

**Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei**

**Novel Image Processing Methods for Aiding Diabetic  
Retinopathy Diagnosis Based on Color Fundus  
Images**

Lázár István

Témavezető: Dr. Hajdu András



**DEBRECENI EGYETEM**  
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2016.

# CONTENTS

1 Introduction.....	1
2 Microaneurysm detection.....	4
3 Vessel segmentation.....	8
4 Bevezetés.....	12
5 Mikroaneurizma detektálás.....	15
6 Érhálózat szegmentálás.....	19
7 References.....	23
8 List of the author's publications.....	25

# 1 INTRODUCTION

Diabetic retinopathy (DR) is the most common microvascular complication of diabetes. It develops in most patients with long-standing illness and has become the major cause of vision loss in developed countries [1]. The basis of its diagnosis is the identification of visible lesions and vascular abnormalities on the interior surface of the eye (called the *retina* or *fundus*). This is a time and human resource demanding procedure, where computer aided diagnostic (CAD) systems could be a major asset for clinicians [1] by the means of providing support in the recognition of the symptoms.

This thesis focuses on the proposal of novel image processing techniques for the automatic screening of DR based on non-invasive retinal imaging. We concentrate on two closely related tasks: the detection of microaneurysms (MAs), and the segmentation of the vascular network. While these two fields might seem unrelated, the approaches in the corresponding literature show several similarities. The methods proposed in this dissertation are also similar in the sense that they are based on the same novel approach regarding the general methodology of directional processing.

In the first part of the dissertation, two novel automatic MA detection methods are proposed. First, it is shown that a well-known directional morphology technique can be used to construct an unsupervised and nearly parameter free MA detector. The second proposed MA detection method applies a directional approach similar to some existing solutions in the literature. However, such direct usage of directional cross-section profiles has not been proposed before. The performance of these novel MA detection methods have been evaluated both in an online challenge and on an independent image set provided by an eye clinic, where retinal images are routinely graded.

The second part of the dissertation focuses on a novel retinal vessel segmentation procedure. The proposed method is a directional multi-scale approach, in some aspects similar to available literature techniques. The main difference and novelty lie in the manner how the directional responses are utilized. The usual approach among available methods is to consider only a single value, usually the maximal or summed directional response at each pixel. Contrary to this, in our case, the directional responses of a pixel are treated as a vector and utilized in multiple ways. A response vector correlation based similarity measure is proposed and used in a nearest neighbor classifier setup to determine the seeds for a subsequent region growing segmentation. The proposed segmentation technique then also considers the similarity of the response vectors of adjacent pixels. A vessel score is given, which results in higher value for elongated structures than for circular ones. Bright intensity transitions at the boundaries of the optic disc and bright lesions cause high responses in many available matched filtering techniques. In order to tackle this problem at the lowest possible level a symmetry constrained multiscale matched filtering technique is also proposed. The proposed method has been tested on three publicly available image sets, where its performance proved to be competitive with the state-of-the-art algorithms and comparable to the accuracy of a human observer as well.

The main contributions of the dissertation can be summarized as follows with the corresponding publications also included:

1. The proposal of an unsupervised MA detection method based on a fundamental directional morphology technique [2].
2. The demonstration that the candidate extraction phase of MA detection can be based on the extraction of the local minima of the image intensities [3].

3. The presentation of peak detection and property measurement on the cross-sectional intensity profiles of MA candidate points. The proposal of candidate features that are derived from the statistical measures of the directional peak properties, and the final MA score [3]–[6].
4. The proposal of a matched filtering technique that does not give high response to the steep intensity transitions at the boundary of the optic disc and bright lesions [7].
5. The proposal of a novel vessel segmentation approach, which utilizes all directional responses of a pixel in the calculation of a vessel score, for classification, and in a region growing segmentation step [7], [8].

## 2 MICROANEURYSM DETECTION

The presence of MAs on the retina is the earliest and most characteristic symptom of DR. Their recognition is essential in the process of DR grading, forming the basis of deciding whether an image of a patient's eye should be considered healthy or ill. Thus, automatic MA detection is of prominent importance in a DR screening CAD system. These small lesions appear on the surface of the retina as circular dark spots with a clinically established maximal diameter. The expectation towards automatic MA detection is to reliably mark the centroid of MAs in the image, preferably along with confidence values that express the certainty of the individual candidates. In a CAD system, the operator may adjust a confidence threshold to observe possible lesions at different confidence levels. Most techniques in the literature break down the detection of MAs into the steps of image preprocessing, candidate extraction, feature extraction, and candidate classification.

The maximum of morphological openings with rotated flat structuring elements is one of the most fundamental techniques used for MA candidate extraction in the current literature [9]. These methods follow the principle of using structuring elements that have just larger size than the maximal diameter of the MAs in the image. This step results that only those structures will appear highlighted, where the structuring element could fit. The subtraction of this image from the original one gives a top-hat transformed version that contains the possible MA candidates. However, the drawback of this procedure is that longer structuring elements cannot fit in tighter vessel curvings, resulting in residues of the vessel network as MA candidates. To overcome this problem, most literature methods apply additional region growing, matched filtering, and/or classification.

**Thesis 1** – *I have developed an MA detection method based on a fundamental directional morphological operation which does not apply any additional candidate classification.*

The first MA detection method MADET1 [2] proposed in this dissertation also applies the directional morphological approach given in [9]. However, MADET1 considers another complementary morphological technique, namely diameter opening [10], [11], on the data derived from the directional top-hat responses. This approach makes it possible to segment MAs without considering any subsequent classification or additional parameters. The only parameter of the method is the maximal MA diameter, which can be determined from the diameter of the region of interest (ROI) of the image.

The first step is the determination of the response ratio maps corresponding to different levels. The values of these maps express the ratio of directions, where the top-hat response of the given pixel reached at least the given level. Since MAs are circular structures, theoretically, they should have high response ratios at most top-hat levels. The likelihood of a point corresponding to an MA at a given level is expressed by applying diameter opening top-hat operation on the corresponding response ratio map with applying some minor modifications to the procedure. The final MA score map is constructed using a weighted pixelwise maximum selection of the MA likelihood maps corresponding to different height levels.

The performance of the method MADET1 was evaluated in the Retinopathy Online Challenge (ROC) [12], which provides a platform to objectively compare the performance of retinal MA detectors. The proposed method proved to be the best unsupervised method there. Moreover, later it was used as a candidate extractor member in an ensemble-based system [13] which achieved outstanding performance in the same competition. Tests were also

conducted on a private image set that was provided by the Moorfields Eye Hospital, London, UK.

**Thesis 2** – *I have introduced a novel MA detection method which is based on the direct analysis of the directional cross-section profiles of image intensity minima.*

The approach applied in the second MA detection method MADET2 [3] first extracts candidate points as local minima of the intensity image, and then analyzes their directional cross-section profiles to exclude non-MA candidates. The contributions of this method can be subdivided into the following thesis points:

**Thesis 2.1** – *I have shown that the candidate extraction phase of MA localization can be performed by the extraction of local minima region of the intensity image.*

MAs are local intensity minimum structures on the green channel retinal image, usually with a Gaussian like intensity distribution. This means that every MA region contains at least one regional minimum as well. A local minimum region (LMR) of a grayscale (intensity) image is a connected component of pixels with a constant intensity value, such that every neighboring pixel of the region has a strictly higher intensity. Therefore, it is sufficient to consider only the local minimum regions of the image as possible MA candidates. This step can be accomplished using methods available in the literature. Though this approach might seem to be straightforward, it has not been used directly for MA candidate extraction purposes before.

**Thesis 2.2** – *I have introduced a novel procedure for the efficient classification and scoring of MA candidate points based on the detailed analysis of their directional cross-section profiles.*

The surroundings of an MA candidate are analyzed through its



cross-sectional intensity profiles that correspond to different orientations. A technique has been given for the peak detection on these intensity profiles. Several peak properties have been introduced, whose certain statistical measures constitute a feature set. These features are used as the basis of candidate classification. A formula for the final candidate score has been given that takes the symmetry, sharpness, and contrast of the candidate into consideration.

The method MADET2 provided outstanding results in the ROC challenge, where it proved to be the best non-ensemble based method. Moreover, it achieved the highest average sensitivity at the diagnostically most important low false positive per image range. It also outperformed MADET1 at all average false positive per image rates both in the ROC challenge and on the images from the Moorefields Eye Hospital.

### 3 VESSEL SEGMENTATION

The interior surface of the eye is the only part of the human body where the circulation in small blood vessels can be observed directly in a non-invasive manner. The geometrical and morphological properties of retinal blood vessels, such as width, length, tortuosity, or branching patterns can provide valuable information about several ophthalmologic and cardiovascular diseases. Vessel segmentation has many roles in automatic retinal image processing, e.g., as an aid to lesion detectors and anatomical parts localization. It can provide the basis of image registration or be used for authorization purposes. Though it does not form the first line of DR diagnosis, in later stages of the disease it can be used to recognize vessel deformations or the symptoms of hypertension.

Directional methods are of the most surveyed ones in the field of retinal vessel segmentation. Several matched filtering, line strength measure, Radon and wavelet transform based methods have been proposed. The directional morphological top-hat operation discussed earlier has also been applied for this task by several authors. Matched filtering techniques can be helpful to capture the Gaussian like cross-sections of vessels. However, many of these methods, and also those based on line strength measures, give false high responses to steep intensity transitions that occur at the boundary of the optic disc and bright lesions. This is often referred to as the “ringing effect” [14], [15]. Unlike to MAs, the diameter of vessels vary within a wider range. In order to overcome this issue, variations of multiscale analysis are among the most widely used techniques in the literature.

**Thesis 3** – *I have composed a multiscale matched filtering procedure based on the second derivative of the Gaussian filter for efficient retinal vessel segmentation. I have also shown that it does not give false high responses at the boundary of the optic disc and bright*

*lesions.*

The second order derivative of the Gaussian (SDG) filter, and its negative normalized variant the *Mexican-hat*, are often used in signal and image processing tasks as filters to match. The general way to calculate the matched filter response is the discrete cross-correlation of the signal, in our case the cross-section profile, and the mask. Since in the case of a vessel cross-section profile only the response at the central index is relevant, the cross-correlation operation simplifies to the sum-product of the cross-section profile data of the current point and the SDG filter.

The proposed solution to overcome the “ringing effect” issue is the following. First, the unmodified filter response is determined. Then, both the profile and the filter are split into a left and right part, and the respective sum-products are determined independently. The final response is calculated by subtracting the absolute difference of the left and right sum-products from the unmodified filter response. This symmetry constraint allows high response only for those cross-sections where the difference in the degree of the intensity transition between the two sides is minimal. To handle the varying width of vessels, SDG masks corresponding to different scale parameters are matched against the profile, and the maximal response is selected [7].

**Thesis 4** – *I have developed a novel vessel segmentation technique, which extensively utilizes the directional responses of a pixel.*

The general approach among pixelwise directional methods in the current literature is to consider the maximal or summed matched filter response over the directions at each pixel as a vessel strength measure. However, the method presented in this dissertation considers the directional responses of a pixel as a vector. The proper exploitation of this information are described through these

thesis points:

**Thesis 4.1** – *I have derived a formula which efficiently scores the vesselness property of image pixels based on the mean, standard deviation and maximal value of their response vector.*

Vessel points have low or zero response at directions matching the orientation of the corresponding vessel, thus, the variation of responses over the directions are higher. Therefore, we calculate the vessel score of a pixel by multiplying its response vector mean with its standard deviation, and then divide the product with the maximal response value to achieve a certain level of normalization [7], [8].

**Thesis 4.2** – *I have introduced a directional response vector correlation based similarity measure and applied it in a nearest neighbor classifier setup to filter seed points for region growing segmentation.*

The seed points for the segmentation are extracted as the local maxima of the score map. The seeds are classified using a nearest-neighbor type classifier based on the comparison of the response vector of the seed point to a set of stored vessel response vectors. For this purpose, a correlation based similarity measure has been proposed that is invariant to the orientation of the structure to which the response vectors belong. This is accomplished by successively rotating (circularly shifting) one of the vectors, and calculating the normalized cross-correlation of the rotated and the other one at each step. The rotation is performed as many times as the length of the vectors, and the maximal correlation will give the similarity of the two vectors. This way all possible orientations are checked, thus, the proposed measure is invariant to the orientation of the underlying structures [7].

**Thesis 4.3** – *I have composed a region growing segmentation technique which considers a similarity constraint on the directional response vectors of adjacent pixels.*

This technique considers both the vessel score difference and the response vector similarity of adjacent pixels during processing. The aim of this approach is to prevent small non-vessel structures from being connected to the peripheries of vessels, which would otherwise happen in certain cases, if the segmentation would be solely based on the vessel score [7].

The proposed vessel segmentation method has been tested on the publicly available image sets DRIVE [16], STARE [17], and HRF [18]. Its performance proved to be competitive with the state-of-the-art methods. Moreover, it has been shown in the dissertation that certain components of the proposed vessel segmentation technique, namely the matched filtering procedure and the vessel scoring formula, can be applied to the segmentation of the pigment network in dermatoscopic images.

## 4 BEVEZETÉS

A diabéteszes retinopátia (DR) a cukorbetegség leggyakoribb, hajszálerhálózatot érintő szövödménye, mely a tartósan betegek igen nagy hányadát érinti, továbbá a vakság legfőbb oka a fejlett világban [1]. A betegség diagnózisának alapja a szemfenék (*fundus*) sérüléseinek, illetve az érhalózat látható elváltozásainak felismerése. Mivel ez egy meglehetősen idő- és emberi erőforrás igényes feladat, azon számítógépes diagnosztikai rendszerek (CAD) [1], melyek képesek támogatást nyújtani ezen elváltozások felismeréséhez, illetve a betegség előrehaladottságának becsléséhez, komoly segítséget jelenthetnek a klinikumban.

Ezen értekezés fő témája olyan új digitális képfeldolgozási módszerek bemutatása, melyek a diabéteszes retinopátia nem-invazív szemfenék képek alapján történő automatikus szűréséhez használhatóak. Alapvetően két egymáshoz szorosan kapcsolódó feladatra koncentrálnak: a mikroaneurizmák detektálására, illetve az érhalózat szegmentálására. Bár e két terület különbözőnek tűnhet, a kapcsolódó irodalomban fellelhető algoritmusok számos hasonlóságot mutatnak. Az értekezésben javasolt módszerek ugyancsak hasonlóak abban az értelemben, hogy új megközelítést adnak az egyes irányokban tekintett intenzitásprofilok feldolgozásának módszertanához.

Az értekezés első felében két saját fejlesztésű automatikus mikroaneurizma (MA) detektor kerül tárgyalásra. Először bemutatásra kerül, hogy egy, a területen alapvető morfológiai eljárásból kiindulva készíthető egy osztályozó lépés nélküli, lényegében paraméterfüggetlen mikroaneurizma detektor. A második bemutatott módszer több irodalmi eljáráshoz hasonlóan egy pixelenkénti irány szerinti megközelítést alkalmaz, ugyanakkor a keresztmetszeti intenzitásprofilok itt bemutatott direkt elemzéséhez

hasonló eljárást még nem közöltek korábban. Mindkét módszer hatékonysága egy online versenyfelületen, illetve egy szemészeti klinikáról származó képi halmazon került kiértékelésre.

Az értekezés második felében egy saját fejlesztésű érhálózat szegmentáló algoritmus kerül bemutatásra. A módszer újszerűsége és legfontosabb jellemzője az irányonkénti válaszok alkalmazásának módja. Míg az irodalomban megtalálható hasonló módszerek egy adott pont esetén jellemzően csak irányválaszainak maximumát vagy összegét tekintik, addig az itt javasolt módszer a teljes irányválasz vektort felhasználja. Bemutatásra kerül egy, az irányválasz vektorok korrelációján alapuló hasonlósági mérőszám, illetve ennek alkalmazása a szegmentáló eljárás kiindulási pontjait szűrő legközelebbi szomszéd osztályozási lépésnél. A javasolt régiónövelő szegmentáló eljárás ugyancsak figyelembe veszi a szomszédos pontok irányválasz vektorainak hasonlóságát. Megadunk egy új értpont erősséget leíró mérőszámot is, mely lényegesen zajtűrőbb és magasabb értéket rendel az olyan elnyúlt struktúrákhoz mint az érhálózat darabjai, miközben az olyan körszerű struktúrák mint a mikroaneurizmák értékét alacsonyan tartja. A vakfolt és világos léziók határainál lévő éles világos-sötét átmenetekre jellemzően helytelenül magas maszkválaszt adnak a létező mintaillesztési eljárások. Ezen problémának a kiküszöbölésére megadunk egy többszintű, szimmetriát megkövetelő mintaillesztési eljárást. A javasolt módszer három nyilvánosan elérhető képhalmazon került kiértékelésre. Az eredmények alapján az eljárás versenyképes a szakirodalomban létező eljárásokkal, illetve pontossága összevethető egy humán megfigyelővel is.

Az értekezés fő eredményei a szerző vonatkozó közleményeivel együtt a következő pontokban foglalhatóak össze:

1. Egy osztályozó lépés nélküli MA detektor bemutatása, mely a

vonatkozó irodalomban jól ismert irány szerinti morfológiai eljárásokon alapul [2].

2. Annak a bemutatása, hogy az MA detektálás jelöltállító lépése megfeleltethető a szürkeskálás kép lokális minimumai kinyerésének [3].
3. Keresztszeti intenzitás profilokon történő csúcsetektálás és tulajdonságok meghatározásának bemutatása. Javaslatok az ezekből származtatott jelölt sajátosságvektorra, illetve a végleges MA konfidencia meghatározására [3]–[6].
4. Egy olyan mintaillesztési eljárás bemutatása, mely nem ad erős válaszokat a vakfolt és világos léziók határainál lévő éles intenzitásátmenetekre [7].
5. Egy saját fejlesztésű érhálózat szegmentáló eljárás bemutatása, mely az egyes pixelek összes irányvázását felhasználja az érpont erősség meghatározásához, osztályozáshoz, valamint egy régiónövelő szegmentálási lépéshez [7], [8].



## 5 MIKROANEURIZMA DETEKTÁLÁS

A mikroaneurizmák (MA-k) megjelenése a szemfenéken a DR legelső és legjellegzetesebb tünete. Felismerésük alapvető fontosságú a betegség előrehaladottságának meghatározásában, mivel ez dönti el, hogy betegnek vagy egészségesnek tekintendő a vizsgált személy. Ennélfogva az automatikus MA detektálásnak kiemelt szerepe van egy DR diagnózist támogató számítógépes rendszerben. Ezek az apró elváltozások úgy jelennek meg a szemfenék képeken, mint sötét színű, kör alakú foltok; a maximális méretük egy klinikailag meghatározott érték. Egy automatikus detektorral szembeni legfőbb elvárás az, hogy megbízhatóan jelölje meg az MA középpontokat a képen, lehetőleg mindegyikhez egy olyan konfidencia értéket társítva, mely kifejezi az adott detektálás bizonyosságát. Így egy valós szűrőrendszer esetén a kezelő személy egy konfidencia küszöb változtatása mellett vizsgálhatja az elváltozásokat. Az irodalomban található legtöbb módszer a következő lépésekre bontja a detektálási folyamatot: előfeldolgozás, jelöltállítás, sajátság leírók kinyerése, jelölt osztályozás.

Az irodalomban található egyik alapvető módszer lényege, hogy a képen különböző irányú egyenes struktúraelemekkel végzett morfológia nyitások maximumát tekintjük [9]. Ezek a módszerek azt az elvet követik, hogy az alkalmazott struktúra elem éppen nagyobb legyen, mint a képen lévő legnagyobb MA. Ez azt eredményezi, hogy az eredményképeken csak azok a részek fognak megjelenni, ahova az adott irányú struktúra elem illeszkedni tudott. Ennek és az eredeti képnek a különbségként előálló top-hat transzformált kép adja a lehetséges MA jelölteket. Ezen eljárások legnagyobb hátulütője, hogy a nagyobb struktúra elemek nem képesek illeszkedni a szűk érkanyarulatokra, így ezek is MA jelöltekként jelennek meg. Ennek a problémának a kiküszöbölésére az irodalomban

megtalálható megoldások többek között az utólagos régiönövelés, mintaillesztés és/vagy osztályozás alkalmazása.

**Tézis 1** – *Kifejlesztettem egy MA detektort, mely egy alapvető irányonkénti morfológiai műveleten alapul és nem alkalmaz utólagos osztályozó lépést.*

Az értekezésben elsőként bemutatott MA detektor (MADET1) [2] ugyancsak az előbb leírt eljárást alkalmazza, ugyanakkor felhasznál egy másik morfológiai műveletet – átmérő kritérium alapú nyitást [10], [11] – is, melyet az irányonkénti top-hat válaszokból származtatott képre alkalmazunk. Így az MA-k szegmentálása utólagos osztályozó lépés, illetve további paraméterek nélkül válik lehetővé. A módszer egyetlen paramétere a maximális MA átmérő, amely azonban meghatározható a bemeneti kép ténylegesen a szemfeneket tartalmazó részének átmérőjéből.

A módszer első lépése a különböző szintekhez tartozó irányválasz arány térképek meghatározása. Ezeknek a térképeknek az értékei azt fejezik ki, hogy az adott pont esetén hány irányra érte el a top-hat válasz legalább az adott szintet. Mivel az MA-k körszerű struktúrák, így elméletileg a legtöbb szinten magas válasz arányt kell adniuk. Egy pont egy adott szinten MA-hoz való tartozásának valószínűségét egy némileg módosított átmérő kritérium alapú top-hat művelet segítségével határozzuk meg a vonatkozó irányválasz arány térképen. A végleges MA konfidencia képet ezeknek a különböző szintekhez tartozó MA valószínűségi képeknek a pixelenkénti súlyozott maximumából számoljuk.

A detektor teljesítménye a Retinopathy Online Challenge (ROC) [12] nyílt nemzetközi versenyen került kiértékelésre, melynek célja a retina MA detektorok objektív összehasonlítása. Ezen a fórumon bemutatott módszer bizonyult a legjobb osztályozó lépést nem használó eljárásnak. A módszer továbbá jelöltállítóként

felhasználásra került egy olyan összetett rendszerben [13], mely az összes résztvevő közül a legjobb átlagos eredményt érte el. A módszer teljesítménye kiértékelésre került továbbá egy, a Moorfields szemészeti klinikáról (London, UK) származó képhalmazon.

**Tézis 2** – *Kifejlesztettem egy MA detektort, mely a kép intenzitások lokális minimumainak különböző irányú keresztmetszeti profiljainak vizsgálatán alapul.*

Az értekezésben bemutatott második saját fejlesztésű MA detektor (MADET2) [3] azt a megközelítést alkalmazza, hogy először a kép lokális minimumainak kinyerésével állítjuk elő a jelölt pontokat, majd ezeknek a különböző irányú keresztmetszeti profiljait elemezve kíséreljük meg eltávolítani a hamis detektálásokat. Ennek a módszernek a főbb lépései az alábbi tézispontokban fogalmazhatók meg:

**Tézis 2.1** – *Megmutattam, hogy az MA detektálás jelöltállítási lépése elvégezhető az intenzitás kép lokális minimumainak kinyerésével.*

Az MA-k a képen mint az intenzitás lokális minimumai jelennek meg, jellemzően kétdimenziós Gauss-jellgeű eloszlással. Ebből következik, hogy egy MA régióknak tartalmaznia kell egy diszkrét értelemben vett minimum régiót, mely jellemzően egyetlen pont. Az intenzitás kép egy minimum régiója egy olyan azonos intenzitású pixelek kapcsolódó komponense, melynél minden azzal határos képpontnak az intenzitása nagyobb. Így elegendő a kép intenzitásainak lokális minimum helyeit tekinteni mint lehetséges jelölt pontokat. Ehhez a művelethez számos irodalmi algoritmus áll rendelkezésre. Bár az elgondolás természetes, korábban azonban ezen a területen nem alkalmazták ilyen kontextusban.

**Tézis 2.2** – *Megadtam egy módszert az MA jelölt pontok osztályozására és konfidencia értékiük meghatározására a különböző irányú keresztmetszeti profiljaik vizsgálata alapján.*

Az egyes MA jelölt pontokat a különböző irányú keresztmetszeti intenzitásprofiljaikon keresztül vizsgáljuk. Az értekezésben bemutatásra kerül egy módszer a profilokon történő csúcsetektálásra, továbbá több leíró is, melyek a csúcs tulajdonságait jellemzik. Ezen leíróknak az irányok változásának függvényében vett statisztikai mértékei szolgáltatják a jelölt pont sajátságvektorát. Ezeket a sajátságokat alapul a jelöltek osztályozása, illetve a konfidencia meghatározása, mely így figyelembe veszi a jelölt szimmetriáját, élességét és kontrasztját is.

Az MADET2 módszer kimagasló eredményt ért el a korábban említett ROC versenyen, ahol ez bizonyult a legjobb nem összetett rendszernek és szolgáltatotta a legmagasabb átlagos szenzitivitást alacsony képenkénti fals pozitív szám mellett. Továbbá, mind az ROC, mind pedig a Moorfields-től kapott képekre hatékonyabbnak bizonyult az MADET1 módszernél.

## 6 ÉRHÁLÓZAT SZEGMENTÁLÁS

A szem belső felülete az emberi szervezet egyetlen olyan része, ahol a hajszalérhálózat és a keringés nem invazív módon közvetlenül megfigyelhető. A szemfenék véredényhálózatának geometriai és alaktani tulajdonságai, mint például az érdarabok szélessége, hosszúsága, kanyargóssága és az elágazódási mintázat hasznos információkkal szolgálhatnak számos szemészeti és keringési betegségről. Az érhálózat szegmentálásának több alkalmazása is lehet a retina képek automatikus feldolgozása során. Ilyenek például az elváltozások detektálásának támogatása, anatómiai részek helyzetének pontosabb meghatározása, különböző modalitású képek regisztrációja vagy biometrikus azonosítási eljárások megalapozása. Bár nem tartozik a diabéteszes retinopátia diagnózisának első vonalába, az eljárás a betegség későbbi stádiumában felhasználható az érhálózat elváltozásainak felismeréséhez vagy éppen a magas vérnyomás vérerekre gyakorolt hatásának elemzéséhez.

A különböző irány szerinti eljárások az egyik legtöbbet vizsgáltak a retina érhálózatának szegmentálása területén. Számos mintaillesztési, egyenes erősségi mérték, Radon, illetve wavelet-transzformált alapú módszert javasoltak napjainkig. A korábban ismertetett irányonkénti morfológiai top-hat műveletet ugyancsak több szerző alkalmazta már erre a feladatra. Általánosságban véve a mintaillesztési eljárások jól alkalmazhatóak az érdarabok Gauss-jellegű keresztmetszetének felismerésére. Ugyanakkor ezen módszerek többségét érinti a probléma, hogy helytelenül magas választ adnak a vakfolt és világos léziók határánál jelentkező éles intenzitásátmenetekre. Ezt a jelenséget szokás gyűrű hatásnak (ringing effect) [14], [15] is nevezni. Szemben a mikroaneurizmákkal, az érhálózat darabjainak vastagsága jóval szélesebb tartományon belül változik, melyre a leggyakoribb megoldás az irodalomban a különböző többléptékű

(multiscale) eljárások alkalmazása.

**Tézis 3** – *Kifejlesztettem egy másodrendű Gauss derivált maszkon alapuló többléptékű mintaillesztési eljárást, mely nem ad helytelen magas válaszokat a vakfolt és világos léziók körvonalaira.*

A másodrendű Gauss derivált (MGD) maszk, illetve negatív normalizált változata a „mexican-hat” gyakran használtak mintaillesztéshez jel- és képfeldolgozási feladatokban. A maszkválasz meghatározásának általános módja a jel – ebben az esetben a keresztmetszeti profil – és a maszk diszkrét kereszt-korrelációja. Mivel az itteni alkalmazásnál csak a középső pontban vett válasz a lényeges, így a művelet leegyszerűsödik a profil és az MGD maszk szorzatösszegének meghatározására.

Az értekezésben javasolt megoldás a gyűrű hatás kiküszöbölésére, hogy először meghatározzuk a módosítatlan maszkválaszt, majd ezt követően mind a maszkot, mind pedig a profilt a középső elemnél szétbontjuk egy bal és jobb részre és külön-külön számoljuk ezek kereszt-korrelációját. A végső választ úgy határozzuk meg, hogy a módosítatlan maszkválaszból kivonjuk a bal és jobboldali válaszok különbségének abszolút értékét. Ennek a szimmetria megkötésnek az eredménye, hogy csak azoknál a keresztmetszeti profiloknál kapunk magas választ, ahol a két oldal intenzitás átmenetének mértéke hasonló. A különböző érvastagságok kezeléséhez több különböző szórású maszk választ határozzuk meg és a maximumot tekintjük [7].

**Tézis 4** – *Kifejlesztettem egy új retina érhálózatot szegmentáló módszert, mely átfogóan használja fel az egyes képpontok irányválasz vektorait.*

Az irodalomban létező pixelenkénti különböző irányokon alapuló módszerek közös tulajdonsága, hogy jellemzően csak a maximális vagy összegzett irányválaszokat használják fel. Ezzel

szemben az értekezésben bemutatott módszer az egyes pixelek irányválaszait együttesen tekinti mint vektort. Ennek az információnak a hatékony kihasználási módját az alábbi tézispontokban foglaljuk össze:

**Tézis 4.1** – *Megadtam egy érerősségi mérőszámot, mely a pont irányválasz vektorának átlaga, szórása és maximuma alapján kerül kiszámításra.*

Az érháló pontoknak alacsony vagy nulla a maszkválasza a sajátjukkal közel azonos irányokra, így az érponok esetén nagyobb lesz a szórás a különböző irányok maszkválaszaiban. Az érpon erősségi értéket úgy határozzuk meg, hogy tekintjük az irányválasz vektor átlagának és szórásának szorzatát és ezt osztjuk a maximummal, normalizálás céljából. [7], [8]

**Tézis 4.2** – *Megadtam egy irányválasz vektorok korrelációján alapuló hasonlósági mérőszámot, továbbá bemutattam ennek alkalmazását a szegmentáló eljárás kiindulási pontjainak osztályozására egy k-legközelebbi szomszéd (kNN) osztályozóval.*

Az érhálózat szegmentációjához használt kiindulási pontokat az érerősségi térkép lokális maximumaiként nyerjük ki. A pontokat egy k-legközelebbi szomszéd jellegű osztályozóval szűrjük meg, melynek lényege, hogy az adott pont irányválasz vektorát hasonlítja egy sor tárolt érháló pont irányválasz vektorához. Az összehasonlítás alapja egy, a vektorok korrelációján alapuló hasonlósági mérték, mely invariáns a vonatkozó struktúra irányára. Ezt úgy érjük el, hogy az egyik vektor elemeit körbeforgatjuk, minden lépésnél meghatározva az a két vektor keresztkorrelációját. Hasonlósági mértéknek az így kapott értékek maximumát tekintjük. Ily módon a kapott hasonlósági mérőszám invariáns a vonatkozó struktúrák irányára nézve [7].

**Tézis 4.3** – *Megadtam egy régiónövelő szegmentáló eljárást, mely felhasználja a szomszédos pontok irányvász vektorainak hasonlóságára vonatkozó megkötést*

Az eljárás felhasználja a szomszédos pontok érerősségi értéke mellett azok irányvász vektorainak hasonlóságát is. A cél annak megakadályozása, hogy kisméretű struktúrák kapcsolódjanak az erek pereméhez, ami akkor fordulna elő, ha csak az érpont erősség alapján végeznénk a szegmentálást [7].

A módszer a DRIVE[16], STARE [17] és HRF [18] szabadon hozzáférhető annotált képi adatbázisokon került kiértékelésre. A tesztek megmutatták, hogy az eljárás pontossága versenyképes a legtöbb jelenlegi irodalmi algoritmuséval. Az értekezésben az is bemutatásra kerül, hogy a javasolt érhálózat szegmentáló bizonyos komponensei, konkrétan a mintaillesztési eljárás és az érpont erősségi formula hogyan alkalmazhatóak dermatoszkópos képeken történő pigmenthálózat kinyerésre is.



## 7 REFERENCES

- [1] D. S. Fong, L. P. Aiello, F. L. Ferris, and R. Klein, "Diabetic Retinopathy," *Diabetes Care*, vol. 27, no. 10, pp. 2540–2553, Oct. 2004.
- [2] I. Lazar and A. Hajdu, "Microaneurysm detection in retinal images using a rotating cross-section based model," presented at the Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2011 IEEE International Symposium on, 2011, pp. 1405–1409.
- [3] I. Lazar and A. Hajdu, "Retinal Microaneurysm Detection Through Local Rotating Cross-Section Profile Analysis," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 32, no. 2, pp. 400–407, Feb. 2013.
- [4] I. Lazar, R. J. Qureshi, and A. Hajdu, "A novel approach for the automatic detection of microaneurysms in retinal images," 2010, pp. 193–197.
- [5] I. Lázár and A. Hajdu, "Retinal Microaneurysm Detection Based on Intensity Profile Analysis," in *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Informatics*, Eger, Hungary, 2010, pp. 157–165.
- [6] I. Lázár and A. Hajdu, "Keresztszemi intenzitás profilokon alapuló mikroaneurizma detektálás és érhálózat szegmentálás retina képeken," in *Proceedings of a Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 9. országos konferenciája*, 2013, pp. 404–412.
- [7] I. Lázár and A. Hajdu, "Segmentation of retinal vessels by means of directional response vector similarity and region growing," *Comput. Biol. Med.*, vol. 66, pp. 209–221, Nov. 2015.
- [8] I. Lazar and A. Hajdu, "Segmentation of vessels in retinal images based on directional height statistics," presented at the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE, 2012, pp. 1458–1461.
- [9] T. Spencer, J. A. Olson, K. C. McHardy, P. F. Sharp, and J. V. Forrester, "An Image-Processing Strategy for the Segmentation and Quantification of Microaneurysms in Fluorescein Angiograms of the Ocular Fundus," *Comput. Biomed. Res.*, vol. 29, no. 4, pp. 284–302, Aug. 1996.
- [10] L. Vincent, "Morphological Area Openings and Closings for Grey-scale Images," in *Shape in Picture*, Y.-L. O, A. Toet, D. Foster, H. J. A. M. Heijmans, and P. Meer, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994, pp. 197–208.

- [11] E. J. Breen and R. Jones, "Attribute Openings, Thinnings, and Granulometries," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 64, no. 3, pp. 377–389, Nov. 1996.
- [12] M. Niemeijer, B. van Ginneken, M. J. Cree, A. Mizutani, G. Quellec, C. I. Sanchez, B. Zhang, R. Hornero, M. Lamard, C. Muramatsu, X. Wu, G. Cazuguel, J. You, A. Mayo, Qin Li, Y. Hatanaka, B. Cochener, C. Roux, F. Karray, M. Garcia, H. Fujita, and M. D. Abramoff, "Retinopathy Online Challenge: Automatic Detection of Microaneurysms in Digital Color Fundus Photographs," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 29, no. 1, pp. 185–195, Jan. 2010.
- [13] B. Antal and A. Hajdu, "An Ensemble-Based System for Microaneurysm Detection and Diabetic Retinopathy Grading," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 59, no. 6, pp. 1720–1726, Jun. 2012.
- [14] M. M. Fraz, S. A. Barman, P. Remagnino, A. Hoppe, A. Basit, B. Uyyanonvara, A. R. Rudnicka, and C. G. Owen, "An approach to localize the retinal blood vessels using bit planes and centerline detection," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 108, no. 2, pp. 600–616, Nov. 2012.
- [15] B. S. Y. Lam, Yongsheng Gao, and A. W.-C. Liew, "General Retinal Vessel Segmentation Using Regularization-Based Multiconcavity Modeling," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 29, no. 7, pp. 1369–1381, Jul. 2010.
- [16] J. Staal, M. D. Abramoff, M. Niemeijer, M. A. Viergever, and B. van Ginneken, "Ridge-Based Vessel Segmentation in Color Images of the Retina," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 23, no. 4, pp. 501–509, Apr. 2004.
- [17] A. D. Hoover, V. Kouznetsova, and M. Goldbaum, "Locating blood vessels in retinal images by piecewise threshold probing of a matched filter response," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 19, no. 3, pp. 203–210, Mar. 2000.
- [18] J. Odstrcilik, R. Kolar, A. Budai, J. Hornegger, J. Jan, J. Gazarek, T. Kubena, P. Cernosek, O. Svoboda, and E. Angelopoulou, "Retinal vessel segmentation by improved matched filtering: evaluation on a new high-resolution fundus image database," *IET Image Process.*, vol. 7, no. 4, pp. 373–383, Jun. 2013.

## 8 LIST OF THE AUTHOR'S PUBLICATIONS

### Publications related to the thesis

#### *Journal articles*

**I. Lázár** and A. Hajdu, “Segmentation of retinal vessels by means of directional response vector similarity and region growing,” *Computers in Biology and Medicine*, vol. 66, pp. 209–221, Nov. 2015, DOI: 10.1016/j.combiomed.2015.09.008.

**I. Lázár** and A. Hajdu, “Retinal Microaneurysm Detection Through Local Rotating Cross-Section Profile Analysis,” *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 32, no. 2, pp. 400–407, Feb. 2013, DOI: 10.1109/TMI.2012.2228665.

#### *Articles in the proceedings of international conferences*

**I. Lázár** and A. Hajdu, “Segmentation of vessels in retinal images based on directional height statistics,” in *Proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 1458–1461, 2012, DOI: 10.1109/EMBC.2012.6346215.

**I. Lázár** and A. Hajdu, “Microaneurysm detection in retinal images using a rotating cross-section based model,” in *Proceedings of the Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 1405–1409, 2011, DOI: 10.1109/ISBI.2011.5872663.

**I. Lázár**, R. J. Qureshi, and A. Hajdu, “A novel approach for the automatic detection of microaneurysms in retinal images,” in *Proceedings of the Emerging Technologies (ICET), 2010 6th International Conference on*, pp. 193–197, 2010, DOI: 10.1109/ICET.2010.5638490.

**I. Lázár** and A. Hajdu, “Retinal Microaneurysm Detection Based on Intensity Profile Analysis,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2010)*, pp. 157–165, 2010.

#### *Articles in the proceedings of Hungarian conferences*

**I. Lázár** and A. Hajdu, “Keresztmetszeti intenzitás profilokon alapuló mikroaneurizma detektálás és érhálózat szegmentálás retina képeken,” in *Proceedings of Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 9. országos*

konferenciája, pp. 404-412, 2013.

## Other publications

### *Articles in the proceedings of international conferences*

J. Toth, L. Bartha, T. Szabo, **I. Lazar**, B. Harangi, A. Hajdu, “An Online Application for Storing, Analyzing, and Sharing Dermatological Data,” *Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2015 6th IEEE International Conference on*, Gyor. Hungary, pp. 339-342, 2015, DOI: 10.1109/CogInfoCom.2015.7390615.

B. Antal, **I. Lázár**, and A. Hajdu, “An adaptive weighting approach for ensemble-based detection of microaneurysms in color fundus images,” in *Proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 5955–5958, 2012, DOI: 10.1109/EMBC.2012.6347350.

B. Antal, **I. Lázár**, and A. Hajdu “An Ensemble Approach to Improve Microaneurysm Candidate Extraction,” in *Communications in Computer and Information Science - 7th International Joint Conference, ICETE 2010, Revised Selected Papers*, pp. 378-391, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-25206-8\_25.

B. Antal, **I. Lázár**, A. Hajdu, Zs. Török, A. Csutak, and T. Pető, “Evaluation of the grading performance of an ensemble-based microaneurysm detector,” in *Proceedings of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2011 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 5943–5946, 2011, DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6091469.

B. Antal, **I. Lázár**, A. Hajdu, Zs. Török, A. Csutak, and T. Pető, “A multi-level ensemble-based system for detecting microaneurysms in fundus images,” in *Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Soft Computing Applications*, pp. 137-142, 2010, DOI: 10.1109/SOFA.2010.5565609.

B. Antal, **I. Lázár**, and A. Hajdu, “An optimal voting scheme for microaneurysm candidate extractors using simulated annealing,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications (SIGMAP 2010)*, pp. 80-87, 2010.

B. Antal, **I. Lázár**, and A. Hajdu, “Novel approaches to improve microaneurysm detection in retinal images” in *Proceedings of the 8th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2010)*, pp. 149-156, 2010.

## *Articles in the proceedings of Hungarian conferences*

B. Antal, **I. Lázár**, and A. Hajdu, “Mikroaneurizma detektálás összetett rendszerrel,” in *Proceedings of Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 8. országos konferenciája*, pp 155-162, 2011.

## *Conference abstracts*

A. Csutak, B. Antal, **I. Lázár**, T. Petó, Z. Török, A. Biró, A. Hajdu, “Diabetic retinopathy screening with computational support” in *Acta Ophthalmol.* 89, p. 357, 2011, DOI: 10.1111/j.1755-3768.2011.357.x

## *Technical reports*

**I. Lázár**, B. Antal, and A. Hajdu, “Microaneurysm detection in digital fundus images,” Tech. Rep. 2010/14(387), University of Debrecen, Hungary.



Registry number: DEENK/40/2016.PL  
Subject: Ph.D. List of Publications

Candidate: István Lázár  
Neptun ID: EA47HI  
Doctoral School: Doctoral School of Informatics  
MTMT ID: 10038593

### List of publications related to the dissertation

#### Foreign language scientific article(s) in international journal(s) (2)

1. **Lázár, I.**, Hajdu, A.: Segmentation of retinal vessels by means of directional response vector similarity and region growing.  
*Comput. Biol. Med.* 66, 209-221, 2015. ISSN: 0010-4825.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combiomed.2015.09.008>  
IF:1.24 (2014)
2. **Lázár, I.**, Hajdu, A.: Retinal Microaneurysm Detection Through Local Rotating Cross-Section Profile Analysis.  
*IEEE Trans. Med. Imaging.* 32 (2), 400-407, 2013. ISSN: 0278-0062.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMI.2012.2228665>  
IF:3.799

#### Hungarian conference proceeding(s) (1)

3. **Lázár I.**, Hajdu A.: Keresztmetszeti intenzitás profilokon alapuló mikroaneurizma detektálás és érhálózat szegmentálás retina képeken.  
In: Képfeldolgozók és Alakfelismerők 9. konferenciája. Szerk.: Czúni László, NJSZT-KÉPAF, Bakonybél, 404-412, 2013.





Foreign language conference proceeding(s) (4)

4. **Lázár, I.**, Hajdu, A.: Segmentation of Vessels in Retinal Images Based on Directional Height Statistics.  
*Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 34*, 1458-1461, 2012. ISSN: 1557-170X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMBC.2012.6346215>
  
5. **Lázár, I.**, Hajdu, A.: Microaneurysm detection in retinal images using a rotating cross-section based model.  
*Proc. IEEE Int. Symp. Biomed. Imaging.* , 1405-1409, 2011. ISSN: 1945-7928.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISBI.2011.5872663>
  
6. **Lázár, I.**, Qureshi, R.J., Hajdu, A.: A Novel Approach for the Automatic Detection of Microaneurysms in Retinal Images.  
In: Proceedings of the Emerging Technologies (ICET), 2010 6th International Conference on IEEE, Piscataway, 193-197, 2010. ISBN: 9781424480579  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICET.2010.5638490>
  
7. **Lázár, I.**, Hajdu, A.: Retinal Microaneurysm Detection Based on Intensity Profile Analysis.  
In: Proceedings of the 8th International Conference on Applied Informatics (ICAI2010) Vol. 1. Ed.: by Attila Egri-Nagy, Emőd Kovács, Gergely Kovásznaí, Gábor Kusper, Tibor Tótmács, Eszterházy Károly Főiskola, Eger, 157-165, 2011. ISBN: 9789639894723

**List of other publications**

Foreign language international book chapter(s) (1)

8. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A.: An Ensemble Approach to Improve Microaneurysm Candidate Extraction.  
In: e-Business and Telecommunications : 7th International Joint Conference, ICETE, Athens, Greece, July 26-28, 2010 : Revised Selected Papers. Ed.: Mohammad S. Obaidat, George A. Tsihrintzis, Joaquim Filipe, Springer Verlag, Heidelberg, 378-394, 2012. ISBN: 9783642252051



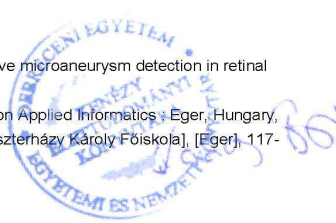


Hungarian conference proceeding(s) (1)

9. Antal B., **Lázár I.**, Hajdu A.: Mikroaneurizma-detektálás összetett rendszerrel.  
In: 8th Conference of the Hungarian Association for Image Processing and Pattern Recognition January 25-28, 2011 Szeged, Hungary : Proceedings of KÉPAF 2011. Szerk.: Zoltán Kató, Palágyi Kálmán, Erdőhelyi Balázs, Szegedi Egyetem, Szeged, 155-162, 2012.

Foreign language conference proceeding(s) (8)

10. Tóth, J., Bartha, L., Szabó, T., **Lázár, I.**, Harangi, B., Hajdu, A.: An Online Application for Storing, Analyzing, and Sharing Dermatological Data.  
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 October 19-21, Széchenyi István University Győr, Hungary : Proceedings. Szerk.: Peter Baranyi, Széchenyi István University, Győr, 339-342, 2015. ISBN: 9781467381284  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CogInfoCom.2015.7390615>
11. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A.: An adaptive weighting approach for ensemble-based detection of microaneurysms in color fundus images.  
In: Képfeldolgozók és Alakfelismerők országos 9. konferenciája : KÉPAF Konferencia kiadvány. Szerk.: Czúni László, NJSZT-KÉPAF, Bakonybél, 393-403, 2013.
12. Harangi, B., Hajdu, A., **Lázár, I.**: Automatic Exudate Detection Using Active Contour Model and Regionwise Classification.  
*Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 1, 5951-5954, 2012. ISSN: 1557-170X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347349>
13. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A.: An adaptive weighting approach for ensemble-based detection of microaneurysms in color fundus images.  
*Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* , 5955-5958, 2012. ISSN: 1557-170X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347350>
14. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A.: Novel approaches to improve microaneurysm detection in retinal images.  
In: Proceedings of The 8th International Conference on Applied Informatics ; Eger, Hungary, January 27 - 30, 2010. Ed.: Attila Egri-Nagy et al., [Eszterházy Károly Főiskola], [Eger], 117-124, [2011].







15. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A., Török, Z., Csutak, A., Pető, T.: Evaluation of the grading performance of an ensemble-based microaneurysm detector.  
In: Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 5943-5946,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091469>
16. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A.: An optimal voting scheme for microaneurysm candidate extractors using simulated annealing.  
In: 5th International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications : SIGMAP 2010. IEEE, Athén, 80-87, 2010.
17. Antal, B., **Lázár, I.**, Hajdu, A., Török, Z., Csutak, A., Pető, T.: A multi-level ensemble-based system for detecting microaneurysms in fundus images.  
In: Soft Computing Applications (SOFA), 2010 4th International Workshop on. [s.n.], Arad, Románia, 137-142, 2010. ISBN: 9781424479856  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SOFA.2010.5565609>

Foreign language abstract(s) (1)

18. Csutak, A., Antal, B., **Lázár, I.**, Pető, T., Török, Z., Biró, A., Hajdu, A.: Diabetic retinopathy screening with computational support.  
*Acta Ophthalmol.* 89, 357, 2011. ISSN: 1755-375X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1755-3768.2011.357.x>

**Total IF of journals (all publications): 5,039**

**Total IF of journals (publications related to the dissertation): 5,039**

The Candidate's publication data submitted to the IDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

19 February, 2016

