

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Ратушний Павло Миколайович

УДК 621.03

**МЕТОДИ ТА СИСТЕМА ОБРОБЛЕННЯ СЛАБОКОНТРАСТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ
ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ
МІКРОКАПІЛЯРІВ КІНЦІВОК ЛЮДИНИ**

Спеціальність 05.11.17 – Біологічні та медичні прилади і системи

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Вінниця – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, доцент
Білинський Йосип Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідуючий кафедрою електроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кожем'яко Володимир Прокопович,
Вінницький національний технічний університет,
завідуючий кафедрою лазерної та оптоелектронної
техніки;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Муравський Леонід Ігорович,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН
України,
завідуючий відділом оптико-електронних
інформаційних систем, м. Львів.

Захист відбудеться "1" липня 2011 р. о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, аудиторія 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий "23" травня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Ю. Кучерук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку візуалізаційних технологій *in vivo* закономірним є розвиток комп'ютерної капіляроскопії, перевагою якої є візуалізація процесу, що значно спрощує для лікаря сприйняття капілярних картин, дає змогу глибше вивчити та проаналізувати одержані зображення, можливість констатації унікальних мікроциркуляторних змін для прогнозування стану пацієнта. Застосування комп'ютерної обробки одержаних зображень дає змогу детальніше проаналізувати картину мікроциркуляції, передати її в числових характеристиках, які можуть відображати незначні зміни в кількісному еквіваленті.

На сьогодні існують методи, що дозволяють виконувати вимірювання таких характеристик мікроциркуляції, як розміри та геометрію капілярів, швидкість протікання крові в окремому капілярі, об'ємну швидкість трансапілярного обміну, тощо. За допомогою цих методів в клінічній практиці можна фіксувати розлади мікроциркуляції на ранньому етапі та в ході прогресування хвороби. Це дає можливість зрозуміти початкові порушення, які надалі призводять до дисфункції органів людини.

Більшість медичних зображень, отриманих комп'ютерним капіляроскопом, є розмитими і слабконтрастними, що не завжди дає змогу отримати достовірну інформацію про геометрію об'єкта дослідження. Це стосується також зображень, отриманих, наприклад, дистанційним зондуванням, електронною мікроскопією, ультразвуковими приладами тощо. Тому для обробки і аналізу такої інформації необхідно забезпечити високу візуальну якість, високу точність вимірювання діагностичних параметрів зображень досліджуваних об'єктів, зокрема геометричних, яка може бути отримана за допомогою сучасних методів підвищення різкості, виділення контурів і границь. Крім цього автоматизація процесів обробки зображень капілярів і дослідження їх параметрів прискорює діагностику захворювань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2006 – 2011 років відповідно до тематичних планів виконання науково-дослідних робіт у Вінницькому національному технічному університеті, зокрема:

- за Державною договірною темою «Розробка методів підвищення інформативності медико-біологічних зображень» (№ 43-Д-339 від 01.01.2001р.);

- за договором на створення науково-технічної продукції з науково-виробничим об'єднанням «ФОРТ» Міністерства внутрішніх справ України (№4319 від 01.03.2007р.) – «Розробка макету установки для електродугового нанесення плівок у вакуумі», № 0108U009394 держреєстрації;

- за договорами про творчу співдружність:

- з Вінницьким медичним центром лікування захворювань хребта (№ 5025 від 05.06.2007 р., «Розробка програмного забезпечення та інтерфейсу оптико-електронної системи діагностики постави тіла людини», № 0108U001658 держреєстрації);

- з Вінницьким національним медичним університетом, м. Вінниця (№ 43/1 від 01.07.2009 р. «Комп'ютерна система виділення контурів кровоносних судин на цифрових зображеннях»).

Результати роботи також використовуються у Вінницькому національному технічному університеті.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності оброблення слабконтрастних розмитих зображень шляхом розробки нових методів і створення на їх основі системи для оцінювання показників мікрокапілярів кінцівок людини.

Виходячи з мети, в роботі поставлені такі завдання:

1. Виділити особливості оброблення зображень мікрокапілярів та оцінювання кількісних та якісних характеристик їх структурно-функціонального стану.

2. Провести аналіз існуючих підходів до автоматизованого виділення на цифрових зображеннях мікрокапілярів, їх переваги та недоліки.

3. Розробити метод підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої

слабоконтрастних розмитих зображень, що забезпечує підвищення ефективності локалізації контурної лінії, дослідити його роботу.

4. Розробити метод придушення імпульсного шуму на слабоконтрастних розмитих зображеннях, порівняти його роботу з існуючими.

5. Розробити метод виділення контурів та знаходження субпіксельних координат контурних точок для слабоконтрастних розмитих зображень на основі знаходження спільних точок вхідного та зображення з підвищеною різкістю та дослідити його ефективність в порівнянні з відомими методами.

6. Розробити алгоритмічне забезпечення та апаратно-програмну систему на основі запропонованих методів для отримання кількісних показників кровоносних мікрокапілярів кінцівок людини.

Об'єктом дослідження є процес оброблення слабоконтрастних розмитих зображень кровоносних мікрокапілярів верхніх і нижніх кінцівок людини.

Предметом дослідження є методи та засоби оброблення зображень мікрокапілярів та визначення їх геометричних показників.

Методи досліджень. При виконанні поставлених задач використовувались: математичний апарат теорії сигналів, цифрового подання та покращення зображень для розробки математичних моделей придушення шуму, підвищення різкості і виділення контуру; методи просторового оброблення зображень для розробки нових підходів підвищення різкості та використання їх в детекторі контуру слабоконтрастних зображень; математичне моделювання з використанням сучасних комп'ютерних технологій для підтвердження ефективності роботи запропонованих методів крайового детектування, основи дискретної математики та аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для створення програмного забезпечення запропонованих методів, програмні пакети Matlab, Matcad, Excel, Photoshop, Sximage, Image in Depth.

Наукова новизна одержаних результатів що виносяться на захист, полягає у розв'язанні важливого науково-прикладного завдання – підвищення ефективності виділення геометричних параметрів мікрокапілярів на слабоконтрастних розмитих зображеннях на основі нового методу підвищення різкості та удосконаленого методу виділення контуру, що дало змогу створити систему для оцінювання показників кровоносних мікрокапілярів верхніх і нижніх кінцівок людини.

У роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше виявлено та експериментально підтверджено закономірність підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої слабоконтрастних розмитих зображень шляхом використання двох одиничних індикаторів для формування маски вагових коефіцієнтів та на її основі отримано математичну модель підвищення різкості.

2. Удосконалено математичну модель слабоконтрастного розмитого перепаду інтенсивності, яка, на відміну від відомих, дозволяє отримати як одновимірний, так і двовимірний перепад інтенсивності з можливістю субпіксельної дискретизації в межах розмитості зображення при $\sigma \geq 3,5$.

3. Вперше розроблено метод підвищення різкості слабоконтрастних розмитих зображень медико-біологічних об'єктів до максимального нахилу примежової кривої шляхом використання адаптивної маски з плаваючими ваговими коефіцієнтами, який на відміну від відомих не формує «зернистості» на зображенні за рахунок підсилення високочастотної складової.

4. Отримав подальший розвиток метод придушення імпульсного шуму на медико-біологічних зображеннях на основі розщеплення ковзного вікна на сектори, який на відміну від відомих, запобігає відмічанню пікселів, що не спотворені, але знаходяться на границях об'єктів зображення. Ефективність методу підтверджено отриманими критеріями СКВ і PSNR.

5. Удосконалено метод крайового детектування мікрокапілярів і визначення їх

субпіксельних координат, який оснований на знаходженні спільних точок вхідного та за зображення з підвищеною різкістю до максимального нахилу примежової кривої. Це дало змогу отримати тонкі неперервні контури зображень об'єктів без розривів та зайвих фрагментів і розрахувати із субпіксельною дискретизацією ширину зображення мікрокапіляра, а при відомому збільшенні капіляроскопа його діаметр. При значенні розмитості зображення в межах 2,5–3,5 забезпечується підвищення ефективності локалізації контурних точок зображення мікрокапіляра в 2–2,5 рази в порівнянні з відомими методами, що підтверджено критерієм Претта та узагальненим критерієм ефективності виділення контурів.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено:

1. Детектор підвищення різкості зображень мікрокапілярів на основі запропонованого методу підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої, що дозволило отримати перепади інтенсивності шириною в один піксел.

2. Програмний фільтр придушення імпульсного шуму, який в 1,2–1,5 рази ефективніше відтворює вхідні значення інтенсивностей.

3. Детектор виділення контурів мікрокапілярів нижніх і верхніх кінцівок людини та визначення їх геометричних параметрів з субпіксельною дискретністю порядку 0,25 міжпіксельної ширини, що дало змогу ефективно відслідковувати динаміку змін стану мікрокапілярів.

4. Апаратно-програмну систему оцінювання геометричних параметрів кровоносних мікрокапілярів кінцівок людини, що використовує запропоновані детектори та методику розрахунку їх геометрії.

Результати роботи впроваджені і використовуються у:

- Вінницькому медичному центрі лікування захворювань хребта;
- Вінницькому національному медичному університеті ім. М.І. Пирогова;
- Вінницькому національному технічному університеті на кафедрі електроніки в рамках навчально-методичного процесу.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Роботи із експериментальних досліджень та впровадження розробок, їх програмної підтримки виконувались разом із співавторами. Із робіт, що виконувались у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем. Авторів належать: розробка алгоритму придушення імпульсного шуму і дослідження якості роботи [1, 11], дослідження і моделювання знаходження крайової точки [4], розробка програмного забезпечення, дослідження процесу знаходження крайової точки [2], розробка програмного забезпечення, дослідження процесу знаходження координат [3], розробка алгоритму виділення контурної лінії [5], розробка алгоритму визначення краю [8], дослідження роботи методу виділення контуру [9], розроблена комп'ютерної програми локалізації краю об'єктів зображень [7], дослідження роботи запропонованої схеми виділення контуру [13], дослідження якісних характеристик методу підвищення різкості [6], розробка способу підвищення різкості слабконтрастних розмитих зображень [10].

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на чотирьох наукових конференціях:

- Друга міжнародна конференція «Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування», м. Вінниця, 16 – 19 листопада 2006 р.

- Третя міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи», м. Ялта, 16 – 22 вересня 2007 р.

- Друга міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні роботи технічні комплекси», м. Київ, 25 – 28 травня 2009 р.

- Четверта міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми

радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування», м. Вінниця, 8 – 10 жовтня 2009 р.

Крім вищезгаданих науково-технічних форумів результати дисертаційної роботи, починаючи з 2006 року, представлялись і обговорювались на щорічних науково-технічних конференціях кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури Вінницького національного технічного університету.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 13 наукових працях, з них: в 6 статтях у науково-технічних журналах, внесених до переліку ВАК України, в 3 збірниках праць науково-технічних конференцій, в 3 патентах на винаходи України, в 1 свідоцтві Державного департаменту про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів і додатків. Загальний обсяг дисертації 157 сторінок, основний зміст складає 130 сторінок друкованого тексту, містить 61 рисунок, 6 таблиць, 4 додатки, список із 106 використаних літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, її наукова і практична значущість, сформульовані мета та задачі роботи, наведено її загальну характеристику, наведені відомості про апробацію та впровадження отриманих результатів.

В **першому розділі** проведено аналіз основних геометричних параметрів капілярів кінцівок людини, до яких відноситься відстань між артеріальними і венозними відділами, діаметри капіляра по відділах, розмір периваскулярної зони, розмір периваскулярного відтинку. Встановлено особливості оцінювання структурно-функціонального стану судин із розрахованих геометричних параметрів.

Виявлено, що зображення, отримані капіляроскопом є слабконтрастними та розмитими за рахунок неможливості повної фіксації об'єкта дослідження, пульсації крові в капілярі під час візуалізації та неінвазивності способу отримання зображень, що супроводжується неоднорідністю фону зображення. Всі ці фактори ускладнюють обрахунок геометричних параметрів мікрокапілярів.

Проведено аналіз основних етапів попереднього оброблення зображень медико-біологічних об'єктів, основними недоліком яких є низька ефективність роботи і як наслідок низька точність визначення їх геометричних параметрів, що дозволило зробити висновок про необхідність розробки нових методів придушення шумів, підвищення різкості та виділення контурів.

В **другому розділі** розроблено математичну модель підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої слабконтрастних розмитих зображень на основі оброблення зображення маскою із змінними ваговими коефіцієнтами. Вагові коефіцієнти вираховуються окремо для кожного пікселя шляхом порівняння значення інтенсивності центрального пікселя у вікні з середнім значенням інтенсивності по вікню та з кожним пікселем у вікні окремо. В загальному випадку математична модель підвищення різкості може бути описана системою рівнянь (1).

Таким чином, ділянки примежових кривих зображень об'єктів, які нижче середнього значення примусово понижаються до нижчого рівня інтенсивності, а ділянки вище середнього значення, примусово піднімаються до вищого рівня інтенсивності, що й приводить до підвищення різкості.

$$\left\{ \begin{array}{l}
I'_{ij} = \frac{\sum_{w=i-(n-1)/2}^{i+(n-1)/2} \sum_{h=j-(n-1)/2}^{j+(n-1)/2} (I_{wh} \cdot (k_{wh} \oplus z_{wh}))}{\sum_{w=i-(n-1)/2}^{i+(n-1)/2} \sum_{h=j-(n-1)/2}^{j+(n-1)/2} (k_{wh} \oplus z_{wh})}; \\
k_{wh} = 1, \text{ якщо } I_{ij} \geq \frac{\sum_{w=i-(n-1)/2}^{i+(n-1)/2} \sum_{h=j-(n-1)/2}^{j+(n-1)/2} (I_{wh})}{n^2}; \\
k_{wh} = 0, \text{ якщо } I_{ij} < \frac{\sum_{w=i-(n-1)/2}^{i+(n-1)/2} \sum_{h=j-(n-1)/2}^{j+(n-1)/2} (I_{wh})}{n^2}; \\
z_{wh} = 1, \text{ якщо } I_{wh} \geq I_{ij}; \\
z_{wh} = 0, \text{ якщо } I_{wh} < I_{ij},
\end{array} \right. \quad (1)$$

де n – розмірність маски; I_{ij} – вхідне значення інтенсивності поточного пікселя; I'_{ij} – вихідне значення інтенсивності поточного пікселя.

З метою підтвердження даного підходу проведено моделювання з використанням запропонованої математичної моделі примежової кривої, яка враховує зміну перепаду інтенсивності в межах однієї градації, що припадає на декілька пікселів в координатах n , m . Враховуючи коефіцієнт r , що визначає ширину перепаду інтенсивності на одну градацію, модель слабконтрастного перепаду має вигляд

$$H(n, m) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L \exp\left[-\frac{((n-k)/r-0,5)^2 + ((m-l)/r-0,5)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (2)$$

На основі проведеного аналізу зображень мікрокапілярів *розроблено математичну модель придушення імпульсного шуму* за допомогою розщеплення ковзного вікна, яка передбачає відмічання спотворених пікселів на підставі введення порогового критерію і розподілення маски на сектори. Математична модель придушення імпульсного шуму описується:

$$\left\{ \begin{array}{l}
I'_{ij} = \frac{\sum_{w=i-1}^{i+1} \sum_{h=l-1}^{l+1} (I_{wh} \cdot d_{wh})}{\sum_{w=i-1}^{i+1} \sum_{h=j-1}^{j+1} d_{wh}}; \\
d_{i,j} = 0, \text{ якщо } V_{ij} = Q; \\
d_{i,j} = 1, \text{ якщо } V_{ij} \neq Q; \\
V = \sum_{q=1}^Q \text{one} \left(g_{q,c}, \frac{\sum_{m=1}^n g_{q,m}}{n}, \rho \right); \\
\text{one}(a, b, e) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |a - b| \geq e \\ 0, & \text{якщо } |a - b| \leq e, \end{cases}
\end{array} \right. \quad (3)$$

де Q – кількість секторів; n – кількість пікселів у секторі; $g_{q,c}$ – інтенсивність центрального пікселя q -го сектора; $g_{q,m}$ – інтенсивність m -го пікселя q -го сектора; ρ – порогове значення, яке задається користувачем; I_{ij} – вхідне значення інтенсивності поточного пікселя; I'_{ij} – вихідне значення інтенсивності поточного пікселя.

Проведено моделювання придушення шуму з використанням одновимірного сигналу, що піддавався зашумленню з рівнем шуму в діапазоні 2,5-5 дБ. СКВ значень сигналу при

цьому зменшувалося із 5,9 до 3,1, що свідчить про можливість застосування запропонованої моделі придушення шуму в задачах обробки зображень мікрокапілярів.

Запропоновано математичну модель виділення контуру зображення капілярів і визначення його координат з субпіксельною дискретністю. Знаходження контуру капілярів зводиться до визначення координат спільних точок примежових кривих перепадів інтенсивності вхідного зображення та зображення внаслідок підвищення різкості. В області перепаду визначаються два сусідніх пікселя, для яких

$$(U(m,n)-U'(m,n)) \cdot (U(m+1,n)-U'(m+1,n)) < 0, \quad (4)$$

де $U(m,n)$, $U'(m,n)$, $U(m+1,n)$, $U'(m+1,n)$ – інтенсивності N -го та $N+1$ -го пікселя до та після підвищення різкості, відповідно.

Координата межі капіляра в міжпіксельному просторі визначається як

$$L = \frac{U(m,n) - U'(m,n)}{U'(m+1,n) - U(m+1,n)} \cdot d, \quad (5)$$

де d – відстань між двома сусідніми пікселями.

Тоді ширина капіляра визначається за формулою

$$D = \sqrt{((n_a + L_{na}) - (n_b + L_{nb}))^2 + ((m_a + L_{ma}) - (m_b + L_{mb}))^2} \cdot d, \quad (6)$$

де $n_a + L_{na}$, $m_a + L_{ma}$, $n_b + L_{nb}$, $m_b + L_{mb}$ – координати із субпіксельною поправкою по осі n та по осі m по передньому та задньому фронтах відповідно.

В третьому розділі на основі математичних моделей розроблено методи підвищення різкості слабоконтрастних розмитих зображень до максимального нахилу примежової кривої та виділення контуру з субпіксельними координатами, а також метод фільтрації імпульсного шуму на основі розщеплення ковзного вікна.

Структурна схема методу підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої наведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема запропонованого методу підвищення різкості

Для підтвердження ефективної роботи методу проведено ряд досліджень з використанням синтезованого зображення мікрокапілярів, з певним рівнем шуму та розмитості. Зображення оброблялося фільтрами підвищення різкості у програмах Image in Depth, Photoshop, SxImage, Matlab маскою типу Лапласіан та запропонованим методом. Отримані зображення порівнювались із вхідним за допомогою критеріїв відношення амплітуда сигнал-шум (PSNR), середньоквадратичної похибки (MSE), нормованої середньоквадратичної похибки (NMSE) та критерію нормованої кореляції (NK).

Результати дослідження показали, що значення критерію PSNR та NK для запропонованого методу вищі ніж для інших в середньому на 10%, а MSE та NMSE нижчі в середньому на 15%, що свідчить про більш ефективне відтворення зображення за допомогою запропонованого методу.

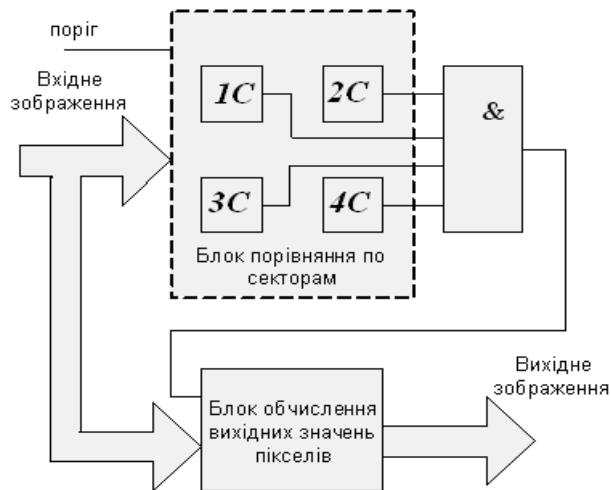


Рис. 2. Схема фільтра придушення імпульсного шуму

Розроблено метод придушення на цифрових працює в два етапи.

метод імпульсного шуму зображеннях, який Перший етап –

визначення пікселів, які представляють шум і не несуть корисної інформації. Для розв'язання цієї задачі маска розбивається на декілька секторів і поточний піксел порівнюється із кожним сектором окремо. Для кожного сектора знаходиться різниця значення інтенсивності центрального пікселя і середнього значення інтенсивності по сектору. У випадку, якщо ця різниця більша за деяке порогове значення ρ , яке задається користувачем, (ρ встановлюється на рівні 30 – 80 градацій інтенсивності) для всіх секторів, то центральний піксел відмічається як спотворений шумом. Якщо ж хоча б в одному секторі різниця значень не перевищує поріг, то поточний піксел не відмічається як спотворений. На другому етапі на місце спотвореного пікселя ставиться середнє значення по масці 3×3 . В обрахунок середнього значення не включаються пікселі, відмічені як шум, які потрапляють у маску. На рис. 2 представлена схема фільтра придушення імпульсного шуму, що реалізує запропонований метод. Фільтр містить блок порівняння по секторах, в яких визначається приналежність пікселя до спотворених по кожному сектору шляхом порівняння із пороговим значенням. Блок логічного множення, за допомогою якого визначається одиничний або нульовий коефіцієнт, що оцінює спотворення пікселя. Блок обчислення вихідних значень пікселів, в якому відбувається визначення вихідних значень інтенсивностей пікселів із урахуванням приналежності їх до спотворених чи неспотворених.

Проведено дослідження фільтра та отримано значення критерію PSNR, які свідчать про підвищення ефективності для запропонованого фільтра в середньому на 15– 20% в порівнянні із пороговим та медіанним фільтрами.

На основі математичної моделі запропоновано метод виділення контуру зображень мікрокапілярів і детектор на його основі, який наведений на рис. 3.

Виділення контуру безпосередньо пов'язано з запропонованим методом підвищення різкості слабоконтрастного розмитого зображення до максимального нахилу примежової кривої, що дозволило отримати контурні лінії шириною в один піксел без розривів та зайвих фрагментів.



Рис. 3. Схема детектора виділення контуру об'єктів на слабоконтрастних розмитих зображеннях

Проведено порівняльний аналіз результатів роботи детектора із результатами роботи відомих детекторів на синтезованому зображенні, яке являє собою модель судинної структури із розгалуженнями з певними відстанями між ними. Окунтурювання зображень мікрокапілярів, отримані детекторами Собела, низькочастотної фільтрації, Канні, детектором програмного пакету Matlab та детектором на основі запропонованого методу. При цьому враховувались якість контурів та їх точність локалізації. Візуальний аналіз отриманих зображень контурів показав, що для розмитих зображень методи, що використовуються в програмному пакеті Matlab, а також диференціальні методи не дають необхідного результату. Контур містить розірвані фрагменти. А контур, отриманий методом Собела є розмитим по всій ширині перепаду. Більш прийнятні результати дають детектори на основі методів Канні та низькочастотної фільтрації, але мають місце розриви контурних ліній й хибні елементи контуру.

Для отримання кількісної оцінки якості контурних ліній використано комплексний показник ефективності алгоритмів виділення контурів і границь, який враховує такі спотворення як розриви в контурі, викиди, зсув справжнього положення перепаду інтенсивності і розмиття перепаду.

Значення комплексного критерію для запропонованого методу становило 0,4667 в порівнянні із 0,3766 для методу низькочастотної фільтрації, 0,2081 для методу Канні, 0,0038 для методу Собела, що свідчить про вищу ефективність запропонованого методу для виділення контуру мікрокапілярів. Крім цього проведено додаткове дослідження якості контурних ліній з використанням критерію Претта та СКВ координат на різних ділянках зображення детекторами Канні, низькочастотної фільтрації та детектором на основі запропонованого методу. За результатами досліджень, можна стверджувати що ефективність виділення контуру запропонованим методом в 2–2,5 рази вища на складних ділянках (розриви контуру та помилкові викиди) і практично однакова на простих в порівнянні з детектором Канні, а також на 10–15 % вища в порівнянні з методом низькочастотної фільтрації.

Проведено експериментальні дослідження і встановлено, що роздільна здатність зростає в 4 рази із врахуванням субпіксельної поправки при локалізації зображення країв мікрокапілярів..

В четвертому розділі розроблено апаратно-програмну систему для оцінювання показників мікрокапілярів шляхом обробки зображень, отриманих комп'ютерним капіляроскопом. Система використовує детектори на основі запропонованих методів придушення імпульсного шуму, підвищення різкості, виділення контуру та визначення його субпіксельних координат. Система забезпечує ефективне оцінювання геометричних показників мікрокапілярів (рис. 4).

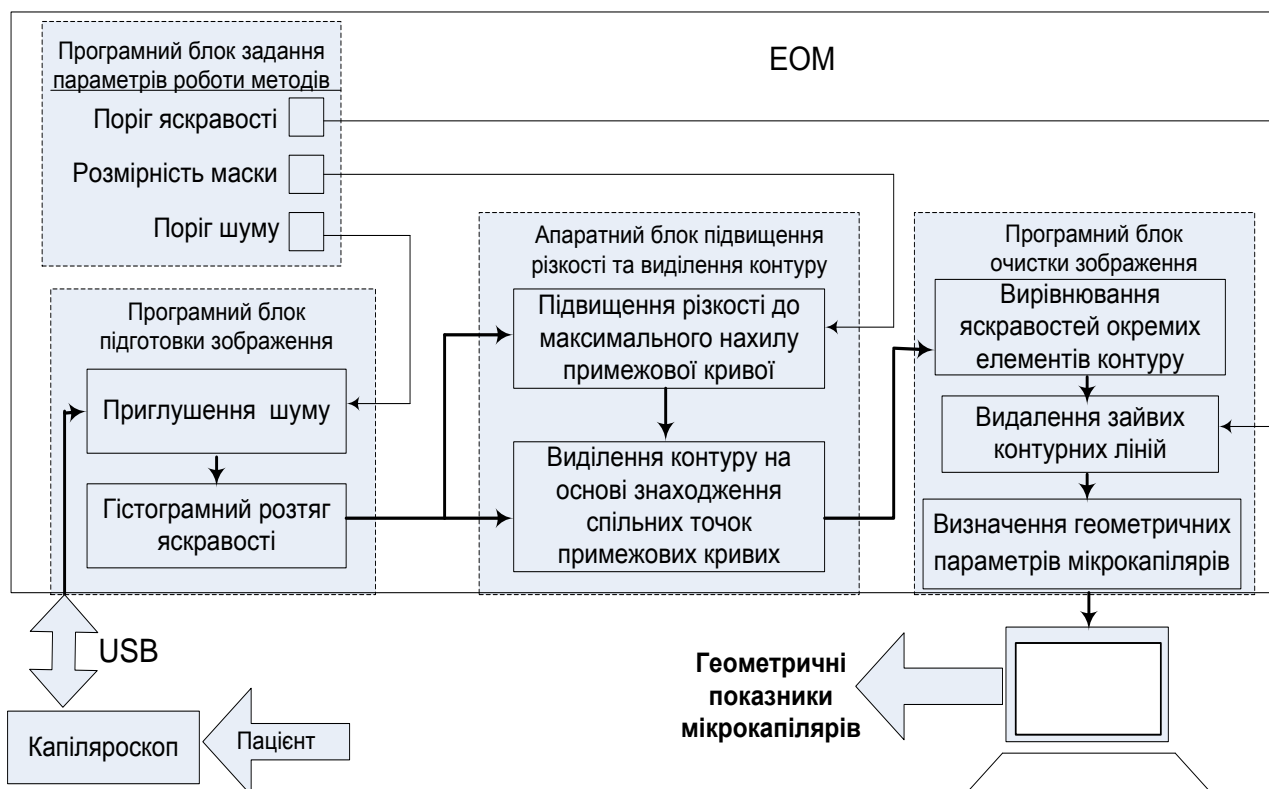


Рис. 4. Функціональна схема системи оцінювання показників мікрокапілярів

На рис. 5, *а* представлено зображення мікрокапілярів, отримане за допомогою капіляроскопа. На рис. 5, *б* наведено зображення мікрокапілярів в результаті підвищення різкості за допомогою запропонованого методу, яке містить різко виражені перепади інтенсивності та не формує зернистості за рахунок підвищення височастотної складової.

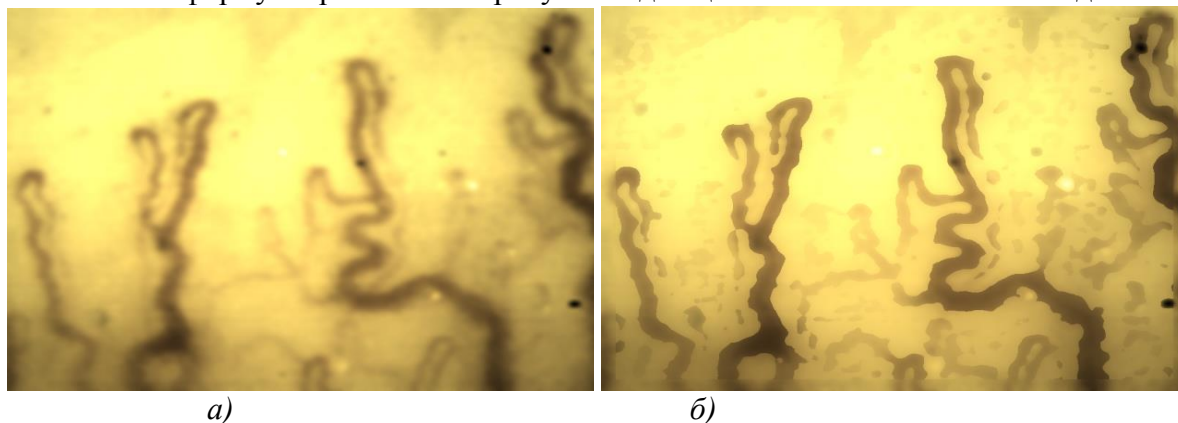
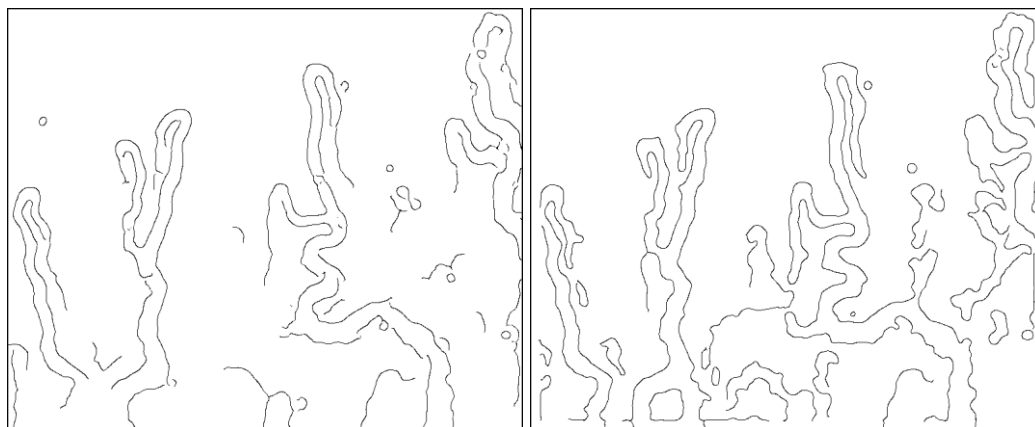


Рис. 5. Результат підвищення різкості зображення мікрокапілярів (*а*) запропонованим методом (*б*)

На рис. 6, *а* наведено зображення контуру, виділеного за допомогою детектора Канні. Як видно з контурного зображення капіляра недоліки детектора Канні проявилися у вигляді розривів, несправжніх контурних ліній і некоректних розпізнавань Y-розгалужень.

На рис. 6, *б* наведено зображення контуру мікрокапілярів, виділеного за допомогою запропонованого методу після підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої.



а) б)
Рис. 6. Результат виділення контуру зображення мікрокапілярів за допомогою детектора Канні (а) та запропонованим методом після підвищення різкості (б)

Візуальний аналіз контурного зображення дозволяє оцінити його якість і в результаті їх порівняння зробити такі висновки:

- 1) контурні лінії, що отримані з використанням процедури підвищення різкості, не мають розривів на відміну від контурних ліній отриманих без її використання;
- 2) після використання процедури підвищення різкості детектор Канні на багато менше виділяє хибних чи подвійних контурних ліній.

Виділення контурів за допомогою методу на основі знаходження спільних точок прилежових кривих зображень є найбільш оптимальним варіантом для вирішення поставленої задачі, так як він має декілька переваг: простота реалізації; тонка контурна лінія, шириною в один піксел; неперервність контурної лінії; відсутність хибних контурних ліній; можливість диференціації інтенсивності окремих пікселів контурних ліній для відокремлення «корисних» ліній від зайвих; висока швидкодія. При цьому видалення зайвих контурних ліній відбувається в два етапи. На першому – відомими методами окрема контурна лінія, що мала різні значення інтенсивності в кожній точці приводиться до одного значення інтенсивності (максимального). Приведення до одного значення інтенсивності контурної лінії відбувається таким чином. Фон зображення в кожному пікселі однаковий, а інтенсивність кожного пікселя контуру різна. При виявленні пікселя з інтенсивністю вищою ніж сусіднього (не фонового) цей сусідній піксел і всі сполучені з ним контурні піксели однієї інтенсивності заливаються кольором поточного пікселя. На другому етапі шляхом введення порогового значення менш інтенсивні видаляються, а більш інтенсивні залишаються. На рис. 7, а наведені контурні зображення капілярів після першого етапу, а на рис. 7, б – після другого. Маючи для кожної точки контуру значення субпіксельного зміщення, діаметр мікрокапіляра визначається шляхом знаходження відстані між двома точками, які знаходяться в субпіксельному просторі.

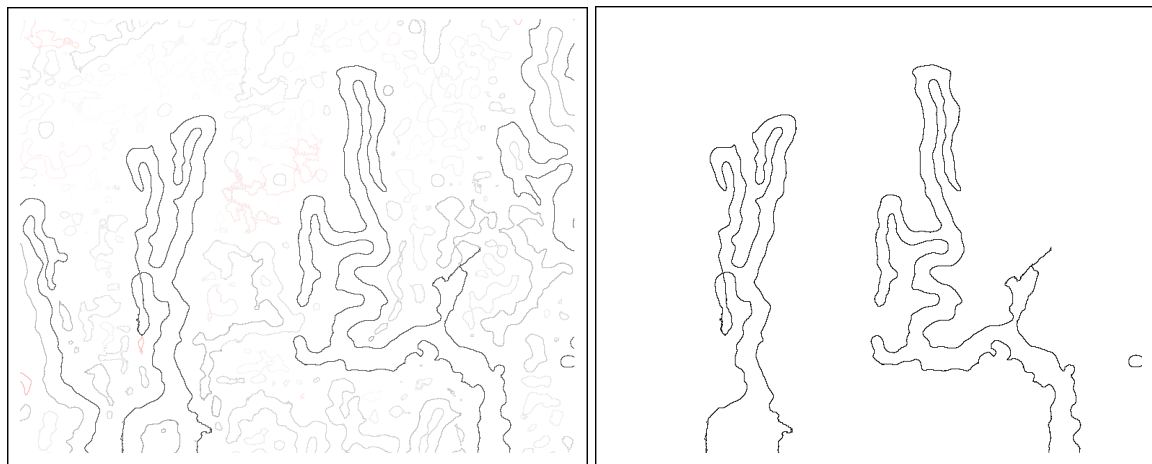


Рис. 7. Результат приведення контурних ліній мікрокапілярів до одного значення інтенсивності (а) і видалення зайвих контурних ліній (б)

Напрямок визначається наступним чином:

- 1) вибирається розмір ковзного вікна, в межах якого буде проводитися визначення діаметрів чи інших геометричних розмірів;
- 2) шляхом наведення курсору у відповідне місце формується частина зображення, що потрапляє у ковзне вікно;
- 3) знаходиться середнє значення градієнтів у вікні по напрямках 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° і 315° , по якому визначається орієнтація осі вимірювання;
- 4) визначається відповідний геометричний розмір.

Складовою частиною апаратно-програмної системи є розроблений програмний модуль, що дозволяє в інтерактивному режимі шляхом наведення курсору у відповідне місце визначати геометричні параметри мікрокапілярів з субпіксельною роздільністю на основі запропонованої математичної моделі (5). За рахунок того, що контури однорідні по інтенсивності, а також не мають розривів і хибних ліній система безперешкодно визначає відстань між будь-якими двома точками контурної лінії. На рис. 8 зображено результати роботи програми дослідження геометричних параметрів мікрокапілярів.

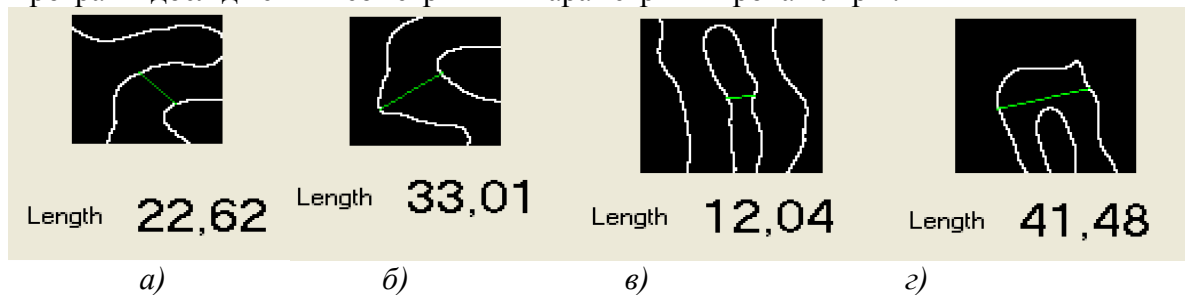


Рис. 8. Отримані значення відстаней між границями об'єктів зображення: а) діаметр капіляра, б) розмір периваскулярного відтинка, в) відстань між венозним і артеріальним відділами, г) розмір периваскулярної зони

Таким чином розроблені методи та на їх основі система для оцінювання показників мікрокапілярів дозволяють із досить високою ефективністю проводити діагностичні дослідження і робити висновки про структурно-функціональний стан кровоносної системи пацієнтів.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В ході виконання роботи розв'язано важливу науково-практичну задачу підвищення ефективності оброблення розмитих слабоконтрастних зображень мікрокапілярів верхніх і нижніх кінцівок людини, що дало змогу оцінити основні геометричні показники мікрокапілярів.

В загальному по роботі можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено перелік основних характеристичних показників мікрокапілярів на основі зображень, отриманих капіляроскопом. До них відносяться відстань між артеріальними і венозними відділами капілярів, діаметри капіляра по відділах (венозному, артеріальному і перехідному), розмір периваскулярної зони, розмір периваскулярного відтинку. Встановлено, що зображення, отримані капіляроскопом є слабоконтрастними та розмитими, що ускладнює обрахунок їх геометричних показників.

2. Проведено огляд теоретичних засад формування цифрових медико-біологічних зображень, зокрема фільтрації, підвищення різкості та виділення контуру. Запропоновано класифікацію методів виділення контуру. Проведений огляд медико-біологічних методів дослідження, в яких невід'ємною складовою присутнє оброблення цифрових зображень. Обґрунтовано необхідність вдосконалення існуючих і створення нових методів попереднього оброблення зображень медико-біологічних об'єктів, оскільки такі зображення є слабоконтрастними та розмитими внаслідок неможливості повної фіксації об'єкта дослідження.

3. Виявлено та експериментально підтверджено закономірність підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої, на основі якої запропоновано математичну модель підвищення різкості, що дало можливість отримати перепади інтенсивності шириною в 1 піксел. Шляхом порівняння інтенсивності центрального пікселя з середнім по масці визначається місце максимального перепаду, а шляхом порівняння інтенсивності пікселів в околі з інтенсивністю центрального будується маска коефіцієнтів, що підсилює перепад.

4. Вперше розроблено метод підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої слабоконтрастних розмитих зображень на основі запропонованої математичної моделі. Досліджено його роботу на реальних зображеннях мікрокапілярів та на синтезованому зображенні. При підвищенні різкості спотвореного синтезованого зображення найкращі результати показав запропонований метод в порівнянні з методами, що застосовуються в відомих програмах Image in Depth, PhotoShop, CxImage та в детекторі на основі оператора Лапласа, про що свідчать отримані значення критеріїв PSNR (35,7 в порівнянні з 15,3; 27,4; 31,2; 33,2, відповідно), MSE (220 в порівнянні з 1214; 1062; 315; 252, відповідно), NMSE (0,0012 в порівнянні з 0,0117; 0,006; 0,0032; 0,0012, відповідно) та NK (1,0072 в порівнянні з 1,0032; 1,0047; 1,0009; 1,0054, відповідно). Таким чином встановлено, що підвищення ефективності в середньому склало до 25%.

5. Встановлено, що використання запропонованого методу підвищення різкості дає змогу отримати мінімальну ширину перепаду в 1 піксел, тобто максимально підвищити різкість при збереженні всіх дрібних елементів зображення без внесення «зернистості». Виявлено, що найкращі результати підвищення різкості згідно проведених експериментальних досліджень, отримуються при розмірності маски, що відповідає середньому значенню ширини перепаду інтенсивності по зображенню.

6. Запропоновано математичну модель придушення імпульсних шумів на основі розщеплення ковзного вікна. Відмічання спотворених пікселів і оброблення тільки останніх дає змогу підвищити ефективність відтворення зображення. При цьому розподіл маски на сектори, на відміну від інших фільтрів, запобігає відмічання пікселів, які не спотворені, але знаходяться на границях об'єктів зображення. Таким чином, границі об'єктів на зображенні менше спотворюються в порівнянні з відомими методами.

7. Розроблено метод придушення імпульсних шумів, особливістю якого є розщеплення маски на сектори і те, що спотворені піксели не використовуються при обрахунку вихідних значень. Проведено дослідження розробленого фільтра на основі запропонованого методу та отримано значення критерію PSNR. Встановлено, що запропонований метод придушення

шуму в порівнянні із пороговим та медіанним фільтрами ефективніший в середньому на 15–20%.

8. Запропоновано математичну модель крайового детектування із субпіксельною дискретизацією на основі знаходження спільних точок зображень примежових кривих до та після підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої, перевагами якого є можливість отримати тонкі контурні лінії товщиною в один піксел, збереження контурів кутових точок і дрібних елементів зображення, неперервність контурних ліній і можливість диференціації інтенсивностей контурних ліній. Експериментально встановлено, що субпіксельна поправка при визначенні координат краю дає можливість підвищити ступінь дискретизації в 4 рази, тобто визначати координати краю із роздільною здатністю до 0,25 піксела.

9. На основі математичної моделі розроблено метод виділення контуру шляхом знаходження спільних точок примежових кривих до та після підвищення різкості. При візуальному дослідженні зображень контуру виявлено, що контурні лінії, отримані запропонованим детектором не мають розривів, хибних ліній та більш щільно прилягають до справжньої контурної лінії. Результати досліджень показали, що в порівнянні з методом Канні запропонований метод виконує локалізацію контурних ліній з ефективністю в 2–2,5 рази вищою на складних ділянках та приблизно з однаковою на простих. Результати ефективності підтверджують використані критерії Претта, комплексний критерій ефективності виділення контуру та значення СКВ.

10. Розроблено апаратно-програмну систему на основі запропонованих методів фільтрації, підвищення різкості та виділення контуру для оцінювання геометричних показників мікрокапілярів з дискретністю 0,25 ширини піксела, що дало змогу ефективно відслідковувати динаміку змін стану мікрокапілярів. При цьому визначаються такі геометричні показники мікрокапілярів: відстань між артеріальними і венозними відділами капілярів, діаметри капіляра по відділах (артеріальному, перехідному, венозному), розмір периваскулярної зони та розмір периваскулярного відтинка.

11. Результати досліджень впроваджені в Вінницькому національному медичному університеті ім. М. І. Пирогова, Вінницькому медичному центрі лікування захворювань хребта і Вінницькому національному технічному університеті, про що свідчать відповідні акти.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ратушний П.М. Фільтр для придушення імпульсних шумів на зображеннях / Білинський Й.Й., Ратушний П.М. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №1 (13) – 2007. – С. 30 – 33.

2. Ратушний П.М. Субпіксельна оцінка границі дискретних зображень / Білинський Й.Й., Городецька О.С., Ратушний П.М. // Вісник Хмельницького національного університету. – Том 2. – 2007. – С. 143 – 146.

3. Ратушний П.М. Субпіксельна оцінка координат лазерної лінії / Білинський Й.Й., Ратушний П.М., Білинський В.Й. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Спецвипуск, 2007. – С. 17 – 19.

4. Ратушний П.М. Відновлення неперервного контуру на основі його дискретного подання / Мотигін В.В., Юкиш С.В., Ратушний П.М. // МНТЖ Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – №2. – 2008. – С. 173 – 176.

5. Ратушний П.М. Детектор крайового детектування на основі низькочастотної фільтрації / Білинський Й.Й., Юкиш С.В., Ратушний П.М. // Вісник Хмельницького національного університету. – № 1. – 2009. – С. 230 – 233.

6. Ратушний П.М. Метод підвищення різкості слабконтрастних двовимірних зображень / Білинський Й.Й., Ратушний П.М., Кліменко І.В. // Вісник політехнічного інституту. – № 6. – 2009. – С. 12 – 15.

7. Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір №23631 Україна. Комп'ютерна програма «Локалізація краю об'єкта на зображенні»/ Й.Й.Білинський, П.М. Ратушний. Дата реєстрації 1.02.08. – 4с.

8. Пат. 25485А Україна, МПК G 06 K 9/36. Спосіб визначення краю примежової кривої зображень / Білинський Й.Й., Ратушний П.М., Мельничук А.О.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет – № 200703607, заявл. 02.04.2007; опубл. 10.08.07, Бюл. №12.

9. Пат. 32886 Україна, МПК G 01 K 9/64. Спосіб ізотропного виділення контуру зображення / Білинський Й.Й., Юкиш С.В., Ратушний П.М.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет – №200713462, завл.03.12.2007; опубл. 10.06.08, Бюл. №11.

10. Пат. 45887 Україна, МПК G 06 K 9/36. Спосіб підвищення різкості зображення / Білинський Й.Й., Ратушний П.М., Мельничук А.О.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет – №200907326, заявл. 13.07.09; опубл. 25.11.09, Бюл. №22.

11. Ратушний П.М. Фільтр для придушення імпульсних шумів на зображеннях / П.М. Ратушний, Й.Й. Білинський // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: II міжнародна науково-технічна конференція, 16–19 листопада 2006 р.: тези доповідей. – Вінниця, 2006. – С.134 – 135.

12. Ратушний П.М. Математична модель алгоритму підвищення різкості слабконтрастних двовимірних зображень / П.М. Ратушний // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси: II міжнародна науково-практичної конференція, 25-28 травня 2009 р.: збірка тез. – Київ, 2009. – С. 210 – 211.

13. Ратушний П.М. Комп'ютерна система виділення контуру слабконтрастних цифрових зображень/ П.М. Ратушний // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: IV міжнародна науково-технічна конференція, 8-10 жовтня, 2009р. тези доповідей. – Вінниця, 2009. – С. 59 – 60.

АНОТАЦІЯ

Ратушний П.М. Методи та система оброблення слабконтрастних зображень для оцінювання показників мікрокапілярів кінцівок людини – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 – Біологічні та медичні прилади і системи – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2011.

Розв'язано важливе науково-практичне завдання підвищення ефективності оброблення розмитих слабконтрастних зображень мікрокапілярів кінцівок людини, що дало змогу оцінити їх основні геометричні показники.

Виявлено та експериментально підтверджено закономірність підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої, на основі якої запропоновано математичну модель підвищення різкості, що дало можливість отримати перепади інтенсивності шириною в 1 піксел. Розроблено метод підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої слабконтрастних розмитих зображень.

Запропоновано математичну модель придушення імпульсних шумів на основі розщеплення ковзного вікна та на її основі розроблено метод придушення шуму.

Запропоновано математичну модель крайового детектування із субпіксельною дискретизацією на основі знаходження спільних точок зображень примежових кривих до та після підвищення різкості до максимального нахилу примежової кривої. На основі математичної моделі розроблено метод виділення контуру шляхом знаходження спільних точок примежових кривих до та після підвищення різкості.

Розроблено апаратно-програмну систему для реалізації запропонованих методів фільтрації, підвищення різкості та виділення контуру, а також оцінювання показників мікрокапілярів.

Ключові слова: піксел, примежова крива, контур, згортка, адаптивна маска, максимальний нахил, гістограма, діагностичні показники, субпіксельна дискретизація.

АННОТАЦІЯ

Ратушный П.Н. Методы и система обработки слабоконтрастных изображений для оценивания показателей микрокапилляров конечностей человека – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 – Биологические и медицинские приборы и системы – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2011.

Развязано важное научно-практическое задание повышения эффективности обработки размытых слабоконтрастных изображений микрокапилляров конечностей человека, что дало возможность оценить их основные геометрические показатели.

В ходе работы был проведен анализ работы капилляроскопа, установлен перечень основных характеристических показателей микрокапилляров на основе изображений, полученных капилляроскопом, к которым относятся расстояние между артериальными и венозными отделами капилляров, диаметры капилляра по отделам (венозном, артериальном и переходном), размер периваскулярной зоны; размер периваскулярного отрезке. Установлено, что изображения, полученные капилляроскопом являются слабоконтрастными и размытыми в следствие неинвазивности метода получения изображений и невозможности полной фиксации объекта исследования. Этот факт затрудняет расчет их геометрических показателей.

Проведен анализ существующих методов предварительной обработки цифровых изображений, выявлены их недостатки при работе со слабоконтрастными размытыми медицинскими изображениями.

Сформулирован ряд требований к контурной линии и предложено разработать новые методы предварительной обработки цифровых изображений.

Выявлена и экспериментально подтверждена закономерность повышения резкости до максимального наклона приграничной кривой, на основе которой предложена математическая модель повышения резкости, что позволило получить перепады интенсивности шириной в 1 пиксель. Разработан метод повышения резкости до максимального наклона приграничной кривой слабоконтрастных размытых изображений. Проведен ряд исследований, которые подтвердили повышение эффективности работы предложенного метода в среднем на 15% по сравнению с существующими. Преимуществом предложенного метода есть перепад интенсивности шириной в один пиксель без внесения зернистости на изображение. Проведены исследования по выбору размерности маски, которые показали, что наивысшая эффективность предложенного метода достигается при ширине маски, которая отвечает средней ширине перепадов интенсивности изображений.

Предложена математическая модель подавления импульсных шумов на основе расщепления скользящего окна и на ее основе разработан метод подавления шума. Проведенные исследования подтверждают повышение эффективности разработанного метода в среднем на 15 – 20% по сравнению с пороговым и медианным фильтрами.

Предложена математическая модель краевого детектирования с субпиксельной дискретизацией на основе нахождения общих точек изображений приграничных кривых до и после повышения резкости до максимального наклона приграничной кривой. На основе математической модели разработан метод выделения контура путем нахождения общих точек приграничных кривых до и после повышения резкости. Проведено исследования,

которые подтвердили, что эффективность предложенного метода примерно одинакова с эффективностью метода Канни на простых участках и в 2 – 2,5 раза выше на сложных, и по сравнению с методом низкочастотной фильтрации выше на 10 – 15%.

Проведены экспериментальные исследования, которые показали, что субпиксельная поправка при определении координат края дает возможность повысить степень дискретизации в 4 раза, то есть определить координаты края с разделяющей способностью до 0,25 ширины пикселя.

Разработана аппаратно-программная система для реализации предложенных методов фильтрации, повышения резкости и выделения контура, а также оценки показателей микрокапилляров.

Ключевые слова: пиксель, приграничная кривая, контур, свертка, адаптивная маска, максимальный наклон, гистограмма, диагностические показатели, субпиксельная дискретизация.

ABSTRACT

Ratushny P.M. Methods and system for processing low-contrast images for evaluation indicators of human limbs micro-capillary – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical sciences in the specialty 05.11.17 - Biological and Medical Instruments and Systems - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia 2011.

It was solved the important scientific and practical task of improving the efficiency of processing of low-contrast human limbs micro-capillary images, that enabled to assess their basic geometrical indicators.

Discovered and experimentally verified law of sharpening to the maximum slope of the boundary curve on which the mathematical model of sharpening, which enabled to get the intensity drops to 1 pixel wide. The method of sharpening to the maximum slope of the boundary curve for low-contrast blurred images.

It is proposed a mathematical model for impulsive noise suppression based on sliding window splitting and on its basis the method of noise suppression.

It is proposed a mathematical model of edge detection with sub-pixel discretization, based on finding common points of boundary curves of images before and after sharpening the boundary to the maximum slope of the curve. Based on the mathematical model it is developed a method of edge by finding common points of boundary curves before and after sharpening.

It is developed a hardware-software system for implementing the proposed filtering methods, sharpening and edge, and evaluation of micro-capillary indicators.

Keywords: pixel, boundary curve, contour, convolution, adaptive mask, maximum slope, histogram, diagnostic indicators sub-pixel discretization.

Підписано до друку 04.05.2011 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 118

Віддруковано у друкарні ПП Балюк І.Б.
м. Вінниця, вул. Скалецького, 15

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 2524 від 23.07.2006.