

МЕТОД ЗНАХОДЖЕННЯ СУБПІКСЕЛЬНИХ КООРДИНАТ КОНТУРНИХ ТОЧОК ЗОБРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТУ, ОТРИМАНИХ ТАКТИЛЬНО-ОПТИЧНИМ СЕНСОРОМ**Й. Й. Білинський, І. В. Сухоцька, С. В. Юкиш**

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: mukylka@gmail.com

Розроблено метод знаходження координат контурних точок зображення мікрооб'єкту складної форми із субпіксельною точністю при використанні тактильно-оптичного сенсора із щупом. Сутність методу полягає в отриманні спільної точки примежових кривих зображення краю вимірюваного об'єкту і щупу. Розроблено математичну модель крайової точки об'єкту на зображенні, отриманої з використанням щупа. Особливістю методу є врахування кута нахилу зображення межі об'єкту і щупу до розташування матриці фотоприймача шляхом використання градієнта, а також субпіксельних зміщень координатних точок локалізованої межі. Проведено розрахунок залежності абсолютної похибки від субпіксельного зміщення, результати якого показали, що запропонований метод працює з похибкою менше 10 % ширини пікселя, що дає змогу використовувати його при вимірюваннях мікрооб'єктів.

Ключові слова: субпіксельні координати, контур, щуп, зображення, мікрооб'єкти.**МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ КООРДИНАТ КОНТУРНЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА, ПОЛУЧЕННЫХ ТАКТИЛЬНО-ОПТИЧЕСКИМ СЕНСОРОМ****И. И. Билинский, И. В. Сухоцкая, С. В. Юкиш**

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: mukylka@gmail.com

Разработан метод нахождения координат контурных точек изображения микрообъектов сложной формы с субпиксельной точностью при использовании тактильно-оптического сенсора со щупом. Суть метода заключается в получении общей точки пограничных кривых изображений края измеряемого объекта и щупа. Разработана математическая модель краевой точки объекта на изображении, полученной с использованием щупа. Особенностью метода является учет угла наклона изображения границы объекта и щупа к расположению матрицы фотоприемника путем использования градиента, а также субпиксельных смещений координатных точек локализованного контура. Проведен расчет зависимости абсолютной погрешности от субпиксельного смещения, результаты которого показали, что предложенный метод работает с погрешностью менее 10 % ширины пикселя, что позволяет использовать его при измерениях микрообъектов.

Ключевые слова: субпиксельные координаты, контур, щуп, изображения, микрообъекты.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сучасному етапі розвитку науки та техніки за допомогою технологій електроніки та приладобудування здійснюється виробництво високоточних і малогабаритних деталей. При виготовленні таких деталей велика увага приділяється контролю їх параметрів. Проте існує проблема знаходження геометричних параметрів об'єктів, розміри яких знаходяться на межі роздільної здатності систем реєстрації [1]. Саме це зумовлює розмитість та розфокусованість зображень досліджуваних об'єктів, що унеможливує розпізнавання їх контурної лінії. Також слід враховувати похибку від дифракції світла на межах вимірюваного об'єкту, яка складає приблизно 0,02 мм і вплив оператора на результат вимірювання.

При вимірюванні геометричних параметрів мініатюрних деталей та деталей складної форми значна увага приділяється засобам їх вимірювання. На сьогодні широко розповсюджені як контактні, так і безконтактні засоби вимірювання. При безконтактних вимірюваннях, як правило, використовують мікроскопи. Основним недоліком використання мікроскопів є суб'єктивне вимірювання (вплив оператора на результати досліджень) та розмитість при знаходженні розмірів на межі роздільної здатності мікроскопа. Для підвищення точності визначення геометричних параметрів здійснюють обробку зображень, а саме – виділення контурів, оскільки контури – це найбільш інформативні структурні елементи

об'єктів. Однак контури, що виділяються на розмитих зображеннях мають такі недоліки, як розриви, відсутність контурних ліній або наявність помилкових, що не відповідають досліджуваному об'єкту, при чому контурні лінії є широкими, розмитими й нечіткими, що унеможливує їх розпізнавання. На сьогодні відомими традиційними засобами виділення контурів об'єктів на зображеннях є методи Робертса, Лапласа, Собела, Канні, Превітта та Кірша [2–5]. Методи Робертса та Собела [2] дуже прості у застосуванні, проте не дають потрібних результатів у випадку роботи з розмитими зображеннями. Контурні лінії, отримані таким шляхом, є широкими розмитими і нечіткими, що унеможливує їх розпізнавання автоматизованими системами. Детектор Лапласа [4] дозволяє отримати ширину лінії в 1 піксель, але його недоліком є великі розміри маски, а як наслідок великий час обробки, а також висока чутливість до шуму, що ускладнює оброблення зображення. Детектори Превітта та Кірша [2, 4] характеризуються високим ступенем точності визначення краю і стійкістю до шуму, проте їх недоліком є складність обчислень, великий час оброблення зображення та низька ефективність при роботі із розмитими зображеннями [6].

Контактні методи, як правило, використовують щуп. Технологія виготовлення і конструювання щупів накладають певні обмеження на їх габаритні розміри, що негативно впливає на точність вимірю-

вання. Крім цього, слід враховувати похибку зв'язану з деформацією щупа під дією вимірювального тиску [7].

Найбільш оптимальними на сьогодні є методи, які поєднують переваги використання мікроскопів і щупів. За їх допомогою можна виміряти геометричні параметри мініатюрних (розміром до десятків міліметра) елементів деталей та деталей складної конфігурації, а також вони мають доступ до важкодоступних елементів деталей.

Для підвищення точності визначення координат до сотих долей пікселя, на сьогодні, широко використовують методи інтерполяції, екстраполяції, кореляції, а також градієнтні методи та ін. [8–10]. У роботі [8] здійснено порівняльний аналіз субпіксельних алгоритмів при зміщених зображеннях і визначено, що найбільш точним є алгоритм інтерполяції інтенсивності, а найбільш швидкодіючим – апроксимації гауссової кривої. У роботі [10] досліджені алгоритми для визначення положення максимуму лінії з субпіксельною точністю, а саме: апроксимація Гауса, центр мас, лінійна інтерполяція, параболічна оцінка та детектори Blais і Roux. Авторами встановлено, що Гаусіан має значні переваги, а саме рівень шуму становить порядку 2–3 кванта чи 1–5 % інтенсивності піку та невелика ширина стрічки. Проте ці методи не забезпечують високої точності при визначенні субпіксельних координат контурних точок деталей складної конфігурації.

Метою роботи є підвищення точності знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманого тактильно-оптичним сенсором.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Більшість зображень, отриманих методами мікроскопії, є розмитими і слабо контрастними внаслідок неможливого досягнення повної фіксації об'єкту дослідження, мають нерівномірний фон, а також містять різного роду шуми. Тому для оброблення та аналізу такої інформації необхідно застосовувати додаткові засоби візуалізації, які забезпечать високу візуальну якість і ефективність попереднього оброблення досліджуваного зображення [11].

На рис. 1,а зображено контур об'єкту на розфокусованому зображенні, який є розмитим і широким. Лінією «контур» показано один із багатьох можливих варіантів контуру, який не можна вважати локалізованим із великою точністю, оскільки неможливо точно визначити крайові точки, так звані початкові точки відліку для виконання інтерполяції та знаходження контуру в цілому. На сьогодні таку задачу можна вирішити, використовуючи щуп (рис. 1,б) [7]. А це означає, що необхідно з високою точністю знайти спільну точку зображення краю щупа та межі зображення об'єкта.

Задача візуалізації об'єктів на слабо контрастних зображеннях полягає у виділенні чітких меж досліджуваних об'єктів для можливості подальшого автоматизованого обрахунку їх параметрів, а також у полегшенні візуального сприйняття людиною.

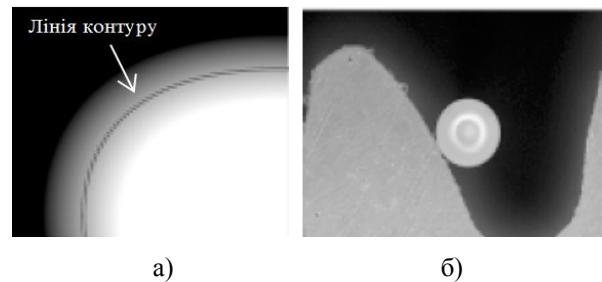


Рисунок 1 – Вхідні зображення: а – об'єкт із розмитими контурами; б – використання щупа для отримання початкової точки інтерполяції

Для цього необхідно виконання низки важливих умов: контурна лінія повинна бути неперервною, а зображення не повинно містити хибних контурних ліній, при цьому ширина контурної лінії повинна становити один піксель [11]. Тим більше, у випадку використання тактильно-оптичного сенсора координати межової кривої повинні визначатись із субпіксельною точністю. У зв'язку із цим у роботі запропоновано математичну модель крайової точки об'єкту на зображенні отриманій щупом.

У теорії лінійної фільтрації відомо, що добуток декількох просторово-частотних характеристик окремих ланок оптичної системи наближається до гауссової форми, коли їх кількість стає великою [12, 13]. Це надає особливого значення гауссоїді, яка дає змогу досить точно описати просторово-частотні властивості реальних оптико-електронних приладів.

Математичний запис нормованої гауссоїди обертання має вигляд [14]:

$$G(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

де u – середньоквадратичний розподіл перепаду інтенсивності відбитого світла на межі (постійна закону Гауса); x, y – координати межі.

Неперервну нормовану примежову криву оптичної системи з урахуванням формули (1), можна записати у вигляді функції

$$H^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right] dt = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right). \quad (2)$$

Дискретне подання примежової кривої з урахуванням просторової неінваріантності передавальної функції визначається [15]:

$$H^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{k=0}^K \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

де $[-n, n]$ – кінцева область аргументів у просторі примежової кривої по осі n , в околі яких знаходиться крайова точка.

Якщо $\sigma > 0$, то різкоконтрастний розподіл інтенсивності $H(x, y)$ перетворюється в розмите зображення. Ступінь розмитості тим більший, чим

більша величина σ .

Нехай об'єкт $H(x, y)$, враховуючи формули (2) і (3), має двовимірний розподіл інтенсивності різкого краю:

$$H(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_0; \\ 1 & \text{при } x > x_0; \\ \frac{1}{2} & \text{при } x_0 = 0; \\ 2 & \text{для будь-яких } y. \end{cases} \quad (4)$$

Функція розподілу сигналу різкого краю на неперервному фотоприймачі по осі x (формула 4) за рахунок функції $G(x, y)$ однозначно пов'язана з нею і визначається її виглядом (рис. 2).

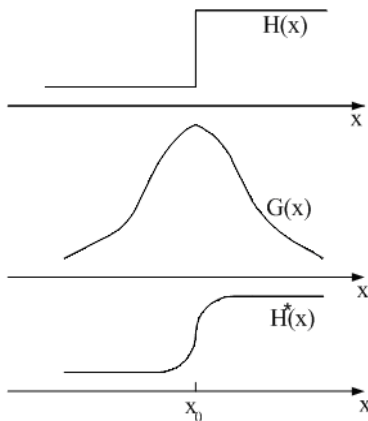


Рисунок 2 – Вигляд примежової кривої до та після проходження через лінійну оптичну систему

Таким чином, для знаходження крайової точки зображення об'єкта, отриманого за допомогою оптико-електронної системи зі щупом, формується не одна, а дві примежові криві, які мають, як правило, одну спільну точку, що й є крайовою [15].

На основі вище сказаного у роботі запропоновано метод знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкту з використанням щупа, що здійснюють наступним чином:

- реєструють зображення;
- пригнічують імпульсний та адитивний шум;
- підвищують різкість до максимального нахилу примежової кривої;
- отримують примежові криві спільні для вимірюваного об'єкта та щупа;
- знаходять субпіксельні зміщення відносно центра контурних пікселів по вертикальному і горизонтальному напрямках;
- визначають координати контурних точок з урахуванням субпіксельних зміщень.

На рис. 3 показано модель крайової точки об'єкта на зображенні, отриманої щупом, що визначається шляхом побудови примежових кривих спільних для вимірюваного об'єкта та щупа.

В області перепаду інтенсивності визначаються два сусідніх пікселя, для яких виконується умова

$$(I(m, n) - I'(m, n)) \cdot (I(m, n + 1) - I'(m, n + 1)) < 0, \quad (5)$$

де $I(m, n)$, $I'(m, n)$, $I(m, n + 1)$, $I'(m, n + 1)$ – інтенсивності N -го та $N + 1$ -го пікселя для щупа та досліджуваного об'єкта відповідно.

Оскільки примежові криві є розмитими й протяжними, то функцію інтенсивності в околі крайової точки можна показати прямими лініями.

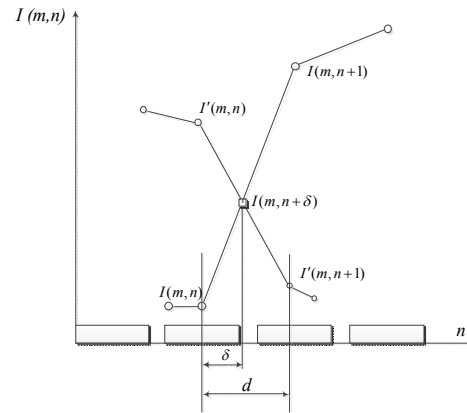


Рисунок 3 – Знаходження субпіксельних координат межі об'єкта на зображенні

Тоді положення точки перетину, з урахуванням умови (5), визначається за допомогою системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{I(m, n + \delta) - I(m, n)}{I(m, n + 1) - I(m, n + \delta)} = \frac{\delta}{d - \delta}; \\ \frac{I(m, n + \delta) - I(m, n)}{I(m, n + 1) - I(m, n + \delta)} = \frac{I'(m, n) - I(m, n)}{I(m, n + 1) - I'(m, n + 1)}, \end{cases}$$

де d – відстань між пікселями; δ – субпіксельне зміщення.

Із системи рівнянь можна визначити субпіксельне зміщення координати відносно центра пікселя як

$$\delta = \frac{I'(m, n) - I(m, n)}{(I(m, n + 1) - I'(m, n + 1)) + (I'(m, n) - I(m, n))} \cdot d$$

Цей випадок справедливий тоді, коли кут нахилу контуру близький до 0 або 90°, але якщо кут довільний, субпіксельні зміщення знаходяться за допомогою градієнта зображення [2]

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

де G_x – градієнт по осі x ; G_y – градієнт по осі y .
Напрямок градієнта можна визначити як

$$\alpha = \arctg \frac{G_x}{G_y}.$$

Якщо градієнт відмінний від нуля, то для більш точного визначення відстаней між точками контуру необхідно знайти субпіксельні зміщення δ_n і δ_m відносно центра контурних пікселів (рис. 4).

Субпіксельне зміщення δ_n і δ_m відносно центра пікселя визначається як:

$$\delta_m = 2\delta(1 - \cos\alpha);$$

$$\delta_n = \frac{\delta(1 - \cos\alpha)}{\sqrt{2}},$$

де δ_n та δ_m – субпіксельні зміщення відносно центра пікселя по нахиленим осям.

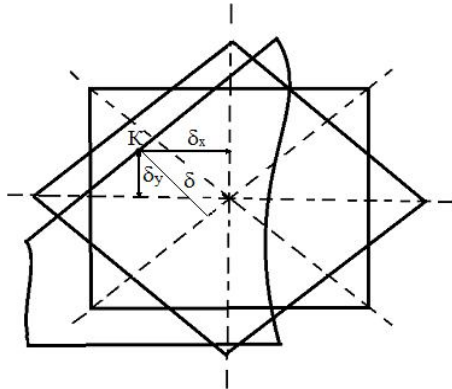


Рисунок 4 – Знаходження субпіксельних координат межі зображення об'єкта при різних кутах нахилу контуру

Узагальнену формулу визначення положення крайової точки з субпіксельною точністю можна записати як

$$X = (n - 1) \cdot d + \delta.$$

Для підтвердження адекватності запропонованої моделі здійснено моделювання залежності абсолютної похибки від субпіксельного зміщення (рис. 5), в якому використовувались умови, що задовольняють підхід кусково-лінійної інтерполяції [15]. Хоча такий підхід є чутливим до шуму, проте його основною перевагою залишається простота та швидкодія за рахунок мінімального часу обробки. Дискретні координати нормованої примежової прямої розраховувались для відомого ступеня згладжування σ за допомогою формул дискретного подання примежових кривих і формул визначення координат в міжпіксельному просторі.

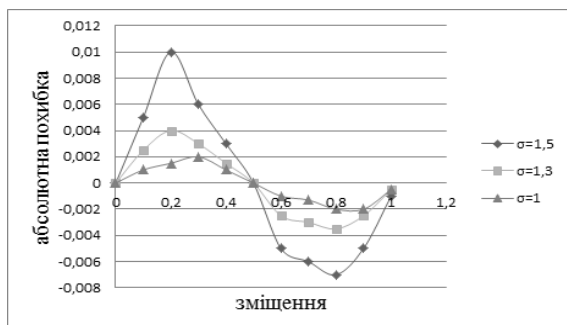


Рисунок 5 – Результати моделювання знаходження крайової точки

Дослідження показали, що абсолютна похибка моделі в межах ступеня розмитості $1 \leq \sigma \leq 1,5$ не перевищує 10 % ширини пікселя, що дає можливість

зробити висновок про можливість застосування запропонованого методу.

ВИСНОВКИ. Запропоновано метод знаходження субпіксельних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманого тактильно-оптичним сенсором, в якому знаходження границі досліджуваного об'єкта зводиться до визначення координати спільної точки двох примежових кривих із похибкою, що не перевищує 10 % ширини пікселя. Це дозволяє широко використовувати запропонований метод у військовій, космічній та медичній галузях, на підприємствах машинобудівної та газодобувної промисловості, а також на фірмах, які займаються огранкою дорогоцінних каменів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Курманбек уулу Талантбек. Обнаружение и определение координат движущихся точечных объектов в последовательности изображений / Курманбек уулу Талантбек: дис....канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 110 с.
2. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера. – 2005. – 1072 с.
3. Canny J.F. Finding edges and lines in images // MIT. – Cambridge: USA, 1983. – 149 p.
4. Русин Б.П. Системы синтеза, обработки та розпізнавання складно-структурованих зображень. – Л.: Вертикаль, 1997. – 264 с.
5. Robinson G.S. Edge detection by compass gradient masks // Comput. – Vision Graphics Image Process. – 1977. – № 6. – PP. 492–501.
6. Детектор виділення контуру розфокусованих зображень / Й.Й. Білинський, К.В. Огородник, І.В. Микулка // Наукові праці ВНТУ [Електронний ресурс]. – 2010. – № 2. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2338/2612>.
7. Применение оптоволоконного щупа в системе визирования измерительного микроскопа для повышения точности измерения координат точек объекта / А.А. Зуйков, А.В. Шулепов, Н.В. Шулепова // Вестник ВНИИИМАШ. – М.: ООО «Издательская группа «Граница», 2013. – № 1 (14). – С. 152–158.
8. Сравнительный анализ субпиксельных алгоритмов при совмещении изображений / В.А. Душепа, М.Л. Усс // Радиоэлектрон. і комп'ютерні системи. – 2011. – № 4. – С. 41–51
9. A survey and examination of subpixel measurement techniques / G.A.W. West, T. A. Clarke // Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision. – 1990. – PP. 456–463.
10. A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection / R.B. Fisher, D.K. Naidu in Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision, J. Sanz, ed. (Springer-Verlag, Heidelberg, 1996).
11. Білинський Й. Й., Ратушний П. М. Методи та система оброблення слабоконтрастних зображень для оцінювання показників мікрокапілярів кінцівок людини: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 122 с.
12. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
13. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Не-

дра, 1987. – 221 с.

14. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

15. Білінський Й.Й. Методи обробки зображення в комп'ютеризованих оптико-електронних системах: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 272 с.

THE METHOD OF DETERMINATION OF AN OBJECT IMAGE CONTOUR POINT SUB-PIXEL COORDINATES OBTAINED BY A TACTILE-OPTICAL SENSOR

I. Bilynskiy, I. Sukhotska, S. Yukysh

Vinnitsia National Technical University

vul. Khmelnytsky Shose 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine. E-mail: mukylka@gmail.com

The paper describes the method to define the contour point coordinates of a microscopic complex-shape object in its image. Sub-pixel accuracy is achieved with help of an optical tactile sensor equipped with a probe. The method consists in obtaining the common point for edge boundary curves of the object and the probe. It was developed the mathematical model of the object contour point in image, obtained using the probe. The features of the method are following: to take into account an image angle, object boundaries angle, and the probe angle made with a sensor matrix location, using gradient or sub-pixel displacement of the localized contour coordinate points. The calculation of absolute error dependency on sub-pixel displacement was provided. The experimental results showed that the proposed method has an error of less than 10 % of the width of the pixel, so it can be used for microscopic measurements.

Key words: sub-pixel coordinates, circuit, optoelectronic probe, images, microscopic object.

REFERENCES

1. Kurmanbek uulu Talantbek (2009), "Detection of moving point objects coordinates in the image sequence", Thesis... Cand. Sc., Engineering, specialty: Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs, 110 p., Russian Academy Sciences, Siberian Branch, Institute of Automation and Electrometry, Novosibirsk, Russia.

2. Honsales, R., Vuds, R. (2005), *Tsyfrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital image processing], Technosphere, Moscow, Russia.

3. Canny J.F. (1983) Finding edges and lines in images, 149 p., Cambridge, USA.

4. Rusyn, B.P. (1997), *Systemy sintezu, obrobky ta rozpoznavannia skladno-strukturovanykh zabrazhen* [Systems of synthesis, processing and recognition of hard-structured image], Vertical, Kyiv, Ukraine.

5. Robinson, G.S. (1977) "Edge detection by compass gradient masks", *Vision Graphics Image Process*, no. 6, pp.492–501.

6. Bilynskiy, I.I., Ohorodnyk, K.V., Mykulka, I.V. (2010), "Edge determination detector of defocused images", *Proceedings of VNTU* [Electronic resource], no. 2, available at: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2338/2612>.

7. Zuikov, A.A. (2013), "Application of fiber-optic probe in vision measuring microscope system for improve of accuracy of measuring the points object coordinates", *Vestnik VNIIMASH*, no. 1 (14), pp.152–158.

8. Dushhepa, V.A. (2011), "Comparative analysis of algorithms for subpixel image overlapping",

Radioelektron. i Komp'yut. Systemy, no. 4, pp. 41–51, Ukraine.

9. West, G.A.W., Clarke, T.A. (1990), "A survey and examination of subpixel measurement techniques", *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision*, pp.456–463.

10. Fisher, R.B, Naidu, D.K. (1996), "A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection" in *Image Processing, Multimedia and Machine Vision*, ed. J. Sanz, Springer-Verlag, Heidelberg.

11. Bilynskiy, I.I., Ratushnyi, P.M. (2012), *Metody ta sistema obroblennia slabokontrastnykh zobrazhen dlia otsiniuvannia pokaznykiv mikrokapiliariv liudyny* [Methods and systems of low contrast image processing for indicators evaluation of human limbs micro capillaries], Monograph, VNTU, Kiev, Ukraine.

12. Holdenberh, L.M. (1990), *Tsyfrovaya obrabotka signalov* [Digital Signal Processing], Radio i Sviyaz, Moscow, Russia.

13. Khemmynh, R.V. (1987), *Tsyfrovye filtry* [Digital filters], Nedra, Moscow, Russia.

14. Forsait, D., Pons Zh. (2004), *Computer vision. Modern approach*, trans. from English, Publishing House "Williams", Moscow, Russia.

15. Bilynskiy, I.I. (2010), *Metody obrobky zobrazhen v kompyuterizovanykh optyko-elektronnykh systemakh* [Methods for image processing in a computerized optoelectronic systems], monograph VNTU, Vinnitsa, Ukraine.

Стаття надійшла 19.05.2014.