



ПОХИБКА ТРИВИМІРНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПОВЕРХНІ ЗА ТРИАДОЮ ЇЇ ЗОБРАЖЕНЬ

ГРАБОВСЬКА Н.Р., РУСИН Б.П., ІВАНЮК В.Г.

Розглядається метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою двовірних зображень, які отримані під різними напрямками освітлення. Оцінка похибки реконструкції похідних поверхні проводиться для незапланованих відхилень вертикального напрямку освітлення.

1. Вступ

Останнім часом для опису та відновлення форми дефектів, які утворилися на поверхні конструкцій в процесі експлуатації, використовують методи тривимірної реконструкції [1-9]. Одним з методів отримання тривимірної форми предмета на основі аналізу його зображень є запропонований в [10, 11] метод 3D реконструкції за тріадою зображень, отриманих зі змінним положенням джерела світла. Метод оснований на ламбертівській моделі відбиття світла від поверхні конструкції. Для відеозйомки зображень використовуються три напрямки освітлення - вертикальний та два бокові.

Сама реконструкція відбувається шляхом інтегрального накопичення реконструйованих горизонтальної та вертикальної похідної вектора нормалі. Як правило, визначення глибини дефекту відбувається з певною похибкою. Похибка має дві складові: перша, яка виникає лише в розрахунковій частині алгоритму реконструкції, і друга, обумовлена неточністю відеозйомки зображень. Спотворення зображень викликане неточністю встановлення напрямків освітлення поверхні дефекту. За результатами роботи [11] похибка обрахунку поверхні дефекту, яка зосереджена лише в розрахунковій частині алгоритму реконструкції за тріадою зображень для випадку оцінки глибини тріщини, становить $\pm 0,04\%$. Але при практичній реалізації цієї реконструкції необхідно врахувати похибки, які індуковані відхиленням кожного з трьох напрямків освітлення від технологічно запланованого значення. Це складне завдання. Тому, щоб досягти його успішного виконання, слід розбити вирішення цієї проблеми на простіші етапи і аналізувати зазначені похибки по частинах. На першому етапі такого аналізу точності розглянуто похибку, яка індукована відхиленням кожного з двох бокових напрямків освітлення від технологічно запланованого значення у випадку дослідження тріщини [12].

На другому етапі такого аналізу точності доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням вертикального напрямку освітлення від технологічно запланованого значення.

Тому метою роботи є оцінка похибки визначення похідних поверхні при її реконструкції за тріадою зображень залежно від вертикального напрямку освітлення.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити дві задачі оцінки похибок 3D реконструкції похідних поверхні залежно від напрямку освітлення, а також з'ясувати, в якій мірі цей тип похибок можна контролювати в системі тривимірної реконструкції, що дозволить конструктивно зменшити їх до необхідного рівня і покращити точність 3D реконструкції.

2. Ілюмінаційна модель зображення

Для дифузної моделі відбиття (розглядають монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначає рівняння [13, 14]

$$I_{\lambda} = I_a + I_{p\lambda} k_d (N \cdot L), \quad (1)$$

де I_a – інтенсивність розсіяного світла; $I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела освітлення; k_d – дифузний коефіцієнт, який визначає рівень дифузного відбиття досліджуваної точки поверхні; $L = (L_x, L_y, L_z)$ – напрям на джерело світла; $N = (N_x, N_y, N_z)$ – одиничний вектор нормалі до поверхні $F(x, y, z) = 0$ у досліджуваній точці $M = (x, y, z)$.

Вважаємо, що наступну реконструкцію виконують, коли поверхня задана в явній формі $z = f(x, y)$, тому $F(x, y, z) = f(x, y) - z = 0$. Направлені косинуси нормалі (N) до такої поверхні в точці $M = (x, y, z)$ описуються формулами [15]:

$$N = \left\{ \frac{-p}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \frac{-q}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \right\}, \quad (2)$$

де $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ – нахил поверхні в околі точки.

Оскільки інтенсивність джерела освітлення $I_{p\lambda}$ є стала величина, то рівняння (1) є функцією чотирьох невідомих p , q , k_d та I_a .

3. 3D реконструкція за тріадою зображень

Розглянемо ілюмінаційну модель зображення з контрольованим кутом освітлення та визначимо її параметри p , q , k_d та I_a з тріади зображень. Щоб усунути залежність від параметра I_a , експериментально визначимо його, тимчасово штучно затінюючи зразок з дефектом. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а отже і положення тіні, визначає система оброб-

ки. Використовуючи базове зображення I_λ зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону I_a і звести модель (1) до трьох невідомих.

Забезпечивши у системі джерело світла з такими параметрами, що

$$L_0 = (L_{x0}, L_{y0}, L_{z0}), \quad L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1}), \\ L_2 = (L_{x2}, L_{y2}, L_{z2}),$$

отримаємо інтенсивність відбиття поверхні у вигляді системи трьох рівнянь:

$$I_{\lambda 0} = I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x0} N_x + L_{y0} N_y + L_{z0} N_z), \\ I_{\lambda 1} = I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x1} N_x + L_{y1} N_y + L_{z1} N_z), \quad (3) \\ I_{\lambda 2} = I_a + I_{p\lambda} k_d (L_{x2} N_x + L_{y2} N_y + L_{z2} N_z),$$

в якій невідомі компоненти вектора нормалі N . Кожна компонента вектора нормалі N залежать від похідних p, q , а отже система (3) залежать від них. Щоб спростити вираз (3), застосуємо у системі джерела світла з такими параметрами, що

$$L_0 = (0, 0, 1), \quad (4)$$

$$L_1 = (L_{x1e}, 0, L_{z1e}), \quad L_2 = (0, L_{y2e}, L_{z2e}). \quad (5)$$

Представимо джерела світла (5) з застосуванням кутів (рис. 1)

$$L_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta), \quad L_2 = (0, \cos\phi, \sin\phi). \quad (6)$$

Крім того, приймаємо, що джерела світла L_{S0}, L_{S1}, L_{S2} є однакові за інтенсивністю.

Отриману систему трьох рівнянь з невідомими параметрами k_d та p, q шляхом алгебраїчних перетворень трансформуємо у таку форму:

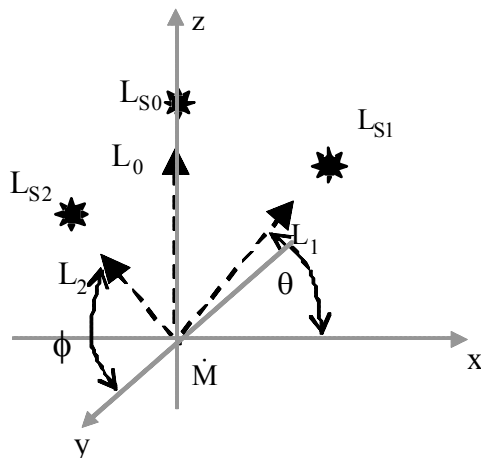


Рис. 1. Геометрична інтерпретація локалізації джерела світла (L_{S0}, L_{S1}, L_{S2}) в тривимірному просторі відносно точки \dot{M} поверхні

$$p = \frac{L_{z1e}}{L_{x1e}} - \frac{\eta_1}{L_{x1e}}, \quad (7)$$

$$\text{де } \eta_1 = \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a},$$

$$q = \frac{L_{z2e}}{L_{y2e}} - \frac{\eta_2}{L_{y2e}}, \quad (8)$$

$$\text{де } \eta_2 = \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{I_{\lambda 0} - I_a}.$$

Оскільки напрямки освітлення L_0 (4), L_1, L_2 (5) є технологічно заплановані, то на основі їх компонент виконується реконструкція (7) і (8).

4. Похибка визначення похідних поверхні

На практиці під час зйомки виникають відхилення від напрямків освітлення (4), (5). Тому на першому етапі аналізу точності реконструкції на основі тріади 2D зображень доцільно розглянути похибку, яка індукована відхиленням напрямку освітлення

$$\tilde{L}_0 = (\tilde{L}_{x0}, \tilde{L}_{y0}, \tilde{L}_{z0}) \quad (9)$$

від технологічно запланованого L_0 для відеозйомки зображення $I_{\lambda 0}$. Зауважимо, що за внаслідок змін напрямку освітлення \tilde{L}_0 зображення $I_{\lambda 0}(L_0)$ спотворюється і стає $I_{\lambda 0}(\tilde{L}_0)$. Тому реконструкція похідної p (7) змінюється лише за рахунок зміни параметра $\eta_1(I_{\lambda 0}(\tilde{L}_0))$, а реконструкція похідної q (8) – лише за рахунок зміни параметра $\eta_2(I_{\lambda 0}(\tilde{L}_0))$.

Розглянемо похибку реконструкції похідної p , яка індукована відхиленням напрямку освітлення \tilde{L}_0 (9).

Для векторів L_0, \tilde{L}_0 скористаємось описом, який слідує при використанні поверхні сфери $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, з центром у досліджуваній точці O . Досліджувана точка розміщена у центрі координат.

Для поверхні $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$ можна визначити похідну $P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\text{ctg}\theta$, де θ – кут напрямку світла в площині XOZ , а також можна визначити похідну $Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\text{ctg}\phi$, де ϕ – кут напрямку світла в площині YOZ . На основі цього опис вектору \tilde{L}_0 набуває форми

$$\tilde{L}_0 = \left(\frac{-P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2 + 1}}, \frac{-Q_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2 + 1}} \right). \quad (10)$$

Привідсутності відхилення освітлення від технологічно запланованого у точці $P_0 = P_{e0} = 0$, $Q_0 = Q_{e0} = 0$ вираз (7) приймає значення

$$p = p(0, 0) = \frac{L_{zle}}{L_{xle}} - \frac{\eta_l(0, 0)}{L_{xle}}. \quad (11)$$

У випадку, коли маємо відхилення освітлення від технологічно запланованого, зображення $I_{\lambda 0}$ стає функцією параметрів P_0, Q_0 . Внаслідок цього вираз (11) приймає значення

$$p(P_0, Q_0) = \frac{L_{zle}}{L_{xle}} - \frac{\eta_l(P_0, Q_0)}{L_{xle}}. \quad (12)$$

Застосуємо для оцінки точності реконструкції параметра p розклад функції (12) в ряд Маклорена:

$$\begin{aligned} p(P_0, Q_0) &= p(0, 0) + P_0 \left[\frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} + \\ &+ Q_0 \left[\frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} + P_0^2 \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 p(P_0, 0)}{\partial P_0^2} \right]_{P_0=0} + \\ &+ Q_0^2 \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 p(0, Q_0)}{\partial Q_0^2} \right]_{Q_0=0} + \\ &+ \frac{1}{2!} P_0 Q_0 \left[\frac{\partial^2 p(P_0, Q_0)}{\partial P_0 \partial Q_0} \right]_{P_0=0, Q_0=0} + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Наступний аналіз точності виконується з технологічно запланованим напрямком L_1 , який визначено в точці з $P = P_{e1}$, $Q = Q_{e1} = 0$ таким виразом

$$L_1 = \left(\frac{-P_{e1}}{\sqrt{P_{e1}^2 + 1}}, 0, \frac{1}{\sqrt{P_{e1}^2 + 1}} \right). \quad (14)$$

Для оцінки другого і третього членів розкладу (13), підставивши вирази (2) та (14) у вираз (12), шляхом його диференціювання отримуємо

$$\left[\frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} = -\frac{p^2 P_{e1} + p}{P_{e1}}, \quad (15)$$

$$\left[\frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} = -\frac{q P_{e1} + q}{P_{e1}}. \quad (16)$$

Нехтуючи у виразі (13) малими членами, отримуємо наближення розвинення в ряд Маклорена, з якого, з використанням підставлення виразів (15) і (16) в (13), визначимо загальну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної

$$\Delta p_{PQ} = p(P_0, Q_0) - p(0, 0) = \Delta p_P + \Delta p_Q, \quad (17)$$

де похибки

$$\Delta p_P = P_0 \left[\frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0}, \quad (18)$$

$$\Delta p_Q = Q_0 \left[\frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0}. \quad (19)$$

Для оцінки точності реконструкції параметра q поступимо аналогічно, розклавши функцію $q(P_0, Q_0)$ в ряд Маклорена:

$$\begin{aligned} q(P_0, Q_0) &= q(0, 0) + P_0 \left[\frac{\partial q(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} + \\ &+ Q_0 \left[\frac{\partial q(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} + P_0^2 \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 q(P_0, 0)}{\partial P_0^2} \right]_{P_0=0} + \\ &+ Q_0^2 \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 q(0, Q_0)}{\partial Q_0^2} \right]_{Q_0=0} + \\ &+ \frac{1}{2!} P_0 Q_0 \left[\frac{\partial^2 q(P_0, Q_0)}{\partial P_0 \partial Q_0} \right]_{P_0=0, Q_0=0} + \dots \end{aligned} \quad (20)$$

Наступний аналіз точності виконується з технологічно запланованим напрямком L_2 , який визначено в точці з $P = P_{e2} = 0$, $Q = Q_{e2}$ виразом

$$L_2 = \left(0, \frac{-Q_{e2}}{\sqrt{Q_{e2}^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{Q_{e2}^2 + 1}} \right). \quad (21)$$

Для оцінки другого і третього членів розкладу (20), підставивши вирази (2) та (21) у вираз (20), шляхом його диференціювання отримуємо

$$\left[\frac{\partial q(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} = -\frac{q P_{e2} + p}{Q_{e2}}, \quad (22)$$

$$\left[\frac{\partial q(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} = -\frac{q^2 Q_{e2} + q}{Q_{e2}}. \quad (23)$$

Нехтуючи у виразі (20) малими членами, отримуємо наближення розвинення в ряд Маклорена, з якого, з використанням підставлення (22), (23), визначимо загальну оцінку точності реконструкції вертикальної похідної

$$\Delta q_{PQ} = q(P_0, Q_0) - q(0, 0) = \Delta q_P + \Delta q_Q, \quad (24)$$

де похибки

$$\Delta q_P = P_0 \left[\frac{\partial q(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0}, \quad (25)$$

$$\Delta q_Q = Q_0 \left[\frac{\partial q(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0}. \quad (26)$$

Продовжимо наступний аналіз точності реконструкції похідної r з параметром $P_{e1} = -1$. Підставивши $P_e = -1$ в (15) і (16), отримаємо

$$\left[\frac{\partial p(P_0, 0)}{\partial P_0} \right]_{P_0=0} = -p^2 + p, \quad (27)$$

$$\left[\frac{\partial p(0, Q_0)}{\partial Q_0} \right]_{Q_0=0} = -q P_{e1} + q. \quad (28)$$

На основі (17) з врахуванням (27) і (28) визначимо відносну похибку обрахунку горизонтальної похідної

$$\delta p = \delta p_P + \delta p_Q, \quad (29)$$

де
$$\delta p_P = \frac{P_0}{g_P}, \quad (30)$$

тут
$$g_P = \frac{1}{1-p}, \quad (31)$$

$$\delta p_Q = \frac{Q_0}{g_Q}, \quad (32)$$

тут
$$g_Q = \frac{P}{(1-p)q}. \quad (33)$$

Далі доцільно розглянути точність реконструкції, проаналізувавши похибку реконструкції вертикальної похідної, викликану змінами напрямку $L_0(P_0, Q_0)$. Продовжимо наступний аналіз точності реконструкції похідної q з параметром $Q_{e2} = -1$. Підставимо $Q_{e2} = -1$ в (25), (26) і визначимо відносну похибку обрахунку вертикальної похідної

$$\delta q = \delta q_Q + \delta q_P, \quad (34)$$

де
$$\delta q_Q = \frac{Q_0}{G_Q}, \quad (35)$$

тут
$$G_Q = \frac{1}{1-q}, \quad (36)$$

$$\delta q_P = \frac{P_0}{G_P}, \quad (37)$$

тут
$$G_P = \frac{q}{(1-q)p}. \quad (38)$$

В такій формі похибки формально подібні. Тому необхідно та достатньо провести аналіз точності для однієї з них. Проведемо цей аналіз для похибки δp_Q (32). За умовами тривимірної реконструкції маємо заплановане номінальне значення параметра Q_0 $Q_{0e} = 0$. Нехай задана абсолютна похибка визначення параметра Q_0 як відхилення від запланованого номінального значення $\pm \Delta Q$, тобто має місце

$$-\Delta Q \leq Q_0 \leq \Delta Q. \quad (39)$$

Таким чином, знак похибки δp_Q (32) спільно формується параметрами Q_0, g_Q .

Нехай задано кількісну оцінку точності реконструкції горизонтальної похідної, як умову реконструкції

$$-\delta p_{Q0} \leq \delta p_Q \leq \delta p_{Q0}.$$

Розглянемо таку умову реконструкції з підставленням δp_Q :

$$-\delta p_{Q0} \leq \frac{Q_0}{g_Q} \leq \delta p_{Q0}. \quad (40)$$

Залежно від знаку похибки δp_Q розглянемо чотири випадки формування умови (40).

В першому випадку нехай $Q_0 = \Delta Q$ і $g_Q > 0$. Внаслідок цього права частина умови (40) трансформується у таку умову:

$$\Delta Q \leq g_Q \delta p_{Q0}. \quad (41)$$

У другому випадку нехай $Q_0 = -\Delta Q$ і $g_Q < 0$. Внаслідок цього права частина умови (40) трансформується у таку умову

$$-\Delta Q \geq \delta p_{Q0} g_Q. \quad (42)$$

У третьому випадку нехай $Q_0 = \Delta Q$ і $g_Q < 0$. Внаслідок цього ліва частина умови (40) трансформується в умову (42).

У четвертому випадку нехай $Q_0 = -\Delta Q$ і $g_Q > 0$. Внаслідок цього ліва частина умови (40) трансформується в умову (41).

Таким чином, коли задані відносна похибка δp_{Q0} та абсолютна похибка $\pm \Delta Q$, для встановлення належності точки (p, q) до робочих діапазонів реконструкції необхідно і достатньо визначити параметр $g(p, q)$ і проаналізувати, чи виконується одна з умов (41), (42).

Використовуючи отримані результати (41), (42), (39) та застосовуючи підставлення $P=Q$, отримуємо аналіз точності реконструкції, яка формується похибкою δp_P .

Зауважимо, що оскільки параметр g_P не залежить від похідної q , то на етапі кількісного аналізу виникає можливість простежити результати (41), (42), використовуючи їх візуалізацію, не обмежуючись одним значенням абсолютної похибки визначення параметра $P_0 - \pm \Delta P$, а у діапазоні похибок $D_{\Delta P} = [\pm \Delta P_S, \pm \Delta P_S]$.

Проведемо кількісну оцінку діапазонів реконструкції похідних p, q на основі умов (41) і (42) та абсолютної похибки параметра $Q_0 (P_0)$ для конкретної системи реконструкції і реального пристрою вертикального променя, зображеного на рис. 2.

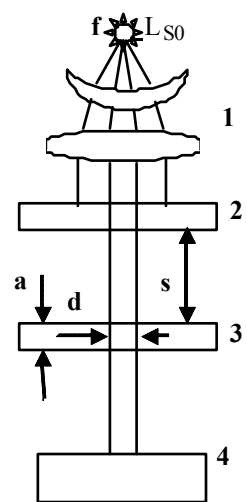


Рис. 2. Пристрій вертикального променя

5. Система тривимірної реконструкції

Щоб з'ясувати практичні аспекти технологічної реалізації точності встановлення напрямку освітлення, розглянемо варіант системи тривимірної реконструкції за тріадою зображень (СТРТЗ) з наступними технічними характеристиками:

1. Відносна похибка реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{P_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра P_0 .
2. Відносна похибка реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{Q_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра Q_0 .
3. Відносна похибка реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{P_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра P_0 .
4. Відносна похибка реконструкції вертикальної похідної $\delta q_{Q_0} = \pm 0,1$ під впливом параметра Q_0 .
5. Діапазон реконструкції горизонтальної похідної $D_p = [-0,97; 0,97]$.
6. Діапазон реконструкції вертикальної похідної $D_q = [-0,97; 0,97]$.

Зауважимо, що серед представлених технічних характеристик діапазони D_p, D_q є попередніми характеристиками і їх реальну конфігурацію необхідно кількісно визначити на основі виразів (41), (42).

Розглянемо варіант пристрою вертикального променя (ПВП) в запропонованій СТРТЗ.

5.1. Пристрій вертикального променя

ПВП (див. рис. 2) має такі конструктивні елементи: вузол освітлення, вузол екранування, дослідний зразок 4.

Вузол освітлення складається з джерела світла L_{S0} та конденсора 1. Джерело світла L_{S0} розміщене в фокальній площині конденсора 1, який містить дві лінзи.

Вузол екранування містить два екрани: екран 2 та екран 3. Відстань між екранами s , товщина екрана a .

ПВП має два режими: режим калібровки напрямку освітлення та режим освітлення.

В режимі калібровки встановлюється напрям вертикального освітлення з заданою точністю. В режимі освітлення проводиться освітлення дослідного зразка для потреб тривимірної реконструкції.

Режим калібровки. Вузол освітлення генерує паралельний пучок променів.

Для встановлення вертикального режиму освітлення вузлом освітлення 1 використовуються екрани 2 та 3. Кожний екран має отвір розміром d . Ці отвори технологічно розташовуються на прямій

лінії, яка перпендикулярна до площини дослідного зразка 4.

Вузол освітлення обертом в площині $[XZ]$ (площині $[YZ]$) відносно фокуса f , в якому розміщене джерело світла L_{S0} , встановлюється таким чином, щоб промінь освітлення через отвір екрана 3 падав на дослідний зразок 4. Коли промінь через отвори екранів падає на дослідний зразок 4, то виконується умова перевірки напрямку освітлення. У площині $[XZ]$ ця умова має вигляд

$$\Delta P \geq \frac{d}{s+2a}, \quad (43)$$

а у площині $[XZ]$

$$\Delta Q \geq \frac{d}{s+2a}. \quad (44)$$

ПВП має такі технічні характеристики:

1. Абсолютна похибка $\Delta P_0 = \pm 0,01$ визначення параметра P_0 .
2. Абсолютна похибка $\Delta Q_0 = \pm 0,01$ визначення параметра Q_0 .

Основні габаритні характеристики вузла екранування: $s=30\text{см}$, $a=0,5\text{см}$.

Габаритну характеристику (розмір отвору d) визначимо з умови (43), (44), яка на основі наведених характеристик ПВП приймає таку форму:

$$d \leq 3,1\text{мм}. \quad (45)$$

Приймаємо, що $d=3\text{мм}$.

Зауважимо, що практична реалізація вузла з екранами (див. рис. 2) може бути точно проконтрольована з використанням сучасної вимірювальної техніки, зокрема кутомірів Мікротех.

Режим освітлення. Принцип роботи ПВП в режимі освітлення. Після встановлення кута освітлення отвори екранів збільшуються. Вузол освітлення генерує паралельний пучок променів. Паралельний пучок променів падає на дослідний зразок 4.

6. Кількісна оцінка робочих діапазонів реконструкції горизонтальної похідної

Задаючись технічною характеристикою 1 СТРТЗ, похибкою δp_{P_0} та технічною характеристикою 5 СТРТЗ, діапазоном реконструкції горизонтальної похідної D_p , на основі (41), де застосовано підстав-

лення $P=Q$, розраховано розподіл $\Delta P = P_0 \leq \frac{0,1}{1-p}$.

Результати розрахунків представлені на рис. 3, де $\theta = \text{arc ct } gP_0$. Над наведеною кривою (зелений сегмент) реконструкція горизонтальної похідної відбу-

вається з заданою відносною похибкою $\delta p_{p0} = 0,1$.

З рис 3 видно, що при кутах θ , які $87,5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, реконструкція горизонтальної похідної відбувається з заданою відносною похибкою $\delta p_{p0} = 0,1$ в межах діапазону реконструкції горизонтальної похідної D_p . При куті $87,5^\circ$ абсолютна похибка визначення параметра P_0 $\Delta P = \text{ctg}87,5 = 0,05$, що забезпечує реалізацію технічної характеристики 1 ПВП, абсолютна похибка визначення параметра $P_0 \in \Delta P_0 = \pm 0,01$.

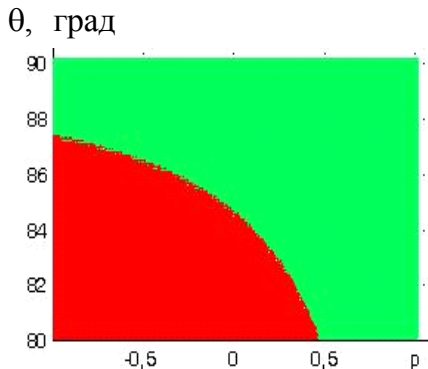


Рис. 3. Залежність кута θ від горизонтальної похідної p

У наступному етапі кількісного дослідження можливості обмежень діапазонів D_p, D_q , задаючись технічною характеристикою 2 СТРТЗ, похибкою δp_{q0} , технічними характеристиками 5, 6 СТРТЗ, діапазонами реконструкції горизонтальної похідної D_p, D_q розрахуємо розподіл

$$Q_0 = 0,1g_Q \quad (46)$$

і спираючись на технічну характеристику 2 ПВП, абсолютну похибку ΔQ_0 , проведемо аналіз виконання умови (41)

$$0,01 \leq Q_0 \quad (47)$$

та умови (42)

$$Q_0 \leq -0,01. \quad (48)$$

Результати розрахунків розподілу Q_0 з кількісним аналізом виконання умов (47) та (48) представлено на рис. 4.

Тут точки (p,q) , в яких можна реконструювати похідну p , коли виконується умова (47), представлено площиною $Q_0 = 0,01$, а точки (p,q) , в яких виконується умова (48), представлено площиною $Q_0 = -0,01$.

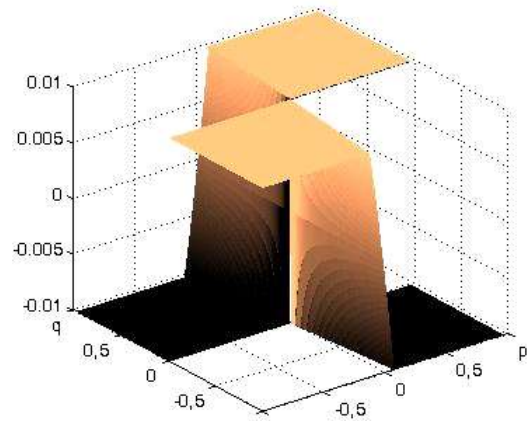


Рис. 4. Частково обмежений розподіл відхилення $Q_0(p, q)$

З рис. 4 видно, що між площинами, де реконструкція виконується з заданою точністю, є зони значень точок (p, q) , де точність реконструкції не відповідає заданій.

Щоб краще селектувати зони реконструкції з заданою точністю і заборонені зони реконструкції, розподіл відхилення Q_0 представлено у бінарній формі на рис. 5.

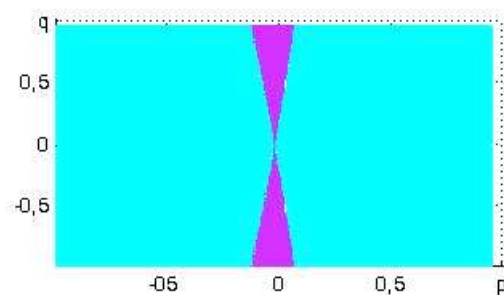


Рис. 5. Бінарний розподіл відхилення $Q_0(p, q)$

На рис. 5 точки, в яких можна реконструювати похідні p та q , представлено сірим кольором, а точки, в яких не можна реконструювати похідні p та q – чорним. З рис. 5, видно, що в околі $p=0$ діапазон реконструкції горизонтальної похідної D_p стає подвійним, а початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної D_q звужується. Для кількісної оцінки пошкоджень діапазонів D_p, D_q розподіл похідних p та q в забороненій зоні представлено на рис. 6.

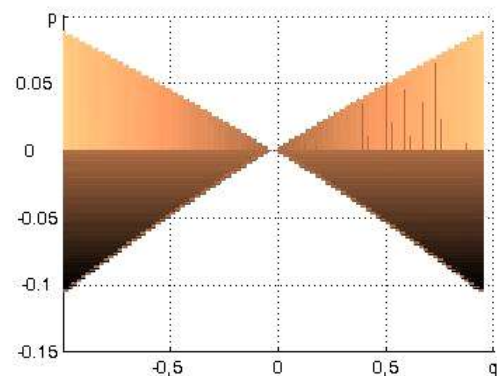


Рис. 6. Сегмент бінарного розподілу $Q_0(p, q)$, в якому є заборонена зона реконструкції

З рис. 6 видно, що діапазон реконструкції горизонтальної похідної D_p стає

$$D_{p-} = [-0,97; p_-], \text{ де } -0,1 \leq p_-(q) < 0,$$

$$D_{p+} = [p_+; 0,97], \text{ де } 0 \leq p_+(q) \leq 0,08.$$

Розширення діапазонів реконструкції відбувається при мінімальному відхиленні похідної q від 0, а екстремальне звуження діапазонів відбувається, коли $q = \pm 0,97$.

Також видно, що коли $-0,1 \leq p \leq 0,08$, початковий діапазон реконструкції вертикальної похідної D_q стає таким: $D_{q-} = [-q_-; q_-]$, де $q_-(p) < 0,97$. Екстремальне звуження діапазону D_{q-} відбувається, коли $p \rightarrow 0$.

Отже, встановлено, що при запланованих технічних характеристиках 1-2 завдяки появі забороненої зони реконструкції заплановані діапазони реконструкції D_p, D_q зменшено.

З виразів (46)-(48) видно, що при фіксованій технічній характеристиці 2 СТРТЗ для розширення діапазонів реконструкції доцільно додатково зменшити абсолютну похибку ΔQ_0 . Один з варіантів практичної реалізації такої операції полягає у збільшенні відстані s . В цьому випадку габарити приладу зростають, а також необхідні додаткові технологічні зусилля для корекції точності розташування напрямків освітлення.

Таким чином, розраховані похибки визначення горизонтальних похідних досліджуваної поверхні обумовлені відхиленням напрямку освітлення L_0 .

Зауважимо, що подібність співвідношень похибок реконструкції (30) та (35), а також співвідношень похибок (32) та (37) дозволяє використати представлені результати з використанням підставлень $q = p$, $p = q$, $P_0 = Q_0$ для кількісної оцінки робочих діапазонів реконструкції вертикальної похідної.

Висновки

Розглянуто задачу тривимірної реконструкції поверхні за тріадою двовірних зображень. Запропоновано алгоритм реконструкції поверхні та розраховано точність його роботи для випадку неконтрольованих змін вертикального напрямку освітлення відеозйомки.

Аналітично знайдені похибки визначення похідних досліджуваної поверхні обумовлені відхиленням вертикального напрямку освітлення від технологічно запланованого значення в площині XOZ та YOZ. На їх основі розраховані похибки визначення горизонтальної та вертикальної похідних поверхні досліджуваного об'єкта, два діапазони 3D реконструкції значень горизонтальної та вертикальної похідних, а також запропоновані рекомендації по встановленню експлуатаційних меж кутових відхилень вертикального напрямку освітлення від технологічно запланованого значення в

перспективі практичної реалізації пристрою вертикального напрямку освітлення.

Література: 1. Y. Liu, X. Su, and Q. Zhang, "A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry," Opt. Express 19(15), 2011. P.14137–14144. 2. Zhang Q., Su X., Xiang L., and Sun X. 3-D shape measurement based on complementary gray-code light, Opt. Lasers Eng. 2012. Vol. 50. Vol. 50 P.574-579. 3. Zhang S., Van Der Weide D., and Oliver J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement, Opt. Express. No. 9, 2010. Vol. 18. P. 9684–9689. 4. Woodham R.J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images Optical Engineering. 1980. – 19(1). P.139–144. 5. Maria E. Angelopoulou, Maria Petrou Evaluating the effect of diffuse light on photometric stereo reconstruction Machine Vision and Applications. 2014. Vol. 25, Issue 1. P.199-210. 6. Yoshizawa, T. Handbook of Optical Metrology -principle and applications- CRC Press, New York. 2009. 744 p. 7. Zhang S. High-resolution 3-D profilometry with binary phase-shifting methods, Appl. Opt.50(12), 2011 P.1753–1757. 8. Sudipta N. Sinha, D. Scharstein, R. Szeliski. Efficient high-resolution stereo matching using local plane sweeps / IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2014), 2014. P. 1219-1222. 9. Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, New York, 2010. 655P. 10. Неруїнівний контроль стану поверхонь, уражених корозійними пітингами / Б.П. Русин, Н.П. Ануфрієва, Н.Р. Грабовська, В.Г. Іванюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2013. №4. С. 90–96. 11. Оцінка глибини тріщини за тріадою зображень / Б.П. Русин, В.Г. Іванюк, О.В. Капшій, Н.П. Ануфрієва // Радіоелектроніка та інформатика. 2010. №2. С. 70–78. 12. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень / Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В. // Радіоелектроніка та інформатика. 2015. №2. С. 58-63. 13. Lambert J. H. Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae / sumptibus viduae E. Klett, 1760. 14. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions // ICIP 2001. 2001. P.201-204. 15. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 1. М.: Наука. 1967. 480с. 16. tool@microtech-ua.com

Транслітерований список літератури. 1. Y. Liu, X. Su, and Q. Zhang, "A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry," Opt. Express 19(15), 2011. –P.14137–14144. 2. Q. Zhang, X. Su, L. Xiang, and X. Sun, 3-D shape measurement based on complementary gray-code light, Opt. Lasers Eng., vol. 50, 2012, p.574-579. 3. S. Zhang, D. Van Der Weide, and J. Oliver, Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement, Opt. Express vol. 18, No. 9, 2010. P. 9684–9689. 4. Woodham R.J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images Optical Engineering. 1980. – 19(1). – P.139–144. 5. Maria E. Angelopoulou, Maria Petrou Evaluating the effect of diffuse light on photometric stereo reconstruction Machine Vision and Applications. 2014, Vol. 25, Issue 1. – P.199-210. 6. Yoshizawa, T. Handbook of Optical Metrology -principle and applications- CRC Press, New York 2009. - 744 p. 7. S. Zhang, High-resolution 3-D profilometry with binary phase-shifting methods, Appl. Opt.50(12), 2011 P.1753–1757. 8. Sudipta N. Sinha, D. Scharstein, R. Szeliski. Efficient high-resolution stereo matching using local plane sweeps. / IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2014), 2014. P. 1219-1222. 9. Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, New York, 2010. 655P. 10. Nerujnivnyj kontrol'

stanu poverhon', urazhenyh korozijnymy pityngamy /B.P. Rusyn, N.P. Anufrijeva, N.R. Grabovs'ka, V.G. Ivanjuk // Fiz.-him. mehanika materialiv. – 2013 –№4 –S. 90–96. 11. Ocinka glybyny trishhyny za triadoju zobrazhen'. / B.P. Rusyn, V.G. Ivanjuk, O.V. Kapshij, N.P. Anufrijeva // Radioelektronika i informatyka. – 2010. – №2–S. 70–78. 12. An error of three-dimensional reconstruction of surface of crack is after the triad of images / Hrabovska N.R., Rusyn B.P., Ivanyuk V.G., Kapshiy O.V. // Radioelektronika i informatyka. 2015. № 2. P. 58-63. 13. J. H. Lambert. Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae / sumptibus viduae E. Klett, 1760. 14. Shintaro Watanabe, Koji Miyajima Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions // ICIP 2001. 2001. P.201-204. 15. Smyrnov V.Y. Kurs vysshej matematyky. T. 1. M.: Nauka. 1967. 480s. 17. tool@microtech-ua.com.

Надійшла до редколегії 22.01.2016

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. Яворський І.М.

Русин Богдан Павлович, д-р техн. наук, проф., зав. відділом “Методи і системи дистанційного зондування “Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, e-mail: dep32@ipm.lviv.ua.

Грабовська Наталія Романівна, аспірантка Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, e-mail: dep32@ipm.lviv.ua.

Іванюк Віталій Григорович, інженер відділу “Методи і системи дистанційного зондування “ Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ. Наукові інтереси: обробка та розпізнавання зображень. Адреса: Україна, 79601, Львів, вул. Наукова, 5а, тел:2296-530. e-mail: vivan@imp.lviv.ua.

Rusyn B.P., doctor of engineering sciences, professor, manager of department of “Methods and systems of the remote sensing “ of Karpenko Physico- Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Address: 79601, Ukraine, Lviv, street Scientific, 5a, telephone : 2296-530, e - mail: dep32@ipm.lviv.ua

Hrabovska N.R., graduate student of Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Scientific interests: treatment and artificial perception. Address: 79601, Ukraine, Lviv, street Scientific, 5a, telephone: 2296-530, e - mail: dep32@ipm.lviv.ua

Ivanyuk V.G., engineer of department of “Methods and systems of the remote sensing “ of Karpenko Physico- Mechanical Institute of NAS of Ukraine, . Scientific interests: treatment and artificial perception. Address: 79601, Ukraine, Lviv, street Scientific, 5a, telephone: 2296-530, e - mail: vivan@imp.lviv.ua