

Elektrodiagnostyka i diagnostyka obrazowa serca w Laboratorium Biocybernetyki

Tomasz Pięciak, Piotr Augustyniak

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki

Streszczenie: Artykuł przedstawia bieżące zagadnienia i problematykę poruszaną w ramach prac Laboratorium Biocybernetyki AGH w obrębie elektrodiagnostyki i diagnostyki obrazowej serca i naczyń. Zaprezentowano ideę przenośnego rejestratora EKG z adaptacyjną wymianą oprogramowania w zakresie automatycznej interpretacji elektrokardiogramu. Rozszerzeniem przenośnych rejestratorów są hybrydowe systemy nadzoru i sterowania. Wyróżniają one część osobistą, odpowiedzialną za rejestrację sygnałów elektrodiagnostycznych, oraz część stacjonarną, nadzorującą pacjenta i identyfikującą potencjalne zagrożenia zdrowia i życia. W zakresie obrazowania medycznego zaprezentowano trzy obszary, dla których zaprojektowano algorytmy segmentacji: mięsień sercowy, implanty wewnątrznaczyniowe oraz tętnice szyjne. Metody te oparte są w głównej mierze na modelach deformowalnych: metodzie aktywnego konturu oraz zbiorów poziomicowych.

Słowa kluczowe: elektrokardiogram, telemedycyna, zdalny nadzór, systemy rozproszone, obrazowanie medyczne, segmentacja obrazów, trójwymiarowa rekonstrukcja

1. Wprowadzenie

Diagnostyka medyczna oparta na nieinwazyjnej rejestracji elektrycznej aktywności serca liczy już sobie ponad 100 lat, jednakże niektóre jej aspekty stanowią interesujące wyzwanie naukowe, a zarazem mogą być źródłem rezultatów o istotnym znaczeniu dla poprawy jakości życia. Dotyczy to szczególnie spersonalizowanej diagnostyki telemedycznej, nadzorowania osób starszych lub chorych w miejscu zamieszkania oraz instrumentów dla prewencji chorób krążenia i kształtowania stylu życia. Trzy wymienione dziedziny zastosowań elektrokardiografii są obecnie tematem prac badawczych prowadzonych w Laboratorium Biocybernetyki AGH. Ich rezultatem jest m.in. prototyp zdalnie programowanego przenośnego rejestratora z interpretacją EKG oraz inteligentny rejestrator stanowiący element domowego systemu nadzorującego.

W sferze poznawczej dotychczasowe prace zaowocowały sformułowaniem pojęć jakości rezultatu diagnostycznego oraz dodatkowych atrybutów parametrów diagnostycznych: ich priorytetu i czasu ważności (zależnych od stanu osoby badanej). Ponadto, wprowadzono nowatorski opis zachowania człowieka za pomocą gramatyki grafów, pojęcie wzorca zachowań, będącego sekwencją stanów osoby obserwowanej oraz miary odległości wzorców umożliwiającą ich porównywanie i rozumienie w systemach sztucznej

inteligencji. Zamierzonym efektem tych prac jest prototyp wbudowanego w infrastrukturę mieszkania systemu nadzorującego, który umożliwi indywidualne uczenie się zachowań osoby nadzorowanej, identyfikację sytuacji nietypowych i automatyczną ocenę stopnia zagrożenia.

Z kolei cyfrowe metody diagnostyki obrazowej stały się nieodłączną częścią diagnozy medycznej na przestrzeni ostatnich dwóch dekad. W szczególności, wśród personelu nowoczesnych centrów obrazowania medycznego uznaniem cieszą się trójwymiarowe rekonstrukcje poszczególnych organów wewnętrznych. Umożliwiają nie tylko subtelny podgląd struktur anatomicznych i wykonanie odpowiednich pomiarów w przestrzeni trójwymiarowej, ale również wcześniejsze zaplanowanie zabiegów operacyjnych.

Prace naukowe, dotyczące metod przetwarzania i analizy obrazów w ramach Laboratorium Biocybernetyki AGH, prowadzone są od lat 70. ubiegłego wieku [1]. Obecne badania, dotyczące metod obrazowania medycznego, zostały uzupełnione o metody segmentacji na podstawie modeli deformowalnych, a w szczególności metody aktywnego konturu i kształtu. Prace koncentrują się w zakresie możliwości wykorzystania zaawansowanego aparatu matematycznego, m.in. procesów stochastycznych i rachunku wariacyjnego jako narzędzi komplementarnych do znanych powszechnie modeli deformowalnych. W dotychczasowych pracach zajmowano się opracowaniem algorytmu bazującego na modelu aktywnego konturu, służącego do segmentacji mięśnia sercowego na obrazach rezonansu magnetycznego.

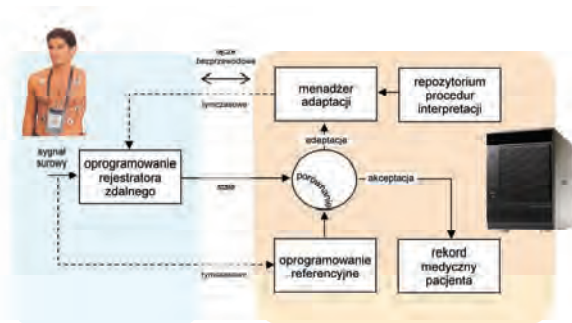
Rezultaty poprawnej z punktu widzenia medycznego segmentacji struktur anatomicznych są wykorzystywane w głównej mierze jako dane wejściowe w trójwymiarowych rekonstrukcjach narządów wewnętrznych. W tym obszarze bieżące badania skupiały się na opracowaniu algorytmów mających za cel segmentację implantów wewnątrznaczyniowych oraz tętnic szyjnych na przekrojach poprzecznych obrazów tomografii komputerowej.

2. Spersonalizowana zdalna interpretacja elektrokardiogramu

Elektrokardiogram rejestrowany zdalnie jest źródłem informacji diagnostycznej o potwierdzonej wiarygodności. W zastosowaniu do nadzorowania systemy telemedyczne wypierają aparaturę holterowską (rejestrującą zapis do pamięci) dzięki dostępności zapisu na bieżąco i możliwej interakcji z osobą nadzorowaną. Niestety, poważnym ograniczeniem tych systemów jest konieczność zapewnienia wysokiej jakości transmisji bezprzewodowej (w przypadku systemów bez interpretacji zdalnej) lub kompromis

obniżający wiarygodność interpretacji w wyniku ograniczonej dostępności zasobów obliczeniowych w przenośnym rejestratorze pacjenta.

Interesującym rozwiązaniem jest przenośne urządzenie rejestrujące, wyposażone w mechanizmy indywidualnego wyboru procedur interpretacyjnych w zależności od stanu pacjenta i wynikającej z niej potrzeby diagnostycznej [2]. Podstawą optymalizacji oprogramowania interpretacyjnego jest zależność złożoności i wymagań procedur obliczeniowych od osiągniętej jakości parametrów diagnostycznych (np. precyzji wyznaczania załamek). Dysponując zestawem procedur spełniających identyczną rolę, o zuniifikowanym interfejsie i potencjalnie zamiennych w procesie interpretacji, automatyczny proces decyzyjny uruchamiany na serwerze nadzorującym stale analizuje jakość wyznaczanych zdalnie parametrów diagnostycznych. Następnie tak dobiera skład oprogramowania zdalnego, aby zapewnić jak najwyższą jakość chwilowo najistotniejszych parametrów diagnostycznych. Proces ten jest oparty na porównaniu wartości parametrów obliczonych lokalnie (w pozbawionych ograniczeń zasobach serwera) i zdalnie (w rejestratorze pacjenta) dla krótkich odcinków surowego sygnału przesyłanych w wybranych interwałach czasu. Przenośne urządzenia rejestrujące mogłyby zatem być produkowane masowo, a następnie personalizowane zdalnie w zależności od wyniku automatycznej identyfikacji stanu pacjenta. Proces zdalnego programowania rejestratora (rys. 1) został zaprojektowany z uwzględnieniem możliwych szybkich zmian tego stanu [3].



Rys. 1. Zasada przepływu danych w autoadaptacyjnym systemie diagnostycznym

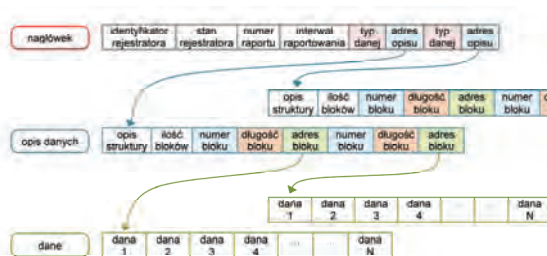
Fig. 1. General scheme of the data flow in autoadaptive diagnostic system

Konsekwencją stosowania adaptacyjnego oprogramowania interpretacyjnego w urządzeniu zdalnym jest tryb raportowania, w którym zawartość raportu jest niejednorodna. Polimorfizm raportów diagnostycznych obejmuje:

- sygnały surowe (przesyłane zarówno w celu centralnej interpretacji najtrudniejszych przypadków, jak i w celu kontroli jakości parametrów diagnostycznych),
- metadane będące parametrami pośrednimi obliczeń, przekazywanymi między procedurami rozproszonego procesu przetwarzania,
- parametry diagnostyczne stanowiące ilościowy opis medycznych cech elektrokardiogramu, uaktualniane z częstotliwością od 0,27 mHz (raz na godzinę) do ok. 3,5 Hz (raz na uderzenie serca).

Pakiet danych zaprojektowany do wykorzystania w autoadaptacyjnym systemie ciągłego nadzorowania kardiologicznego składa się z trzech warstw informacyjnych (rys. 2):

- obowiązkowego nagłówka opisującego zawartość pakietu i status rejestratora,
- obowiązkowych pól opisów danych z odnośnikami,
- opcjonalnych pól danych.



Rys. 2. Format wymiany informacji diagnostycznych w rozproszonym systemie nadzorowania

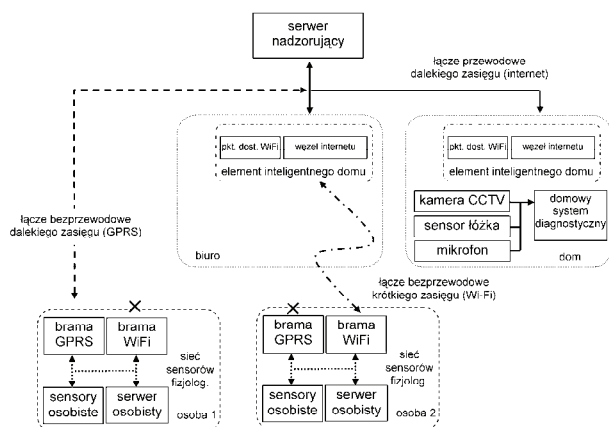
Fig. 2. The format of the exchange of diagnostic data in a distributed supervising system

3. Hybrydowe systemy nadzoru i sterowania

Nadzór prowadzony z użyciem inteligentnych sensorów zawierających wbudowane oprogramowanie właściwe do ekstrakcji poszukiwanych cech jest obecnie rozpowszechniony w systemach bezpieczeństwa banków, lotnisk i podobnych przestrzeni publicznych. Wymiana oprogramowania i dołączenie dodatkowych sensorów generujących opis obserwowanej osoby na podstawie parametrów diagnostycznych pozwalają na dostosowanie systemu do nadzoru osób niepełnosprawnych, starszych lub chorych mieszkających samotnie (ang. *assisted living*) [4]. Systemy takie są obecnie stosowane w niektórych szpitalach, hospicjach i domach spokojnej starości, ułatwiając pracę personelu przez automatyczną analizę zachowań osób i detekcję sytuacji potencjalnie niebezpiecznych. Najczęściej podawanym przykładem jest detekcja upadku. Powszechne obecnie przenoszenie usług medycznych (diagnostyki i terapii) do domu pacjenta pociągnie za sobą także instalację systemów nadzorujących w domach osób objętych nadzorem.

Systemy nadzoru są określone jako hybrydowe, gdyż składają się zarówno z części osobistej (zrealizowanej zwykle jako autonomiczna sieć sensorów, ang. *body sensor network*) towarzyszącej osobie podczas poruszania się, jak i z części stacjonarnej (stanowiącej element infrastruktury budynku, domu lub biura, albo pojazdu). Ciekawym wyzwaniem jest zagadnienie automatycznej identyfikacji osoby nadzorowanej i współpraca obu podsystemów z wykorzystaniem alternatywnych kanałów łączności bezprzewodowej. Podczas pobytu osoby nadzorowanej w pomieszczeniu jej sieć sensorów komunikuje się z centrum nadzorującym za pośrednictwem części stacjonarnej, z wykorzystaniem szerokopasmowego łącza o krótkim zasięgu (np. Wi-Fi). Podczas przemieszczania się osoba nadzorowana

wychodzi z zasięgu infrastruktury stacjonarnej i jej stan może być monitorowany w ograniczonym zakresie za pośrednictwem kanału o dalekim zasięgu (np. GPRS) i niższej przepustowości (rys. 3).



Rys. 3. Schemat blokowy przykładowego hybrydowego systemu nadzorowania

Fig. 3. General scheme of the example hybrid monitoring system

Systemy nadzorujące, stosowane do nadzoru zachowania i zdrowia osób, mają szereg interesujących właściwości:

- mogą być indywidualnie programowane dla każdej nadzorowanej osoby (zgodnie z założeniami medycyny spersonalizowanej),
- zapamiętują zachowania typowe dla nadzorowanych osób (wzorce behawioralne) i na podstawie odstępstw mogą identyfikować sytuacje potencjalnie niebezpieczne,
- wykorzystują indywidualne właściwości pomieszczeń w celu identyfikacji i klasyfikacji akcji,
- mogą zostać zaprojektowane do identyfikacji określonych gestów jako poleceń wydawanych przez nadzorowaną osobę otoczeniu (zgodnie z paradygmatem *universal design*).

Ostatnia z wymienionych właściwości powoduje, że systemy te nazywane bywają nadzorująco-sterującymi i zaliczane są do grupy alternatywnych interfejsów człowiek-komputer [5].

4. Segmentacja mięśnia sercowego

Jednym z zastosowań segmentacji obrazów w tym obszarze obrazowania medycznego jest ocena odkształceń (ang. *strain*) i prędkości odkształceń (ang. *strain rate*) poszczególnych segmentów mięśnia sercowego. Regionalna ilościowa analiza czynności mięśnia sercowego w czasie skurczu i rozkurczu pozwala na ocenę mechaniki serca, w szczególności umożliwia identyfikację miejsc niedokrwiennych.

W pracy [6] zaprezentowano metodę segmentacji mięśnia sercowego lewej komory serca na obrazach kardiologicznego rezonansu magnetycznego (CMR) w osi krótkiej. Stosując parametryczny algorytm aktywnego konturu, bazujący na rachunku wariacyjnym, wyszczególniono kontur wsierdzia. Segmentacja metodą parametrycznego aktywnego konturu polega na zadaniu warunków początkowych

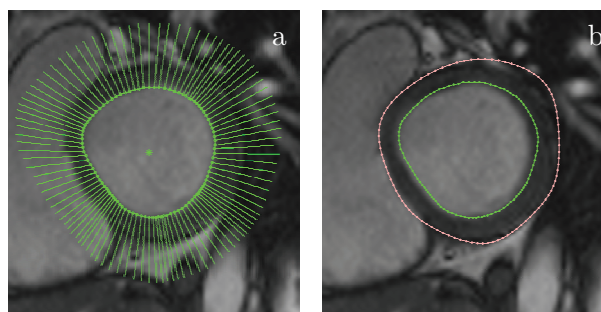
w postaci krzywej zamkniętej $\psi(s^0)$ na płaszczyźnie obrazu, a następnie w wyniku oddziaływujących sił i określonych ograniczeń (na podstawie obrazu), dopasowaniu jej do brzegów poszukiwanego obiektu (rys. 4). Proces dopasowania jest procedurą iteracyjną, w której następuje minimalizacja odpowiednio zdefiniowanej energii krzywej.



Rys. 4. Zbieżność dyskretnej krzywej do granicy obiektu; szary kolor oznacza obszar zbieżności punktów krzywej, natomiast biały – brak zbieżności

Fig. 4. A convergence of discrete curve to the boundaries of the object; gray colour denotes area of convergence, while white colour denotes area of divergence

Metoda aktywnego konturu, wraz z wyznaczeniem obszaru zbieżności (pole wektorowe), stosująca rachunek wariacyjny, została z powodzeniem wykorzystana do segmentacji wsierdzia (rys. 5a). Podejście to jednak okazało się bezużyteczne w określeniu nasierdzia, co jest podyktowane lokalną rotacją pola wektorowego. Jako wariant alternatywny uzupełniono algorytm o autorską metodę łączącą proponowane rozwiązanie „rozchodzących promieni” oraz deskryptory Fouriera (rys. 5b).



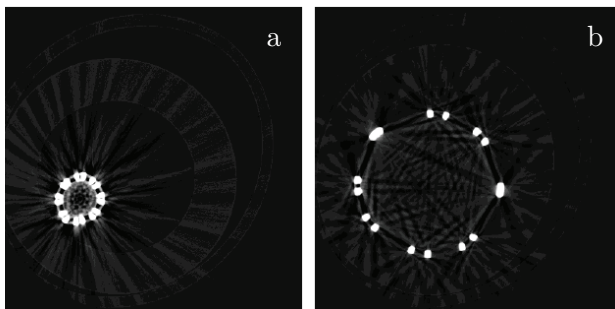
Rys. 5. Rezultat zastosowania metody „rozchodzących promieni” (a) oraz końcowy kształt krzywej nasierdzia po korekcji za pomocą procedury opartej o deskryptory Fouriera (b)

Fig. 5. Results of application of the method of "diverging rays" (a) and final shape of a curve fitting epicardium, after correction based on Fourier descriptors (b)

5. Trójwymiarowa rekonstrukcja implantów wewnątrznaczyniowych

Implanty wewnątrznaczyniowe znajdują zastosowanie w leczeniu zwężenia światła naczyń krwionośnych w układzie sercowo-naczyniowym, w szczególności dużych tętnic oraz aorty. Po wykonaniu zabiegu angioplastyki, którego celem jest umiejscowienie stentu wewnątrz naczyń krwionośnych, jedną z metod diagnostyki może okazać się rekonstrukcja trójwymiarowa na podstawie dwuwymiaro-

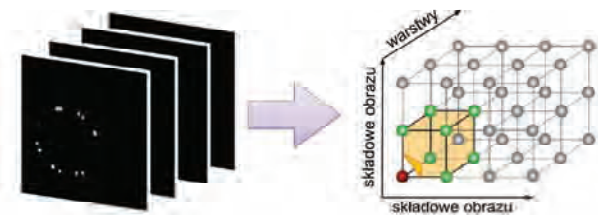
wych obrazów poprzecznych, uzyskanych w wyniku badania tomografii komputerowej (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowe obrazy przekrojów poprzecznych implantu wewnątrznacyniowego przed rozprężeniem (a) oraz po rozprężeniu (b)

Fig. 6. Exemplary cross section images of an intravascular implant before (a) and after expansion (b)

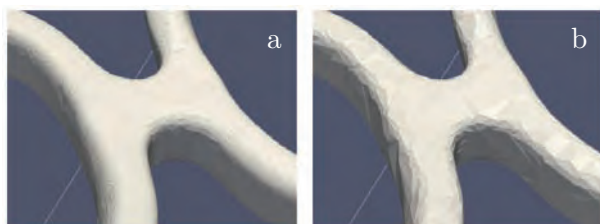
W pracy [7] zaprezentowano segmentację implantów wewnątrznacyniowych na podstawie techniki progowania, filtracji nieliniowej oraz operacji morfologicznych. Wyszczególnione obszary implantów stanowią dane wejściowe do algorytmu maszerujących sześcianów, który z kolei odpowiada za przestrzenną rekonstrukcję obiektu (rys. 7).



Rys. 7. Mapowanie danych obrazowych na regularną siatkę skalarną w trzech wymiarach

Fig. 7. Image data mapping on a regular scalar grid in three-dimensional space

W pracy zastosowano algorytmy decymacyjne siatki, które w znaczący sposób przyspieszają operacje na trójwymiarowej strukturze (obrót, skalowanie), jednak wyniki obarczone są utratą informacji, która z punktu widzenia medycznego może okazać się nie do zaakceptowania (rys. 8).



Rys. 8. Decymacja 75 % (a) – próg, od którego następuje utrata informacji z punktu widzenia diagnostycznego oraz decymacja na poziomie 95 % (b)

Fig. 8. Decimation at 75 % (a) (a threshold level, from which a loss of the diagnostic data begins to happen), and decimation at 95 % (b)

6. Segmentacja oraz trójwymiarowa rekonstrukcja tętnic szyjnych

Komplikacje na tle neurologicznym często spowodowane są pojawiającymi się blaszkami miażdżycowymi zakłócającymi światło tętnic szyjnych doprowadzających krew natlenioną do naczyń mózgu. Konsekwencje wynikające z braku drożności tętnic mogą prowadzić do zaburzeń ruchowych, czuciowych, zmysłu równowagi i mowy. Według organizacji WHO (World Health Organization), udar niedokrwienny mózgu jest drugą po chorobie niedokrwiennej serca przyczyną zgonów na świecie przyczyniając się do śmierci 6,15 mln ludzi [8].

Właściwa lokalizacja i uwidocznienie przewężeń tętnic szyjnych jest podstawą do leczenia inwazyjnego, w tym endarterektomii i plastyki wewnątrznacyniowej. Proces lokalizacji przewężeń i planowania decyzji dotyczących zabiegów chirurgicznych może być wspomagany przez odpowiedni system CAD. Wcześniej jednak etap trójwymiarowej rekonstrukcji musi zostać poprzedzony właściwą i poprawną z punktu widzenia medycznego segmentacją obszarów tętnic na przekrojach poprzecznych.

W pracy [9] przedstawiono algorytm segmentacji tętnic szyjnych na obrazach przekrojów poprzecznych, wykorzystując do tego metodą zbiorów poziomicowych (ang. *level-set method*). Metody zbiorów poziomicowych bazują na ewolucji krzywej $\gamma(t)$, która w kolejnych iteracjach dopasowuje się do brzegów struktur anatomicznych na obrazach dwuwymiarowych. Krzywa $\gamma(t)$ reprezentowana jest jednak w postaci niejawnej, tzn. jako zbiór poziomicowy pewnej funkcji $\psi(x, y, t)$

$$\gamma(t) = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \psi(x, y, t) = 0\} \quad (1)$$

Proces segmentacji wstępującej polega na analizie każdego przekroju poprzecznego oraz jego poprzednika w postaci konturu naczynia począwszy od przekroju zlokalizowanego na wysokości pnia ramienno-głogowego. W wyniku ewolucji krzywej, na każdym z przekrojów wyznaczony zostaje kontur opisujący naczynie, który w dalszej części



Rys. 9. Wyniki trójwymiarowej rekonstrukcji tętnic szyjnych po poprzedniej segmentacji za pomocą podejścia zbiorów poziomicowych

Fig. 9. Results of three-dimensional reconstruction of the carotid arteries preceded by an image segmentation based on the level-set approach

służy jako dane wejściowe do algorytmu maszerujących sześcianów. Uzupełniona wersja algorytmu, przez powtórzoną analizą zstępującą przekrojów, umożliwia również segmentację tętnic podobojczykowych (rys. 9).

7. Podsumowanie

Elektrodiagnostyka i diagnostyka obrazowa serca w zakresie, w jakim stanowią tematy prac badawczych prowadzonych w Laboratorium Biocybernetyki AGH, są problemami bezpośrednio wpływającymi na poziom życia społeczeństw o systematycznie wzrastającej długości życia. Wynika to zarówno z faktu znacznej śmiertelności i gwałtownego przebiegu patologii układu krążenia, niedostosowania tego układu do obecnej średniej długości życia (prawie dwukrotnie dłuższej niż przed 100 laty), jak i ze ścisłej reprezentacji wielu pozornie niezwiązanych epizodów (np. obciążenia organizmu, oddechu, ale i faz snu) w łatwym do pozyskania sygnale EKG.

Prace naukowe mające na celu wdrożenie nowych urządzeń medycznych lub powszechnego użytku przeznaczonych do wspomagania profilaktyki zdrowotnej i świadomego kształtowania stylu życia, są uzasadnione chęcią wykorzystania techniki w służbie człowiekowi. Autorzy nie mają wątpliwości, że tematyka ta jeszcze przez długie lata będzie niewyczerpanym źródłem coraz lepszych rozwiązań.

Bibliografia

1. Tadeusiewicz R.: *Earliest Computer Vision Systems in Poland*, [w:] Choras R.S. (red.): *Image Processing and Communications Challenges 2*, "Advances in Intelligent and Soft Computing" vol. 84, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, New York, 2010, 3–13.
2. Augustyniak P., Tadeusiewicz R.: *Ubiquitous Cardiology: Emerging Wireless Telemedical Applications*, Hershey, New York, Medical Information Science Reference, 2009.
3. Augustyniak P.: *Adaptivity and Optimization in Distributed ECG Interpretation*, „IEEE Trans on Information Technology in Biomedicine” vol. 14 no. 2, 394–400.
4. Augustyniak P.: *Assisted Living Infrastructure*, „Journal of Medical Informatics and Technologies”, 2011, vol. 17, 11–22.
5. Augustyniak P.: *Compound Personal and Residential Infrastructure for Ubiquitous Health Supervision* [w:] Hippe Z.S., Kulikowski J.L., Mroczek T. (red.): *Human-Computer Systems Interaction. Backgrounds and Applications 2*, Springer-Verlag Co., „Advances in Soft Computing” (w druku).
6. Pięciak T.: *Myocardial Segmentation Based on Magnetic Resonance Sequences*, „Bio-Algorithms and Med-Systems, Medical College”, 2010, vol. 6 no. 12, 85–90.
7. Pięciak T.: *Trójwymiarowa rekonstrukcja implantów wewnętrznych*, I Ogólnopolska konferencja studentów biofizyki, Uniwersytet Jagielloński, Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii, 2011, 47–57.
8. [www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310_2008.pdf] – *World Health Organization, The Top Ten Causes of Death*, May 2011.
9. Pięciak T., Baran M., Urbańczyk M.: *Level-set Based Segmentation of Carotid Arteries in Computed Tomography Angiography Images*, „Journal of Medical Informatics and Technologies”, 2011, vol. 17, 281–286. ■

Electrodiagnostics and image diagnostics of the heart in Biocybernetics Laboratory

Abstract: This article deals with current issues in electrodiagnostics and image diagnostics of the heart and vessels. All research takes place in the Biocybernetics Laboratory of AGH University of Science and Technology. In the article, an idea of a portable ECG recorder, which auto adaptively changes ECG interpretation software, is being presented. This group of systems is extended by hybrid systems for supervision and control. They consist of personal and stationary parts, which are responsible respectively for signal acquisition and patient monitoring, as well as identification of potentially threatening conditions. In the field of medical imaging, three domains are presented, for which image segmentation algorithms are proposed: a myocardium, an intravascular implants and carotid arteries. These methods are mostly based on the deformable models: active contour and level-set methods.

Keywords: telemedicine, remote monitoring, distributed systems, medical imaging, image segmentation, three-dimensional reconstruction

mgr inż. Tomasz Pięciak

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w Krakowie (2010). Od 2010 r. asystent naukowo-dydaktyczny na macierzystym wydziale. Zainteresowania naukowe to metody deformowalne w analizie obrazów oraz techniki obrazowania tensora dyfuzji. Członek IEEE od 2010 r.
e-mail: pieciak@agh.edu.pl



dr hab. inż. Piotr Augustyniak, prof. AGH

Kierownik Międzywydziałowej Szkoły Inżynierii Biomedycznej w AGH w Krakowie. Ukończył studia na kierunku elektronika w 1989 r. (AGH), doktorat w 1995 (z wyróżnieniem), habilitacja w 2004 (automatyka i robotyka). Pracownik Katedry Automatyki AGH od 1989. Zainteresowania naukowe to sprzętowe i programowe rozwiązania przetwarzania sygnałów oraz systemów wspierających osoby starsze i chore w codziennym życiu. Członek IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, International Society of Electrocardiology oraz Computers in Cardiology Society.
e-mail: august@agh.edu.pl

