

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Mantas PAULINAS

SEGMENTATION AND ANALYSIS
OF MEDICAL COMPUTER
TOMOGRAMS

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2010.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Andrius UŠINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc Prof Dr Šarūnas PAULIKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof Dr Habil Audris KOPUSTINSKAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Genadijus KULVIETIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Aleksandras LAUCEVIČIUS (Vilnius University, Biomedical Sciences, Medicine – 07B),

Prof Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Opponents:

Assoc Prof Dr Vaidotas MAROZAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 10 a. m. on 10 December 2010.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 9 November 2010.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Mantas Paulinas, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mantas PAULINAS

MEDICININIŲ KOMPIUTERINIŲ
TOMOGRAMŲ SEGMENTAVIMAS
IR ANALIZĖ

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

doc. dr. Andrius UŠINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

doc. dr. Šarūnas PAULIKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. habil. dr. Audris KOPUSTINSKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Aleksandras LAUCEVIČIUS (Vilniaus universitetas, biomedicinos mokslai, medicina – 07B),

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Oponentai:

doc. dr. Vaidotas MAROZAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. gruodžio 10 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. lapkričio 9 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1824-M mokslo literatūros knyga.

Introduction

Topicality of the problem. Segmentation is an indispensable part of medical image processing. It helps to extract regions of interest, subdivide image into smaller meaningful parts, etc. But usually a method intended for liver segmentation cannot be used for blood vessels segmentation. A lot of methods for segmenting blood vessels exist. Some of them are meant for body vessels and others for brain vessels. Some of them work with computed tomography (CT) data, others with magnetic resonance (MR) data. All of them have different requirements for computational power and have several adjustable parameters which influence the outcome.

Recently low dose 4D scanners appeared. They capture internal tissues movements using CT technology emitting significantly smaller amount of ionizing radiation. The price of this is decreased image contrast and resolution. Therefore lots of algorithms meant for vessels extraction fail. They require adoptions to changed image parameters, which are not always possible.

Several methods for analysis of left heart ventricle exist, but there are only few for right ventricle. Due to a complex geometrical form it remains difficult to analyze them. The technology for analysis exists but MR is rather expensive, while CT is hazardous to health. 3D echocardiography, which can provide insights into the workings of right ventricle, appeared recently. However, there is a need for new simpler tools, which would allow analyzing complex movements of ventricle surface, and assess in diagnosis.

Research object. In this work we analyze medical images obtained using MR and low dose 4D CT technologies, 4D segmented images of right heart ventricle and algorithms for such images processing.

Aim and tasks of the work. The aim of the work is to provide new and better means for segmentation of brain blood vessels in MR images, segmentation of blood vessels with bifurcation detection in low dose CT images and to create a methodology for extraction and subdivision of right heart ventricle medial axis. The main tasks, relating to the aim of the work are as follows:

1. Analyze available blood vessel segmentation algorithms.
2. Considering results of the analysis provide:
 - a) an algorithm for head blood vessels segmentation,
 - b) an algorithm for lungs blood vessels segmentation with bifurcation detection,
 - c) a right heart ventricle medial axis extraction and methodology of simplification.

Methodology of research. It includes traditional image segmentation theory and novel computational geometry methods. Computer models and algorithms are implemented using C++ programming language with additional *ITK* (Insight Toolkit) and *VTK* (Visualization Toolkit) libraries. We analyze and work with real medical images obtained at various medical institutions.

Scientific novelty

1. A new, fully automatic brain blood vessels segmentation algorithm is provided. It allows to segment blood vessels and their pathologies – aneurysms for subsequent processing.
2. A new, lungs blood vessels segmentation with bifurcation detection algorithm is provided.
3. A new methodology for right heart ventricle medial axis extraction and simplification is provided.

Practical value. The proposed brain blood vessels segmentation algorithm allows fully automatically segmenting vessel regions in MR images. There is a possibility to adjust segmentation results if needed. Algorithm can be used to improve visual inspection of blood vessels as well as an intermediate step for further processing: i.e. search for anomalies in vessels, computer aided diagnostics, computation of parameters, etc. This algorithm was developed specifically as an intermediate step for calculation of aneurysms' parameters. The development was supported by European organization "Eureka!" in a project "Analysis of human head blood vessels in angiograms"; no. E! 3475; AMRA.

The proposed algorithm for segmenting blood vessels in low dose CT lung images allows detecting vessel regions and extracting bifurcation points. Algorithm can be used for blood vessel extraction and visualization or as an intermediate step for further processing. This algorithm was developed for lungs' blood vessels bifurcation points' detection. The results were meant to be used in further analysis of lung tissues movement during breath cycle.

The proposed methodology for right heart ventricle medial axis extraction and subdivision can be used as an intermediate step for further analysis of ventricle surface movement. The surface can be subdivided with respect to medial axis partitions. This can be advantageous in difficult shape analysis and parameterization. The methodology can be adapted for different shape analysis.

Defended propositions

1. The algorithm for automatic brain blood vessel segmentation in MR images produces results with average 0,59 Matthews correlation with 0,23 standard deviation.

2. Lung vessels regions in low dose CT can be segmented using proposed lung vessel segmentation algorithm.
3. To obtain a reference point for analysis of right heart ventricle dynamics, its' medial axis can be extracted and subdivided using proposed methodology.

The scope of the scientific work. The dissertation is written in Lithuanian. It consists of four main chapters; two of them are dedicated for blood vessel segmentation and one for right heart ventricle medial axis extraction and subdivision. The text of dissertation consists of 100 pages. It contains 53 mathematical expressions, 51 figures, 2 tables and cites 100 references.

1. Analytical Review of Literature

The methods review shows that several possible segmentation types exist. It includes: pattern recognition, modelling, tracking, artificial intelligence, neural networks and combinations of several methods. Taking into account applicability of the segmentation algorithms we need to reduce or possibly eliminate free adjustable parameters which can influence the outcome. Lots of algorithms are discarded by this requirement.

For lung blood vessels segmentation we need to detect vessel bifurcations. This limits the choice of algorithms. Further, initial low dose 4D CT data narrows the range of available algorithms even more. For our purposes we chose region growing algorithm as a starting point.

The reconstruction of right heart ventricle requires additional surface movement investigations. They require additional tools which could capture and present surface movements. We chose a medial axis due to its ability for capturing even tiniest surface details. Computation of medial axis from low resolution segmented image data requires additional investigation. To overcome this we chose to reconstruct ventricle's surface and to use it to approximate medial axis. The three-dimensional medial axis is complex in its geometrical shape and this leads to a need of simplification. Observing movement of medial axes of different ventricles we chose to subdivide them using curvature maps.

2. Segmentation of Brain Blood Vessels

Data for brain blood vessels segmentation is obtained from MR scanner. Blood vessels leave bright traces in angiography images. Trace brightness varies with thickness of the vessels. The thinner the vessel, the lower brightness it has. Most of the brain vessels have a path to internal carotid arteries. We utilize

these properties using region growing algorithm. The overview of the algorithm is shown in Fig. 1. The algorithm needs two initialization parameters, which are computed automatically. First of the parameters is a set of initial seed points. They are collected by thresholding initial data at specific brightness. The thresholding value is different for each dataset.

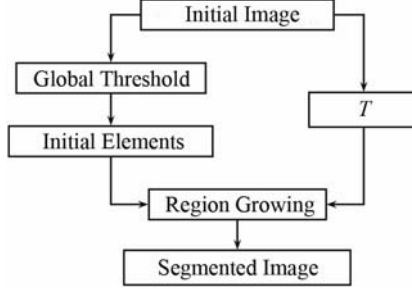


Fig. 1. The structure of the automatic blood vessel segmentation algorithm

We obtained experimental threshold T_e by thresholding images so that remaining voxels belong only to blood vessels internal regions. It was found that the experimental threshold correlated best with mean image brightness (0,89) and could be computed by

$$T_a(\bar{I}) = 0,1116\bar{I}^2 - 8,314\bar{I} + 388,4, \quad (1)$$

here: T_a is automatically computed threshold, \bar{I} – mean image brightness. The approximation graph is shown in Fig. 2.

After the application of computed threshold . all remaining voxels are considered as seed points for region growing algorithm.

The second automated parameter is a stop condition for region growing. It was chosen as a brightness threshold of voxels, which can be added to a segmented region. This stops expansion into neighbouring brain tissues.

It was observed that brightness histograms of head angiography images were bimodal. Another observation was that all brightness values belonging to blood vessels were clustered in the far right end. To automatically compute the stopping threshold we propose the following function

$$\delta(i) = -w \cdot (h_f(i-w) + h_f(i+w)) + \sum_{j=i-w}^{i+w} h_f(j), \quad (2)$$

here: i – brightness, h_f – filtered histogram, w – half width of a window, σ – difference of two areas.

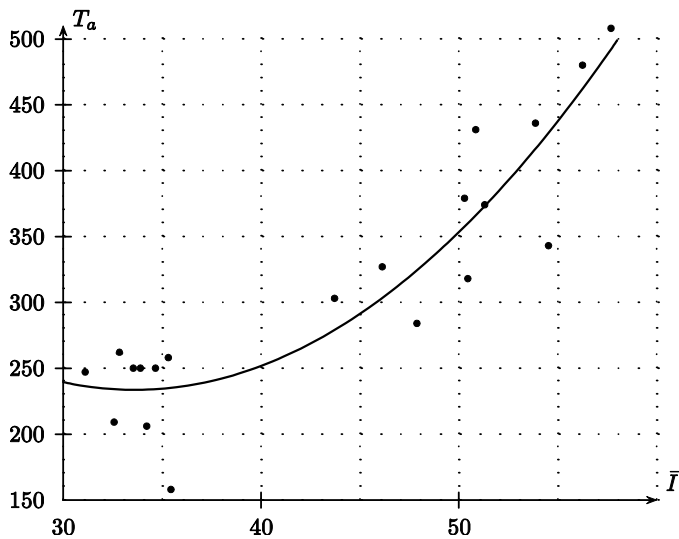


Fig. 2. Experimental threshold T_e data and their approximation T_a

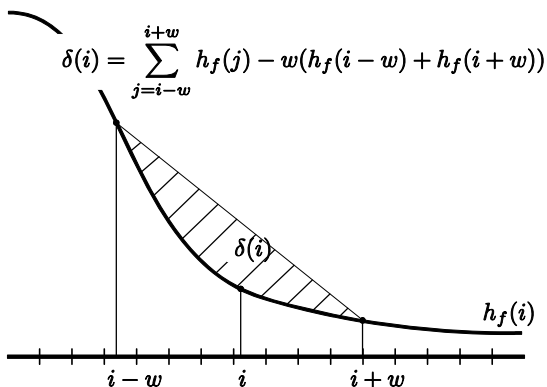


Fig. 3. Graphical view of δ ; a difference of integral area under the histogram and trapezoid

Prior of the function application histogram is filtered using low pass Gaussian filter with window width w_g . This increases robustness. A geometrical representation of the expression is shown in Fig. 3. The equation has one direct and one indirect free parameter. The direct one is the width of the computation window, and the indirect one – the width of the histogram filtering window. In order to find the optimal combination of these two parameters we performed an experiment and found their effect on segmentation outcome. The data were segmented using different combination of the parameters and results were compared to ground truth segmentation (obtained semi-automatically). The error of segmentation was evaluated using the following expression:

$$\epsilon = \sum_{n=0}^N \frac{\sum_{i=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_j} \sum_{k=0}^{n_k} (I_A(i, j, k) - I_S(i, j, k))^2}{N_{I_S}}, \quad (3)$$

here: N – number of different data sets, n_i, n_j, n_k – size of one data set in x, y and z dimensions, I_A – ground truth segmented image, I_S – automatically segmented image, N_{I_S} – number of blood vessel voxels in ground truth segmented image. Distribution of the results is shown in Fig. 4. It was found that the best parameters were $w_g = 20$ and $w = 30$.

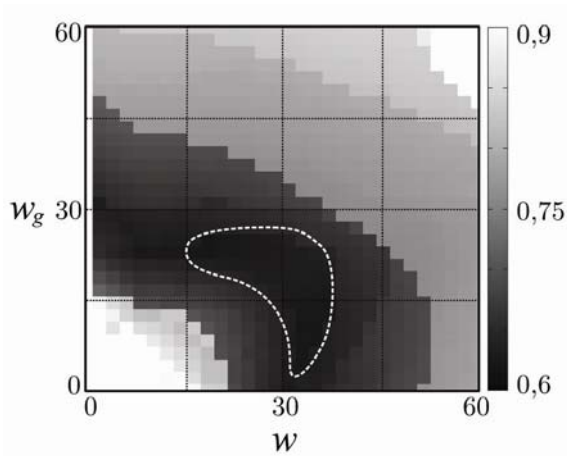


Fig. 4. Mean ϵ , with changing parameters w and w_g ; dashed line denotes function minimum

It was observed that processing unfiltered histogram gives worse results than moderately filtered. From Fig. 4 can be seen that histogram filtering window width and vessels region detection from histogram window width has similar effect, but optimal result in the sense of equation 3 is obtained using both windows.

3. Segmentation of Lung Blood Vessels

Lungs' blood vessels segmentation algorithm is based on modified region growing algorithm. The segmentation is performed on four dimensional low dose CT scans. Whole region of lungs is obtained in several blocks which are aligned and matched using an image registration algorithm proposed by Ehrhardt (Ehrhardt *et al* 2008).

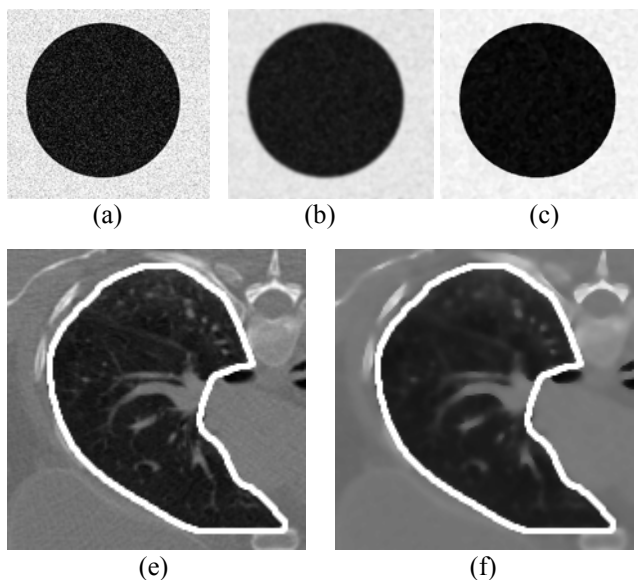


Fig. 5. a) noisy picture, b) filtered using Gaussian filter, c) filtered using anisotropic diffusion filter, d) sub region of lungs, e) same sub region after filtering. Lung region is marked by white contour

The low dose CT scans are noisy and low in contrast. To decrease noise and increase separation between blood vessels and surrounding tissues we perform anisotropic diffusion filtering and sigmoid filtering. The first one filters out noise but leaves undistorted object edges as shown in Fig. 5. The filter solves diffusion equation over image domain relating conduciveness with local image properties, i.e. strong gradient means low conductivity and vice versa.

The sigmoid filter nonlinearly maps voxel brightness to other values, thus increasing contrast nonlinearly. The filter is defined as

$$I_{\Omega} = (I_{min} - I_{max}) \cdot \frac{1}{\left(1 + e^{-\frac{I-\beta}{\alpha}}\right)} + I_{min}, \quad (4)$$

here: I_{max} and I_{min} – maximal and minimal brightness in image I , α – sigmoid function steepness, β – sigmoid function shift. The filter was applied to initial data gradient, prior to lungs segmentation, to emphasize separation between lungs and other tissues. Best values for parameters were found to be $\alpha = 0,005$ and $\beta = 0,06$. Lungs were segmented using level sets (Sethian 1999) and fast marching algorithm (Sethian 1996).

Before segmenting blood vessels we increase their visibility by calculating vesselness criterion I_C (Sato *et al* 1998) and merging initial data with I_C using expression

$$I_{SDA}(\mathbf{v}) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{I(\mathbf{v})-600}{20}}} + \frac{1}{1 + e^{-\frac{I_C(\mathbf{v})-20}{2}}}, \quad (5)$$

here: I_{SDA} – merged image, I_C – image of vesselness criterion, \mathbf{v} – voxel coordinates. The merged data is processed by modified region growing algorithm to blood vessel regions and detect vessel bifurcation points.

The modified region growing algorithm works in a similar manner as wave propagation algorithms. It expands from seed points and maintains wave front; expansion is performed equally in all directions. The blood vessels are modelled as composite objects. One blood vessel is considered to be a tubular object between two bifurcations. This object is subdivided into smaller segments of blood vessel, which are constantly monitored for certain properties during segmentation. If the segment does not satisfy several criterions, it is rejected as not belonging to a vessel tree. Main criterions are: ratio between initial wave front and current front sizes, ratio between length and radius of the segment and others. The lungs and blood vessels segmentations are shown in Fig. 6 a and b. Fig. 6 a displays segmented lungs region, it is marked by contour. The lungs regions are segmented only approximately, but all the traces of blood

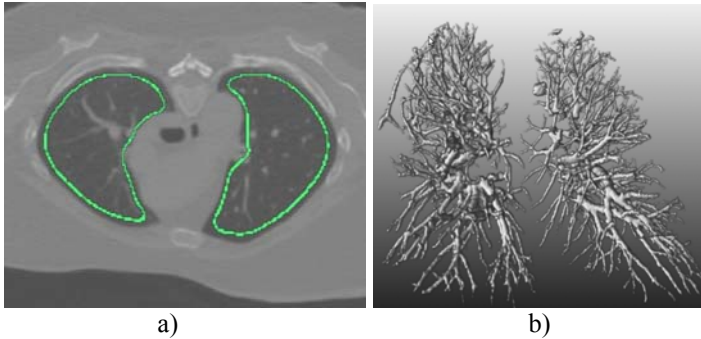


Fig. 6. a) Lungs segmentation result; b) segmented lungs internal blood vessels regions

vessels near the lobe of lungs are very small and hard to detect. So, approximate extraction of lungs region does not have noticeable effect on subsequent blood vessels segmentation results. It can be seen that blood vessel regions are extracted from segmented lungs images.

4. Analysis of Right Heart Ventricle Medial Axis

For analysis of right heart ventricle we propose to use its medial axis. To compute it from initial segmented data we have to reconstruct initial ventricle's surface because obtained four dimensional data has too low spatial resolution for direct approximation of medial axis.

We have tried two approaches for surface approximation: first, to parameterize and reconstruct surface using spherical harmonics and second, to use marching cubes algorithm on enlarged and interpolated dataset.

The first approach gave good results in surface smoothness and sampling density but it introduced additional details which burdened computation and analysis of medial axis. The second approach produced good surface approximation and medial axis approximation.

To find best dataset enlargement and filtering combination, we modelled three dimensional object details as spheres of different radius. We converted them into digital image representation with the same properties as our initial data. Then we enlarged, filtered and reconstructed sphere's surface. The newly obtained surface was compared to original sphere and the difference error was computed. The results showed that it was best to make voxel size on each di-

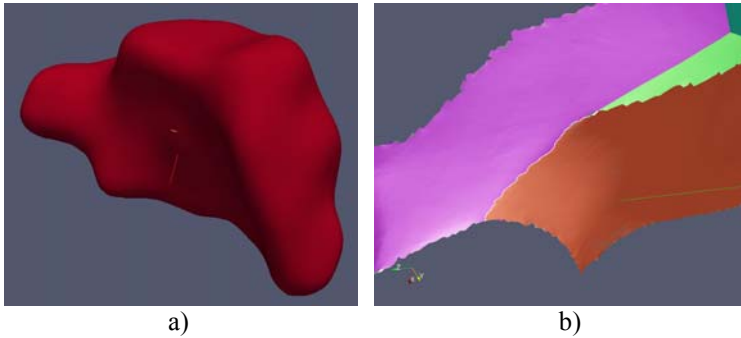


Fig. 7. a) Approximated right heart ventricles' surface; b) dividing path of medial axis

mension to be equal to 1,5 mm. We used Gaussian filter for data filtering. The experiment showed that smallest error was obtained with $\sigma = 3,5$.

All data sets were recomputed according to results of the experiment and right heart ventricle's surfaces approximated.

The medial axis was constructed as described in (Dey and Zhao 2004). An obtained axis was composed from irregularly shaped and sized polygons. In order to regularize them, triangulation and Laplace relaxation were performed. The relaxation introduced some small changes in shape of the medial axis. The optimal number of relaxation iterations was found experimentally, by computing mean triangles' smallest angle and error introduced by distortion. It was found that it was best to use ~ 1000 iterations.

To simplify an analysis of medial axis we propose to subdivide it into smaller medial scaffolds. The subdivision is carried out in two steps. Firstly, all the largest two dimensional manifolds are found, and secondly, they are subdivided with respect to their curvature maps.

The computation and subdivision results are shown in Fig. 7 a and b.

General Conclusions

In this work we propose two algorithms for blood vessels segmentation and the methodology for right heart ventricle medial axis extraction and subdivision. We produced these important results:

1. An algorithm for brain blood vessels segmentation in MR images was created.

- 1.1. The blood vessels were segmented with average 0,59 Matthews correlation with 0,23 standard deviation. In the best case correlation reaches 0,83, and worst drops to 0,21. These results could be improved with addition of iterative results improvement procedure. The results are dependent on strong noise as well. The data sets with pronounced noisy structures should be recaptured before application of automatic segmentation algorithm.
- 1.2. We found a relationship between a mean image brightness and threshold which leaves voxels belonging only to blood vessels. Nonlinearity of the relationship indicated that brightness values in the picture are scaled nonlinearly with increase of mean brightness.
- 1.3. The values of segmentation algorithm parameters obtained during optimization can be used only for processing original images. They are related to shape of the image histogram. Any pre-processing which alters the image histogram can influence segmentation algorithms' performance.
- 1.4. The algorithm is suitable for brain blood vessels segmentation before subsequent processing or visualization.
2. An algorithm for lungs blood vessels segmentation in four dimensional low dose CT images.
 - 2.1. Experimentally determined that sigmoid filter was suitable for lung region enhancement. Sigmoid function parameters should be $\alpha = 0,005$ and $\beta = 0,06$.
 - 2.2. By changing threshold of level set function, we could adjust lungs segmentation results. They can be improved manually if required.
 - 2.3. The algorithm detects most of the visible blood vessels. Analysis of modified region growing algorithm front allows detecting blood vessels bifurcation points.
3. The methodology for right heart ventricle medial axis extraction and subdivision was created.
 - 3.1. Right heart ventricle approximation using spherical harmonics introduces distortions on surface.
 - 3.2. Surface reconstruction from enlarged and smoothed data produces better surface than the one produced using spherical harmonics. It was experimentally determined that best image data enlargement was when spacing was converted to isotropic and voxel's dimensions were 1,5 mm. Gaussian smoothing filter should have $\sigma = 3,5$.
 - 3.3. Fully automatic subdivision works best when the distance between source and target points is small (less than 5 mm).

List of Published Works on the Topic of the Dissertation In the reviewed scientific periodical publications

Paulinas, M.; Meilūnas, M. 2010. An Algorithm for Partitioning of Right Heart Ventricle Medial Axis, *Mathematical Modelling and Analysis* 15(2): 245–255. ISSN 1329-6292. (Web of Science, INSPEC)

Paulinas, M.; Miniotas, D.; Meilūnas, M.; Ušinskas, A. 2008. An Algorithm for Segmentation of Blood Vessels in Images, *Elektronika ir Elektrotechnika*: 25–28. ISSN 1392-1215. (Web of Science, INSPEC)

Mockus, L.; Meilūnas, M.; Paulinas, M.; Ušinskas, A.; Zakarkaitė, D. 2007. Generating of Reformat Slices in Neural and Cardio Tomography, *Mathematical Modelling and Analysis* 12(1): 121–130. ISSN 1392-6292. (Web of Science, INSPEC)

Paulinas, M.; Ušinskas, A. 2007. A Survey of Genetic Algorithms Applications for Image Enhancement and Segmentation, *Information Technology and Control* 36(3): 278–284. ISSN 1392-124X. (Web of Science, INSPEC)

In the other editions

Matiukas, V.; Paulinas, M.; Rokicki, J. 2009. Nemokamų biomedicininių vaizdų apdorojimo priemonių apžvalga, in *Proceedings of Conference on Virtual Instruments in Biomedicine*, 198–205.

Matiukas, V.; Paulinas, M.; Ušinskas, A.; Adaškevičius, R.; Meškauskas, R.; Valinčius, D. 2008. A Survey of Point Cloud Reconstruction Methods, in *Proceedings of the 3-rd International Conference on Electrical and Control Technologies*, 150–153. (ISI Proceedings)

Paulinas, M.; Rokicki, J. 2008. Panašios formos paviršių, centrinės ašies radimo ir filtravimo metodika, in *Proceedings of Conference on Biomedical Engineering*, 209–212.

Rokicki, J.; Paulinas, M.; Meilūnas, M. 2006. Aneurizmos srities aproksimavimas geometrinėmis figūromis, in *Proceedings of Conference on Biomedical Engineering*, 145–149.

Mockus, L.; Paulinas, M. 2006. Galvos smegenų sričių išskyrimas ir atvaizdavimas, in *Proceedings of JMK Conference*, 49–55.

Rokicki, J.; Paulinas, M. 2005. Taškų pasiskirstymo modelio panaudojimas aneurizmų atpažinimui MRI tomogramose, in *Proceedings of Conference on Biomedical Engineering*, 261–264.

Ušinskas, A.; Paulinas, M.; Rokicki, J.; 2005. Trimačio modelio sudarymas skaitmeninei kraujagyslių analizei tomogramose, in *Proceedings of Conference on Biomedical Engineering*, 248–251.

About the author

Mantas Paulinas was born in Kaunas, on 3 of June 1982.

First degree in Computer Systems Engineering, Faculty of Electronics, Vilnius Gediminas Technical University, 2004. Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of Electronics, Vilnius Gediminas Technical University, 2006. In 2006–2010 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. Mantas Paulinas in 2008 was on internship at Medical Informatics institute, Hamburg University. At present – Assistant in Electronic Systems Department of Vilnius Gediminas Technical University.

MEDICININIŲ KOMPIUTERINIŲ TOMOGRAMŲ SEGMENTAVIMAS IR ANALIZĖ

Mokslo problemos aktualumas. Segmentavimas yra būtina atvaizdų apdorojimo proceso dalis. Jis padeda nustatyti dominančią sritį, išskirti reikalingus objektus, suskaidyti atvaizdą į specifines sritis ir pan. Medicininių atvaizdų apdorojime segmentavimas naudojamas konkrečių organų arba audinių išskyrimui. Dažnai metodas, skirtas vienai sričiai, negali būti taikomas kitos srities segmentavimui, pavyzdžiui kepenų segmentavimui skirtas algoritmas negali būti taikomas kraujagyslių radimui. Pastarųjų segmentavimui sukurta daug metodų, vieni skirti kepenų kraujagyslėms, kiti – galvos kraujagyslėms, vieni darbą atlieka kompiuterinės tomografijos (KT) atvaizduose kiti – magnetinio rezonanso tomografijos (MRT) atvaizduose. Be to algoritmai skiriasi savo sparta ir kiekvienas turi savų privalumų bei trūkumų. Jeigu yra sprendžiamas konkretus uždavinys su konkrečiais apribojimais, dažnai bendri algoritmai netinka ir juos tenka modifikuoti bei pritaikyti konkrečios problemos sprendimui.

Kuriama nauja tobulesnė diagnostinė įranga, gebanti užfiksuoti naujus žmogaus organų atvaizdus. Tobulėjant technologijoms buvo sukurta mažų dozių kompiuterinė tomografija, leidžianti fiksuoti žmogaus organizmo veiklą laike. Šios technologijos kuriami atvaizdai yra mažiau kontrastingi ir triukš-

mingesni nei įprastinė kompiuterinė tomografija, tad didelė dalis algoritmų skirtų tradiciniams atvaizdams pradeda išduoti prastesnius rezultatus ir reikalauja papildomų tyrimų ir adaptacijų.

Širdies analizei sukurta eilė metodų ir algoritmų, tačiau dauguma jų skirti kairiajam širdies skilveliui. Jis yra gerai ištyrinėtas ir žinomas, o dešinysis dėl savo sudėtingos formos nėra iki galo ištirtas. Pastaruoju metu jo tyrimams skiriama vis daugiau dėmesio, tačiau juos apsunkina sudėtingas ir brangus atvaizdų gavimas. MRT tyrimai yra brangūs, o KT kenksmingas žmogaus sveikatai, ultragarsu pagrįsti tyrimai pirmą kartą 1987 m. tapo trimačiais, tačiau techninės įranga išlieka brangi. Nėra atlikta tyrimų kaip būtų galima rekonstruoti trimatį skilvelio vaizdą iš dvimačių ultragarso pjūvių.

Tyrimų objektas. Šiame darbe buvo tiriami atvaizdai gauti medicininės diagnostikos įranga ir juos apdorojantys algoritmai. Tiriami medicininiai atvaizdai: galvos smegenų kraujagyslių atvaizdai užfiksuoti magnetinio rezonanso būdu, plaučių atvaizdai gauti mažų dozių kompiuteriniu tomografu ir segmentuoti širdies atvaizdai.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Darbo tikslas – sukurti, įgyvendinti ir ištirti algoritmus, skirtus medicinoje gaunamų skaitmeninių atvaizdų apdorojimui. Darbo tikslui pasiekti buvo spęsti šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti esami kraujagyslių sričių segmentavimo metodai ir suformuluotos, tolimesnius metodų pasirinkimus darbe pagrindžiančios, išvados.
2. Remiantis apžvelgtais esamais algoritmais, pasiūlyti ir ištirti:
 - a) galvos kraujagyslių sričių segmentavimo metodas,
 - b) plaučių kraujagyslių sričių segmentavimo metodas, leidžiantis identifikuoti kraujagyslių išsišakojimus,
 - c) dešiniojo širdies skilvelio simetrijos karkaso išskyrimo ir skaidymo į dalis metodika.

Tyrimų metodika. Ji apima tradicinės atvaizdų segmentavimo teorijas ir skaičiuojamosios geometrijos metodus. Kompiuteriniai modeliai ir algoritmai kuriami ir įgyvendinami C++ programavimo kalba, naudojama atvaizdų apdorojimo sistema *ITK* (Insight Toolkit) ir vaizdinimo sistema *VTK* (Visualization Toolkit). Dirbama su realiais medicininiais atvaizdais.

Mokslinis naujumas

1. Sukurtas naujas galvos kraujagyslių segmentavimo metodas. Jis leidžia pilnai automatiškai išskirti kraujagyslių sritis tolimesniam apdorojimui.

2. Sukurtas naujas plaučių kraujagyslių segmentavimo metodas. Jis leidžia išskirti kraujagysles iš mažų dozių kompiuterinės tomografijos atvaizdų, tuo pačiu užfiksuojant kraujagyslių šakojimosi vietas.
3. Sukurta nauja dešiniojo širdies skilvelio simetrijos karkaso išskyrimo ir jo skaidymo metodika, leidžianti efektyviai surasti ir padalinti simetrijos karkasą į sudedamąsias dalis, o šias papildomai skaidyti pagal kreivumo žemėlapius.

Praktinė vertė. Sukurtas galvos kraujagyslių segmentavimo metodas leidžia greitai ir automatiškai išskirti kraujagyslių sritis iš galvos MRT atvaizdų. Galimas papildomas vartotojo įsikišimas tikslinant segmentavimo rezultatus. Metodas pagreitina duomenų peržiūrą, tarnauja tarpiniu žingsniu tolimesniems kraujagyslių medžio apdorojimams, pvz. anomalijų paieškai, kompiuterinei diagnostikai, nukrypimų parametų skaičiavimui ir pan. Metodas buvo kuriamas ir naudojamas kaip tarpinis žingsnis galvos aneurizmų paieškoje ir jų parametų skaičiavime Europos tyrimų, plėtros ir bendradarbiavimo programos finansuojamame projekte „Žmogaus galvos kraujagyslių aneurizmos sritys analizė angiogramose“; nr. E! 3475, akronimas AMRA.

Sukurtas plaučių kraujagyslių sričių segmentavimo mažų dozių KT atvaizduose metodas leidžia išskirti kraujagyslių sritis. Metodas gali būti naudojamas kraujagyslių išskyrimui prieš vaizdinimą arba kaip tarpinis žingsnis ilgesnėje skaičiavimų grandinėje. Metodas buvo taikomas ieškant kraujagyslių išsišakojimo taškų, siekiant surasti jų judėjimą kvėpavimo ciklo metu.

Sukurta dešiniojo skilvelio simetrijos karkaso išskyrimo ir skaidymo metodika leidžia suskaidyti SK į atskiras dedamąsias dalis. Jos savo ruožtu gali būti naudojamos skilvelio paviršiaus judėjimo analizei, pagal jas paviršius gali būti skaidomas į atskiras dalis ir analizuojami tų dalių parametrai. Tai būtų naudinga parametrizuojant sudėtingos formos paviršius. Metodas gali būti adaptuotas ir kitokių objektų analizei, kurių paviršius deformuojasi sunkiai nuspėjama linkme.

Ginamieji teiginiai

1. Pritaikius automatinį srities didinimo algoritmo (SDA) inicijavimą ir jo parametų nustatymą, kraujagyslių sritis, galvos MRT atvaizduose, galima segmentuoti su vidutine 0,59 kokybe, jos standartinė deviacija – 0,23.
2. Taikant modifikuotą SDA algoritmą galima segmentuoti plaučių kraujagyslių sritis mažų dozių KT atvaizduose ir išskirti jų išsišakojimus.
3. Taikant siūlomą metodiką galima iš segmentuotų atvaizdų išskirti dešiniojo širdies skilvelio simetrijos karkasą ir jį suskaidyti į simetrijos plokštumas

su papildomu skaidymu pagal kreivumo žemėlapi. Tai sukuria atraminį tašką tolimesnei skilvelio dinamikos analizei.

Darbo apimtis. Disertaciją sudaro: įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas su atskirai pateiktomis autoriaus publikacijomis ir priedais.

Pirmame skyriuje atliekama kraujagyslių segmentavimo metodų analitinė apžvalga. Nagrinėjamos jų teigiamos ir neigiamos savybės. Taip pat pateikiama trumpa kompiuterinių technologijų taikymo vaizdams apdoroti istorija ir klasifikacija. Apžvelgiamos simetrijos karkaso išskyrimo metodikos ir formuluojami disertacijos uždaviniai.

Antrame skyriuje nagrinėjama galvos kraujagyslių segmentavimo MRT atvaizduose problema. Pateikiamas metodas kaip automatizuoti SDA algoritmą ir jį pritaikyti kraujagyslių segmentavimui. Patobulinimai optimizuojami parenkant optimalius parametrus, tikintis gauti kaip galima geresnį segmentavimą. Atliekami eksperimentiniai tyrimai ir suformuluojamos išvados.

Trečiame skyriuje nagrinėjamos plaučių kraujagyslių segmentavimo problemos mažų dozių KT atvaizduose. Pateikiamas modifikuotas SDA metodas, leidžiantis išskirti kraujagysles ir užfiksuoti jų šakojimosi taškus. Atliekami eksperimentiniai tyrimai ir suformuluojamos išvados.

Ketvirtajame skyriuje nagrinėjamos simetrijos karkaso išskyrimo ir skaidymo problemos. Siūlomi du metodai kaip pagerinti atvaizdo savybes siekiant tikslios karkaso rekonstrukcijos. Atliekami šių metodų tyrimai. Taip pat siūlomas metodas kaip suskaidyti SK aproksimaciją į atskiras sudedamąsias dalis ir papildomais suskaidyti jas pagal kreivumo žemėlapius.

Disertacijos pabaigoje apibendrinami darbo rezultatai ir pateikiamos bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 100 puslapių, kuriuose pateikta: 53 formulės, 52 paveikslai ir 2 lentelės. Disertacijoje remtasi 100 kitų autorių literatūros šaltinių.

Bendrosios išvados

Disertacijoje pasiūlyti ir ištirti galvos ir plaučių kraujagyslių segmentavimui skirti metodai, bei dešiniojo širdies skilvelio simetrijos karkaso išskyrimo ir skaidymo metodika. Gauti šie elektros ir elektronikos mokslo kryptiai svarbūs rezultatai:

1. Sukurtas naujas galvos kraujagyslių segmentavimo MRT atvaizduose algoritmas.
 - 1.1. Vidutinė visiškai automatinio galvos kraujagyslių segmentavimo MRT angiogramose rezultatų Metjūzo koreliacija siekia 0,59 su vi-

duotiniu kvadratinu nuokrypiu 0,23. Geriausiu atveju pasiekiami 0,83, o blogiausiu – 0,21. Šie rezultatai gali būti gerinami įvedant iteracinius žingsnius. Taip pat rezultatai gali būti pagerinti apdorojimui atrenkant atvaizdus be stiprių triukšmų. Atvaizdai su ryškiais triukšmais turėtų būti fiksuojami iš naujo.

- 1.2. Kuriant galvos kraujagyslių segmentavimo algoritmą, nustatytas sąryšis tarp vidutinio atvaizdo skaisčio ir slenksčio, kurį pritaikius lieka tik kraujagyslių sritims priklausantys atvaizdo elementai. Šio sąryšio netiesiškumas parodo, kad didėjant bendram atvaizdo skaisčiui, skaisčiai atvaizde didėja neproporcingai.
- 1.3. Atlikus algoritmo parametrų optimizavimą nustatyta, kad geriausi segmentavimo rezultatai pasiekiami kai galvos kraujagyslių atvaizdo histograma filtruojama Gauso filtru, kurio plotis lygus 25 imtims, o stabdymo kriterijaus paieškos lango plotis – 30 imčių. Šie dydžiai nėra priklausomi nuo atvaizdo raiškos. Tačiau yra tinkami tik neapdoroto atvaizdo histogramoms.
- 1.4. Algoritmas yra spartus ir tinkamas greitam kraujagyslių išskyrimui bei peržiūrai. Jis gali būti taikomas kaip pradinis žingsnis sudėtingesnėje atvaizdų apdorojimo schemeje.
2. Sukurtas naujas plaučių kraujagyslių segmentavimo keturmačiuose mažų dozių KT atvaizduose algoritmas.
 - 2.1. Eksperimentiškai nustatyta, kad plaučių srities išryškimui tinka sigmoidinis filtras su $\alpha=0,005$ ir $\beta=0,06$ parametrais. Filtrą pritaikant atvaizdo gradientui gaunami išryškinti plaučių kontūrai.
 - 2.2. Keičiant aproksimuotos funkcijos slenkstį gautas plaučių kontūras priartinamas arba nutolinamas nuo tikrojo plaučių kontūro. Taip galima koreguoti segmentavimo algoritmo rezultatus, jeigu reikalingas tikslus rezultatas.
 - 2.3. Taikant siūlomą metodą galima išskirti didžiąją dalį atvaizde matomų kraujagyslių. O stebint modifikuoto SDA algoritmo frontą galima užfiksuoti kraujagyslių šakojimosi taškus.
3. Sukurta ir pritaikyta nauja simetrijos karkaso išskyrimo metodika ir karkaso skaidymo į simetrijos plokštumas algoritmas.
 - 3.1. Aproksimuojant skilvelį sferinėmis harmonikomis, dėl nepakankamo harmonikų skaičiaus paviršius iškraipomas.

- 3.2. Rekonstruojant paviršių iš didintų ir glodintų duomenų, gaunamas paviršius neturi iškraipymų, kurie yra būdingi aproksimacijai sferinėmis harmonikomis. Eksperimentiškai nustatyta, kad optimalus duomenų tankio didinimas pasiekiamas, kai atvaizdo mastelis suvienodinamas visomis kryptimis. Tokiu atveju optimalus Gauso filtro plotis yra $\sigma=3,5$ mm.
- 3.3. Pilnai automatinis simetrijos karkaso padalinimas pagal kreivumo žemėlapi yra naudotinas tik esant nedideliems atstumams (mažiau negu 5 mm) tarp pradžios ir pabaigos taškų.

Trumpos žinios apie autorių

Mantas Paulinas gimė 1982 m. birželio 3 d. Kaune.

2004 m. įgijo kompiuterinių sistemų inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2006 m. įgijo elektros inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos inžinerijos fakultete. 2006–2010 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Mantas Paulinas 2008 m. stažavosi medicinos informatikos institute, Hamburgo universitete, Vokietijoje. Šiuo metu dirba asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektroninių sistemų katedroje.

Mantas PAULINAS

SEGMENTATION AND ANALYSIS OF
MEDICAL COMPUTER TOMOGRAMS

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering (01T)

Mantas PAULINAS

MEDICININIŲ KOMPIUTERINIŲ TOMOGRAMŲ
SEGMENTAVIMAS IR ANALIZĖ

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2010 11 04. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius
<http://www.ciklonas.lt>