

ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

УДК 681.7: 621.396

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є–МЕЛІНА ДЛЯ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ

О. П. Максименко

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

E-mail: maksymenko@ipm.lviv.ua

Запропоновано алгоритм для розрахунку відносного повороту, зміщення та зміни масштабу спекл-зображень, які використовують під час досліджень деформацій поверхні елементів конструкцій. Алгоритм побудовано на основі лог-полярного перетворення Фур'є–Меліна. Розраховані величини визначають просторові переміщення контрольованої поверхні і використовують в подальшому для корекції зареєстрованих спекл-зображень з метою отримання дійсних деформацій та переміщень контрольованої поверхні.

Ключові слова: цифрова кореляція зображень, лог-полярне перетворення Фур'є–Меліна, деформація поверхні, масштаб зображення, зсув та поворот зображення.

USING THE FOURIER-MELLIN TRANSFORM FOR DIGITAL SPECKLE IMAGES CORRELATION

O. P. Maksymenko

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

Significant errors occur when 2D digital image correlation (DIC) is used for assessment of the moving object deformation. Algorithm for calculating the value of relative rotation, displacement, and scaling of the speckle images based on log-polar Fourier–Mellin transform is proposed. The values obtained by this algorithm show the displacement of the controlled object in the surface plane and then they are used for correction of the registered speckle images, so the real deformations and displacements of the surface are obtained. During realization of this algorithm, the cross-correlation in the spectral plane (CCSP) is used to compare the speckle images. The CCSP algorithm allowed us to reduce essentially the time needed for the correction values assessment.

Keywords: digital image correlation, Fourier–Mellin log-polar transform, surface deformation, the image scale, translation and rotation of the image.

Для вимірювання деформацій елементів конструкцій і зразків матеріалів під час їх випробувань та діагностичних процедур традиційно використовують тензоперетворювачі. Тензовимірювання є надійним і перевіреним засобом вимірювання, яке забезпечує необхідну точність і достовірність даних. Проте ця технологія потребує багато часу для підготовки контрольованого об'єкта. До недоліків тензовимірювань належать: контакт тензоперетворювача з досліджуваною поверхнею, вплив зовнішнього середовища та температури. Значні похибки виникають під час вимірювання деформацій виробів з полімерних композиційних матеріалів, зумовлені неоднорідністю їх структури, та для низькомодульних матеріалів [1]. Виходячи з цього, актуальним є розроблення нових безконтактних оптико-цифрових методів визначення деформацій на основі цифрової кореляції зображень (ЦКЗ), які дають змогу отримувати просторовий розподіл переміщень поверхні за зміни навантаження [2, 3].

Практика використання ЦКЗ. Завдяки простоті технічної реалізації, безконтактності та широкому діапазону вимірювань метод ЦКЗ широко застосовують під

© О. П. Максименко, 2016

час вимірювання деформацій в натурних умовах. Його використовують для встановлення розподілу деформацій на поверхні мостових балок [4] і посудин під тиском [5]; тривалого моніторингу блоків [6] і паропроводів електростанцій [7]. Розширення практики застосування цього методу потребує розроблення методик вимірювання і вибору оптимальних параметрів апаратури, виходячи з характеристик об'єкта контролю, очікуваного діапазону вимірювання деформацій та прийнятних похибок вимірювання. Одним з обмежуючих чинників впровадження методу ЦКЗ є неконтрольовані переміщення об'єкта контролю під час вимірювань, які суттєво спотворюють результати. Для усунення цього недоліку оптико-цифрову систему реєстрації закріплюють на об'єкті [8] або застосовують складні фотограмметричні системи [9], які використовують декілька синхронно працюючих систем реєстрації зображень. Перший спосіб незавжди доступний, а другий вимагає значних матеріальних затрат.

Для практичної реалізації систем ЦКЗ, побудованих на основі однієї відеокамери, потрібно розробити алгоритми обробки зображень, які б дали змогу визначити не тільки розподіл деформацій контрольованої ділянки поверхні, а і переміщення об'єкта в цілому. Ця задача особливо актуальна для великогабаритних об'єктів, коли потрібно визначити деформації в багатьох місцях конструкції і мати дані про переміщення контрольованого об'єкта у просторі.

Встановлення переміщень ділянки поверхні відносно відеокамери. За умов вимірювань, коли система реєстрації зображень зафіксована нерухомо на стійці або на штативі [10] біля об'єкта контролю, як правило, відбувається зміна масштабу і відносний поворот та зміщення зареєстрованих у різні моменти часу зображень за зміни навантаження. Тоді, щоб отримати дійсні деформації поверхні об'єкта методом ЦКЗ, необхідно спочатку здійснити корекцію цих зображень.

Для отримання повздовжніх переміщень поверхні за допомогою однієї відеокамери використовують властивості частотного спектра крос-кореляції двох лазерних спекл-зображень, одне з яких зареєстровано до, а друге після відхилення поверхні об'єкта від нормалі до напрямку спостереження на певний кут [11]. Цей метод ґрунтується на фіксації змін у просторовому розподілі частотного спектра і дозволяє з інтерферометричною точністю встановити повздовжні переміщення поверхні. Чутливість методу становить $\lambda/10$ для фрагментів зображень розміром 64×64 пікселів. Проте метод має низку недоліків, а саме: малий діапазон вимірювань відхилень поверхні, максимум до $\Delta z \approx 10\lambda$; малу завадостійкість, відношення сигнал/шум має бути не менше 10. Висока точність досягається за умови, що деформації в межах фрагмента відсутні, а спекли, які утворюються за певного кута падіння розширеного лазерного променя на досліджувану поверхню, добре розвинуті, що ставить суворі вимоги до шорсткості досліджуваної поверхні і параметрів оптичної системи. Об'єкти, який використовують у цій системі, повинен забезпечувати велику глибину різкості, щоб нахил поверхні не розфокусував зображення, і незмінність масштабу зображень під час вимірювань. Характерним для цього методу є залежність похибки вимірювання від зміщення поверхні як твердого тіла. Також до недоліків методу належать: нечутливість до поворотів у площині поверхні та необхідність реєструвати додаткове спекл-зображення для визначення напрямку кута нахилу поверхні.

У системах розпізнавання образів розроблено низку алгоритмів для коригування геометричних трансформацій зображень, які можна використати під час ЦКЗ. Наприклад, для визначення повороту, зміщення та зміни масштабу зображень у системах розпізнавання використовують статистичні характеристики розподілу інтенсивності зображень (моменти нульового, першого і другого порядків), які дозволяють розрахувати шукані величини [12]. Точність визначення цих параметрів невисока і становить декілька пікселів, а реалізація алгоритму потре-

бує значних обчислюваних ресурсів. Цей підхід використовують, коли центр симетрії зображень не більше другого порядку. Точнішу оцінку параметрів для геометричної корекції зображень отримують, використовуючи інваріантне перетворення Фур'є–Меліна (ПФМ) та швидке перетворення Фур'є (ШПФ) [13, 14]. Порівняння моментного і спектрального підходів корекції зображень показало, що, використовуючи останній, можна отримати досить малі похибки [15]. Середні значення похибок встановлення масштабу ($\leq 20\%$), кута ($\leq 30^\circ$) і зміщення ($\leq 10\%$) становлять відповідно: 6×10^{-3} ; $6,1 \times 10^{-3}$ радіан і 0,4 піксела. Підхід на основі ПФМ та його модифікації використовують як для цілих зображень [16], так і для їх фрагментів [17]. Під час реалізації цього перетворення використовують ШПФ, тому його легко адаптувати до алгоритмів ЦКЗ, побудованих на основі крос-кореляції в спектральній площині (ККСП).

Застосування ПФМ для коригування геометричних трансформацій спекл-зображень. Під час визначення деформацій методом ЦКЗ використовують зображення поверхні, які реєструє відеокамера, що встановлена поруч з об'єктом. При цьому для визначення полів деформацій кореляційно порівнюють фрагменти вихідного зображення поверхні $r(x, y)$, яке зареєстроване на початку випробувань, і фрагменти наступних зображень $s_n(x, y)$, отриманих за зміни навантаження. При цьому, якщо не вжити спеціальних заходів, додатково до “деформаційних” переміщень поверхні, викликаних зміною навантаження, додаються просторові переміщення об'єкта, які залежать від умов його закріплення. Переміщення об'єкта сприймаються вимірною системою як деформації і спотворюють дійсні результати вимірювань. Особливо небажаними є великі повороти і зміна дистанції зйомки. Якщо за зміни дистанції зйомки поверхня об'єкта знаходиться в просторі різкості об'єктива, то це призводить до зміни масштабу зображень. Таким чином, відносні повороти зображень перетворюються у додаткові зсувні деформації, а зміна масштабу додає постійну радіальну складову деформації направлену від центра зображення.

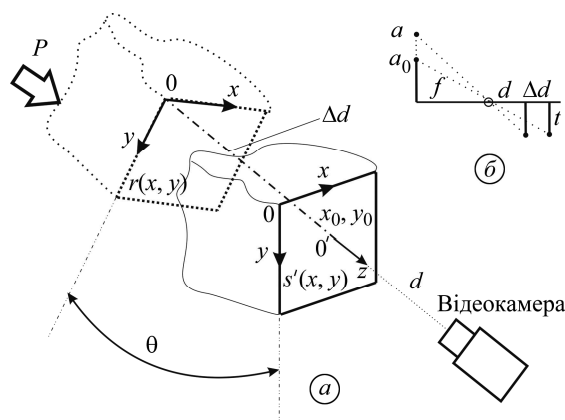


Рис. 1. Просторові переміщення досліджуваної ділянки поверхні об'єкта.

Подамо геометричні трансформації спекл-зображення контрольованої ділянки, викликані переміщенням об'єкта у просторі $O \rightarrow O'$ під дією сили P , за допомогою афінного перетворення. У прийнятій прямокутній системі координат отримуємо (рис. 1а):

$$s'(x, y) = r[\mu(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)) - x_0, \mu(-x \sin(\theta) + y \cos(\theta) - y_0)], \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт зміни масштабу зображення; θ – відносний кут повороту і (x_0, y_0) – зсув спекл-зображень у площині поверхні (Oxy) . Зміна масштабу зображення $\mu = a/a_0$ зумовлена зміною дистанції зйомки Δd , віддаленням (наближенням) пло-

щини спостереження до оптичної системи. Для простої моделі оптичної системи у вигляді пінхол камери (рис. 1б) залежність зміни дистанції зйомки від масштабу має вигляд $\Delta d = d(1 - 1/\mu)$.

У випадку застосування спеціальних телецентричних оптичних систем [3] зміни масштабу практично повністю усуваються і зображення залишається різким навіть за значних поздовжніх зсувів об'єкта. Тут на похибку визначення деформацій будуть впливати тільки поворот і поперечні зсуви контрольованої ділянки. За малої дистанції зйомки і застосування звичайних фотографічних об'єктивів невеликі зміни дистанції можуть викликати відчутні зміни масштабу.

Для відокремлення відносного повороту, зміни масштабу і зміщення спекл-зображень виконаємо такі перетворення з вхідними зображеннями. Застосуємо перетворення Фур'є до виразу (1) і отримаємо зв'язок спектрів початкового та трансформованого спекл-зображення

$$S(v, \nu) = e^{-i\phi_s(v, \nu)} |S(v, \nu)|, \quad (2)$$

де $|S(v, \nu)| = \mu^{-2} \left| R \left[\mu^{-1}(v \cos(\theta) + \nu \sin(\theta), \mu^{-1}(-\nu \sin(\theta) + \nu \cos(\theta))) \right] \right|$ – спектральна амплітуда, яка не залежить від зміщення спекл-зображень (x_0, y_0) ; $\phi_s(v, \nu)$ – спектральна фаза трансформованого зображення, яка залежить від відносного зміщення спекл-зображень, зміни масштабу і повороту. Інваріантність повороту і масштабування модуля спектра відносно початку координат $v = \nu = 0$ дозволяє виокремити шукані величини. Для цього подамо спектральні амплітуди зображень (\bar{r}, \bar{s}) в полярних координатах, $\text{Image}(x_i, y_j) \rightarrow \text{Image}(\rho, \alpha)$, де $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ – полярний радіус (рис. 2). Для цифрових зображень розміром (M, N) з центром $m_0 = M/2, n_0 = N/2$ отримаємо такі перетворення координат і амплітуд спектрів:

$$\begin{aligned} x_i &= \rho \cos(\alpha) + m_0, \\ y_j &= \rho \sin(\alpha) + n_0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\bar{r}_p(\alpha, \rho) = |R(\rho \cos(\alpha), \rho \sin(\alpha))|, \quad (4)$$

$$\bar{s}_p(\alpha, \rho) = |S(\rho \cos(\alpha), \rho \sin(\alpha))|.$$

Як бачимо з виразів (2)–(4), в полярній системі координат поворот зображення відповідає зміщенню амплітуди спектра $\bar{s}_p(\alpha, \rho)$ вздовж осі α , а зміна масштабу зображення зменшує інтенсивність амплітуди спектра у μ^2 рази та змінює масштаб радіальної координати ρ у μ рази. Зменшення радіального масштабу можна звести до переміщення, використавши логарифмічні координати у виразах (3), (4) [14], $[p = \ln(\rho), q = \ln(\mu)]$. Тоді зв'язок між амплітудами спектрів вихідного і трансформованого спекл-зображення матиме вигляд

$$\bar{s}_p(\alpha, \rho) \Leftrightarrow \bar{s}_{pl}(\alpha, p) = \mu^{-2} \bar{r}_{pl}(\alpha - \theta, p - q), \quad (5)$$

де $\bar{r}_{pl}(\alpha, p) \Leftrightarrow \bar{r}_p(\alpha, \rho)$ – перетворення у лог-полярні координати.

Такий підхід дає можливість виокремити поворот і зміну масштабу зображень. Зв'язок спектрів спекл-зображень в лог-полярній системі координат матиме вигляд

$$S_{pl}(v, w) = \mu^{-2} e^{-i2\pi(vq + w\theta)} R_{pl}(v, w). \quad (6)$$

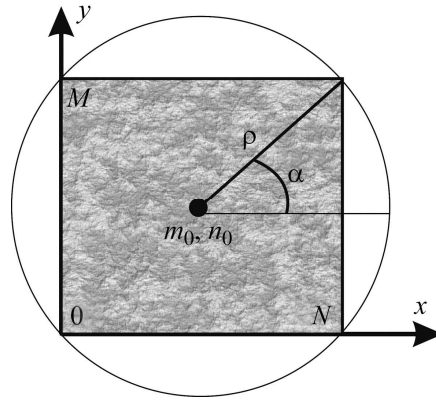


Рис. 2. Полярна система координат.

З виразу (6) випливає, що масштабування і поворот містяться у фазовій складовій спектра. Для визначення цих величин кореляційно порівнюємо спектральні амплітуди, використовуючи алгоритм ККСП, одночасно виконуючи інверсну фільтрацію спектрів [2]. Після зворотного перетворення Фур'є отримаємо:

$$\phi_0(\alpha, \rho) = F^{-1} \left[\frac{R_{pl}^*(v, w) S_{pl}(v, w)}{|R_{pl}(v, w) S_{pl}(v, w)|^{1-A}} \right], \quad (7)$$

де A – параметр інверсного фільтра, значення якого вибрано, виходячи з характеристик амплітуд спектрів порівнюваних спекл-зображень.

Вираз (7) описує фазовий крос-кореляційний пік у лог-полярних координатах. Відхилення координат максимуму цього піка від центра в одному із напрямків відповідає зміні масштабу, а в другому – відносному повороту спекл-зображень. Визначивши розташування координат максимуму фазового піка $\max[\phi_0(\alpha, \rho)] = (\alpha_{\max}, \rho_{\max})$, можемо встановити окремо відносний поворот $\theta = \alpha_{\max}$ і коефіцієнт лінійного збільшення $\mu = e^{\rho_{\max}}$ між двома порівнюваними спекл-зображеннями. Для встановлення відносного зміщення (x_0, y_0) спекл-зображень у прямокутній системі координат спочатку проводимо геометричну корекцію одного із зареєстрованих зображень

$$\tilde{s}(x, y) = s(x \cdot \cos(\theta), y \cdot \sin(\theta)) \cdot \mu^{-1}. \quad (8)$$

Потім знову застосовуємо алгоритм ККСП для вихідного $r(x, y)$ і коригованого $\tilde{s}(x, y)$ спекл-зображень і за розташуванням максимуму функції крос-кореляції знайдемо їх відносне зміщення $\max[\phi_0(x, y)] = (x_0, y_0)$

$$\phi_0(x, y) = F^{-1} \left[\frac{R^*(v, v) \tilde{S}(v, v)}{|R(v, v) \tilde{S}(v, v)|^{1-B}} \right], \quad (9)$$

де B – параметр інверсного фільтра, значення якого вибрано, виходячи з характеристик вхідних спекл-зображень.

Повна блок-схема алгоритму визначення геометричних трансформацій спекл-зображень подана на рис. 3. Цей алгоритм дає змогу визначати відносне зміщення, поворот і зміну масштабу, що виникають між послідовно зареєстрованими спекл-зображеннями під час вимірювання деформацій поверхні об'єктів, які переміщуються у просторі.

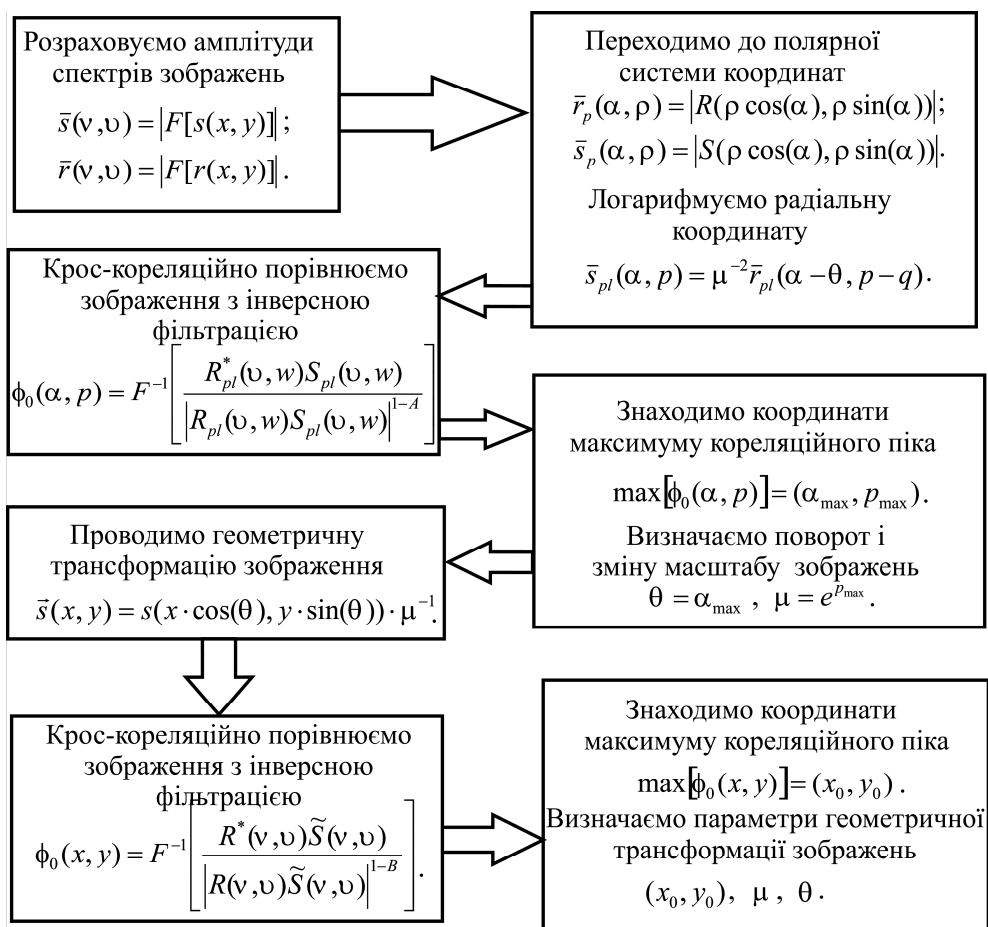


Рис. 3. Алгоритм визначення геометричних трансформацій спекл-зображень.

ВИСНОВКИ

Запропоновано алгоритм корекції геометричних трансформацій спекл-зображень, які використовують для встановлення деформацій поверхні рухомих об'єктів за методом ЦКЗ. Цей алгоритм ґрунтується на лог-полярному перетворенні Фур'є–Меліна і дає змогу виокремити зі зареєстрованих зображень геометричні трансформації – відносний поворот і зміщення зображень у площині реєстрації та зміну масштабу. Визначені параметри можна використати в подальшому для аналізу просторових переміщень контрольованого об'єкта, які відбуваються під впливом навантаження, та корекції зареєстрованих спекл-зображень для встановлення дійсних деформацій поверхні контрольованого об'єкта.

1. *Manual on experimental methods for mechanical testing of composites* / Ed.: C. H. Jenkins. – Fairmont Press, Inc., 1998. – 264 p.
2. *Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method* / D. J. Chen, F. P. Chiang, Y. S. Tan, H. S. Don // *Appl. Optics*. – 1993. – **32**, № 11. – P. 1839–1849.
3. *Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements (Basic Concepts, Theory and Applications)*. – New York: Springer, 2009. – 364 p.
4. *Оптико-цифровий метод визначення полів деформацій на локальних ділянках залізобетонних мостів* / Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, Р. М. Запоточний, Ю. В. Мольков // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 2. – С. 104–108.
5. *Strain analysis of pressure vessels contained pits based on digital image correlation method* / W. Xu, X. Feng, J. Li et al. // *Proc. SPIE*. – 2016. – **9903**. – P. 990310-1–990310-7.

6. *Application of image based methods for monitoring and measurements of structures in power stations* / M. Kujawińska, M. Malesa, K. Malowany, and P. M. Błaszczuk // *Key Eng. Mater.* – 2012. – **518**. – P. 24–36.
7. *Improved plant availability by advanced condition based inspections* / H. J. M. Hulshof, J. W. Notebooma, P. G. M. Welberga, L. E. Bruijn // *Int. J. of Pressure Vessels and Piping.* – 2004. – **81**. – P. 491–497.
8. *Study the behavior of thin-sheet constructional material's plastic zone by using digital speckle correlation techniques* / O. P. Maksymenko, L. I. Muravsky, Ya. L. Ivanytsky, S. T. Shtayura // *Proc. 3th Int. Conf. on Mater. Testing, TEST 2005.* – Nuremberg, 2005. – P. 169–174.
9. *Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection* / D. V. Jauregui, K. R. White, C. B. Woodward, and K. R. Leitch // *J. of Bridge Eng.* – 2003. – **8**, № 4. – P. 212–222.
10. *Maksymenko O. P., Muravsky L. I., Sakharuk O. M. Portable optical-digital speckle correlator for non-destructive control of constructional elements* // *Proc. of the Topical Meeting on Optoinformatics' 2008.* – St. Petersburg: ITMO, 2008. – P. 105–108.
11. *Fricke-Begemann T. Three-Dimensional Deformation Field Measurement with Digital Speckle Correlation* // *Applied Optics.* – 2003. – **42**, № 34. – P. 6783–6796.
12. *Liao S. X. and Pawlak M. On image analysis by moments* // *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* – 1996. – **18**, № 3. – P. 254–266.
13. *Chen Q., Defrise M., and Deconinck E. Symmetric phase-only matched filtering of fourier-mellin transforms for image registration and recognition* // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence.* – 1994. – **16**, № 12. – P. 1156–1168.
14. *Reddy B. S. and Chatterji B. N. An FFT-based Technique for Translation, Rotation and Scale-Invariant Image Registration* // *IEEE Transactions on Image Proc.* – 1996. – **5**, № 8. – P. 1266–1271.
15. *Мясников Е. В. Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений* // *Компьютерная оптика.* – 2007. – Т. 31, Вып. 3. – С. 77–82.
16. *Zokai S. and Wolberg G. Image Registration Using Log-Polar Mappings for Recovery of Large-Scale Similarity and Projective Transformations* // *IEEE Transactions on Image Proc.* – 2005. – **14**, № 10. – P. 1422–1434.
17. *Ho H. T. and Goecke R. Optical flow estimation using Fourier–Mellin transform* // *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition.* – 2008. – P. 1–8.

Одержано 07.07.2016