

Andrzej SKALSKI¹, Jakub ŁAGWA^{1,2}, Piotr KĘDZIARAWSKI³, Paweł KUKOŁOWICZ^{4,5}

¹ AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, KATEDRA METROLOGII I ELEKTRONIKI, Al. Mickiewicza 30, Kraków

² AGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, KOŁO NAUKOWE "BIOMETR", Al. Mickiewicza 30, Kraków

³ ŚWIĘTOKRZYSKIE CENTRUM ONKOLOGII W KIELCACH, DZIAŁ RADIOTERAPII, ul. Atrwińskiego 3, Kielce

⁴ UNIwersytet JANA KOCHANOWSKIEGO W KIELCACH, ZAKŁAD FIZYKI MEDYCZNEJ, Świętokrzyska 15, Kielce

⁵ CENTRUM ONKOLOGII - INSTYTUT IM. MARII SKŁODOWSKIEJ-CURIE W WARSZAWIE, ZAKŁAD FIZYKI MEDYCZNEJ, ul. Roentgena 5, Warszawa

Analiza kształtu struktur anatomicznych jamy brzusznej dla potrzeb radioterapii nowotworu prostaty

Dr inż. Andrzej SKALSKI

Absolwent wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obecnie zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Metrologii i Elektroniki. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień związanych z analizą i przetwarzaniem obrazów medycznych oraz z modelowaniem systemów pomiarowych. Autor ponad 50 krajowych i międzynarodowych publikacji naukowych z wyżej wymienionych dziedzin.

e-mail: skalski@agh.edu.pl



Dr n. med. Piotr KĘDZIARAWSKI

Specjalista radioterapii onkologicznej, dr nauk medycznych, pracuje w Świętokrzyskim Centrum Onkologii w Kielcach, konsultant wojewódzki w dziedzinie radioterapii onkologicznej dla województwa świętokrzyskiego, główne zainteresowania medyczne - rak piersi, gruczolo krokowego, nowotwory regionu głowy i szyi.

e-mail: piotr.ke@op.pl



Inż. Jakub ŁAGWA

Tytuł inżyniera w zakresie inżynierii biomedycznej uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obecnie student studiów magisterskich na tym samym wydziale, członek interdyscyplinarnego studenckiego koła naukowego „BIOMETR”. Zainteresowania naukowe obejmują głównie przetwarzanie i analizę sygnałów i obrazów medycznych oraz elektronikę medyczną.

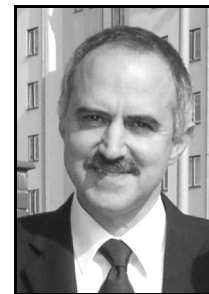
e-mail: klagwa@student.agh.edu.pl



Dr hab. n. med. Paweł KUKOŁOWICZ

Profesor Centrum Onkologii Instytutu im. Marii Skłodowskiej-Curie Warszawie, specjalista fizyki medycznej zatrudniony w wyżej wymienionym Centrum, w którym zajmuje stanowisko kierownika Zakładu Fizyki Medycznej. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół: fizyki medycznej, zastosowania promieniowania jonizującego w medycynie, dozimetrii, planowania leczenia. Prezes Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej.

e-mail: pawel.kukolowicz@gmail.com



Streszczenie

W artykule przedstawiono algorytmy opisu kształtu, które mogą zostać wykorzystane do budowy wiedzy *a priori*, o którą można wzbogacić metody segmentacji danych medycznych. Opisana metodologia została wykorzystana do analizy kształtu struktur anatomicznych okolicy miednicy. Przeprowadzona analiza pozwoliła sprawdzić zmienność geometrii struktur anatomicznych istotnych z punktu widzenia radioterapii nowotworu prostaty, Zmienność kształtu organów oceniono zarówno: pomiędzy osobami w populacji chorych z nowotworem gruczolo krokowego jak i zmienność tych kształtów podczas procesu radioterapeutycznego u pacjenta.

Słowa kluczowe: segmentacja, radioterapia, nowotwór prostaty, model organu, tomografia komputerowa, analiza obrazów.

Shape analysis of abdominal structures for prostate radiotherapy process

Abstract

Prostate cancer is one of most frequently diagnosed cancer diseases among men population, especially in Europe and the USA. The number of fatal cases is also significant. It leads to many attempts to improve processes of the cancer diagnosis and therapy. One of most promising methods of treatment is radiation therapy. However, its proper planning requires contouring of every important structure on every slice obtained from the imaging equipment (in example a CT scanner), which is time-consuming for medical staff. To solve this problem, many efforts are made to construct algorithms of automatic segmentation of organs in 3D data. To provide the expected efficiency of such methods, a base of *a priori* knowledge about organs to be delineated is desired. In this paper we present shape description algorithms which could be used to collect the *a priori* knowledge, potentially able to improve the medical data segmentation methods. The described methodology was used in shape analysis of pelvic region structures, important for planning the prostate cancer radiation therapy, which included: GTV (*Gross Tumor Volume*), rectum, bladder and femoral heads. In this paper 5 different algorithms are presented. The first proposed method describes the shape of the analyzed organ with parameters (semi-axis lengths) of minimum-volume ellipsoid circumscribed on the structure. The other algorithms provide the information about the shape of the analyzed

structure as a distribution of chosen geometric quantity values (such as distance) between the groups of points randomly selected on its surface. The proposed algorithms were tested on the organ models reconstructed from the structures contoured on the images obtained from CT. As a result of the performed analysis, geometrical variability of the considered structures were specified. Variability of shapes of the analyzed organs was examined for the patients from the population group of men with diagnosed prostate cancer as well as for the single patient cases during radiation therapy.

Keywords: image segmentation, radiotherapy, prostate cancer, organ model, CT, image analysis.

1. Segmentacja obrazów z wykorzystaniem wiedzy *a priori*

Przygotowanie procesu leczenia pacjenta z nowotworem prostaty wykorzystującego radioterapię wymaga od lekarza radioterapeuty obrysowania struktur anatomicznych w danych pochodzących z tomografii komputerowej. Lekarz obrysowuje przekrój po przekroju struktury, do których powinno być dostarczone promieniowanie (prostate lub prostata i pęcherzyki nasienne zajęte zmianą nowotworową) oraz, te które przed promieniowaniem powinny być szczególnie chronione (odbytnica, pęcherz, głowy kości udowych) [1].

Proces ten jest niezwykle czasochłonny i trudny ze względu na trudność w wyodrębnieniu granic pomiędzy strukturami (pęcherz - prostata) oraz trójwymiarowy charakter danych. W przetwarzaniu i analizie obrazów odpowiednikiem tego procesu jest segmentacja. Segmentacja polega na podziale danych (przyporządkowaniu pikseli/wokseli) do poszukiwanych struktur anatomicznych oraz tła.

Klasyczne algorytmy segmentacji w przypadku danych medycznych, a w szczególności zobrazowanych struktur anatomicznych z trudno wyodrębnianą granicą, nie przynoszą zadowalających efektów. Rozwiązaniem jest dostarczenie wiedzy *a priori* dotyczącej poszukiwanych struktur anatomicznych. W przypadku segmentacji dla potrzeb radioterapii nowotworu prostaty naukowcy zaproponowali kilka odmiennych podejść.

Pierwszą grupę stanowią algorytmy wykorzystujące tak zwane atlasy statystyczne [2-5]. Idea takiego podejścia sprowadza się do wykorzystania wcześniej zgromadzonej bazy obrazów z obrysowanymi strukturami, a następnie przy pomocy metod dopasowania obrazów dopasowanie danych do nowego obrazu, który ma zostać posegmentowany.

Druga grupę stanowią techniki wykorzystujące modyfikacje algorytmu ASM (ang. *Active Shape Models*) i AAM (ang. *Active Appearance Models*) zaproponowanych przez T. Cootesa [6-7]. W pierwotnej wersji z danych obrazowych buduje się średni statystyczny kształt wraz z wariancją bazując na informacji o rozkładzie wartości pochodzących z profili prostopadłych do powierzchni modelu. Głównym problemem jest generacja zbioru treningowego, w którym punkty należące do modelowych struktur muszą być zgodne (co do kolejności zapisu) z pozostałymi danymi treningowymi. Przykładowe rozwiązania tego problemu w zastosowaniu do danych pochodzących z tomografii komputerowej dla potrzeb radioterapii nowotworu prostaty można znaleźć w [8-10].

Alternatywnym podejściem jest dostarczenie wiedzy *a priori* do równania opisującego przemieszczenie konturu/powierzchni w iteracyjnym procesie segmentacji. Możliwość użycia takiej wiedzy istnieje między innymi w popularnych technikach aktywnego konturu (ang. *Active Contours*) [11-12] czy metodach zbiorów poziomnicowych (ang. *Level Set*) [13].

W niniejszym artykule przedstawiono metodologię wyznaczenia takiej wiedzy, która może zostać wykorzystana w iteracyjnych metodach segmentacji oraz analizę kształtów struktur anatomicznych dla danych wykorzystywanych w radioterapii nowotworu prostaty [14].

2. Algorytmy opisu kształtu

Do opisu kształtu trójwymiarowych struktur anatomicznych zobrazowanych w danych tomograficznych zaproponowano wykorzystanie 5 różnych algorytmów umożliwiających przedstawienie wyników w postaci wektorowej.

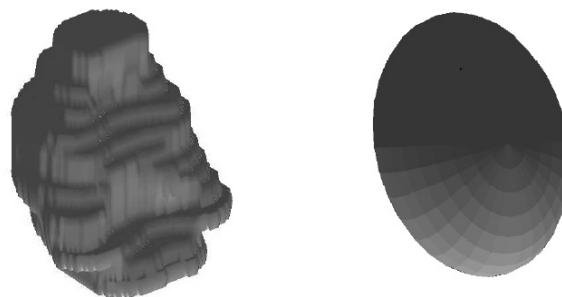
Pierwszy z nich opiera się na opisanie na bryle (strukturze anatomicznej) elipsoidy o najmniejszej możliwej objętości. W tym celu zaproponowano wykorzystanie techniki analizy głównych składowych - PCA (ang. *Principal Component Analysis*). Wybór PCA do wyznaczenia długości półosi elipsoidy uzasadnia intuicyjna interpretacja geometryczna wyników uzyskiwanych w wyniku zastosowania tej metody [15]. W przypadku posiadanych danych medycznych, każdy z obrysowanych narządów reprezentowany jest przez chmurę punktów w przestrzeni trójwymiarowej, o współrzędnych określonych przez maski obrysów oraz dane o rzeczywistych odległościach pomiędzy poszczególnymi punktami obrysu. Celem zastosowania analizy głównych składowych w zaimplementowanym algorytmie nie jest typowa redukcja wymiarów przestrzeni cech, ale pozyskanie informacji o ładunkach składowych (wersorach wyznaczających kierunek każdego PC) oraz wartościach wariancji odpowiadających kolejnym głównym składowym.

Wynikiem działania algorytmu jest trzejelementowy wektor cech:

$$\mathbf{x}_{ell} = [a, b, c], \quad (1)$$

którego elementy odpowiadają długościom kolejnych półosi dopasowanej do narządu elipsoidy, uporządkowanym w kolejności od najdłuższej do najkrótszej. Przykład takiego dopasowania przedstawia rysunek 1.

Pozostałe wykorzystane algorytmy można zaliczyć do jednej szerszej grupy. Stanowią ją metody, których zadaniem jest opis kształtu przy pomocy analizy rozkładu wartości wybranych zależności geometrycznych (np. odległości) pomiędzy grupami losowo wybranych punktów znajdujących się na powierzchni opisywanej struktury [16].



Rys. 1. Rekonstrukcja prostaty z danych tomograficznych oraz dopasowana do niej elipsoida

Fig. 1. Prostate reconstruction from the CT data and the fitted ellipsoid

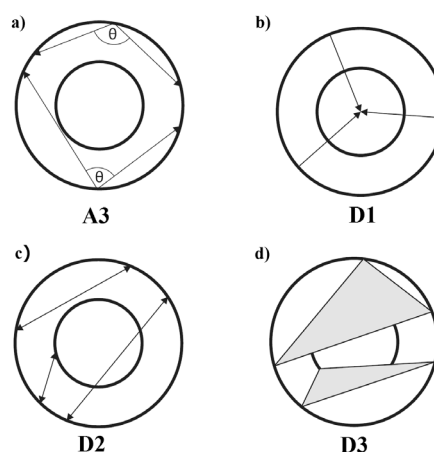
Wynikiem działania każdego z opisywanych w tej części algorytmów jest oparty o ilość wystąpień wartości z danego przedziału histogramu wektor cech:

$$\mathbf{x}_f = [x_1, x_2, \dots, x_{20}], \quad (2)$$

opisujący kształt poddanego analizie narządu. W pracy wykorzystano i dostosowano do potrzeb danych medycznych idee przedstawione w [16], każdy z algorytmów zwraca dwudziesto elementowy wektor cech.

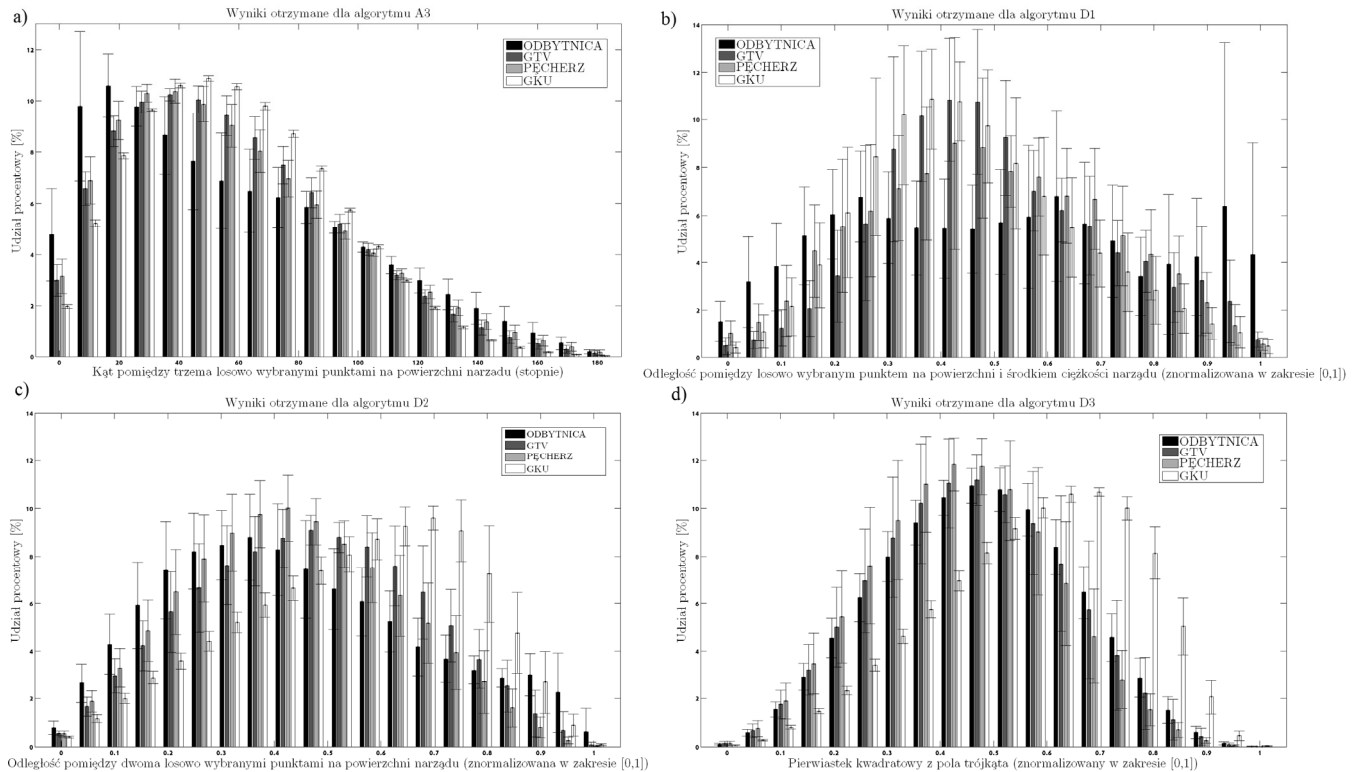
Wykorzystane algorytmy oznaczone jako **A3**, **D1**, **D2**, **D3** posłużyły do oceny zmienności geometrii struktur anatomicznych istotnych z punktu widzenia radioterapii nowotworu prostaty:

- **A3** - algorytm wybiera w sposób losowy zadaną liczbę n uporządkowanych trójek punktów położonych na powierzchni badanego narządu, a następnie wylicza kąt zawarty pomiędzy prostymi łączącymi punkt pierwszy z drugim oraz drugi z trzecim (rys. 2a). Wyznaczone wartości kątów są przyporządkowywane do skwantowanych przedziałów zmienności wartości kątów, a następnie zapisywane w postaci wektora cech,
- **D1** - kształt badanego narządu opisuje się przy pomocy histogramu reprezentującego rozkład wartości odległości pomiędzy każdym z wokseli leżących na powierzchni struktury a punktem stanowiącym środek ciężkości rozważanej bryły (rys. 2b),
- **D2** - algorytm wybiera w sposób losowy zadaną liczbę n par punktów położonych na powierzchni badanego narządu, a następnie oblicza odległości pomiędzy nimi (rys. 2c),
- **D3** - opisuje kształt badanego narządu przy pomocy histogramu reprezentującego rozkład wartości pierwiastków kwadratowych z pól trójkątów, o wierzchołkach zlokalizowanych w trzech losowo wybranych punktach leżących na powierzchni analizowanej struktury (rys. 2d).



Rys. 2. Idea algorytmów opisu kształtu: A3, D1, D2, D3 (na podstawie [16])

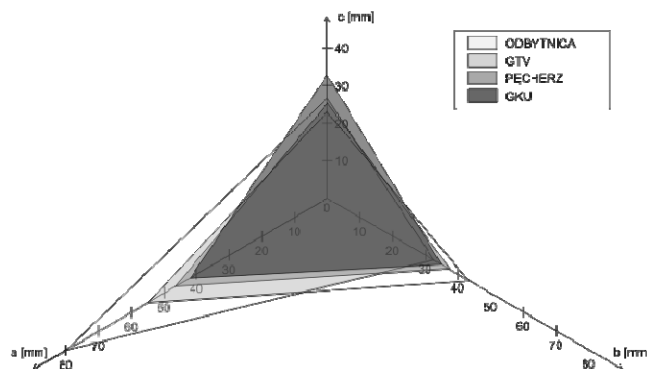
Fig. 2. Idea of shape descriptors: A3, D1, D2, D3 (based on [16])



Rys. 3. Wyniki dla algorytmów opisu kształtu: A3, D1, D2, D3. Skrót GKU odnosi się do głów kości udowych. Opis w tekście

Fig. 3. Results for shape descriptors: A3, D1, D2, D3. GKU is an acronym for femoral heads. Description in text

We wszystkich eksperymentach, dla każdego z algorytmów przyjęto $n=10^6$.



Rys. 4. Wyniki dla algorytmu dopasowania elipsoidy o minimalnej objętości
Fig. 4. Results for shape descriptor based on the minimum-volume enclosing ellipsoid

3. Analiza kształtów struktur anatomicznych okolicy miednicy

Uśrednione wyniki uzyskane przy zastosowaniu opisanych algorytmów dla danych odnoszących się do grupy 10 różnych pacjentów prezentują rys. 3–4. Histogramy przedstawione na rys. 3 odpowiadają średnim rozkładom wartości analizowanych parametrów geometrycznych (znormalizowanym w zakresie [0,1]), nanesione słupki błędów - odchyleniom standardowym w ramach populacji.

Na bazie uzyskanych wyników (graficzna reprezentacja - rys. 3., rys. 4) można stwierdzić, że w ramach grupy rozważanych narządów największa różnica w kształcie obserwowana jest pomiędzy odbytnicą a głowami kości udowych. Każdy z algorytmów wskazuje – na sposób dla niego charakterystyczny – na w przybliżeniu kulisty kształt główek oraz wyraźnie wydłużony w jednym

z kierunków, walcowaty kształt odbytnicy. Zbliżony do kuli kształt głów kości udowych manifestowany jest poprzez, przykładowo, niemal identyczną długość wszystkich półosi dopasowanej elipsoidy. Dla porównania, na podstawie wyników uzyskanych przy zastosowaniu tego samego algorytmu, kształt odbytnicy może być opisany jako podłużny, o zbliżonym do okrągłego przekroju poprzecznym. Stwierdzenie takie może zostać uzasadnione w przybliżeniu równymi wartościami długości dwóch krótszych półosi dopasowanej elipsoidy (b , c) przy przeszło dwukrotnie większej długości półosi a . W przypadku pozostałych metod opisu kształtu wydłużenie odbytnicy manifestowane jest poprzez m.in.: największą częstość występowania kątów o wartościach skrajnych w przypadku algorytmu A3, czy też najbardziej równomierny rozkład prawdopodobieństwa obserwowany w przypadku metod D1 i D2. Rezultaty otrzymane dla obszaru zajętego chorobą nowotworową (GTV) oraz pęcherza moczowego są bardziej zbliżone do siebie, a charakterystyka ich kształtu może zostać określona jako pośrednia pomiędzy kulistymi głowami kości udowych oraz podłużną odbytnicą [14]. Dla tego przypadku, głównym czynnikiem odróżniającym unormowane histogramy stanowiące reprezentację ich kształtu stanowi – w ramach kolejnych algorytmów – położenie najwyższego słupka, czyli maksimum prawdopodobieństwa przyjęcia przez analizowaną wielkość geometryczną wartości z odpowiadającego danemu słupkowi przedziału.

Oprócz pozyskanych informacji o kształcie, mogących znaleźć zastosowanie w algorytmach segmentacji analizowanych narządów w danych obrazowych, wyciągnięto również wnioski dotyczące jego zmienności w różnych seriach danych. Na podstawie otrzymanych wyników zaobserwowano, że wartości odchyień standardowych od uśrednionego modelu kształtu wyznaczonego dla populacyjnej grupy pacjentów były wyraźnie większe niż w przypadku modeli wyznaczonych dla pojedynczych badanych. Świadczy to o występowaniu mniejszych wahań w kształcie struktur anatomicznych w ramach danej jednostki w czasie prowadzenia terapii, niż w przypadku większej grupy na etapie jej planowania. Stwierdzenie to można uznać za jednoznaczne, prawidłowość ta została bowiem potwierdzona w wyniku działania wszystkich zaproponowanych metod. Efekt ten jest nieco słabiej widoczny jedynie w przypadku wyników otrzymanych przy zastosowaniu algorytmu D3 [14].

Kolejną wartą odnotowania obserwację stanowi wyraźnie mniejsza zmienność kształtu głów kości udowych w czasie

i w populacji, niż ma to miejsce w przypadku pozostałych rozważanych narządów. Jest to zgodne z oczekiwaniami – jako struktury kostne charakteryzuje je mniejsza podatność na deformację, niż ma to miejsce w przypadku tkanek miękkich. W przypadku prostaty, wahania jej kształtu – poza naturalnie obserwowaną w populacji zmiennością osobniczą – mogą być powodowane różnym stopniem zaawansowania choroby nowotworowej u różnych pacjentów (w przypadku danych odnoszących się do pojedynczych badanych: również jego zmianą w wyniku prowadzenia procesu radioterapii), a w przypadku pęcherza moczowego – stopniem wypełnienia przez moczu.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono i wykazano skuteczność algorytmów opisu kształtu zastosowanych do struktur anatomicznych istotnych z punktu widzenia radioterapii prostaty. Opisano i zastosowano 5 różnych metod generacji cech, które umożliwiły parametryczne scharakteryzowanie organów zobrazowanych w danych pochodzących z tomografii komputerowej. Przedstawiona metodologia może zostać zastosowana również dla innych danych obrazowych pochodzących między innymi z rezonansu magnetycznego.

Badane algorytmy pozwalają opisać zmienność geometrii struktur w postaci wektorów cech. Zmienność parametrów zawartych w wektorach umożliwia rozróżnienie organów w przestrzeni cech, co można wykorzystać jako wiedza *a priori* w algorytmach segmentacji danych medycznych.

Prace przedstawione w artykule zostały sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego / Narodowe Centrum Nauki, projekt numer NN518 497739.

5. Literatura

- [1] Kukołowicz P., Piziorska M., Kędzierawski P., Skalski A., Zieliński T.: Radioterapia adaptacyjna (dostosowawcza) nowotworu gruczołu krokowego. Modelowanie i Pomiary w Medycynie MPM 2011, Krynica, 8–12 maja 2011, str. 13-18, 2012.
- [2] Acosta O., et al.: Atlas Based Segmentation and Mapping of Organs at Risk from Planning CT for the Development of Voxel-Wise Predictive Models of Toxicity in Prostate Radiotherapy. Prostate Cancer Imaging, LNCS 6367, Springer-Verlag, str. 42-51., 2010.
- [3] Skalski A., Zieliński T., Kukołowicz P., Kędzierawski P.: Computed tomography-based radiotherapy planning on the example of prostate cancer: application of level-set segmentation method guided by atlas-type knowledge. Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, ISABEL 11, ACM, str. 1-5, doi:10.1145/2093698.2093840, 2011.
- [4] Skalski A.: Modelowanie struktur anatomicznych dla potrzeb planowania leczenia w procesie radioterapii nowotworu prostaty. Pomiary, Automatyka, Kontrola, PAK, nr 04/2012, s. 372-375, 2012.
- [5] Lu Ch., et al.: An integrated approach to segmentation and nonrigid registration for application in image-guided pelvic radiotherapy. Medical Image Analysis, vol. 15, str. 772-785, 2011.
- [6] Cootes T., Edwards G.J., Taylor C.J.: Active Appearance Models. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 23 nr 6, str. 681-685, 2001.
- [7] Cootes T.F., Cooper D., Taylor C.J., Graham J.: Active Shape Models Their Training and Application. Computer Vision and Image Understanding, vol. 61, nr 1, str. 38-59, 1995.
- [8] Chen S., Lovelock M., Radke R.J.: Segmenting the prostate and rectum in CT imagery using anatomical constraints. Medical Image Analysis, vol. 15 nr 1, str. 1-11, 2011.
- [9] Kos A., Zieliński T., Skalski A., Kukołowicz P., Kędzierawski P., Kuszewski T.: Comparison of ASM and AAM-based segmentation of prostate image in the CT scans for radiotherapy planning. NTAV/SPA, 27-29 IX 2012 Łódź, str. 53-57, 2012.
- [10] Skalski A., Kos A., Zieliński T.: Using ASM in CT data segmentation for prostate radiotherapy. ICCVG 2012, Warsaw, Poland, 24–26 IX 2012, LNCS 7594, str. 610-617, 2012.
- [11] Cohen L. D.: On active contour model and balloons. CVGIP: Image Understanding, 53(2):str. 211–218, 1991.
- [12] Cohen L.D., Cohen I.: Finite element methods for active contour models and balloons for 2D and 3D images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(11), str. 1131-1147, 1993.
- [13] Osher S. and Paragios N.: Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision, and Graphics. Springer-Verlag, New York, 2003.
- [14] Łągwa J.: Analiza kształtu struktur anatomicznych jamy brzusznej zobrazowanych w danych CT. Projekt inżynierski, AGH, 2013.
- [15] Jolliffe I.T.: Principal Component Analysis. Springer-Verlag, New York, 2002.
- [16] Osada R., Funkhouser T., Chazelle B., Dobkin D.: Shape Distributions. ACM Transactions on Graphics, vol. 21, nr 4, str. 807–832, 2002.

otrzymano / received: 11.12.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.02.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Newsletter PAK

Wydawnictwo PAK wysyła drogą e-mailową do osób zainteresowanych Newsletter PAK, w którym są zamieszczane:

- spis treści aktualnego numeru miesięcznika PAK,
- kalendarz imprez branżowych,
- ważniejsze informacje o działalności Wydawnictwa PAK.

Newsletter jest wysyłany co miesiąc do osób, które w jakikolwiek sposób współpracują z Wydawnictwem PAK (autorzy prac opublikowanych w miesięczniku PAK, recenzenci, członkowie Rady Programowej, osoby które zgłosiły chęć otrzymywania Newslettera).

Celem inicjatywy jest umocnienie w środowisku pozycji miesięcznika PAK jako ważnego i aktualnego źródła informacji naukowo-technicznej.

Do newslettera można zapisać się za pośrednictwem:

- strony internetowej: www.pak.info.pl, po dodaniu swojego adresu mailowego do subskrypcji,
- adresu mailowego: wydawnictwo@pak.info.pl, wysyłając swoje zgłoszenie.

Otrzymywanie Newslettera nie powoduje żadnych zobowiązań ze strony adresatów. W każdej chwili można zrezygnować z otrzymywania Newslettera.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK