

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Dalius MATUZEVIČIUS

ANALYSIS OF
2D ELECTROPHORESIS GEL IMAGES
USING INTELLIGENT TECHNIQUES

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

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

Scientific Supervisor

Prof Dr Dalius NAVAKAUSKAS (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

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

Members:

Prof Dr Habil Algimantas KAJACKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Juozas KULYS (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Biochemistry – 04P),

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

Prof Dr Habil Rimvydas SIMUTIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T).

Opponents:

Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Assoc Prof Dr Šarūnas PAULIKAS (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 21 December 2010.

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

Tel. +370 5 274 49 52, +370 5 274 49 56; fax +370 5 270 01 12;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 19 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).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Dalius MATUZEVIČIUS

DVIMATĖS ELEKTROFOREZĖS
GELIŲ VAIZDŲ ANALIZĖ TAIKANT
INTELEKTUALIUOSIUS METODUS

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

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (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

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

Nariai:

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

prof. habil. dr. Juozas KULYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, biochemija – 04P),

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

prof. habil. dr. Rimvydas SIMUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

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

Disertacija bus ginama Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. gruodžio 21 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

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

Tel.: (8 5) 274 49 52, (8 5) 274 49 56; faksas (8 5) 270 01 12;

el. paštas: doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. lapkričio 19 d.

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

VGTU leidyklos „Technika“ 1833-M mokslo literatūros knyga.

Introduction

Problem under Investigation

Electronic equipments used in industry and large-scale research generate large amounts of data. Because of large amounts and the nature of the complexity of the analysis humans can not process data without computer tools. Processing of such data needs to be automated. Volume and flow of the data is increasing rapidly so there is a need for new effective analysis methods. Another reason why effective methods are necessary – limited resources of the computing power. In order to minimize the size of electronic devices and their used power, also to extend the functionality, advanced algorithms are required to perform the necessary functions with minimum operational costs.

One of the important areas with high demand for automation of data analysis are life sciences. Research data from microarrays used for DNA and protein analysis, images obtained by microscopes, mass spectrometry data, digital two-dimensional electrophoresis (2DE) images are large amounts of data that require specialized methods for their analysis.

2DE is a biochemical experiment used to fractionate proteins from biological sample by their two independent properties – isoelectric point and molecular mass. Proteins are spread in gel plate during the investigation and after visualization protein spot pattern can be observed. The goal of 2DE gel (2DEG) image analysis is to compare several gels and to detect changes in proteins expression level.

Development of effective automated 2DEG image analysis methods for their implementation in a field programmable gate arrays is a close to the thesis topic. Effective methods not only solve the basic problem, but also save computing resources. Method performance is particularly important when the algorithm is to be implemented in the electronic hardware of limited resources. Solving these problems requires not only a method to carry out an automatic 2DEG image analysis, but are minimized in their structured, save memory and computing resources. Resource saving is an important aspect of analysis methods for the implementation in digital signal processors, field programmable gate arrays or integrated circuits. However, before the implementation, it is necessary to solve fundamental yet unresolved problem – automation of 2DEG image analysis.

Topicality of the Research Work

Analytical steps of the automatic 2DEG image analysis are tedious or impossible carrying them by hand. Currently, a fully automated and error-proof 2DEG image analysis system does not exist. Performing 2DEG image analysis manually, it is likely that the human factor will impose errors as one gel analysis and verification takes up to several hours. Loss of important information about protein expression changes in the target samples may prevent important discoveries,

and errors can lead to wasted researchers time and expensive chemical reagents. Reliable automatic 2DEG image analysis methods will stipulate rapid biological processes analysis, disease diagnosis and patient treatment.

To create a compact laboratory equipment that performs automatic 2DEG image analysis, image analysis algorithms must be implemented in a specialized electronic hardware. Complex algorithms that require a wide variety of computing operations are inadequate for implementation in the limited resource hardware. In order to develop efficient algorithms for 2DEG image analysis it is necessary to start problem solving at abstract level – in case of inadequate decisions during development of system structure, it will not be possible to correct them during optimization in a detailed level.

Research Object

The research object is an analysis of two-dimensional electrophoresis gel images. Digital 2DEG images and their groups, and specialized 2DEG image analysis techniques are investigated.

The Aim of the Work

The aim of the work is to automate two-dimensional electrophoresis gel image analysis by creating and testing efficient intelligent image analysis techniques.

Tasks of the Work

1. Perform analytical review of literature on digital 2DEG image analysis literature and justify the selection of specific methods for further research.
2. Frame criterions of 2DEG image analysis efficiency and offer automated 2DEG image analysis strategy on their basis.
3. Derive methods and their implementations by intelligent algorithms for particular 2DEG image automated analysis steps.
4. Investigate the proposed image analysis methods with artificial and natural 2DEG images and gather performance results.

Applied Methods

The following theories are applied in this work: digital signal processing, image analysis, artificial neural networks, optimization, communication, inventive technical problem solving. Computer modelling is performed in MATLAB™ program.

Scientific Novelty and its Importance

1. Strategy for automatic analysis of 2DEG images is developed. It shows which sequence of steps and how maximizes the efficiency of 2DEG image analysis – successfully solve the tasks of 2DEG image analysis and perform minimal-cost computations. Proposed effective image analysis algorithms can be im-

plemented in electronic hardware of limited resources.

2. Communication system model is applied to describe the 2DEG image alignment problem, so efficient information transfer conditions can be used to make the requirements for the structure of 2DEG image alignment algorithm. 2DEG image alignment model can be used for the development of efficient algorithms for alignment of any other origin of digital images.
3. Designed 2DEG image alignment method allows matching of distorted, affected, different resolution gel images. This makes it possible to automate 2DEG image analysis.
4. Designed 2DEG image segmentation algorithm, which minimizes the loss of information and the amount of errors, enables to analyze and evaluate larger amounts of data source without increasing the number of experiments.

Practical Value of the Work Results

2DEG image analysis techniques were applied and investigated:

- in pursuance of the project “Research of the Leukemia Diagnostic and Prognostic Biomarkers” that is the part of the National Research Program “Chronic Non-Infectious Diseases” (Nr. LIG-20/2010, 2010–2011);
- in the scientific work of VGTU “Research of the computational intelligence technologies for signal processing” (No. TMT 151, 2008–2012);
- performing such proteomic analysis:
 - proteomic characterization of human myocardium and heart conduction system;
 - proteomic analysis of stromal cells derived from the dental pulp of human exfoliated deciduous teeth;
- in the finished Scientific Groups Project “Development of Parameterization and Catalogue System for Two-Dimensional Electrophoresis Gel Images”, supported by Lithuanian State Science and Studies Foundation (No. T-111/08, 2008);
- in the finished scientific work of VGTU “Development of the non-linear digital signal processing technologies” (No. 2.42 ELES01T, 2005–2007);
- in developed information system for filing and segmentation of 2DEG images, <<http://eis.el.vgtu.lt/pdb>>;
- during participation in Student Research Fellowship at Institute of Biochemistry, supported by the Lithuanian Science Council (2005).

Statements Presented for Defense

1. Designed automatic 2DEG image alignment method outputs at least 4 times fewer errors compared to RAIN and MIR methods, during alignment of natural and semi-synthetic images.
2. Automatic selection of the master 2DE gel can be carried out in accordance

with the minimum vertical geometric distortion criterion.

3. Technique for similarity evaluation of 2DEG image regions, based on three distance functions (Pearson Correlation, Intersection and χ^2), is least influenced by the noise of 2DEG images.
4. Designed 2DEG image segmentation algorithm classifies image regions at not less than 92 % accuracy and reduces the forthcoming computational load by one fifth.

Approval of the Work Results

The main thesis results were published in 14 scientific papers, of which 5 papers are published in peer-reviewed scientific journals. Results were also presented in 24 scientific conferences in Lithuania and abroad:

- XX-th International Conference on Artificial Neural Networks, 2010, Thessaloniki, Greece. *ENNS Student Award was received.*;
- international conjoint conference “The 4th EuPa Meeting” and “The 6th ProCura Meeting”, 2010, Estoril, Portugal;
- at 7 International Conferences „Electronics“, 2005–2010, Vilnius, Lithuania;
- II-nd International IEEE Workshop “Bio-Inspired Signal and Image Processing”, 2010, Vilnius, Lithuania;
- at 2 International Conferences “Signal Processing Workshop”, 2010, Vilnius, Lithuania. *First Prize in the Young Scientist Paper Contest was received.*;
- at 6 Conferences for Lithuania Junior Researchers “Science for Future”, Electronics and Electrotechnics, 2005–2010, Vilnius, Lithuania;
- XI-th International Conference “Biennial Baltic Electronics Conference”, 2008, Tallinn, Estonia;
- I-st International IEEE Workshop “Bio-Inspired Signal and Image Processing”, 2008, Warsaw, Poland;
- international PhD Summer School “Ogolnopolskie Warsztaty Doktoranckie”, 2007, Vysla, Poland;
- international conference “IC-SPETO”, 2006, Gliwice, Poland;
- X-th International Conference “Biomedical Engineering”, 2006, Kaunas, Lithuania. *Third Prize in the Young Scientist Paper Contest was received.*;
- IX-th Conference for Lithuania Junior Researchers “Science for Future”, Bio-engineering and Bioinformatics, 2006, Vilnius, Lithuania.

The Scope of the Scientific Work

In the first chapter the main thesis-relevant information related to the life science, proteomics, and biochemical techniques is presented. A review of algorithms for major steps of automatic 2DEG image analysis (2DEG image segmentation and alignment) and formulation of the thesis objectives is performed. The second chapter deals with conditions that increase the possibility of finding an appropriate and

effective automated 2DEG image analysis solution. Automated 2DEG image analysis strategy is created. In the third chapter 2DEG image alignment method is created: 2DEG image alignment step is specified; an automatic method for selection of the main gel is created and analyzed; algorithms for the initial and final 2DEG image alignment are created and analyzed. In the fourth chapter 2DEG image segmentation method is created: algorithms for the 2DEG image splitting into areas and for the reconstruction of oversaturated protein spots are created and analyzed; new mathematical models of protein spots are offered and analyzed.

Dissertation is written in Lithuanian. The explanatory part takes up 135 pages. The work contains 197 equations, 20 figures, 9 tables and cites 205 references.

1. Review of Computational Tools for 2D Electrophoresis Gel Image Analysis

Comparison of 2DE gels reveals the critical information about differences in protein samples, related to the vital processes of the cell. In order to find differences, correct matches of protein spots between the examined 2DE gel pairs needs to be found (gels must be aligned) and extracted protein spots during segmentation. Basic strategies for 2DEG image analysis are: image segmentation followed by image alignment, and image alignment followed by image segmentation.

Existing gel image registration methods are feature (landmark) based, image intensity based, or hybrid. Feature based image registration methods are of low computational cost and of high distinctiveness, but the main disadvantage of feature based image registration methods is the fact that protein spots must be detected before their matching procedure. Intensity based image registration methods exploit computational power of modern computers. They are based on the maximization of similarity or minimization of the distance between regions of images. Hybrid image registration approaches exploit both intensity and feature information, thus the erroneous feature extraction still influences performance of 2DEG image alignment.

Segmentation methods described in literature include: morphological operations, Laplacian of Gaussian (LoG) techniques, h-basin transformation, watershed transform, fitting of various mathematical models, use of Artificial Neural Networks. Most popular are watershed transform based gel image segmentation algorithms. Basing on the review of computational tools for 2DEG image analysis it may be stated that:

- two-dimensional electrophoresis, in spite of its imperfections, is an indispensable tool for fractionation of complex protein mixtures;
- by the usage of specialized image analysis techniques: negative impact of 2DE deficiencies can be reduced, and the amount of useful information derived

from 2DE gels can be increased;

- so far, there is no fully automatic and reliable 2DEG image analysis methods because of the wrong choice or the implementation of analytical strategies;
- in order to implement the algorithms in electronic hardware of limited resources (digital signal processors, field programmable gate arrays, integrated circuits) efficient image analysis methods are required.

2. Strategy for Automatic Analysis of 2DEG Images

The most important results to be obtained from 2DEG image analysis are the changes in protein expression level – which protein spots differ in their intensity. Additionally quantitative results of spot changes are wanted, that describe reliability of changes. Needed but less significant are the data of the remaining matches of protein spots between gels. Thus, in order to meet 2DEG image analysis objective – to extract from the gels as much useful information for biochemical studies – the analysis process must be focused on the most important information extraction.

Model of 2DEG Image Alignment. 2DEG image alignment model defined according to communication system model, is shown in Fig. 1. Knowing that 2DEG image alignment can be modeled using elements of the communication system, we can apply the principles of effective communication for alignment of 2DEG images and formulation of requirements to ensure the effective implementation of the method.

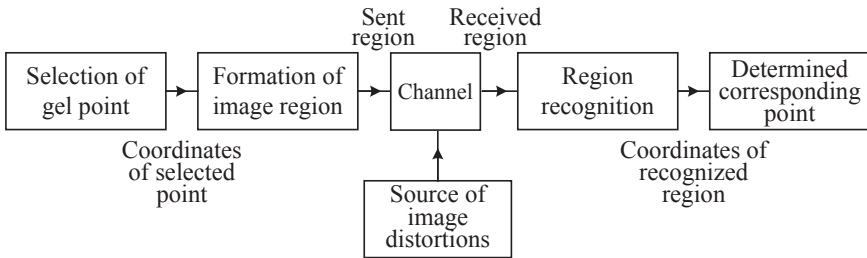


Fig. 1. Alignment model of 2DEG images

Requirements for 2DEG Image Alignment Model. In order to reach 2DEG image alignment objectives, corresponding regions needs to be detected, i.e., to transfer regions from the first image needs to be transferred and corresponding regions in the second image needs to be identified. Image alignment efficiency depends on transmission and recognition rates of 2DEG image regions.

In order to improve information transfer rate through the noisy channel, following actions are considered:

- P1. Equalization of the probabilities of transferred symbols;
- P2. Reduction and and equalization of the similarity of signals transferring different characteristics;
- P3. Selection of signal that would be the least affected by the channel noise;
- P4. Implementation of means of error detection and correction.

In order to achieve effective alignment of 2DEG images, model needs to:

- transmit each image region only once (in accordance to P1);
- distinguish those attributes that best describe the region and distinguish it from other regions. Distinguished features must be least distorted by noise. Recognition of regions can be optimized choosing specialized similarity function or extracting appropriate features (in accordance to P2 and P3);
- maximize signal-to-noise ratio by choosing varying size of region. Distinctive region means stronger signal (in accordance to P3);
- exploit the property that relative positions of protein spots and regions are preserved (in accordance to P4).

Automation of 2DEG Image Analysis. Strategy of automatic 2DEG image analysis presented in Fig. 2. The first essential step in the analysis of images is alignment, and the second – analysis of the protein expression changes. Image alignment consists of three major steps – the individual gel preparation, initial image alignment and the final image alignment.

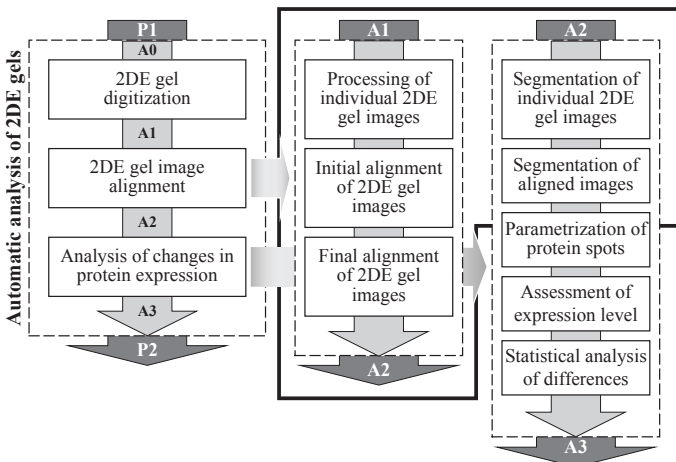


Fig. 2. Strategy for automatic analysis of 2DEG images

2DEG image analysis is performed in order to find expression changes made from the individual 2DEG image segmentation. Then results are adjusted according to the group gels segmentation results. Each segmented protein spot is parameterized in order to assess the relative protein amount and then the relative levels of expression are used to assess changes.

3. Technique of Alignment of 2DEG Images

Preparation of Individual 2DEG Images. The detailed structure of 2DEG image alignment for the proposed strategy is shown in Fig. 3. The first major phase is the *individual 2DEG image preparation*. Individual images are prepared at the beginning, because then absolute geometric distortions needs to be reduced. At a later stages of the image alignment only the relative geometric distortions are eliminated. They are determined by the physical mismatch. For all the 2DEG images the same absolute distortions appearing in selected base gel image will be present.

Algorithm for selection of 2DEG image with minimal vertical geometric distortion consists of the following steps: a) filtration by asymmetric median filter; b) horizontal smoothing; c) contour isolation by modified Canny detector; d) removal of short contour segments; e) polynomial approximation of contours; f) assessment of localized distortion effects; g) filtration of tilt coefficients; h) evaluation of image geometric distortions.

Initial Alignment of 2DEG Images. The next image alignment phase is *initial alignment* (Fig. 3, steps S1–S2). During it matches in 2DEG images with the highest reliability are searched for. Alignment process consists of identification of

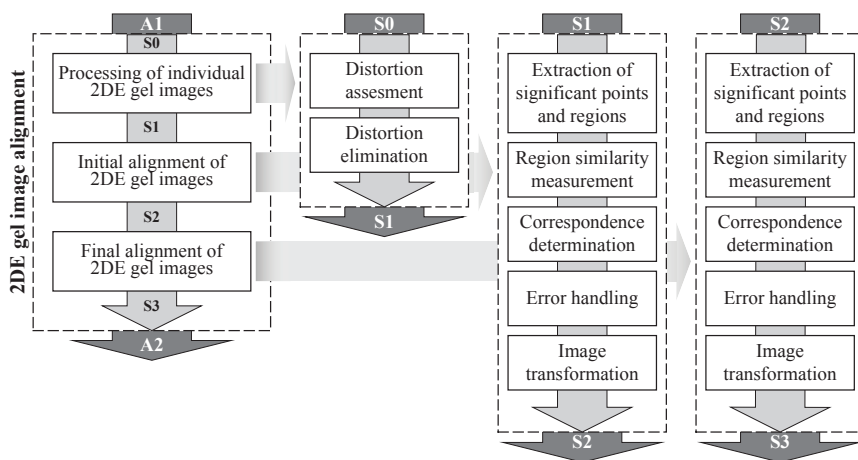


Fig. 3. Specified steps of 2DEG image alignment

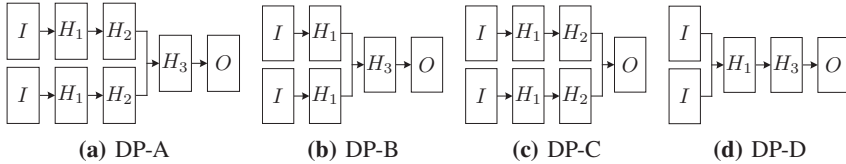


Fig. 4. Generalized pictorial representation of considered core MLP structures

image regions of interest, assessment of similarity of gels various areas, determination of matches and error search.

Method for detection of similar 2DEG image regions based on Multi-Layer Perceptron (MLP) was developed. Considered four core structures of MLP are presented in Fig. 4. Blocks in diagrams denote the layers of neurons. Layer I represents triplet of inputs where features from each pair of segments under comparison are fed. H_1 , H_2 , H_3 represent hidden layers of selectable $\{5; 10; 15; 20; 30; 40\}$ size. O represent a single output, where the final decision about similarity is computed. Transfer functions of neurons in H_1 layer are Log-Sigmoid (LS), in H_3 layer are Tan-Sigmoid (TS), while in H_2 layer they can be Log-Sigmoid or Tan-Sigmoid. MLP-A–MLP-C type structures are partitioned into two parallel, symmetrical and same size branches of layers, while MLP-D type – reassembles traditional MLP structure.

Best MLPs from each group were experimentally selected: MLP-A – 3-5(LS)-5(TS)-30(TS)-1; MLP-B – 3-40(LS)-15(TS)-1; MLP-C – 3-30(LS)-5(TS)-1; MLP-D – 3-30(LS)-10(TS)-1.

Summarized results of the use of single distance measure classifiers and previously found the best MLPs from each four core structures are presented in Table 1.

Table 1. Percentages of successful natural 2DEG image similarity comparisons

Origin of 2DE gel sets	Single feature classifier			Multilayer Perceptron			
	(F3)	(F6b)	(F9b)	A	B	C	D
HL-60	99.965	99.985	99.987	99.983	99.990	99.961	99.973
Human heart	98.915	99.014	98.811	99.363	99.589	99.159	99.253
Stem cells	99.919	99.864	99.868	99.959	99.974	99.930	99.954

Table 2. Results of 2DEG image alignment

Type of alignment experiment:	Alignment of 16 2DEG image pairs		
	MIR	RAIN	Developed method
1. Natural gel images	4 (25 %)	12 (75 %)	15 (94 %)
2. Gel with partial gel	0 (0 %)	0 (0 %)	10 (63 %)
3. Different resolution gels	4 (25 %)	10 (63 %)	14 (88 %)
4. Average alignment time	1.5 s	14 min	21 s

Final Alignment of 2DEG Images. Experiments were carried out using following methods:

1. Multiresolution Image Registration (MIR) method;
2. Robust Automated Image Normalization (RAIN) method;
3. In the thesis developed 2DEG image alignment method.

The set-alignment experiments were made with 16 pairs of 2DEG images and results are presented in Table 2.

4. Technique of Segmentation of 2DEG Images

2DEG Image Splitting. Algorithm for splitting 2DEG images into regions, based on MLP, classifies image regions into three classes: K1 – spot exists in the region, K2 – only part of spot exists in the region; K3 – there is no spot in the region. Results of the classification performance are presented in Fig. 5.

Image features that were selected for classification of image regions:

1. Mode of each region of 2DGE image.
2. Weighted difference of maximum and minimum value in contour pixels of each region of 2DGE image.
3. Weighted difference of maximum and minimum value in contour pixels of each region of symmetry map.

		<u>Expert</u>					<u>Expert</u>		
		K1	K2	K3			K1	K2	K3
ANN	K1	97.8 %	5.1 %	5.6 %	ANN	K1	98.7 %	7.4 %	5.4 %
	K2	2.2 %	94.9 %	2.3 %		K2	1.3 %	92.6 %	1.0 %
	K3	0 %	0 %	92.1 %		K3	0 %	0 %	93.6 %
a) regions from training set					b) new regions				

Fig. 5. Results of 2DEG image region classification by MLP

4. Maximum value of Kovesi phase symmetry feature detector in each region of 2DGE image.
5. Maximum value of Laplacian of Gaussian in each region of 2DGE image.

Protein Spot Modelling. After 2DEG image segmentation, each image region is modeled in order to parameterize it. Three new mathematical models of protein spots were presented: four Gaussians (M4G), four splines (M4S) and bell-shape (MV). These models and popular Diffusion model (MD) were experimentally compared and results are presented in Table 3.

Table 3. Results of protein spot modelling – residual error and relative processing time

Spot shape	Protein spot model							
	MD		M4G		MS		MV	
	Avg.	Dev.	Avg.	Dev.	Avg.	Dev.	Avg.	Dev.
	Residual error							
Saturated	2.300	1.850	2.270	1.960	2.730	1.970	2.030	1.740
Big	1.170	1.270	0.811	0.839	1.440	1.020	1.050	1.190
Small	1.160	1.020	0.824	0.753	1.530	0.922	0.992	0.829
	Relative processing time							
Saturated	1.000	0.000	0.111	0.073	0.351	0.280	0.169	0.103
Big	1.000	0.000	0.068	0.038	0.170	0.130	0.118	0.069
Small	1.000	0.000	0.057	0.024	0.175	0.111	0.126	0.149

Using bell-shape mathematical model saturated protein spots are characterized 10 % more accurately than using diffusion model; Using four Gaussians mathematical model big and small protein spots are characterized 30 % more accurately than using diffusion model. Model of four Gaussians converges on average 14 times faster than diffusion model.

General Conclusions

Automatic analysis strategy for two-dimensional electrophoresis gel images was suggested and methods for essential steps of analysis – alignment and segmentation – were created. Following important conclusions for the scientific field of Electrical and Electronic Engineering can be drawn:

1. Application of communication system model to describe the 2DEG image alignment problem, lets to use efficient information transfer conditions for the development of efficient 2DEG image alignment method. Experimentally is proven that for the effective image alignment following items are essential:
 - a) similar image regions detection method based on multilayer perceptron and three distance metrics (Pearsson correlation, intersection and χ^2), that

- lets to achieve 99.99 % of true matched regions;
- b) locally adaptive two-way correspondence detection technique, that determines minimal threshold for correspondence acceptance;
 - c) RANSAC algorithm based technique for error detection, exploiting stable relative positions of protein spots.
2. Designed and implemented automatic 2DEG image alignment method allows matching of distorted, affected, different resolution gel images and performs more effectively compared to analogous MIR and RAIN methods:
 - a) new method automatically aligns 94 % of natural gel images – 20 % more than RAIN and 70 % more than MIR methods;
 - b) during alignment of natural 2DEG image to partial gel image, new method aligns 63 % of images while other tested methods fail;
 - c) during alignment of 2DEG images that differ in resolution by 20 %, new method automatically aligns 88 % of gels – 25 % more than RAIN and 63 % more than MIR methods;
 - d) new method aligns 2DEG images on the average in 21 s – 40 times faster than RAIN (14 min) and 14 times slower than MIR (1.5 s) methods.
 3. Designed and implemented automatic 2DEG image segmentation method, based on multilayer perceptron, minimizes the loss of wanted information and the amount of errors therefore enables to analyze and evaluate larger amounts of data without increase of the number of experiments:
 - a) image regions are classified into three classes (“spot exists in the region”, “only part of the spot exists in the region” and “there is no spot in the region.”) at 95 % accuracy;
 - b) computationally expensive oversegmentation analysis and correction is performed only on image regions of class “only part of the spot exists in the region” so the required oversegmentation postprocessings are reduced by 20–30 %;
 - c) allows to specify classification results of individual 2DEG image regions according to image region classification of aligned images and to correct significant errors: lost image regions with protein spots and erroneously merged regions.

List of Scientific Publications on the Topic of Dissertation

In the Reviewed Scientific Journals

Pivoriūnas A.; Surovas A.; Borutinskaitė V.; Matuzevičius D.; Treigyte G.; Savickienė J.; Tunaitis V.; Aldonytė R.; Jarmalavičiūtė A.; Suriakaitė K.; Liutkevičius E.; Venalis A.; Navakauskas D.; Navakauskienė R.; Magnusson K. E. 2009. Proteomic analysis of stro-

mal cells derived from the dental pulp of human exfoliated deciduous teeth, *Stem Cells and Development* 2010, 19(7): 1081–1093. ISSN 1547-3287 [Thomson ISI WEB of Science, Impact Factor (2009): 4.146].

Matuzevičius, D. 2010. Automatinė dvimatės elektroforezės gelių su mažiausiais geometriniiais iškraipymais atranka, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika* 2(1): 9–13. ISSN 2029-2341 [Index Copernicus].

Matuzevičius, D.; Žurauskas, E.; Navakauskienė, R.; Navakauskas, D. 2008. Improved proteomic characterization of human myocardium and heart conduction system by computational methods, *Biologija* 54(4): 283–289. ISSN 1392-0146 [Thomson ISI Master Journal List].

Matuzevicius, D.; Serackis, A.; Navakauskas, D. 2007. Mathematical model of oversaturated protein spots, *Electronics and Electrical Engineering* 1(73): 63–68. ISSN 1392-1215 [Thomson ISI WEB of Science].

Matuzevičius, D.; Navakauskas, D. 2005. Proteomikoje taikytinų vaizdo segmentavimo metodų tyrimas, *Elektronika ir Elektrotechnika* 7(63): 74–78. ISSN 1392-1215 [INSPEC, Thomson ISI WEB of Knowledge].

In Other Scientific Works

Matuzevičius, D.; Serackis, A.; Navakauskas, D. 2010. Application of k-means and MLP in the Automation of Matching of 2DE Gel Images, *20th International Conference on Artificial Neural Networks – ICANN2010*, LNCS 6352, vol. 1, 541–550, DOI:10.1007/978-3-642-15819-3_70. [Thomson ISI WEB of Science Proceedings].

Matuzevičius, D.; Navakauskas, D. 2010. Comparison of distance measures according to suitability for 2D electrophoresis image registration using synthetic image data and SOFM, *Signal Processing Workshop – SPW2010, Proceedings of SPIE*, 7745, 774516. [Thomson ISI WEB of Knowledge].

Serackis, A.; Matuzevičius, D.; Navakauskas, D. 2010. 2DE gel image preprocessing using self-organising maps, *Signal Processing Workshop – SPW2010, Proceedings of SPIE*, 7745, 77451N, DOI:10.1117/12.871866. [Thomson ISI WEB of Knowledge].

Matuzevičius, D.; Navakauskas, D. 2008. Feature selection for segmentation of 2D electrophoresis gel images, *11th International Biennial Baltic Electronics Conference – BEC2008*, 341–344, DOI:10.1109/BEC.2008.4657550. ISSN 1736-3705 [Thomson ISI WEB of Science Proceedings].

Serackis, A.; Matuzevicius, D.; Navakauskas, D. 2006. Reconstruction of protein spots using DSP modules, *Proceedings of the 29th International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory – IC-SPETO*, vol. 2, 573–576. [INSPEC].

Matuzevičius, D. 2007. Automatic initial registration of 2-D electrophoresis gel images, *9th International PhD Workshop OWD, Conference Archives PTETIS*, vol. 1, 151–156.

Matuzevičius, D.; Serackis, A.; Navakauskas, D. 2006. Improved segmentation of 2D electrophoresis gel images by the use of bell shape function, *The 10th International Conference „Biomedical Engineering“*, 150–153. ISBN 9955-25-151-4.

Matuzevičius, D.; Serackis, A. 2006. Dvimatės elektroforezės gelių vaizdų automatinės analizės sistemos kūrimas, *Bioinžinerija ir bioinformatika: 9-osios Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, 67–74. ISBN 9986-05-989-5.

Matuzevičius, D. 2005. Proteomikoje taikytini vaizdų segmentavimo metodai, *Elektronika ir elektrotechnika: 8-osios Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ medžiaga*, 3–9. ISBN 9986-936-4.

About the Author

Dalius Matuzevičius was born in Panevėžys region in 1982. In 1992 he graduated from Tiltagaliai Elementary School, and in 2000 graduated from Panevėžys Juozas Balčikonis Gymnasium.

In 2000–2004 he studied at Electronics Faculty of Vilnius Gediminas Technical University and received BSc in Electrical and Electronics Engineering, in 2004–2006 studied at Electronics Faculty of Vilnius Gediminas Technical University and received MSc with Honours in Electrical and Electronics Engineering. In 2006–2010 was PhD student at Electronic Systems Department of Vilnius Gediminas Technical University.

2006 to present he is an Assistant Professor at Electronic Systems Department of Vilnius Gediminas Technical University.

During the Bachelor and Master study he received two Teacher's Carol Martin Gruodis Memorial Education Fund scholarships, four K. Semenavičius 2nd-degree nominal scholarships and Grand Duke of Lithuania Gediminas 1st-degree nominal scholarship; received the support from the Lithuanian Science Council for Student Research Fellowship at Institute of Biochemistry. During the PhD study he received Young Scientist Honour Letter from Lithuanian Academy of Sciences and four PhD Student Grants from Lithuanian State Science and Studies Foundation.

DVIMATĖS ELEKTROFOREZĖS GELIŲ VAIZDŲ ANALIZĖ TAIKANT INTELEKTUALIUOSIUS METODUS

Tiriamoji problema

Pramonėje, didelio masto moksliniuose tyrimuose naudojama elektroninė aparatūra generuoja didelius kiekius duomenų. Žmogus negali tokių duomenų apdoroti be kompiuterinių priemonių dėl jų didelio kiekio, duomenų pobūdžio ir reikiamos analizės sudėtingumo. Tokių duomenų apdorojimas automatizuojamas. Surinkamų duomenų kiekiai greitai auga, duomenų srautai didėja, todėl reikalingi nauji ir efektyvūs apdorojimo metodai. Kita efektyvių metodų poreikio priežastis – riboti kompiuterinių priemonių resursai. Siekiant minimizuoti elektroninių prietaisų dydį ir jų vartojamą energiją, išplėsti funkcionalumą, reikia pažangių algoritmų, kurie reikiamas funkcijas atliktų su minimaliu operacijų skaičiumi.

Viena svarbių sričių, kurioje yra didelis duomenų analizės automatizavimo poreikis – gyvybės mokslai. Biochemijoje baltymų tyrimams naudojama dvimatis gelio elektroforezė (DE) – technologija, skirta mėginyje esantiems baltymams išrūšiuoti (frakcionuoti) pagal dvi nepriklausomas jų savybes – izoelektrinį tašką (pI) ir molekulinę masę (MM). DE gelių (DEG) analizės tikslas – palyginant keletą gelių rasti baltymų raiškos pokyčius.

Disertacijai artima problematika – efektyvių automatinės DEG vaizdų analizės metodų kūrimas siekiant juos įgyvendinti lauku programuojamose loginėse matricose. Efektyvūs metodai ne tik išsprendžia pagrindinę problemą, bet ir taupo skaičiavimo resursus. Metodų efektyvumo sąlyga tampa ypač svarbi, kai siekiama algoritmus įgyvendinti ribotų resursų elektroninėje aparatūroje. Sprendžiant šias problemas reikia sukurti metodus, kurie atliktų automatinę DEG vaizdų analizę ir taupyti atminties bei skaičiavimo resursus. Resursų taupymas yra svarbus norint metodus įgyvendinti skaitmeninių signalų procesoriuose, lauku programuojamose loginėse matricose ar integriniuose grandynuose. Tačiau prieš įgyvendinant lauku programuojamų loginių matricų lustuose, reikia išspręsti esminę, dar neišspręstą problemą – *dvimatis elektroforezės gelių vaizdų analizės automatizavimą*.

Darbo aktualumas

Dvimatis elektroforezės gelių vaizdų analizės etapai yra neįmanomi arba varginantys atliekant juos rankiniu būdu. Šiuo metu visiškai automatizuota ir atspari klaidoms DEG vaizdų analizės sistema nėra sukurta. Atliekant DEG vaizdų analizę rankiniu būdu, yra tikimybė, kad dėl žmogiškojo faktoriaus gauti rezultatai bus su klaidomis, nes vieno gelio analizė ir rezultatų tikrinimas trunka iki keletos valandų. Prarasta svarbi informacija apie baltymų raiškos pokyčius tiriamuose mėginiuose gali užkirsti kelią svarbiems atradimams, o padarytos klaidos gali kainuoti

daug sugaišto tyrėjų laiko ir veltui sunaudotų brangių cheminių reagentų. Patikimi DEG vaizdų automatinės analizės metodai garantuotų spartesnę gyvybinių procesų tyrimą, ligų diagnozavimą ir pacientų gydymą.

Norint sukurti kompaktišką laboratorinę įrangą, kuri atliktų DEG vaizdų automatinę analizę, reikia analizės algoritmus įgyvendinti specializuotoje elektroninėje aparaturoje. Sudėtingi algoritmai, reikalaujantys daug įvairių skaičiavimo operacijų, netinkami įgyvendinimui ribotų resursų aparaturoje. Siekiant sukurti efektyvius analizės algoritmus, reikia problemos sprendimą pradėti abstrakčiame lygmenyje, nes netinkamų sprendimų, kurie būtų priimti sudarant sistemos struktūrą, nebūna įmanoma ištaisyti atliekant algoritmų optimizavimą detaliame lygmenyje.

Tyrimų objektas

Daktaro disertacijos tyrimų objektas yra dvimatės elektroforezės gelių vaizdų analizė. Tiriami šie dalykai: a) skaitmeniniai DEG vaizdai ir jų grupės; b) specializuoti DEG vaizdų analizės metodai.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – automatizuoti dvimatės elektroforezės gelių vaizdų analizę sukuriant ir ištiriant efektyvius, intelektualiaisiais metodais grįstus, vaizdų analizės metodus.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti analitinę skaitmeninių DEG vaizdų analizės technologijų literatūros apžvalgą, pagrindžiant konkrečių analizės būdų parinkimą tolimesniems tyrimams.
2. Suformuluoti DE gelių analizės efektyvumo ir patikimumo vertinimo kriterijus ir jų pagrindu pasiūlyti automatinės DEG vaizdų analizės strategiją.
3. Sukurti pasirinktų automatinės DEG vaizdų analizės etapų metodus ir juos įgyvendinančius intelektualiuosius algoritmus.
4. Iširti siūlomus vaizdų analizės metodus su dirbtiniais ir natūraliais DEG vaizdais, pateikiant jų efektyvumo rezultatus.

Tyrimų metodika

Darbe taikomos skaitmeninio signalų apdorojimo, vaizdų analizės, dirbtinių neuronų tinklų, optimizavimo, ryšių sistemų, techninės kūrybos teorijos. Kompiuterinis modeliavimas atliekamas taikant MATLAB™ programą.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

1. Sudaryta DEG vaizdų automatinės analizės strategija. Strategija parodo, kokia veiksmų seka ir kodėl sudaro didžiausias sąlygas didinti DEG vaizdų analizės efektyvumą – sėkmingai įvykdyti DEG analizės uždavinius tuo pačiu siekiant minimalių skaičiavimo sąnaudų. Pasiūlyti efektyvūs vaizdų analizės algorit-

mai leidžia įgyvendinti juos ribotų resursų elektroninėje aparatūroje.

2. Ryšių sistemos modelis pritaikytas DEG vaizdų sutapdinimui apibūdinti, todėl efektyvaus informacijos perdavimo sąlygas galima naudoti iškeliant reikalavimus DEG vaizdų sutapdinimo algoritmo struktūrai. DEG vaizdų sutapdinimo modelis tinkamas naudoti kitokios kilmės skaitmeninių vaizdų efektyvaus sutapdinimo algoritmams sudaryti.
3. Sukurtas DEG vaizdų sutapdinimo metodas leidžia sutapdinti iškraipytus triukšmo, pažeistus, skirtingos skiriamosios gebos gelių vaizdus. Tai sudaro sąlygas automatizuoti DEG vaizdų analizę.
4. Sukurtas DEG vaizdų segmentavimo metodas, kuris minimizuoja reikalingos informacijos praradimo ir klaidų tikimybę, sudaro sąlygas nedidinant eksperimentų skaičiaus, analizuoti ir vertinti didesnius išėties duomenų kiekius.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

DE gelių vaizdų analizės metodai buvo tirti ir taikyti:

- vykdant nacionalinės mokslo programos „Lėtinės neinfekcinės ligos“ dalies projektą „Leukemijos diagnostinių ir prognostinių žymenų tyrimai“ (Nr. LIG-20/2010, 2010–2011);
- vykdant kvalifikacinį mokslo darbą „Skaitinio intelekto technologijų signalų apdorojime tyrimas“ (Nr. TMT 151, 2008–2012);
- atliekant šiuos proteominius tyrimus:
 - įvertinant baltymų raiškos kaitą žmogaus širdies miokardo bei laidžiosios dalies proteomo žemėlapiuose;
 - įvertinant baltymų raiškos kaitą iš žmogaus pieninio danties išskirtų mezenchiminių kamieninių ląstelių ir tos linijos klonų proteomo žemėlapiuose;
- užbaigtame Valstybinio mokslo ir studijų fondo remtame mokslininkų grupių projekte „Dvimatės elektroforezės gelių vaizdų parametrizavimo ir katalogavimo sistemos kūrimas“ (Nr. T-111/08, 2008);
- užbaigtame kvalifikaciniame mokslo darbe „Netiesinio skaitmeninių signalo technologijų tobulinimas“ (Nr. 2.42 ELES01T, 2005–2007);
- sukurtoje DEG vaizdų parametrizavimo ir katalogavimo informacinėje sistemoje <<http://eis.el.vgtu.lt/pdb>>;
- dalyvavus Lietuvos mokslo tarybos organizuotoje Studentų mokslinėje praktikoje Biochemijos institute, tema „Skaitiniai metodai proteomikoje“ (2005).

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtas automatinis DEG vaizdų sutapdinimo metodas, sutapdinant natūralius ir pusiau dirbtinius vaizdus, leidžia gauti 4 kartus mažiau sutapdinimo klaidų lyginant su RAIN ir MIR metodais.
2. Pagrindinio gelio automatinę atranką galima vykdyti pagal mažiausių vertikalų geometrinių iškraipymų kriterijų.

3. Daugiasluoksniu perceptronu ir trimis atstumo funkcijomis (Pirsono koreliacijos, histogramų sankirtos ir χ^2) grįstas gelių vaizdų sričių panašumo įvertinimo būdas yra mažiausiai įtakojamas DE geliuose esančių triukšmų.
4. Sukurtas DEG vaizdų segmentavimo algoritmas vaizdo sritis klasifikuoja ne prastesniu kaip 92 % tikslumu bei penktadaliu sumažina skaičiavimo apimtis.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai paskelbti 14 mokslinių straipsnių, iš kurių 5 straipsniai paskelbti recenzuojamuose mokslo žurnaluose. Rezultatai viešinti 24 mokslinėse konferencijose Lietuvoje bei užsienyje:

- XX tarptautinėje konferencijoje „International Conference on Artificial Neural Networks – ICANN’2010“, 2010, Salonikai, Graikija. *Laimėtas ENNS studento apdovanojimas*;
- tarptautinėje jungtinėje konferencijoje „The 4th EuPa Meeting“ ir „The 6th ProCura Meeting“, 2010, Estoril, Portugalija;
- 7-nioje tarptautinėse konferencijose „Elektronika“, 2005–2010, Kaunas, Vilnius, Lietuva;
- II tarptautinėje konferencijoje „Bio-Inspired Signal and Image Processing – BISIP’2010“, 2010, Vilnius, Lietuva;
- 2-jose konferencijose „Signal Processing Workshop – SPW’2010“, 2010, Vilnius, Lietuva. *Laimėta pirmoji vieta už jaunojo mokslininko pranešimą*;
- 6-šiose Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijose „Mokslas – Lietuvos ateitis“, Elektronika ir Elektrotechnika, 2005–2010, Vilnius, Lietuva;
- XI tarptautinėje konferencijoje „Biennial Baltic Electronics Conference“, 2008, Talinas, Estija;
- I tarptautinėje konferencijoje „Bio-Inspired Signal and Image Processing – BISIP’2008“, 2008, Varšuva, Lenkija;
- tarptautinėje doktorantų mokykloje „Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie“, 2007, Vysla, Lenkija;
- X tarptautinėje konferencijoje „Biomedical Engineering“, 2006, Kaunas, Lietuva. *Laimėta trečioji vieta už jaunojo mokslininko pranešimą*;
- tarptautinėje konferencijoje „IC-SPETO“, 2006, Glivicė, Lenkija;
- IX Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, Bioinžinerija ir bioinformatika, 2006, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos struktūra

Pirmame skyriuje pristatomos esminės žinios apie proteomiką ir biochemines technologijas. Apžvelgiami proteomikoje taikomi elektronikos ir informatikos įrankiai, pagrindiniai DE gelių automatinės analizės etapai, formuluojami disertacijos uždaviniai. Antrame skyriuje aptariami DE gelių analizės automatizavimo problemos sprendimo būdai, suformuluojami reikalavimai automatinei DEG vaiz-

dų analizės sistemai, apibendrinto ryšių sistemos modelio pagrindu pasiūlomas originalus DEG vaizdų sutapdinimo modelis, pristatoma nauja automatinės DEG vaizdų analizės strategija. Trečiame skyriuje detalizuojama sudarytos strategijos DEG vaizdų sutapdinimo etapas ir, siūlant sprendimus bei juos tiriant, koncentruojamasi ties trimis naujojo sutapdinimo metodo etapais – individualių DEG vaizdų paruošimu, pradiniu ir baigiamuoju DEG vaizdų sutapdinimu. Ketvirtas skyrius skirtas baltymų raiškos analizės problematiškiausios dalies – DEG vaizdų segmentavimo – galimiems sprendimams. Pateikiami du nauji DEG vaizdų skaidymo į prasmingas sritis algoritmai ir jų tyrimo rezultatai, atlikti baltymų pėdsakų modeliavimo tyrimai, apimantys baltymų pėdsakų rekonstravimą ir parametrizavimą.

Darbo apimtis yra 135 puslapiai, kuriuose pateikta: 197 formulės, 20 paveikslų, 9 lentelės. Disertacijoje remtasi 14 autoriaus darbų ir 205 kitų autorių literatūros šaltinių.

Bendrosios išvados

Disertacijoje sudaryta ir pagrįsta dvimatės elektroforezės gelių (DEG) vaizdų automatinės analizės strategija, sukurti svarbiausių analizės etapų – vaizdų sutapdinimo ir segmentavimo – metodai. Gautos šios elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties svarbios išvados:

1. Pritaikius ryšių sistemos modelį DEG vaizdų sutapdinimo procesui apibūdinti, efektyvaus informacijos perdavimo sąlygos gali būti naudojamos sukuriant efektyvų DEG vaizdų sutapdinimo metodą. Eksperimentais pagrįsta, kad DEG vaizdų sutapdinimo efektyviam veikimui svarbiausi:
 - a) daugiasluoksniu perceptronu ir trimis atstumo funkcijomis (Pirsono koreliacijos, histogramų sankirtos ir χ^2) grįstas vaizdo sričių panašumo įvertinimo būdas, kuris leidžia pasiekti 99,99 % teisingai rastų sutampančių sričių skaičių;
 - b) lokaliai adaptyvus dvikryptės atitikmenų paieškos būdas, nustatantis minimalų panašumo slenkstį atitikmens patvirtinimui;
 - c) RANSAC algoritmu grįstas klaidų aptikimo būdas, atsižvelgiantis į baltymų pėdsakų tarpusavio padėties išlaikymo sąlygas.
2. Sukurtas ir įgyvendintas automatinis DEG vaizdų sutapdinimo metodas leidžia sutapdinti iškraipytus triukšmo, pažeistus, skirtingos skiriamosios gebos gelių vaizdus ir veikia efektyviau nei analogiškos paskirties MIR ir RAIN metodai:
 - a) naujas metodas automatiškai sutapdina 94 % natūralių DEG vaizdų – tai 20 % daugiau nei sutapdina RAIN ir 70 % daugiau nei MIR metodai;
 - b) sutapdinant DEG vaizdą su kito gelio vaizdo dalimi, naujas metodas sutapdina 63 % vaizdų – kiti metodai tokios užduoties neįvykdo;
 - c) sutapdinant DEG vaizdus su 20 % skiriamosios gebos skirtumais, naujas

- metodas sutapdina 88 % vaizdų – tai 25 % daugiau nei sutapdina RAIN ir 63 % daugiau nei MIR metodai;
- d) naujas metodas DEG vaizdus sutapdina vidutiniškai per 21 s – tai 40 kartų greičiau nei RAIN (14 min.) ir 14 kartų lėčiau nei MIR (1,5 s) metodai.
3. Sukurtas ir įgyvendintas automatinis daugiasluoksniu perceptoru grįstas DEG vaizdų segmentavimo metodas mažina reikalingos informacijos praradimo ir klaidų tikimybę, sudaro sąlygas nedidinant eksperimentų skaičiaus, analizuoti ir vertinti didesnius išėities duomenų kiekius:
- a) vaizdo sritys klasifikuojamos į tris klases („srityje yra baltymo pėdsakas“, „srityje yra dalis baltymo pėdsako“ ir „srityje nėra baltymo pėdsako“) 95 % tikslumu;
 - b) skaičiavimams imli persegmentuotų pėdsakų korekcija atliekama tik su tomis pėdsakų sritimis, kurios buvo priskirtos klasei „srityje yra dalis baltymo pėdsako“, todėl reikalingų persegmentavimo tyrimų skaičius sumažėja 20–30 %;
 - c) sudaro sąlygas atskirų gelių vaizdų sričių klasifikavimo duomenis patikslinti pagal sutapdintuose vaizduose esančių atitinkamų sričių klasifikavimą ir ištaisyti reikšmingas klaidas: klaidingą srities su baltymo pėdsaku neatpažinimą ir klaidingą pėdsakų sujungimą.

Apie autorių

Dalius Matuzevičius gimė 1982 m. Panevėžio rajone. 1992 m. baigė Tiltgalių pradinę mokyklą ir 2000 m. Panevėžio Juozo Balčikonio gimnaziją.

2000–2004 m. studijavo Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete ir įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį. 2004–2006 m. studijavo Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete ir įgijo elektronikos inžinerijos magistro laipsnį (diplomas su pagyrimu). 2006–2010 m. studijavo Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektroninių sistemų katedros doktorantūroje.

Nuo 2006 m. dirba asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektroninių sistemų katedroje.

Bakalauro ir magistrantūros studijų metu laimėjo dvi Carol Martin Gruodis atminimo švietimo fondo vardines stipendijas, keturias K. Semenavičiaus II laipsnio vardines stipendijas ir LDK Gedimino I laipsnio vardinę stipendiją; iš Lietuvos mokslo tarybos gavo paramą Studentų mokslinei praktikai, kurią atliko Biochemijos institute. Doktorantūros studijų metu gavo Lietuvos mokslų akademijos jaunojo mokslininko pagyrimo raštą, laimėjo keturias Valstybinio mokslo ir studijų fondo stipendijas.

Dalius Matuzevičius
dalius.matuzevicius@el.vgtu.lt

ANALYSIS OF
2D ELECTROPHORESIS GEL IMAGES
USING INTELLIGENT TECHNIQUES

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

DVIMATĖS ELEKTROFOREZĖS
GELIŲ VAIZDŲ ANALIZĖ TAIKANT
INTELEKTUALIUOSIUS METODUS

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

2010 11 17. 12,75 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, LT-01111 Vilnius, <http://www.ciklonas.lt>