (http://biocomp.cnb.uam.es/~iarganda/bUnwarpJ). Zaimplementowano tam algorytm zaproponowany w pracy [1]. Łączy on w sobie najlepsze cechy znanych wcześniej metod nakładania obrazów [2] i [5], gdzie pole deformacji jest modelowane z użyciem *krzywych B-Spline*, a samo nakładanie może być liczone dla obu kierunków naraz (z obrazu nakładanego do obrazu odniesienia i na odwrót). Przykład przedstawiony na rysunku 3 pokazuje transformację obrazu 1a na obraz 1c. Obraz 3a przedstawia obraz nakładany po zakończonej deformacji. Siatka deformacji jest widoczna obok na obrazie 3b.

a) b)



Rys. 3. Wyniki deformacji obrazu 1a na obraz 1c z wykorzystaniem metod nakładania obrazu opisanych w pracy [1] i zaimplementowanych w ImageJ
Fig. 3. The results of usage image registration method described in [1] and implemented in ImageJ

4. Przykłady praktyczne z zakresu inżynierii biomedycznej

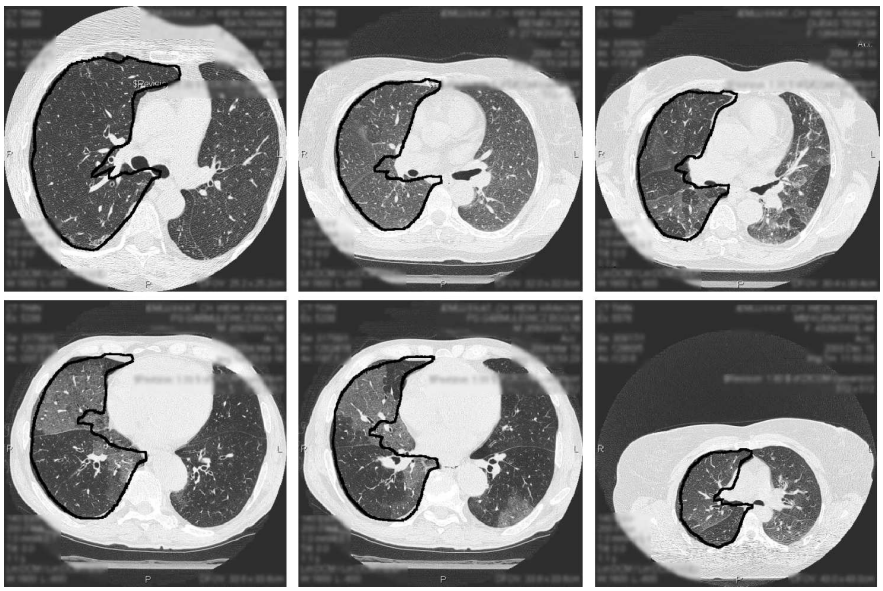
Omówione metody nakładania obrazu pomimo tego, że są najczęściej wykorzystywane na potrzeby wizualizacji i porównania obrazów pochodzących z różnych urządzeń akwizycyjnych (szczególnie w diagnostyce medycznej), znajdują również szerokie zastosowanie do wspomagania rozwiązania innych zagadnień z zakresu inżynierii biomedycznej. W dalszej części artykułu zostaną przedstawione dwa sposoby ich użycia, z których autor korzysta na potrzeby prowadzonych obecnie badań naukowych.

4.1. Detekcja obiektów z użyciem wzorca

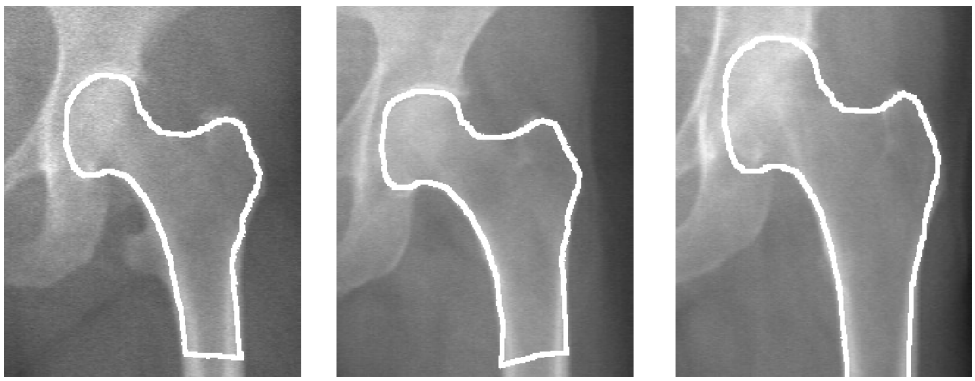
Algorytmy nakładania obrazu umożliwiają konstrukcję metod detekcji obiektów z zastosowaniem wcześniej przygotowanego wzorca. Tego typu podejście zwane w literaturze

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

jako *segmentacja bazująca na atlasie* [6] (ang. *atlas-based image segmentation*) umożliwia szybkie wyznaczenie przybliżonych granic zalegania obiektów, które swym kształtem i położeniem odpowiadają wcześniej przygotowanemu obiektowi wzorcowemu. Obiekt taki w najprostszej postaci może zostać przygotowany za pomocą zaznaczenia jego obrysu na wybranym obrazie. Obraz ten będzie stanowił punkt odniesienia w trakcie trwania procesu nakładania. Tego typu podejście zastosowano dla serii 25 obrazów tomograficznych klatki piersiowej pozyskanych z II Katedry Chorób Wewnętrznych Collegium Medium Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz dla serii 20 obrazów radiologicznych udostępnionych przez Krakowskie Centrum Medyczne.



Rys. 4. Wyniki detekcji prawego płuca z zastosowaniem metody segmentacji opartej na wzorcu
Fig. 4. Results of right lung detection using segmentation method based on pattern



Rys. 5. Wyniki detekcji kości udowej z zastosowaniem metody segmentacji opartej na wzorcu
Fig. 5. Results of femur detection using segmentation method based on pattern

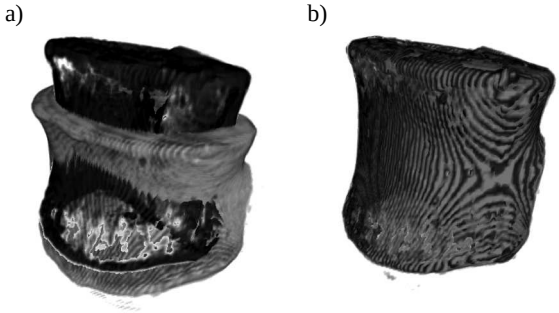
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wyniki uzyskane w ten sposób – przedstawione odpowiednio na rys. 4 i 5 pomimo tego, że z dobrym przybliżeniem wskazują granice obiektu, nie są na tyle dokładne, aby mogły być podstawą metod wspomagających diagnostykę medyczną. W związku z tym autor podjął się prac mających na celu zagwarantowanie dokładnego dopasowania wzorca do obiektu.

4.2. Standaryzacja położenia obrazów 3D kręgów lędźwiowych

Algorytmy nakładania obrazu, jak wspomniano na początku artykułu, znajdują szczególne zastosowanie w sytuacji analizy obrazów pozyskanych za pomocą dwóch różnych urządzeń akwizycyjnych. Aby móc przetwarzać i w dalszej mierze porównywać dane uzyskane w ten sposób, niezbędna jest standaryzacja ich położenia.

W ramach badań naukowych dotyczących konstrukcji algorytmów wspomagających diagnostykę osteoporozy (grant KBN NN518423536), w których autor bierze udział, analizowane są obrazy kręgów lędźwiowych niskiej jakości pozyskane z tomografii komputerowej (CT), jak i obrazy wysokiej jakości z mikrotomografii (µCT). Obrazy te nie tylko mają różną rozdzielczość, ale również mają różną orientację w przestrzeni (przykład na rys. 6a – obraz z µCT został pomniejszony do obrazu z CT). Aby ten problem rozwiązać i ustandaryzować położenie poszczególnych kręgów w przestrzeni użyto implementację algorytmu [3] dostępną w narzędziu Insight Toolkit. Pozwoliło to na pełne dopasowanie danych w przestrzeni (rys. 6b), a tym samym umożliwiło porównywanie wyliczonych parametrów dla obu typów obrazów.



Rys. 6. Nałożenie obrazów z tomografii komputerowej i mikrotomografii przed (a) i po (b) etapie nakładania obrazu
Fig. 6. Imposition of images of lumbar vertebra obtained from computed tomography and microtomography before (a) and after (b) stage of the image registration

5. Wnioski

Zaprezentowane w artykule przykłady zastosowania metod nakładania obrazów, pomimo iż pokazują najczęstsze przypadki ich użycia, na pewno nie wyczerpują pełnego zakresu ich stosowania. Oprócz przedstawionych tutaj przykładów związanych z obszarem inżynierii biomedycznej, warto rozważyć możliwości wykorzystania tych algorytmów na potrzeby przemysłu, a w szczególności w wizyjnych systemach kontroli jakości.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Literatura

[1] Arganda-Carreras I., Sanchez C.O., Marabini R., Carazo J.M., i in., *Consistent and elastic registration of histological sections using vector-spline regularization*, Lecture Notes in Computer Science, Springer 2006, 85-95.

[2] Christensen G.E., He J., *Consistent nonlinear elastic image registration*, Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis, IEEE, 2001, 37-43.

[3] Flusser J., Suk T., *A moment-based approach to registration of images with affine geometric distortion*, Geoscience and Remote Sensing, IEEE, vol. 32, no. 2, 1994.

[4] Maintz J.B., Viergever M.A., *A survey of medical image registration*, Medical Image Analysis, 2(1), March 1998, 1-36.

[5] Sorzano C.O.S., Thevenaz P., Unser M., *Elastic registration of biological images using vector-spline regularization*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 52(4), 2005, 652-663.

[6] Vemuri B.C., Ye J., Chen Y., Leonard C.M., *Image registration via level-set motion: applications to atlas-based segmentation*, Medical Image Analysis, 7(1), March 2003, 1-20.

[7] Zitova B., Flusser J., *Image registration methods: a survey*, Image and Vision a Computing, 21(11), October 2003, 977-1000.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ