ЛЕКЦІЯ 14. ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАЕТРІВ ТА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБЄКТІВ ЗА ЇХ ЦИФРОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ

Цифрове відеозображення $f_{\text{Н}}(n,m)$ з виходу ПФВЗ передається в цифрову ЕОМ. Для ахроматичної поверхні виробів з природного каменю достатньо одного напівтонового цифрового відеозображення $f_{\text{Н}}(n,m)$, що характеризує яскравість точок цієї поверхні. Для хроматичної поверхні виробів формується кольорове цифрове відеозображення, що містить 3 канали (3 цифрових монохромних відеозображення) і характеризує яскравість і колір поверхні за певною колориметричною системою. Найпоширенішою є колориметрична система RGB (R, G і B – відповідно червоний, зелений і синій кольори, а яскравість $Y = 0{,}30R + 0{,}59G + 0{,}11B$ [161, 162]. Всі положення і методи алгоритмічної обробки відеозображень, наведені в даній роботі, застосовуються як до напівтонового цифрового відеозображення $f_{\text{Н}}(n,m)$, так і до кожного з каналів кольорового цифрового відеозображення.

В цифровій ЕОМ виконується алгоритмічна компенсація похибок на цифровому відеозображенні $f_{\text{Н}}(n,m)$. В результаті послідовно отримуємо цифрові відеозображення $\hat{f}_{\text{Д}}(n,m)$, $\hat{f}_{\text{ос}}(n,m)$ і $\hat{f}_0(n,m)$, що є алгоритмічними оцінками відеозображень $f_{\text{Д}}(x_{\text{вз}}, y_{\text{вз}})$, $f_{\text{ос}}(x_{\text{вз}}, y_{\text{вз}})$ і $f_0(x_{\text{вз}}, y_{\text{вз}})$. З урахуванням коефіцієнта збільшення оптичної системи ПФВЗ цифрове відеозображення $\hat{f}_0(n,m)$ також є алгоритмічною оцінкою двовимірної функції $f_0(x,y)$, що характеризує поверхню виробу з природного каменю.

Елементи (точки) цифрового відеозображення $\hat{f}_0(n,m)$ з індексами (n,m) характеризують яскравість точок початкового відеозображення $f_0(x_{\text{вз}}, y_{\text{вз}})$ з координатами [156, 158] $x_{\text{âç}} = n \cdot \delta_{x1}$, $y_{\text{вз}} = m \cdot \delta_{y1}$, де δ_{x1} і δ_{y1} – відстань по горизонталі і вертикалі між центрами сусідніх світлочутливих елементів перетворювача «світло-сигнал».

Якщо відомий коефіцієнт збільшення оптичної системи $k_{\text{м ос}}$ [158], то

$$x = x_{\text{вз}} / k_{\text{м ос}} = n \cdot \delta_x, \quad y = y_{\text{вз}} / k_{\text{м ос}} = m \cdot \delta_y,$$

де δ_x і δ_y – крок дискретності просторових координат x і y в площині поверхні виробу, що відповідає відстані в 1 д.т. на цифровому відеозображенні $f_0(n,m)$.

Для вимірювань ГП в приладовій системі використовується цифрове відеозображення $\hat{f}_0(n,m)$. Перед вимірюваннями ГП на цьому відеозображенні виділяють область $Q_{\text{ÎÂ}}$, що належить ОВ.

Розглянемо ГП ОВ (виробів з природного каменю та структурних елементів їх поверхні), що можуть бути визначені для кожного відеозображення шляхом алгоритмічної обробки результатів вимірювань координат точок. ОВ будемо вважати плоскою геометричною фігурою, що розміщена в площині відеозображення. ГП ОВ можна розділити на п’ять груп: координати характерних контурних точок об’єкта, лінійні розміри та периметр об’єкта, різні варіанти визначення площі об’єкта, морфометричні ознаки об’єкта, коефіцієнти геометричної форми об’єкта [161, 162, 169, 170, 192].

До координат характерних контурних точок ОВ відносяться:

– перелік всіх контурних точок з визначеними координатами;

– екстремальні координати об’єкта (координати самої верхньої, нижньої, лівої та правої точок об’єкта);

– координати вершин опуклого багатокутника, в який вписано об’єкт;

– координати характерних точок геометричної фігури (наприклад, прямокутника або еліпса), що використовується для апроксимації об’єкта.

До лінійних розмірів ОВ відносяться його ширина w та висота h, що відповідають ширині та висоті прямокутника, в який вписано цей об’єкт. Відстань між двома точками ОВ з координатами (x_l, y_l) і (x_j, y_j) дорівнює [161]: $d = \sqrt{(x_j - x_l)^2 + (y_j - y_l)^2}$. Величини w, h і d для цифрового відеозображення можуть бути обраховані у д.т. або у метрах.

Площа ОВ може бути визначена за такими варіантами:

– площа об’єкта $S_{\text{ОВ}}$ (область, яку займає цей об’єкт на відеозображенні);

– повна площа об’єкта, що дорівнює його площі із заповненими отворами;

– опукла площа об’єкта $S_{\text{ОВ}1}$, що дорівнює площі опуклого багатокутника, в який вписано цей об’єкт.

Площа ОВ для цифрового відеозображення може бути виражена відповідною кількістю точок цифрового відеозображення, що належать ОВ, або обрахована у одиницях площі (м^2).

До морфометричних ознак ОВ, як плоскої фігури в площині відеозображення, відносяться такі ГП:

– центр мас об’єкта;

– еквівалентний діаметр, що відповідає діаметру кола з площею, яка дорівнює площі об’єкта $d_{\text{е}} = \sqrt{4S_{\text{ОВ}} / \pi}$;

– довжина максимальної осі інерції об’єкта як плоскої фігури;

– довжина мінімальної осі інерції об’єкта як плоскої фігури;

– кутове положення об’єкта, що визначається кутом між горизонтальною віссю координат і максимальною віссю інерції цього об’єкта.

До коефіцієнтів геометричної форми ОВ, як плоскої фігури в площині відеозображення, відносяться:

– коефіцієнт опуклості: $k_c = S_{\text{ОВ}} / S_{\text{ОВ}1}$;

– коефіцієнт заповнення: $k_f = S_{\text{ОВ}} /(w \cdot h)$;

– ексцентриситет, що визначається для еліпса, який має головні моменти інерції такі ж, як у об’єкта.

Узагальненим варіантом ГП ОВ є його моменти [169]. Початкові моменти ОВ порядку $(\beta + \gamma)$ дорівнюють:

$$m_{\beta\gamma} = \iint\limits_{Q_{\text{ÎÂ}}} x^{\beta} y^{\gamma} f_0(x, y) dxdy.$$

Центральні моменти порядку $(\beta + \gamma)$ визначаються формулою:

$$\mu_{\beta\gamma} = \iint\limits_{Q_{\text{ÎÂ}}} (x - x_c)^{\beta} (y - y_c)^{\gamma} f_0(x - x_c, y - y_c) dxdy,$$

де x_c, y_c – координати центра мас ОВ.

Координати центра мас ОВ дорівнюють [169]:

$$x_c = m_{10} / S_{\text{ОВ}}, \quad y_c = m_{01} / S_{\text{ОВ}}.$$

Для відеозображення (1.1)

$$x_c = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} x_j = \frac{\delta_x}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} n_j, \quad y_c = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} y_j = \frac{\delta_y}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} m_j.$$

Важливими характеристиками ОВ, як плоскої фігури, є його головні моменти інерції J_1 і J_2, довжина максимальної і мінімальної осей інерції l_{max} і l_{min} та ексцентриситет $e_{\text{åë}}$. Головні моменти інерції визначаються відносно максимальної і мінімальної осей інерції ОВ [169, 192]:

$$J_{1,2} = \frac{1}{2}\left(J_x + J_y\right) \pm \sqrt{J_{xy}^2 + \frac{1}{4}\left(J_x - J_y\right)^2},$$

де J_x, J_y, J_{xy} – моменти інерції ОВ відносно координатних осей Ox і Oy, $J_x = \mu_{20}$, $J_y = \mu_{02}$, $J_{xy} = \mu_{11}$.

Для відеозображення (1.1)

$$J_x = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} \left(x_j - x_c\right)^2 = \frac{\delta_x^2}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} \left(n_j - n_c\right)^2, \text{ де } n_c = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} n_j,$$

$$J_y = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} \left(y_j - y_c\right)^2 = \frac{\delta_y^2}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} \left(m_j - m_c\right)^2, \text{ де } m_c = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} m_j,$$

$$J_{xy} = \frac{1}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} \left(x_j - x_c\right)\left(y_j - y_c\right) = \frac{\delta_x \delta_y}{N_{\text{ОВ}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ОВ}}} \left(n_j - n_c\right)\left(m_j - m_c\right).$$

Довжина максимальної і мінімальної осей інерції ОВ, як плоскої фігури, визначається співвідношеннями [192, 193]:

$$l_{\max} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{J_x + J_y + 2C_J}, \quad l_{\min} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{J_x + J_y - 2C_J},$$

де $C_J = \sqrt{J_{xy}^2 + \frac{1}{4}\left(J_x - J_y\right)^2}$.

Ексцентриситет визначається на основі апроксимації ОВ еліпсом, що має моменти та осі інерції, як у ОВ [169, 192]:

$$e_{\text{ел}} = \frac{c_{\text{ел}}}{a_{\text{ел}}} = \frac{2\sqrt{\left(l_{\max}/2\right)^2 - \left(l_{\min}/2\right)^2}}{l_{\max}},$$

де $c_{\text{ел}}^2 = a_{\text{ел}}^2 - b_{\text{ел}}^2$ – половина міжфокусної відстані еліпса, $a_{\text{ел}}$ і $b_{\text{ел}}$ – його півосі.

На основі моментів інерції ОВ також може бути визначено його кутове положення відносно центра мас [192, 193]. Це кутове положення визначається як кут між віссю Ox і максимальною віссю інерції:

$$\alpha = \begin{cases} arctg\dfrac{J_y - J_x + 2C_J}{2J_{xy}}, & J_y > J_x, \\ arctg\dfrac{2J_{xy}}{J_x - J_y + 2C_J}, & J_y < J_x. \end{cases} \tag{1.3}$$

Інший варіант визначення кутового положення ОВ наведено в [169]:

$$\alpha = \frac{1}{2} arctg\frac{2\mu_{11}}{\mu_{02} - \mu_{20}} + \lambda, \; \lambda = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \mu_{20} \ge \mu_{02}, \mu_{30} \ge 0, \\ \pi/2, & \text{якщо } \mu_{20} < \mu_{02}, \mu_{30} \ge 0, \\ \pi, & \text{якщо } \mu_{20} \ge \mu_{02}, \mu_{30} < 0, \\ 3\pi/2, & \text{якщо } \mu_{20} < \mu_{02}, \mu_{30} < 0. \end{cases} \tag{1.4}$$

Найпростіший варіант визначення кутового положення ОВ – на основі виміряних координат двох опорних точок цього об’єкта за формулою [169, 170]:

$$\alpha = arctg\frac{y_l - y_j}{x_l - x_j}. \tag{1.5}$$

Параметри руху ОВ можуть бути визначені на основі часової послідовності відеозображень $f_i(x_{вз}, y_{вз})$, що характеризує просторове положення ОВ в моменти часу $t_i = i \cdot \delta_д$ ($i \in \overline{1,K}$, K – загальна кількість відеозображень у часовій послідовності, $\delta_ä$ – інтервал часу, що розділяє моменти формування двох сусідніх відеозображень у часовій послідовності) [150, 156, 158]. З урахуванням використання дискретних відліків відеозображень в цифровій ЕОМ отримуємо часову послідовність $f_i(n,m)$. Для кожного цифрового відеозображення у часовій послідовності визначаються координати точок ОВ згідно викладених вище методів.

На основі цих даних можна визначити параметри руху ОВ [150, 156, 158]:

1. Лінійні переміщення контурних точок та центра мас ОВ. Ці переміщення dr_{ij} визначаються для j-ї точки ОВ на основі їх проекцій dx_{ij} і dy_{ij} на координатні осі Ox і Oy просторової системи координат в площині лицьової поверхні виробу:

$$dx_{ij} = x_{ij} - x_{(i-q)j}, \quad dy_{ij} = y_{ij} - y_{(i-q)j}, \quad dr_{ij} = \sqrt{dx_{ij}^2 + dy_{ij}^2},$$

де x_{ij}, y_{ij} – координати j-ї точки ОВ в момент часу $t_i = i \cdot \delta_{ä}$, $q = 1,2,3,...$ – коефіцієнт, що задає крок визначення параметрів руху за чисельними методами диференціювання.

2. Лінійні швидкості і прискорення контурних точок та центра мас ОВ в площині лицьової поверхні виробу:

$$v_{x\,ij} = \frac{dx_{ij}}{q \cdot \delta_{д}}, \quad v_{y\,ij} = \frac{dy_{ij}}{q \cdot \delta_{д}}, \quad v_{ij} = \sqrt{v_{x\,ij}^2 + v_{y\,ij}^2},$$

$$a_{x\,ij} = \frac{v_{x\,ij} - v_{x\,(i-q)j}}{q \cdot \delta_{д}}, \quad a_{y\,ij} = \frac{v_{y\,ij} - v_{y\,(i-q)j}}{q \cdot \delta_{д}}, \quad a_{ij} = \sqrt{a_{x\,ij}^2 + a_{y\,ij}^2},$$

3. Поточне кутове положення ОВ α_i відносно його центру мас в момент часу $t_i = i \cdot \delta_{ä}$ згідно співвідношень (1.3) – (1.5).

4. Кутові переміщення, швидкості і прискорення ОВ відносно його центру мас:

$$d\alpha_i = \alpha_i - \alpha_{(i-q)}, \quad \omega_i = \frac{d\alpha_i}{q \cdot \delta_{д}}, \quad d\omega_i = \omega_i - \omega_{(i-q)}, \quad \varepsilon_i = \frac{d\omega_i}{q \cdot \delta_{д}}.$$

Для ОВ на основі відеозображень також можуть бути визначені інші механічні величини, що залежать від ГП та параметрів руху цих об’єктів:

1. Якщо відома апріорна інформація про тривимірну геометричну форму та просторове розташування ОВ, то на основі відеозображення можуть бути оцінені об’єм $V_{\text{ОВ}}$ та площа перетину $S_{\text{П}}$ цього об’єкту. Наприклад, для ОВ в формі шару на основі виміряного поперечного розміру w його об’єм $V_{\text{ОВ}} = 4\pi w^3 / 3$, на основі виміряної площі $S_{\text{ОВ}}$ його об’єм $V_{\text{ОВ}} = 32 / \left(3\sqrt{\pi}\right) S_{\text{ОВ}}^{3/2}$. В даному випадку максимальне значення площі перетину $S_{\text{П}} = S_{\text{ОВ}}$.

2. Якщо відома апріорна інформація про об’ємну густину ОВ $\rho_{ÎÂ}$ або його густину $\rho_{ÎÂ\,1}$, як плоскої фігури, то можна визначити масу цього об’єкта: $m_{\text{ОВ}} = \rho_{\text{ОВ}} \cdot V_{\text{ОВ}}$ або $m_{\text{ОВ}} = \rho_{\text{ОВ}1} \cdot S_{\text{ОВ}}$.

3. Якщо відома маса ОВ, то на основі вимірювань його параметрів руху можуть бути оцінені зовнішні сили та моменти, що діють на цей об’єкт: $F_{\text{ОВ}} = m_{\text{ОВ}} \cdot a_{ij}$.

4. На основі розрахованих площі перетину ОВ та зовнішньої сили, що перпендикулярна площині цього перетину, можуть бути визначені механічні напруги в цьому об’єкті: $U_{\text{ОВ}} = F_{\text{ОВ}} / S_{\text{П}}$.

5. На основі переміщень ділянок ОВ, що виміряні для часової послідовності відеозображень, можуть бути визначені механічні деформації об’єкта.