

ГЕОМЕТРИЧНІ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ВИРОБІВ ЗА ЇХ ЦИФРОВИМИ ВІДЕОЗБРАЖЕННЯМИ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ

Розглянуто геометричні похибки визначення координат виробів в автоматизованих системах. Для визначення координат використовуються цифрові відеозображення цих виробів. Геометричні похибки координат обумовлено дисторсією відеозображень в оптичній системі та похибками орієнтації та розташування виробу відносно цифрової відеокамери. Для цих складових частин геометричної похибки отримано математичні моделі, виконано чисельне моделювання та експериментальні дослідження. За результатами досліджень доведено можливість алгоритмічної компенсації геометричних похибок та підвищення точності вимірювання геометричних параметрів виробів, що контролюються автоматизованою системою. Наприклад, це можуть бути облицювальні вироби з природного каменю.

Ключові слова: цифрове відеозображення, геометрична похибка, автоматизовані системи, математична модель, геометричні параметри.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними задачами. Одним з ефективних методів вимірювання геометричних параметрів промислових виробів 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 виробів, що виготовляються на підприємствах. Наприклад, це можуть бути відеозображення виробів з природного каменю. Для цих виробів визначаються лінійні розміри та кути по зовнішньому контуру, а також геометричні параметри структурних елементів на поверхні виробу [1–3]. Результати вказаних вимірювань доцільно використовувати для контролю якості виробів з природного каменю та для підвищення конкурентоспроможності каменеобробних підприємств України.

При формуванні відеозображень в автоматизованій системі виникають геометричні похибки [4–6], що впливають на точність вимірювання координат точок виробів. Геометричні похибки відеозображень виникають в оптичній системі пристрою формування відеозображень (ПФВЗ) [4, 5, 7, 8]. Ці похибки обумовлені дисторсією оптичної системи ПФВЗ та неперпендикулярністю лицьової поверхні виробу і оптичної осі ПФВЗ.

Отримання математичних моделей та детальних характеристик геометричних похибок дозволяє розробити методики та процедури їх алгоритмічної компенсації та підвищити точність визначення геометричних параметрів виробів з природного каменю в автоматизованих системах.

Тому **актуальним завданням** є розробка та дослідження математичних моделей та методики ідентифікації параметрів геометричних похибок на відеозображеннях виробів в автоматизованих системах. Такий підхід повинен забезпечити більш високу точність та швидкодію вимірювань вказаних механічних величин, порівняно з існуючими засобами вимірювань.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Відомо ряд математичних моделей відеозображень об'єктів вимірювань (промислових виробів) та процесів їх формування і обробки в технічних та алгоритмічних засобах [5, 6, 9–13]. Також відомі математичні моделі процесів формування оптичних зображень об'єктів в оптичних пристроях [14–16]. Але ці математичні моделі орієнтовані на визначення візуальної якості отриманих відеозображень або оперують показниками, що не можуть бути безпосередньо використані в процедурах аналізу та синтезу автоматизованої системи.

В існуючих системах технічного зору та їх математичних моделях [17–19] недостатньо приділяється уваги саме процедурам вимірювання геометричних параметрів та інших механічних величин. Існуючі математичні моделі вимірювальних каналів приладів та вимірювальних систем орієнтовані, перш за все, на одновимірні сигнали або на декілька таких сигналів, що передаються паралельними каналами [20–22].

Тому виникає завдання розробки та дослідження математичної моделі геометричних похибок координат контурних точок виробів, що визначаються в автоматизованій системі на основі відеозображень.

Метою проведеного в статті дослідження є розробка математичної моделі геометричних похибок, що мають місце в автоматизованих системах при визначенні координат виробів за їх відеозображеннями. Ця модель може бути використана для алгоритмічної компенсації похибок і підвищення точності автоматизованих систем, що призначені для контролю геометричних параметрів та підвищення якості промислових виробів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Ефективним методом контролю якості промислових виробів є вимірювання їх геометричних параметрів на основі цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про ці вироби. Наприклад, це можуть бути вироби, що виготовляються з природного каменю на каменеобробних підприємствах. В тому числі – це блоки, видобуті з родовищ, оброблені плити та елементи будівельних конструкцій, бордюрний камінь, декоративно-облицювальні вироби та інші вироби, що мають плоску лицьову поверхню [1]. Для вимірювання геометричних параметрів вказаних виробів використовуються координати контурних точок граней виробів та структурних елементів їх поверхні, що визначені на основі відеозображень.

Геометричні похибки обумовлені дисторсією оптичної системи ПФВЗ та неперпендикулярністю лицьової поверхні виробу й оптичної осі ПФВЗ.

Дисторсія обумовлена конструктивними та технологічними обмеженнями на розробку та точність виготовлення оптичної системи. Відносна величина дисторсії для якісної оптичної системи не перевищує 0,1 % від загального розміру поля зору оптичної системи. Наприклад, якщо для цифрового фотоапарата розмір відеозображення дорівнює 3200x2400 дискретних точок (д.т.), а поле зору оптичної системи становить 2000x1500 мм (для максимального розміру виробів з природного каменю 1500x1200 мм [23–24]), то відповідна складова геометричної похибки $\Delta_{\text{ааіі}} = 3,2$ д.т. = 2,0 мм. Для цифрової відеокамери з розміром відеозображення 2000x2000 д.т. $\Delta_{\text{ааіі}} = 2,0$ д.т. = 2,0 мм.

Для оцінки отриманих значень геометричних похибок необхідно враховувати те, що цифрові відеозображення також містять похибку $\Delta_{\text{а}}$, обумовлену дискретним характером цифрових відеозображень [4, 25–27]. Величина цієї похибки визначається полем зору оптичної системи ПФВЗ та загальною кількістю точок на цифровому відеозображенні. Похибка $\Delta_{\text{а}}$ має рівномірний розподіл в діапазоні $\pm\delta_x / 2$ або $\pm 0,5$ д.т. з нульовим середнім значенням (δ_x – крок дискретності просторових координат в площині поверхні виробу, що відповідає відстані в 1 д.т. на цифровому відеозображенні).

Наприклад, якщо для цифрового фотоапарата розмір відеозображення дорівнює 3200x2400 д.т., а поле зору оптичної системи становить 2000x1500 мм, то крок дискретності $\delta_x = 1$ д.т. = 0,625 мм,

$\Delta_{\text{амакс}} = \delta_x / 2 = 0,500$ д.т. = 0,313 мм, $\sigma_{\Delta_{\text{а}}} = \frac{\delta_x}{2\sqrt{3}} = 0,289$ д.т. = 0,181 мм. Для цифрової відеокамери з розміром відеозображення 2000x2000 д.т. та полем зору оптичної системи 2000x2000 мм $\delta_x = 1$ д.т. = 1,000 мм, $\Delta_{\text{амакс}} = 0,50$ мм, $\sigma_{\Delta_{\text{а}}} = 0,289$ мм.

Похибка $\Delta_{\text{а}}$ визначає максимально можливу точність вимірювання координати однієї точки цифрового відеозображення. Ця похибка не може бути скомпенсована алгоритмічними методами для однократного вимірювання координати однієї точки. Тому для підвищення точності вимірювання цієї координати необхідно, щоб геометричні похибки цифрових відеозображень були суттєво меншими за похибку $\Delta_{\text{а}}$. Як відомо, для цього середньоквадратичне значення геометричних похибок:

$$\sigma_{\Delta_{\text{ааіі}}} \leq \sigma_{\Delta_{\text{а}}} / 3. \quad (1)$$

Порівнюючи отримані значення геометричних похибок з похибкою $\Delta_{\text{а}}$, можна зробити висновок, що геометричні похибки є неприпустимо великими і потрібна їх алгоритмічна компенсація. Для здійснення алгоритмічної компенсації необхідно отримати математичні моделі геометричних похибок координат виробів в автоматизованій системі.

Математичною моделлю першої складової частини геометричних похибок (дисторсія оптичної системи), згідно з [5], є відображення точки з координатами (x, y) в площині поверхні виробу $f_0(x, y)$ в точку з координатами $(x_{\text{аф}}, y_{\text{аф}})$ в площині відеозображення з геометричними похибками $f_{\text{іі}}(x_{\text{аф}}, y_{\text{аф}})$:

$$x_{\text{аф}} = G_x(x, y), \quad y_{\text{аф}} = G_y(x, y),$$

де G_x, G_y – деякі монотонні функції.

Найчастіше як G_x, G_y використовують поліноміальні функції, що апроксимують дану складову геометричних похибок [4, 5]:

$$x_{\text{аф}} = k_{\text{ііі}} \sum_{i=0}^{N_{\text{аіі}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{аіі}}-i} a_{ik} x^k y^i, \quad y_{\text{аф}} = k_{\text{ііі}} \sum_{i=0}^{N_{\text{аіі}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{аіі}}-i} b_{ik} x^k y^i, \quad (2)$$

де $N_{\text{аіі}}$ – ступінь апроксимуючого полінома.

Ідентифікація коефіцієнтів a_{ik}, b_{ik} математичної моделі (2) виконується за методом найменших квадратів шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки, що характеризує зміщення опорних точок на відеозображенні тестового об'єкта вимірювань.

Коефіцієнти математичної моделі (2) можуть бути визначені за формулами [5]:

$$\dot{A}_{a_{i0}} = \left(A_0^T A_0 \right)^{-1} A_0^T X^*, \quad B_{a_{i0}} = \left(A_0^T A_0 \right)^{-1} A_0^T Y^*, \quad (3)$$

де $\dot{A}_{a_{i0}}, B_{a_{i0}}$ – вектори коефіцієнтів a_{ik}, b_{ik} , розташованих в порядку зростання індексів, розмірність кожного з цих коефіцієнтів визначається розмірностями елементів матриці \dot{A}_0 та векторів X^*, Y^* ;

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & \dots & \left(\begin{smallmatrix} N_{a_{i0}} \\ \vdots \\ N_{a_{i0}} \end{smallmatrix} \right) \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & \dots & \left(\begin{smallmatrix} N_{a_{i0}} \\ \vdots \\ N_{a_{i0}} \end{smallmatrix} \right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N_{i0}} & y_{N_{i0}} & \left(\begin{smallmatrix} N_{i0} \\ \vdots \\ N_{i0} \end{smallmatrix} \right) & x_{N_{i0}} y_{N_{i0}} & \left(\begin{smallmatrix} N_{i0} \\ \vdots \\ N_{i0} \end{smallmatrix} \right) & \dots & \left(\begin{smallmatrix} N_{i0} \\ \vdots \\ N_{i0} \end{smallmatrix} \right) \end{bmatrix},$$

де x_j, y_j – відомі координати опорних точок ОВ, $j \in \{1, N_{i0}\}$; N_{i0} – кількість опорних точок, X^*, Y^* – вектори результатів вимірювання координат опорних точок об'єкта вимірювань на відеозображенні з дисторсією. Середньоквадратичне значення похибки визначення координат точок після компенсації дисторсійних геометричних викривлень дорівнює:

$$\sigma_{a_{i0}}^2 = \left(\left(X^* - A_0 \dot{A}_{a_{i0}} \right)^T \left(X^* - A_0 \dot{A}_{a_{i0}} \right) + \left(Y^* - A_0 B_{a_{i0}} \right)^T \left(Y^* - A_0 B_{a_{i0}} \right) \right) / (2 N_{i0}). \quad (4)$$

Розглянемо другу складову частину геометричних похибок, що обумовлена неперпендикулярністю лицьової поверхні виробу й оптичної осі ПФВЗ. Математична модель цієї похибки основана на проєкційній моделі формування відеозображень виробів в автоматизованій системі (рис. 1). Для опису просторового перетворення координат згідно з цією моделлю використано відомості, викладені в [28, 29].

Точка P_0 з координатами (x, y) на поверхні виробу відображається в точку $P_{a_{\phi}}$ з координатами $(x_{a_{\phi}}, y_{a_{\phi}})$ в площині початкового відеозображення шляхом проєкційного перетворення в тривимірному просторі $O_i x_i y_i z_i$:

$$\begin{bmatrix} X_{a_{\phi}} \\ Y_{a_{\phi}} \\ Z_{a_{\phi}} \\ W_{a_{\phi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ W_0 \end{bmatrix} M_{oi}(z_{i\phi}), \quad (5)$$

де $\begin{bmatrix} X_{a_{\phi}} \\ Y_{a_{\phi}} \\ Z_{a_{\phi}} \\ W_{a_{\phi}} \end{bmatrix}$ – вектор однорідних координат точки $P_{a_{\phi}}$; $\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ W_0 \end{bmatrix}$ – вектор однорідних координат точки P_0 ,

$$M_{oi}(z_{i\phi}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/z_{i\phi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} -$$

матриця центрального проєкційного перетворення; $z_{i\phi}$ – фокусна відстань оптичної системи ПФВЗ.

Якщо поверхня виробу перпендикулярна оптичній осі ПФВЗ, то

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ W_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -z_{i\phi} \\ 1 \end{bmatrix},$$

де $z_{i\phi}$ – відстань від поверхні виробу до відеокамери.

Якщо поверхня виробу повернута на кути $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ навколо координатних осей Ox, Oy, Oz , то

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ W_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} M_x(\gamma_x) \cdot M_y(\gamma_y) \cdot M_z(\gamma_z) \cdot M_i(z_{i\phi}), \quad (6)$$

де

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_x & \sin \gamma_x & 0 \\ 0 & -\sin \gamma_x & \cos \gamma_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_y = \begin{bmatrix} \cos \gamma_y & 0 & -\sin \gamma_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma_y & 0 & \cos \gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma_z & \sin \gamma_z & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_z & \cos \gamma_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} -$$

матриці повороту,

$$M_{\bar{i}}(z_{i\bar{A}}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -z_{i\bar{A}} & 1 \end{bmatrix} -$$

матриця, що задає перенос центра системи координат з точки O в точку O_i після повороту.

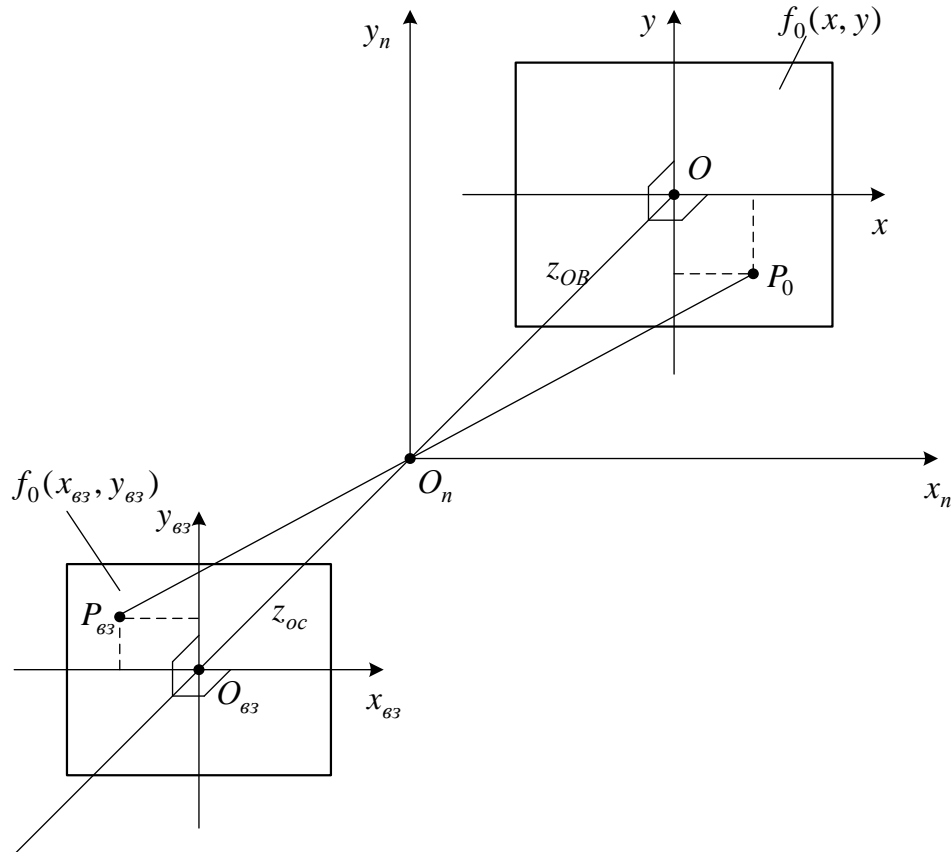


Рис. 1. Проекційна модель формування відеозображень виробів з природного каменю в приладовій системі

Координати точки $P_{\bar{a}\bar{c}}$ в площині відеозображення дорівнюють:

$$x_{\bar{a}\bar{c}} = X_{\bar{a}\bar{c}} / W_{\bar{a}\bar{c}}, \quad y_{\bar{a}\bar{c}} = Y_{\bar{a}\bar{c}} / W_{\bar{a}\bar{c}}. \quad (7)$$

В автоматизованій системі координати точок виробу P_0 отримують шляхом перерахунку з координат точок відеозображення $P_{\bar{a}\bar{c}}$:

$$x^* = x_{\bar{a}\bar{c}} / k_{i\bar{i}\bar{n}}, \quad y^* = y_{\bar{a}\bar{c}} / k_{i\bar{i}\bar{n}}, \quad k_{i\bar{i}\bar{n}} = z_{i\bar{n}} / z_{i\bar{A}}. \quad (8)$$

На основі формул (5)–(8) отримуємо остаточний вираз для координат точок виробу з геометричними похибками:

$$x^* = \frac{(x \cos \gamma_y \cos \gamma_z + y(\sin \gamma_x \sin \gamma_y \cos \gamma_z - \cos \gamma_x \sin \gamma_z)) z_{i\bar{A}}}{z_{i\bar{A}} + x \sin \gamma_y - y \sin \gamma_x \cos \gamma_y}; \quad (9)$$

$$y^* = \frac{(x \cos \gamma_y \sin \gamma_z + y(\sin \gamma_x \sin \gamma_y \sin \gamma_z + \cos \gamma_x \cos \gamma_z)) z_{i\bar{A}}}{z_{i\bar{A}} + x \sin \gamma_y - y \sin \gamma_x \cos \gamma_y}.$$

Відповідно, геометрична похибка, обумовлена неперпендикулярністю поверхні виробу і оптичної осі цифрової відеокамери дорівнює:

$$\Delta_{\bar{a}\bar{a}\bar{i}\bar{i}\bar{2}x} = x^* - x, \quad \Delta_{\bar{a}\bar{a}\bar{i}\bar{i}\bar{2}y} = y^* - y. \quad (10)$$

Як було визначено вище, геометричні похибки відеозображень є неприпустимо великими і тому в автоматизованій системі потрібно виконувати їх алгоритмічну компенсацію. Для цього необхідно ідентифікувати параметри математичних моделей (2) і (9). Особливістю ідентифікації геометричних

похибок в приладовій системі є те, що на сформованому відеозображенні присутні як похибки, обумовлені дисторсією оптичної системи, так і похибки, обумовлені неперпендикулярністю поверхні виробу й оптичної осі цифрової відеокамери.

Тому використовують тестові об'єкти вимірювань (рис. 2), на поверхні яких розташовано N_{io} опорних точок з відомими координатами $\{x_j, y_j\}$.

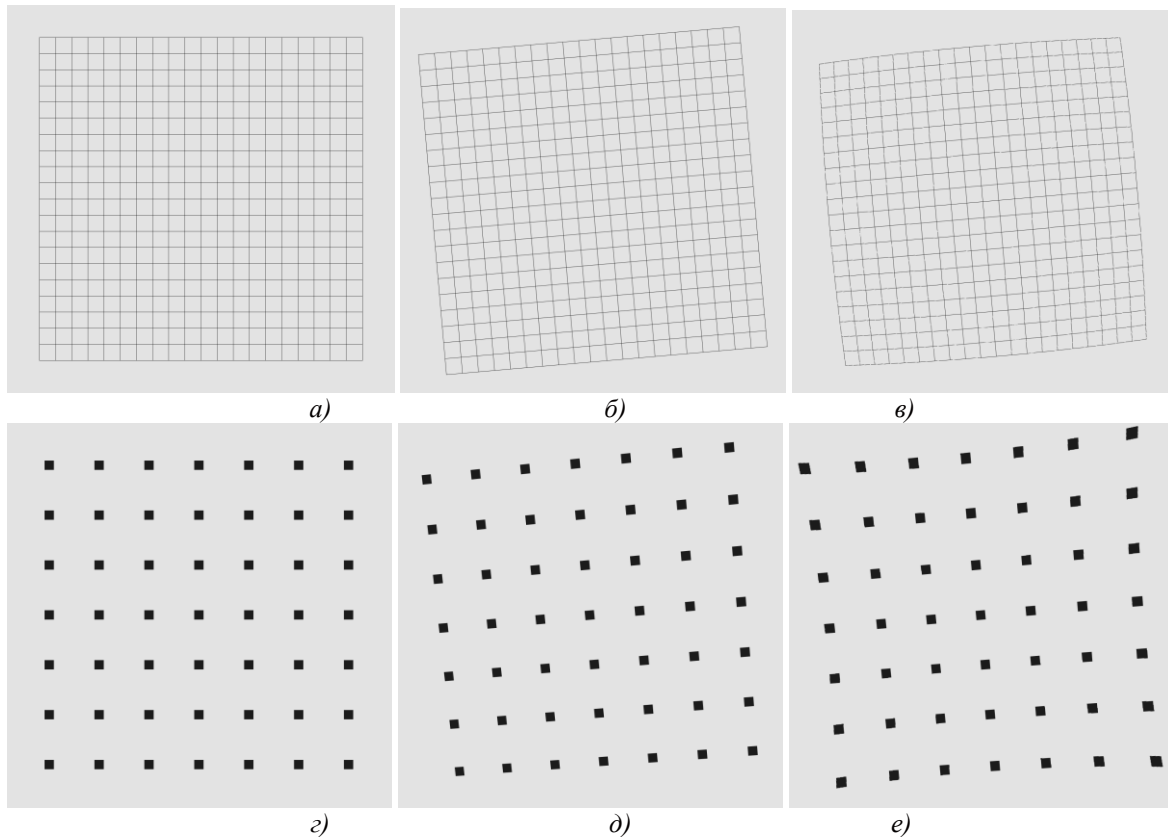


Рис. 2. Відеозображення тестових об'єктів вимірювань, що використовуються в приладовій системі для алгоритмічної компенсації геометричних похибок: а) відеозображення об'єкта вимірювань № 1; б) поворот об'єкта вимірювань № 1 на кут 5° в площині відеозображення; в) від'ємна дисторсія 3% відеозображення (б); г) відеозображення об'єкта вимірювань № 2; д) поворот об'єкта вимірювань № 2 на кути 5° відносно трьох осей просторової системи координат; е) додатня дисторсія 3% відеозображення (д)

За допомогою додаткових пристроїв (фотоелектричного автоколіматора, що підключений до цифрової ЕОМ в складі автоматизованої системи) поверхню об'єкта розташовують перпендикулярно оптичній осі ПФВЗ. Далі формують відеозображення тестового об'єкта вимірювань, на цьому відеозображенні вимірюють координати опорних точок, результат вимірювань в координати $\{x_j^*, y_j^*\}$ опорних точок тестового об'єкта вимірювань з дисторсійними геометричними похибками.

За (3) визначають коефіцієнти a_{ik}, b_{jk} математичної моделі (2) дисторсійних геометричних похибок. Далі шляхом алгоритмічної обробки відеозображення тестового об'єкта обчислюються поправки до поточних координат точок в різних областях цифрового відеозображення. Отримані поправки використовуються для алгоритмічної компенсації геометричних похибок.

Використання полінома другого ступеня для визначення поправок та білінійної апроксимації для обчислення координат з скомпенсованою дисторсією дозволяє суттєво зменшити величину геометричних похибок. В результаті можна досягти виконання умови (1). Таким чином, алгоритмічні методи компенсації дисторсійних похибок доцільно використовувати в автоматизованій системі з метою підвищення її точності.

Для розрахунку й алгоритмічної компенсації геометричної похибки, обумовленої неперпендикулярністю поверхні виробу і оптичної осі відеокамери, необхідно визначити величини $Z_{iA}, Z_{iB}, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$, координати центра поверхні виробу O та центра відеозображення O_{ac} в системі координат $O_i x_i y_i z_i$. Це може бути здійснено на основі координат опорних точок тестового об'єкта

вимірювань за методами геометричних перетворень і реєстрації відеозображень [6, 30]. Також відомі методи калібрування цифрових відеокамер, визначення елементів їх зовнішнього і внутрішнього орієнтування [29, 31–32]. Методи калібрування дозволяють на основі відеозображення тестового ОБ з опорними точками одночасно визначити параметри дисторсійних і проєкційних викривлень. Розглянемо приклад розрахунку геометричних похибок відеозображень при вимірюванні геометричних параметрів виробу з природного каменю, що має максимальний розмір 1500x1200 мм. Розрахунок здійснено за формулами (9), (10) для відеозображення розміром 2000x1500 мм, що вміщує виріб з природного каменю. Результати розрахунку наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахунок геометричних похибок відеозображень в автоматизованій системі

Кути повороту виробу γ_x і γ_y , град.	Похибка визначення координат точок, мм			
	$\gamma_x = \gamma_y, \gamma_z = 0$		$\gamma_x = \gamma_y = \gamma_z$	
	$ \Delta_{\text{ааіі}} 2x $	$ \Delta_{\text{ааіі}} 2y $	$ \Delta_{\text{ааіі}} 2x $	$ \Delta_{\text{ааіі}} 2y $
1. Розрахунок для кутів відеозображення 2000x1500 мм, $Z_{\text{Д}} = 5000$ мм				
0	0	0	0	0
0,05	0,0434	0,0330	0,6983	0,8393
0,1	0,0865	0,0666	1,3969	1,6774
0,2	0,1715	0,1354	2,7951	3,3500
0,3	0,2549	0,2066	4,1945	5,0178
0,4	0,3368	0,2800	5,5951	6,6806
0,5	0,4172	0,3557	6,9970	8,3387
1,0	0,7962	0,7683	14,0243	16,5561
3,0	1,9386	2,9907	42,4019	48,2201
5,0	2,5047	6,1326	71,1328	77,9742
2. Розрахунок для середньої зони відеозображення 2000x1500 мм, $Z_{\text{Д}} = 5000$ мм				
0	0	0	0	0
0,05	0,0108	0,0083	0,3382	0,4279
0,1	0,0214	0,0169	0,6767	0,8551
0,2	0,0421	0,0350	1,3540	1,7079
0,3	0,0620	0,0542	2,0321	2,5583
0,4	0,0812	0,0746	2,7108	3,4063
0,5	0,0996	0,0961	3,3902	4,2520
1,0	0,1801	0,2207	6,7970	8,4453
3,0	0,3146	1,0053	20,5727	24,6337
5,0	0,1556	2,2484	34,5451	39,8974

Геометрична похибка вимірювання координат точок повинна бути значно меншою (в 3–5 разів) за похибку, обумовлену дискретним характером цифрового відеозображення (0,313 мм для цифрового фотоапарата, 0,5 мм для цифрової відеокамери). Аналізуючи результати розрахунку геометричної похибки, бачимо, що похибка виставлення виробу відносно ПФВЗ не повинна перевищувати (0,05...0,2)°. Досягнення такої точності взаємного розташування ПФВЗ та виробу, що має значну масу і габарити, є складним завданням та потребує додаткового обладнання. Тому для зменшення геометричної похибки без високоточної просторової орієнтації виробу доцільно здійснювати її алгоритмічну компенсацію на основі математичних моделей (2), (9).

Висновки. Геометричні похибки відеозображень обумовлені дисторсією оптичної системи ПФВЗ та неперпендикулярністю поверхні виробу і оптичної осі ПФВЗ. Для врахування та компенсації геометричних похибок використано поліноміальну апроксимацію дисторсійного зсуву точок відеозображень і проєкційну математичну модель формування відеозображень поверхні виробів з природного каменю.

Математичні моделі (2), (4), (9) і (10) дозволяють розрахувати величину геометричних похибок відеозображень і здійснити алгоритмічну компенсацію цих похибок в автоматизованій системі.

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 облицовального каменю / *М.Т. Бакка, О.О. Ремезова, А.О. Криворучко* и др. // Сб. науч. тр. 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* и др. // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2005. – № 1 (32). – С. 107–116.
4. *Горелик С.Л.* Телевизионные измерительные системы / *С.Л. Горелик, Б.М. Кац, В.И. Киврин*. – М. : Связь, 1980. – 168 с.
5. *Претт У.* Цифровая обработка изображений / *У.Претт*. – М. : Мир, 1982. – 792 с.
6. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений / *Р.Гонсалес, Р.Вудс*. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
7. *Стафеев С.К.* Основы оптики : учеб. пособие / *С.К. Стафеев, К.К. Боярский, Г.Л. Башина*. – СПб. : Питер, 2006. – 336 с.
8. Оптико-электронные приборы для научных исследований : учеб. пособие / *Л.А. Новицкий, А.С. Гоменюк, В.Е. Зубарев* и др. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.
9. *Форсайт Д.* Компьютерное зрение. Современный подход / *Д.Форсайт, Ж.Понс*. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с.
10. *Анисимов Б.В.* Распознавание и цифровая обработка изображений : учеб. пособие / *Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин*. – М. : Высшая школа, 1983. – 295 с.
11. *Даджион Д.* Цифровая обработка многомерных сигналов : пер. с англ. / *Д.Даджион, Р.Мерсеро* ; под ред. *Л.П. Ярославского*. – М. : Мир, 1988. – 488 с.
12. *Васильев К.К.* Статистический анализ многомерных изображений / *К.К. Васильев*. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – 156 с.
13. *Ярославский Л.П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голо-графии. Введение в цифровую оптику / *Л.П. Ярославский*. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
14. *Кононов В.И.* Оптические системы построения изображений / *В.И. Кононов, А.Д. Федоровский, Г.П. Дубинский*. – К. : Техніка, 1981. – 134 с.
15. *Креопалова Г.В.* Оптические измерения : учебник / *Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев* ; под ред. *Д.Т. Пуряева*. – М. : Машиностроение, 1987. – 264 с.
16. Прикладная оптика : учеб. пособие / *Л.Г. Бебчук, Ю.В. Бога-чев, Н.П. Заказнов* и др. ; под ред. *Н.П. Заказнова*. – М. : Машиностроение, 1988. – 312 с.
17. *Taylor G.* Visual Perception and Robotic Manipulation. 3D Object Recognition, Tracking and Hand-Eye Coordination / *G.Taylor, L.Kleeman*. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – 230 p.
18. Техническое зрение роботов / под ред. *А.Пью*. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.
19. *Письменный Г.В.* Системы технического зрения в робототехнике / *Г.В. Письменный, Б.Б. Михайлов, А.Ю. Корнеев*. – М. : Машиностроение, 1991. – 83 с.
20. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / под ред. *Е.С. Полищука*. – К. : Вища школа, 1984. – 359 с.
21. *Вострокутнов Н.Н.* Цифровые измерительные устройства : Теория погрешностей, испытания, поверка / *Н.Н. Вострокутнов*. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
22. *Горлач А.А.* Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / *А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков*. – К. : Техніка, 1985. – 151 с.
23. Матеріали стінові кам'яні. Номенклатура показників якості : ДСТУ БВ 2.7-16-95. – К. : Державний комітет у справах містобудування і архітектури, 1996. – 18 с. – (Національний стандарт України).
24. Будівельні матеріали. Вироби з природного каменю. Облицовальні плити. Вимоги : ДСТУ Б EN 1469:2007 (EN 1469:2004, IDT). – К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008. – 45 с.
25. *Шлихт Г.Ю.* Цифровая обработка цветных изображений / *Г.Ю. Шлихт*. – М. : ЭКОМ, 1997. – 336 с.
26. *Маслюков Ю.С.* Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС / *Ю.С. Маслюков* // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – №4. – С. 70–73.
27. *Игнатъев Н.К.* Дискретизация и ее приложения / *Н.К. Игнатъев*. – М. : Связь, 1980. – 264 с.
28. *Фоли Дж.* Основы интерактивной машинной графики : пер. с англ. / *Дж.Фоли, А.Вэн Дэм*. – М. : Мир, 1985. – 368 с.

29. *Дорожінський О.Л.* Основи фотограмметрії : підручник / *О.Л. Дорожінський*. – Львів : Вид. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2003. – 214 с.
30. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений в среде Matlab / *Р.Гонсалес, Р.Вудс, С.Эддинс*. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
31. *Юрченко В.И.* Об учете систематических искажений неметрических снимков / *В.И. Юрченко* // Геодезия и картография. – 2002. – № 7. – С. 31–38.
32. *Clarke T.A.* The development of camera calibration methods and models / *T.A. Clarke, J.G. Fryer* // The Photogrammetric Record. – 1998. – Vol. 16 (91). – P. 51–66.

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

Наукові інтереси:

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

Стаття надійшла до редакції 17.10.2013

Подчашинський Ю.О. Геометричні похибки визначення координат виробів за їх цифровими відеозображеннями в автоматизованих системах

Подчашинский Ю.А. Геометрические погрешности определения координат изделий на основе их цифровых видеоизображений в автоматизированных системах

Podchashinskiy Yu.O. Geometrical errors of determination the coordinates of the goods based on their digital videoimages in automated systems

УДК 621.317

Геометрические погрешности определения координат изделий на основе их цифровых видеоизображений в автоматизированных системах / Ю.А. Подчашинский

В статье рассмотрены геометрические погрешности определения координат изделий в автоматизированных системах. Для определения координат используются цифровые видеоизображения этих изделий. Геометрические погрешности координат обусловлены дисторсией видеоизображений в оптической системе и погрешностями ориентации и расположения изделия относительно цифровой видеокамеры. Для этих составляющих геометрической погрешности получены математические модели, выполнено численное моделирование и экспериментальные исследования. На основе результатов исследований доказана возможность алгоритмической компенсации геометрических погрешностей и повышение точности измерения геометрических параметров, изделий, которые контролируются автоматизированной системой. Например, это могут быть облицовочные изделия из природного камня.

Ключевые слова: цифровое видеоизображение, геометрическая погрешность, автоматизированные системы, математическая модель, геометрические параметры.

УДК 621.317

Geometrical errors of determination the coordinates of the goods based on their digital videoimages in automated systems / Yu.O. Podchashinskiy

The geometrical errors of determination the coordinates of the goods are considered in this article. This determination of coordinates based on the use of digital video images of these goods in automated systems. Mathematical models of distortion and projection components geometrical errors are presented for contour points of goods. Numerical simulation and experimental study of geometric errors are executed.

In the article the geometric errors of determination of the goods coordinates in automated systems are considered. The digital video images of these goods are used for determination of coordinates. The geometric errors of coordinates are stipulated by a distortion of video images in an optical system and errors of orientation and arrangement of goods by the digital video camera. The mathematical models are obtained for these errors. The numerical simulation and experimental researches are executed for these making a geometric error. Because of outcomes of researches the algorithmic compensation of geometric errors are executed. This result is proved increase of accuracy of measurement of geometric parameters goods, which are inspected by an automated system. For example, it can be goods from a natural stone.

Ключевые слова: цифровое видеоизображение, геометрическая погрешность, автоматизированные системы, математическая модель, геометрические параметры.