

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ШЛЯХОМ АПРОКСИМАЦІЇ КОНТУРІВ НА ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯХ

Розроблено методику визначення геометричних параметрів виробів в автоматизованих системах шляхом апроксимації контурів цих виробів на відеозображеннях. Для виробів прямокутної форми розраховано лінійні розміри та кути між суміжними гранями. Наведено теоретичний розрахунок, виконано чисельне моделювання та експериментальні дослідження похибок визначення геометричних параметрів виробів в автоматизованих системах.

Ключові слова: геометричні параметри, апроксимація контурів, автоматизовані системи, алгоритмічна обробка.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними задачами. Одним з ефективних методів вимірювання геометричних параметрів в автоматизованих системах є формування та алгоритмічна обробка сигналів, в тому числі – цифрових двовимірних відеозображень. Цифрові відеозображення, сформовані сучасними технічними засобами, містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри об'єктів вимірювань, що виготовляються в ході виробничого процесу. В тому числі, це можуть бути відеозображення виробів з природного каменю. Для цих виробів визначаються лінійні розміри та кути за зовнішнім контуром, а також геометричні параметри текстури на поверхні виробу [1–3]. Результати вказаних вимірювань доцільно використовувати для контролю та підвищення якості цих виробів.

Достовірність результатів контролю якості виробів автоматизованою системою безпосередньо залежить від точності визначення їх геометричних параметрів, що розраховуються алгоритмічним шляхом на основі координат контурних точок виробу на відеозображенні. Межа точності безпосереднього вимірювання координат однієї точки цифрового відеозображення після алгоритмічної компенсації випадкових, динамічних і геометричних похибок дорівнює половині відстані між центрами сусідніх дискретних точок цього відеозображення. Це обумовлено дискретним характером цифрових відеозображень, що використовуються для вимірювань. Для подальшого підвищення точності визначення геометричних параметрів необхідно розробити методи алгоритмічної обробки координат множини точок, що належать виробу на цифровому відеозображенні. Основою вказаних методів є апроксимація контурів виробу певною аналітичною залежністю, параметри якої безпосередньо пов'язані з геометричними параметрами виробу.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Алгоритмічні методи обробки відеозображень та апроксимації контурів об'єктів розглянуто в багатьох наукових публікаціях. Це дослідження систем технічного зору [4], автоматизованих систем управління з датчиками відеоінформації [5, 6], телевізійних вимірювальних систем [7]. Але в цих публікаціях не враховуються повною мірою вимоги до метрологічних характеристик вимірювальної інформації на відеозображеннях. Це вимоги до точності визначення геометричних параметрів виробів автоматизованою системою на основі вимірювання координат контурів та опорних точок виробів, що контролюються.

Існуючі методи алгоритмічної обробки вимірювальної інформації про геометричні параметри та інші механічні величини призначені, в основному, для обробки одновимірних сигналів. Існуючі рішення для двовимірних сигналів не використовують сучасні методи інформаційно-комп'ютерних технологій [8–10].

Тому виникає завдання розробки та дослідження методики визначення геометричних параметрів виробів в автоматизованій системі за їх відеозображеннями. Такий підхід повинний забезпечити більш високу точність вимірювання вказаних величин, порівняно з існуючими засобами вимірювань.

Метою проведеного в статті дослідження є розробка методики визначення геометричних параметрів виробів за їх відеозображеннями. Ця методика базується на апроксимації аналітичною залежністю координат ряду точок, що належать контуру виробу на цифровому відеозображенні, і може бути використана в автоматизованих системах для контролю геометричних параметрів та підвищення якості промислових виробів.

Викладення основного матеріалу дослідження. В даній статті розроблено високоточний метод визначення геометричних параметрів виробів в автоматизованих системах за їх відеозображеннями. Визначення геометричних параметрів виконується шляхом апроксимації вимірюваних координат контурних точок виробу. При цьому використовується апріорна інформація про форму виробу. Наприклад, це можуть бути вироби, що виготовляються з природного каменю на каменеобробних підприємствах.

Більшість промислових виробів з природного каменю мають грані у вигляді прямих ліній. Це блоки, видобути з родовищ, оброблені плити та елементи будівельних конструкцій, бордюрний камінь, декоративно-облицювальні вироби [1]. Тому будемо розглядати вимірювання геометричних параметрів вказаних виробів на основі лінійної апроксимації їх контурів на відеозображеннях.

Лінійна апроксимація виконується для множини точок, що належать ділянці контуру виробу на цифровому відеозображенні. Ця ділянка має форму відрізка прямої лінії, що описується аналітичною залежністю, відомою з [11] для випадку сумісних вимірювань двох координат x та y контурних точок виробу:

$$y = \hat{a}_\varepsilon + b_\varepsilon(x - \hat{x}_\varepsilon),$$

$$\hat{x}_\varepsilon = \delta_x \hat{n}_c, \hat{n}_c = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L n_j^*, \hat{a}_\varepsilon = \hat{y}_c = \delta_y \hat{m}_c, \hat{m}_c = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L m_j^*, \quad (1)$$

де δ_x, δ_y – кроки дискретності просторових координат по горизонталі та вертикалі в площині поверхні виробу; (n_j^*, m_j^*) – виміряні координати j -ої точки контуру виробу на цифровому відеозображенні, L – кількість точок контуру, що використовуються в процедурі лінійної апроксимації. Коефіцієнт b_ε визначає кут положення грані: $\alpha = \arctg(b_\varepsilon)$; а величини $\hat{x}_\varepsilon, \hat{a}_\varepsilon = \hat{y}_c$ є координатами середньої точки грані.

Для алгоритмічної оцінки коефіцієнта b_ε і кутового положення грані α доцільно використовувати метод найменших квадратів, узагальнену оцінку ортогональної регресії або дробово-лінійну оцінку [11–15].

Застосування цих методів до задач вимірювання геометричних параметрів та параметрів руху об'єктів розглянуто в [16, 17].

Розглянемо застосування алгоритмічної процедури апроксимації контурів для підвищення точності визначення геометричних параметрів виробів з природного каменю. Для облицювальних виробів і плит, що мають прямокутну форму (рис. 1), необхідно вимірювати такі геометричні параметри [18, 19]:

- лінійні розміри вздовж граней та за середньою лінією виробу;
- величину кутів між сусідніми гранями виробу;
- відхилення виробу від прямокутної форми, що обумовлене неперпендикулярністю його граней.

Тому розроблено методику вимірювання вказаних геометричних параметрів на основі цифрового відеозображення виробу $f_H(n, m)$, що сформоване цифровою відеокамерою або фотоапаратом ($n \in \overline{1, N}$; $m \in \overline{1, M}$; N, M – кількість дискретних відліків амплітуди відеосигналу в рядках та стовбцях цифрового відеозображення виробу, що визначає розміри цифрового відеозображення в дискретних точках (д. т.)).

Методика вимірювання геометричних параметрів виробу полягає у наступних діях:

1. На цифровому відеозображенні виробу $f_H(n, m)$ виконують алгоритмічну компенсацію випадкових, динамічних та геометричних похибок згідно з методами [20–22]. В результаті отримують цифрове відеозображення $\hat{f}_0(n, m)$, що відповідає початковому вигляду поверхні виробу з природного каменю.

2. На цифровому відеозображенні $\hat{f}_0(n, m)$ виділяють область Q_{OV} , що належить виробу, та множину $Q_k(n_j^*, m_j^*)$ контурних точок виробу ($j \in \overline{1, L_\Sigma}$, L_Σ – загальна кількість контурних точок виробу). Для виділення Q_{OV} використовують відмінності у яскравості та кольорі фону відеозображення та поверхні виробу. Для виділення $Q_k(n_j^*, m_j^*)$ використовують результати чисельного диференціювання, що виконується в п.1 даної методики для визначення параметрів перепадів яскравості при компенсації динамічних похибок [22].

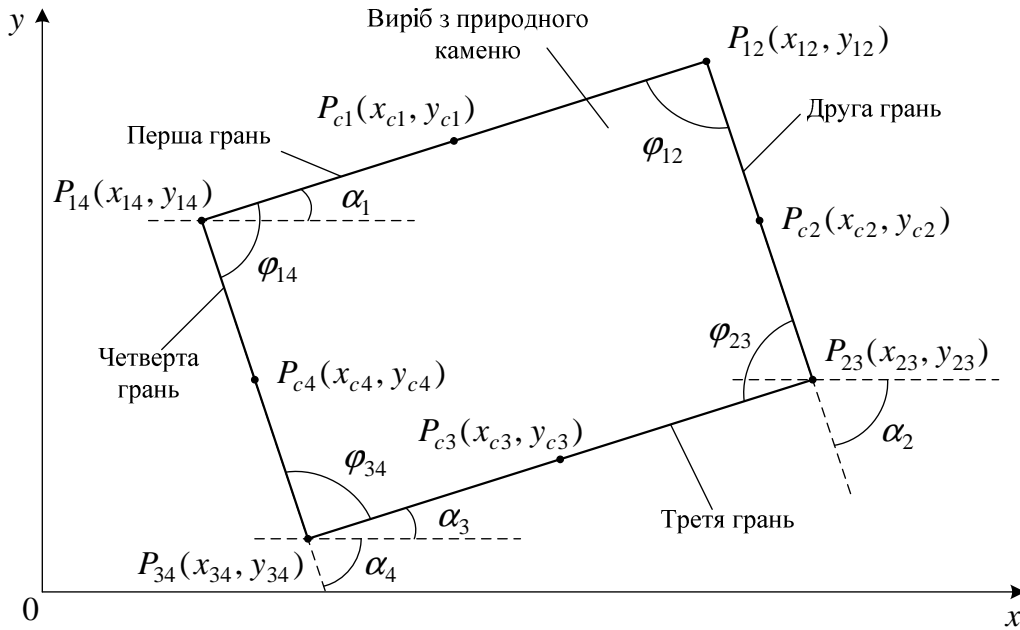


Рис. 1. Визначення геометричних параметрів облицювального виробу з природного каменю за його відеозображенням

3. Розподіляють множину контурних точок $Q_k(n_j^*, m_j^*)$ на чотири множини Q_{k1}, \dots, Q_{k4} , кожна з яких відповідає одній з граней виробу. Для цього за результатами п. 2 на цифровому відеозображенні визначають екстремальні координати виробу, тобто координати самої лівої $P(n_1^*, m_1^*)$, верхньої $P(n_2^*, m_2^*)$, правої $P(n_3^*, m_3^*)$ та нижньої $P(n_4^*, m_4^*)$ точок виробу, де

$$n_1^* = \min_{Q_k(n_j^*, m_j^*)} (n_j^*), \quad n_3^* = \max_{Q_k(n_j^*, m_j^*)} (n_j^*), \quad (2)$$

$$m_2^* = \max_{Q_k(n_j^*, m_j^*)} (m_j^*), \quad m_4^* = \min_{Q_k(n_j^*, m_j^*)} (m_j^*). \quad (3)$$

Координати n_2^*, n_4^* знаходять для елементів множини $Q_k(n_j^*, m_j^*)$, координати яких m_2^*, m_4^* задовольняють умовам (3). Координати m_1^*, m_3^* знаходять для елементів множини $Q_k(n_j^*, m_j^*)$, координати яких n_1^*, n_3^* задовольняють умовам (2).

Елемент множини $Q_k(n_j^*, m_j^*)$ належить першій грані (множині Q_{k1}), якщо

$$\begin{cases} n_1^* \leq n_j^* \leq n_2^*, \\ m_1^* \leq m_j^* \leq m_2^*. \end{cases}$$

Відповідно, для другої, третьої та четвертої граней маємо умови:

$$\begin{cases} n_2^* \leq n_j^* \leq n_3^*, \\ m_3^* \leq m_j^* \leq m_2^*, \end{cases} \quad \begin{cases} n_4^* \leq n_j^* \leq n_3^*, \\ m_4^* \leq m_j^* \leq m_3^*, \end{cases} \quad \begin{cases} n_1^* \leq n_j^* \leq n_4^*, \\ m_4^* \leq m_j^* \leq m_1^*. \end{cases}$$

4. Для множин контурних точок Q_{k1}, \dots, Q_{k4} виконують лінійну апроксимацію контурів виробу на основі узагальненої оцінки ортогональної регресії або дробово-лінійної оцінки. В результаті отримують (1):

– координати середніх точок граней $P_{ci}(\hat{x}_{ci}, \hat{y}_{ci})$, $i = 1, 2, 3, 4$;

– коефіцієнт \hat{b}_{ei} нахилу i -ої грані як прямої лінії, що проходить через точку $P_{ci}(\hat{x}_{ci}, \hat{y}_{ci})$.

5. Для кожної грані записують загальне рівняння прямої [23, 24] в площині поверхні виробу:

$$A_i x + B_i y + C_i = 0,$$

де A_i, B_i, C_i – постійні коефіцієнти, $A_i^2 + B_i^2 \neq 0$.

Для прямої, що отримана шляхом лінійної апроксимації в п. 4 і проходить через середню точку грані $P_{ci}(\hat{x}_{ci}, \hat{y}_{ci})$, маємо [23, 24]: $y - \hat{y}_{ci} = \hat{b}_{ei}(x - \hat{x}_{ci})$, звідки:

$$A_i = \hat{b}_{\varepsilon_i}, B_i = -1, C_i = \hat{y}_{c_i} - \hat{b}_{\varepsilon_i} \hat{x}_{c_i}. \quad (4)$$

6. Визначають координати вершин виробу. Наприклад, вершина $P_{12}(\hat{x}_{12}, \hat{y}_{12})$ є перетином прямих, що відповідають першій та другій граням виробу, а її координати [23]:

$$\hat{x}_{12} = \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}, \quad \hat{y}_{12} = \frac{C_1 A_2 - C_2 A_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1},$$

причому $A_1 B_2 - A_2 B_1 \neq 0$, оскільки грані перетинаються.

З урахуванням формули (4) отримаємо:

$$\hat{x}_{12} = \frac{\hat{y}_{c_1} - \hat{y}_{c_2} - \hat{b}_{\varepsilon_1} \hat{x}_{c_1} + \hat{b}_{\varepsilon_2} \hat{x}_{c_2}}{\hat{b}_{\varepsilon_2} - \hat{b}_{\varepsilon_1}}; \quad \hat{y}_{12} = \frac{(\hat{y}_{c_1} - \hat{b}_{\varepsilon_1} \hat{x}_{c_1}) \hat{b}_{\varepsilon_2} - (\hat{y}_{c_2} - \hat{b}_{\varepsilon_2} \hat{x}_{c_2}) \hat{b}_{\varepsilon_1}}{\hat{b}_{\varepsilon_2} - \hat{b}_{\varepsilon_1}}. \quad (5)$$

7. Визначають лінійні розміри виробу як відстані між суміжними вершинами та між середніми точками протилежних граней. Ширина виробу по першій грані, по середній лінії та третій грані відповідно дорівнює:

$$\begin{aligned} w_1 &= \sqrt{(\hat{x}_{12} - \hat{x}_{14})^2 + (\hat{y}_{12} - \hat{y}_{14})^2}; \\ w_{\text{н\ddot{e}}} &= \sqrt{(\hat{x}_{\bar{n}2} - \hat{x}_{\bar{n}4})^2 + (\hat{y}_{\bar{n}2} - \hat{y}_{\bar{n}4})^2}; \\ w_3 &= \sqrt{(\hat{x}_{23} - \hat{x}_{34})^2 + (\hat{y}_{23} - \hat{y}_{34})^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Висота виробу по другій грані, по середній лінії та четвертій грані відповідно дорівнює:

$$\begin{aligned} h_2 &= \sqrt{(\hat{x}_{23} - \hat{x}_{12})^2 + (\hat{y}_{12} - \hat{y}_{23})^2}; \\ h_{\text{н\ddot{e}}} &= \sqrt{(\hat{x}_{\bar{n}3} - \hat{x}_{\bar{n}1})^2 + (\hat{y}_{\bar{n}1} - \hat{y}_{\bar{n}3})^2}; \\ h_4 &= \sqrt{(\hat{x}_{34} - \hat{x}_{14})^2 + (\hat{y}_{14} - \hat{y}_{34})^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

8. Визначають кути між суміжними гранями виробу (рис. 1):

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{12} &= 180^\circ - \hat{\alpha}_1 - \hat{\alpha}_2, \quad \hat{\phi}_{23} = \hat{\alpha}_2 + \hat{\alpha}_3, \\ \hat{\phi}_{34} &= 180^\circ - \hat{\alpha}_3 - \hat{\alpha}_4, \quad \hat{\phi}_{14} = \hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_4, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\hat{\alpha}_i = \arctg \hat{b}_{\varepsilon_i}$, $\hat{\alpha}_2 = -\arctg \hat{b}_{\varepsilon_2}$, $\hat{\alpha}_3 = \arctg \hat{b}_{\varepsilon_3}$, $\hat{\alpha}_4 = -\arctg \hat{b}_{\varepsilon_4}$.

9. Визначають відхилення виробу від прямокутної форми, обумовлене неперпендикулярністю його граней. Наприклад, для другої грані маємо (рис. 1):

$$\Delta_{12} = \hat{h}_2 \cos \hat{\phi}_{12}. \quad (9)$$

Розглянемо питання точності визначення лінійних розмірів та кутів виробу за розробленою методикою. Загальна похибка обчислень складається з трансформованої і методичної похибок, а також похибки виконання обчислень в цифровій ЕОМ з обмеженою розрядністю [25]. Найбільш суттєвою є трансформована похибка, що обумовлена похибками вимірювання координат контурних точок виробу. Інші похибки можуть бути зменшені до несуттєвого рівня (відносно трансформованої похибки) шляхом використання: обчислень з подвійною точністю і плаваючою комою в цифровій ЕОМ; апробованих методів обчислень тригонометричних і трансцендентних функцій [14, 25].

Початковими даними для теоретичного розрахунку точності геометричних параметрів виробів є: формули (1), (5)–(9); похибки $\Delta_{n_j}, \Delta_{m_j}$ вимірювання координат (n_j^*, m_j^*) контурних точок виробу на цифровому відеозображенні (зазвичай $\Delta_{n_j} = \Delta_{m_j}$); методи розрахунку трансформованої похибки [25].

Похибка вимірювання координат Δ_{n_j} може бути зменшена до мінімально можливої межі $\pm 0,5$ д. т. шляхом алгоритмічної компенсації випадкових, динамічних та геометричних похибок цифрового відеозображення. В цьому випадку похибка вимірювання координат має рівномірний розподіл в діапазоні $\pm 0,5$ д. т. і дисперсію $\sigma_{n_j}^2 = 1/12$ (д. т.)². Для подальших розрахунків використано відомості та правила визначення трансформованих похибок, що викладені в [11, 25].

Дисперсія похибки визначення координат x_{ci}, y_{ci} середньої точки грані за формулами (1) дорівнює:

$$\sigma_{x_{ci}}^2 = \sigma_{y_{ci}}^2 = \sum_{j=1}^{L_i} \left(\frac{\partial \hat{x}_{ci}}{\partial n_j^*} \right)^2 \sigma_{n_j}^2 = \frac{\delta_x^2}{L_i} \sigma_{n_j}^2, \quad (10)$$

де L_i – кількість контурних точок для i -ої грані, $\sigma_{nj}^2 = \sigma_{mj}^2$ – дисперсія похибки визначення координат контурних точок виробу, $\delta_x = \delta_y$ – крок дискретності просторових координат в площині поверхні виробу, що відповідає відстані в 1 д. т. на цифровому відеозображенні.

Дисперсія $\sigma_{\hat{b}_{\hat{e}i}}^2$ визначення коефіцієнта нахилу грані $\hat{b}_{\hat{e}i}$ (1) визначається [11]:

– для узагальненої оцінки ортогональної регресії за формулами:

$$\sigma_{\hat{b}_{\hat{e}}}^2 = \frac{\sigma_{m^*}^2 + \hat{b}_{\hat{e}}^2 \sigma_{n^*}^2}{\Sigma_x}; \quad (11)$$

$$\Sigma_x = \sum_{j=1}^L (n_j^* - \hat{n}_{\hat{n}})^2; \quad (12)$$

– для дробово-лінійної оцінки за формулами:

$$\sigma_{\hat{b}_{\hat{e}}}^2 = \frac{12\sigma_0^2}{h_x^2 L(L-1)}, \quad (13)$$

$$h_x = n_j - n_{(j-1)}, \quad (14)$$

де $\sigma_0^2 = \sigma_{m^*}^2 + \hat{b}_{\hat{e}}^2 \sigma_{n^*}^2$ – приведена дисперсія похибок координат.

Похибка визначення цього коефіцієнта також має систематичну складову частину. Але шляхом чисельних розрахунків для реально можливих значень $\sigma_{nj}^2, \sigma_{mj}^2, \delta_x, \hat{b}_{\hat{e}i}$ встановлено, що систематична складова набагато менша за $\sigma_{b_{ki}}$ і нею можна знехтувати.

Дисперсія похибки визначення координат вершин виробу (5) дорівнює (на прикладі вершини $P_{12}(\hat{x}_{12}, \hat{y}_{12})$ при $\sigma_{xci}^2 = \sigma_{yci}^2$):

$$\begin{aligned} \sigma_{x_{12}}^2 &= \frac{(y_{c1} - y_{c2} - b_{k2}(x_{c1} - x_{c2}))^2}{(b_{k2} - b_{k1})^4} \cdot \sigma_{b_{k1}}^2 + \frac{(y_{c2} - y_{c1} - b_{k1}(x_{c2} - x_{c1}))^2}{(b_{k2} - b_{k1})^4} \cdot \sigma_{b_{k2}}^2 + \\ &+ \frac{b_{k1}^2 + 1}{(b_{k2} - b_{k1})^2} \cdot \sigma_{xc1}^2 + \frac{b_{k2}^2 + 1}{(b_{k2} - b_{k1})^2} \cdot \sigma_{xc2}^2, \\ \sigma_{y_{12}}^2 &= \frac{b_{k2}^2 (y_{c1} - y_{c2} - b_{k2}(x_{c1} - x_{c2}))^2}{(b_{k2} - b_{k1})^4} \cdot \sigma_{b_{k1}}^2 + \frac{b_{k1}^2 (y_{c2} - y_{c1} - b_{k1}(x_{c2} - x_{c1}))^2}{(b_{k2} - b_{k1})^4} \cdot \sigma_{b_{k2}}^2 + \\ &+ \frac{(b_{k1}^2 + 1)b_{k2}^2}{(b_{k2} - b_{k1})^2} \cdot \sigma_{xc1}^2 + \frac{b_{k1}^2 (b_{k2}^2 + 1)}{(b_{k2} - b_{k1})^2} \cdot \sigma_{xc2}^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Дисперсія похибки визначення ширини і висоти виробу дорівнює (на прикладі ширини виробу w_1 (6), (7)):

$$\sigma_{w1}^2 = \frac{(x_{12} - x_{14})^2 \cdot (\sigma_{x_{12}}^2 + \sigma_{x_{14}}^2) + (y_{12} - y_{14})^2 \cdot (\sigma_{y_{12}}^2 + \sigma_{y_{14}}^2)}{(x_{12} - x_{14})^2 + (y_{12} - y_{14})^2}. \quad (16)$$

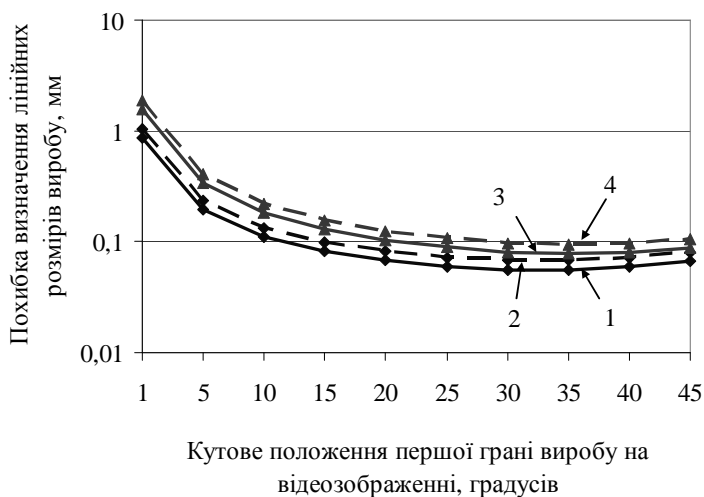
Дисперсія похибки визначення кутів між суміжними гранями виробу дорівнює:

$$\sigma_{\varphi_{il}}^2 = \frac{\sigma_{b_{ki}}^2}{(1 + b_{ki}^2)^2} + \frac{\sigma_{b_{li}}^2}{(1 + b_{li}^2)^2}, \quad i, l = 1, 2, 3, 4, \quad i \neq l. \quad (17)$$

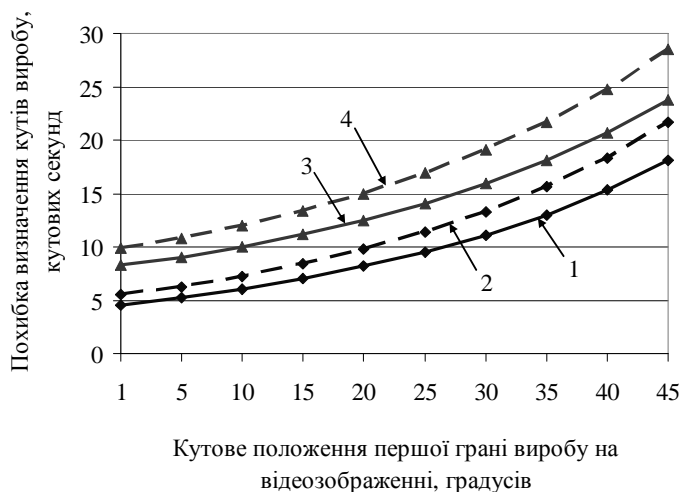
Дисперсія похибки визначення відхилення виробу від прямокутної форми, обумовленого неперпендикулярністю його граней (9), дорівнює:

$$\sigma_{\Delta/2}^2 = \sigma_{h2}^2 \cos^2 \varphi_{12} + \sigma_{\varphi_{12}}^2 h_2^2 \sin^2 \varphi_{12}. \quad (18)$$

Були проведені чисельне моделювання та експериментальні дослідження похибок визначення геометричних параметрів виробів з природного каменю. При дослідженнях використовувалися відеозображення розміром 3200 x 2400 д. т. від цифрового фотоапарату та відеозображення розміром 2000 x 2000 д. т. від цифрової відеокамери. Виріб розташовувався в полі зору пристрою формування відеозображень таким чином, що він займав 90 % ширини та висоти відеозображення, а кутове положення першої грані $\alpha_1 = (1..45)^\circ$. Теоретичний розрахунок похибок виконувався за (10)–(18). Результати досліджень наведено на рисунках 2, 3.

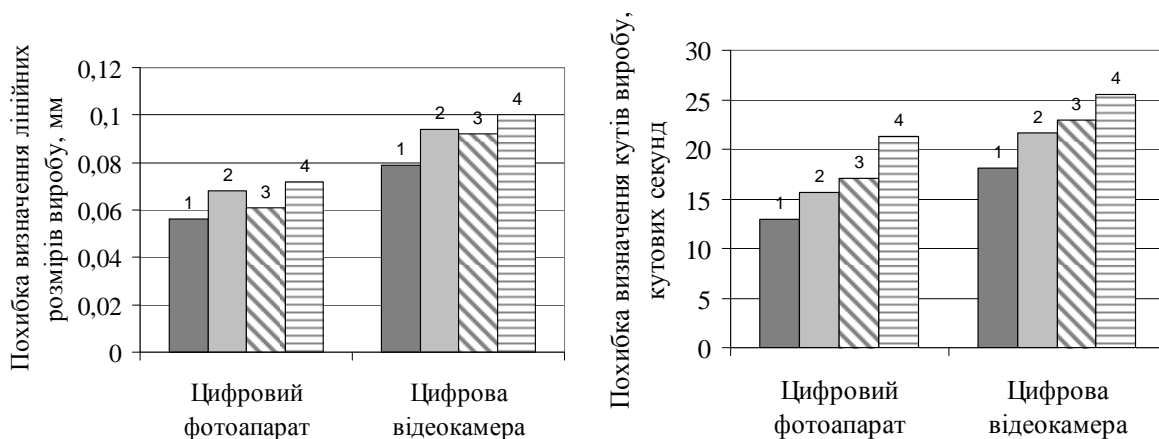


а)



б)

Рис. 2. Результати теоретичного розрахунку похибок визначення ГП виробів з природного каменю: 1, 2 – відеозображення розміром 3200 x 2400 д. т. від цифрового фотоапарату, $\Delta_{nj} = 0,5$ д. т. (1) та $\Delta_{nj} = 0,6$ д. т. (2); 3,4 – відеозображення розміром 2000 x 2000 д. т. від цифрової відеокамери, $\Delta_{nj} = 0,5$ д. т. (3) та $\Delta_{nj} = 0,6$ д. т. (4)



а)

б)

Рис. 3. Результати дослідження похибок визначення ГП виробів з природного каменю за їх відеозображеннями: $\alpha_1 = 35^\circ$; 1 – теоретичний розрахунок при $\Delta_{nj} = 0,5$ д. т.;

2 – теоретичний розрахунок при $\Delta_{nj} = 0,6$ д. т.; 3 – чисельне моделювання (1000 вимірювань) при

$\Delta_{nj} = 0,5$ д. т., $\psi_{с/ш} = 55$ дБ; 4 – вимірювання в робочих умовах

при $\Delta_{nj} = 0,6$ д. т., $\psi_{с/ш} = 40$ дБ

Висновки. На основі отриманих результатів встановлено, що:

1. Існуючі пристрої формування відеозображень можуть бути застосовані для вимірювання геометричних параметрів виробів в автоматизованих системах.

2. Виріб прямокутної форми доцільно розташовувати відносно пристрою формування відеозображень так, щоб кут між горизонталлю і більшою гранню виробу становив $(30...40)^\circ$, а виріб займав максимально можливу площу на відеозображенні.

3. Розроблена методика забезпечує підвищення точності визначення геометричних параметрів виробів у 2,5...3,0 рази, порівняно з існуючими засобами вимірювань (до 0,1 мм та до 26 кутових секунд при розмірі відеозображення 2000 x 2000 д. т.).

4. Отримана точність відповідає вимогам нормативних документів по вимірюванню геометричних параметрів виробів з природного каменю (0,1 мм для лінійних розмірів та $0,1^\circ$ для кутів виробів) [19].

5. Результати теоретичного розрахунку похибок геометричних параметрів підтверджено чисельним моделюванням та експериментальними дослідженнями. Ці результати можуть бути використані при розробці комп'ютеризованих засобів вимірювання геометричних параметрів різних об'єктів вимірювань за їх відеозображеннями.

Напрямок подальших досліджень може бути теоретичне обґрунтування та практичне визначення похибок геометричних параметрів для виробів складної форми, що контролюються автоматизованими системами.

Список використаної літератури:

1. Добыча и обработка природного камня : справочник / под ред. А.Г. Смирнова. – М. : Недра, 1990. – 445 с.
2. Визначення показників кольору та геометричних характеристик текстури облицювального каменю / М.Т. Бакка, О.О. Ремезова, А.О. Криворучко та ін. // Сб. науч. трудов Нац. горного ун-та. – 2004. – № 19, Т. 1. – С. 23–30.
3. Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій обробки відеоінформації в гірничо-геологічній галузі / А.О. Криворучко, Є.С. Купкін, Ю.О. Подчашинський та ін. // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2005. – № 1 (32). – С. 107–116.
4. Техническое зрение роботов / В.И. Мошкин, А.А. Петров, В.С. Титов и др. ; под общей ред. Ю.Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Бутаков Е.А. Обработка изображений на ЭВМ / Е.А. Бутаков, В.И. Островский, И.П. Фадеев. – М. : Радио и связь, 1987. – 240 с.
6. Анисимов Б.В. Распознавание и цифровая обработка изображений : учебное пособие для вузов / Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин. – М. : Высшая школа, 1983. – 295 с.
7. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения : учебное пособие для вузов / Г.Н. Грязин. – СПб. : Политехника, 2000. – 277 с.
8. Горелик С.Л. Телевизионные измерительные системы / С.Л. Горелик, Б.М. Кац, В.И. Киврин. – М. : Связь, 1980. – 168 с.
9. Сарвин А.А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров / А.А. Сарвин. – Л. : Изд-во Ленинградского ун-та, 1983. – 144 с.
10. Измерительные сканирующие приборы / под ред. Б.С. Розова. – М. : Машиностроение, 1980. – 198 с.
11. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
12. Яцук В.О. Методи підвищення точності вимірювань : підручник / В.О. Яцук, П.С. Малачівський. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 368 с.
13. Введение в контурный анализ ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев и др. ; под ред. Я.А. Фурмана. – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2003. – 592 с.

14. *Иванов В.В.* Методы вычислений на ЭВМ : справ. пособие / *В.В. Иванов.* – К. : Наукова думка, 1986. – 582 с.
15. *Лоусон Ч.* Численное решение задач метода наименьших квадратов / *Ч.Лоусон, Р.Хенсон.* – М. : Наука, 1986. – 230 с.
16. *Подчащинський Ю.О.* Вимірювання параметрів обертowego руху на основі алгоритмічної обробки двовимірних відеозображень / *Ю.О. Подчащинський* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2008. – № 4(47). – С. 100–108.
17. *Подчащинський Ю.О.* Підвищення точності вимірювань параметрів обертowego руху на основі алгоритмічної обробки двовимірної вимірювальної інформації / *Ю.О. Подчащинський* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 1/3 (37). – С. 17–22.
18. Будівельні матеріали. Вироби з природного каменю. Облицювальні плити. Вимоги : ДСТУ Б EN 1469:2007 (EN 1469:2004, IDT). – К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008. – 45 с.
19. Будівельні матеріали. Методи випробування природного каменю. Визначення геометричних характеристик виробів : ДСТУ EN 13373:2007 (EN 13373:2003, IDT). – К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008. – 20 с.
20. Пат. 91174 С2 Україна, МПК (2009) G 06 K 9/40, G 06 K 9/00. Спосіб фільтрації відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри об'єктів вимірювань / *Подчащинський Ю.О.* ; заявник і власник патенту *Подчащинський Ю.О.* – № a2009 13355 ; заявл. 22.12.09 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
21. *Подчащинський Ю.О.* Відновлення двовимірної вимірювальної інформації про механічні величини, що містить динамічні похибки / *Ю.О. Подчащинський* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2009. – № 1 (48) – С. 108–117.
22. Пат. 98035 С2 Україна, МПК (2012.01) G06F 7/00, G06K 9/42. Спосіб відновлення зображень, що містять вимірювальну інформацію про геометричні параметри об'єктів вимірювань / *Подчащинський Ю.О.* ; заявник і власник патенту ЖДТУ. – № a2010 09758 ; заявл. 05.08.10 ; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7.
23. *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / *И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев.* – 13-ое изд., испр. – М. : Наука, 1986. – 544 с.
24. *Гриньов Б.В.* Аналітична геометрія : підручник / *Б.В. Гриньов, І.К. Кириченко.* – Харків : Гімназія, 2008. – 340 с.
25. Вероятностные методы в вычислительной технике : учебное пособие / под ред. *А.Н. Лебедева.* – М. : Высшая школа, 1986. – 312 с.
26. *Болнокин В.Е.* Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. Алгоритмы и программы / *В.Е. Болнокин, П.И. Чинаев.* – М. : Радио и связь, 1986. – 248 с.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович — доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління та автоматички Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані системи управління;
- цифрова обробка відеозображень;
- методи вимірювання механічних величин.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2013