

Н.Р. Грабовська<sup>1</sup>, аспірантка,  
Б.П. Русин<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,  
В.Г. Іванюк<sup>1</sup>, інж.,  
Ю.В. Лисак<sup>1</sup>, канд. техн. наук.  
<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАНУ, м. Львів, Україна  
rusyn@ipm.lviv.ua

## Дистанційне визначення напрямку світла в тривимірній реконструкції за тріадою зображень

У статті розглянуто проблему тривимірної реконструкції поверхні за тріадою двовимірних зображень з використанням ламбертівської моделі відбиття світла. Для відеозйомки зображень запропоновано використовувати три напрямки освітлення. У складі реконструкції запропоновано метод дистанційного визначення напрямку світла. В методі на основі ламбертівської моделі відбиття світла проводиться аналіз зображення тріади тестових площин, які мають відмінні вектори нормалі. В моделі для опису напрямку світла застосований вектор нормалі до поверхні одиначної сфери, який у кожній точці однозначно визначається горизонтальною та вертикальною похідними. Параметри моделі, якими є похідні, описали у вигляді системи рівнянь реконструкції, створеної на основі інформації зображення тріади площин та трьох векторів нормалі площин. Параметри моделі визначено за зміною просторового положення вектора нормалі площини з використанням додаткового затінення та незмінного положення приймача.

**Ключові слова:** тривимірна реконструкція, зображення, напрямок світла.

### Вступ

Як правило, в результаті обстеження газопроводу одержуємо великі масиви зображень з дефектами. В цьому випадку адаптація та застосування сучасних методів тривимірної реконструкції зображень до конкретних задач металографії дають можливість значно підвищити ефективність роботи операторів із зображеннями та отримати більше інформації про об'єкти досліджуваної сцени [1-9], зокрема про тривимірну їх структуру.

Одним з методів отримання тривимірної форми предмету 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.

При практичній реалізації цієї реконструкції необхідно врахувати похибки, які індуковані відхиленням кожного з трьох напрямків освітлення від технологічно запланованого значення. Це складне завдання.

Тому на етапі практичної реалізації цієї реконструкції і метою роботи є удосконалення

методу 3D реконструкції за тріадою зображень так, щоб зменшити вплив розташування напрямків освітлення на результат реконструкції.

В рамках поставленої мети будуть вирішені **дві задачі:**

-дистанційне визначення кожного напрямку освітлення;

-3D реконструкція за тріадою зображень в умовах довільного розташування напрямків освітлення.

### Ілюмінаційна модель зображення

Для дифузної моделі відбиття (розглядають монохроматичне зображення) інтенсивність відбиття точки поверхні, освітленої одним джерелом світла, визначає рівняння [12, 13]

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

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  $M = (x, y, z)$

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

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

### 3D реконструкція дифузного об'єкта за тріадою зображень

Оскільки інтенсивність джерела освітлення  $I_{p\lambda}$  є стала величина, то рівняння (1) є функцією чотирьох невідомих  $p$ ,  $q$ ,  $k_d$  та  $I_a$ . 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, штучно затінюючи зразок. Затінення формується за допомогою прямокутника, просторове положення якого над зразком, а отже і положення тіні, визначає система обробки. Використовуючи базове зображення  $I_\lambda$  зі штучним затіненням, можна визначити інтенсивність фону  $I_a$  і звести модель (1) до трьох невідомих.

Припустимо, що у системі забезпечено джерело світла з такими параметрами, що  $L_0 = (L_{x0}, L_{y0}, L_{z0})$ ,  $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$ ,  $L_2 = (L_{x2}, L_{y2}, L_{z2})$ . В результаті отримаємо інтенсивність відбиття поверхні у вигляді системи трьох рівнянь

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

в якій невідомі компоненти вектора нормалі  $N$ . Кожна компонента вектора нормалі  $N$  залежать від похідних  $p$ ,  $q$ , а отже система (3) залежать від них. Отриману систему трьох рівнянь з невідомими  $p$ ,  $q$ ,  $k_d$  шляхом алгебраїчних перетворень трансформуємо у таку:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де

$$A_{11} = (I_{\lambda 1} - I_a) L_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{x1};$$

$$A_{12} = (I_{\lambda 1} - I_a) L_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{y1};$$

$$A_{21} = (I_{\lambda 2} - I_a) L_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{x2};$$

$$A_{22} = (I_{\lambda 2} - I_a) L_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{y2};$$

$$B_1 = (I_{\lambda 1} - I_a) L_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{z1};$$

$$B_2 = (I_{\lambda 2} - I_a) L_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a) L_{z2}.$$

Як бачимо з виразу (4) для здійснення реконструкції крім зображень  $I_{\lambda j}$  необхідно визначити напрямки  $L_j$   $j=0,1,2$ . Якщо тріада напрямків визначена, то за одержаними виразами можна реконструювати похідні  $p$ ,  $q$ , що програмно реалізується засобами МАТЛАБ [14].

Таким чином запропонований метод реконструкції складається з двох етапів. На першому етапі отримуємо інформацію про напрямки кожного кута освітлення, а на другому за тріадою зображень здійснюємо реконструкцію об'єкта.

### Визначення напрямку світла

Припустимо, що у системі маємо джерело світла з параметрами  $L = (L_x, L_y, L_z)$ , які необхідно визначити.

Забезпечивши у системі тестовий зразок для визначення напрямку світла у вигляді тріади площин (ГП) з такими параметрами поверхні, що  $N_0 = (N_{x0}, N_{y0}, N_{z0})$ ,  $N_1 = (N_{x1}, N_{y1}, N_{z1})$ ,  $N_2 = (N_{x2}, N_{y2}, N_{z2})$ , запишемо інтенсивність відбиття поверхонь у вигляді системи трьох рівнянь

$$\begin{aligned} I_{\lambda 0} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_x N_{x0} + L_y N_{y0} + L_z N_{z0}); \\ I_{\lambda 1} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_x N_{x1} + L_y N_{y1} + L_z N_{z1}); \\ I_{\lambda 2} &= I_a + I_{p\lambda} k_d (L_x N_{x2} + L_y N_{y2} + L_z N_{z2}) \end{aligned} \quad (5)$$

в якій невідомі компоненти вектора  $L$ . Для опису вектора  $L$  скористаємось одиничною сферою  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , з центром у досліджуваній точці  $O$ . Досліджувана точка розміщена у центрі координат. Для поверхні  $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$  можна визначити похідну

$$P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\text{ctg} \theta, \quad \text{де } \theta - \text{кут напрямку світла в площині } XOZ,$$

$$Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\text{ctg} \varphi,$$

де  $\varphi$  - кут напрямку світла в площині  $YOZ$ . На цій основі вектор  $L$  набуває форми

$$L = \left( \frac{-P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{-Q}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}}, \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2 + 1}} \right). \quad (6)$$

Кожна компонента вектора  $L$  залежать від параметрів  $P$ ,  $Q$ , а отже система (5) залежать від них. Для усунення залежності моделі (5) від параметра  $k_d$  шляхом математичних перетворень запишемо:

$$\frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda 1} - I_a} = \frac{-PN_{x0} - QN_{y0} + N_{z0}}{-PN_{x1} - QN_{y1} + N_{z1}}, \quad (7)$$

$$\frac{I_{\lambda 0} - I_a}{I_{\lambda 2} - I_a} = \frac{-PN_{x0} - QN_{y0} + N_{z0}}{-PN_{x2} - QN_{y2} + N_{z2}}. \quad (8)$$

Отриману систему двох рівнянь (7), (8) з двома невідомими  $P$ ,  $Q$  шляхом алгебраїчних перетворень аналогічно виразам (3) і (4) трансформуємо у таку:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_{\lambda 1} - I_a)N_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{x1}; \\ A_{12} &= (I_{\lambda 1} - I_a)N_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{y1}; \\ A_{21} &= (I_{\lambda 2} - I_a)N_{x0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{x2}; \\ A_{22} &= (I_{\lambda 2} - I_a)N_{y0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{y2}; \\ B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a)N_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{z1}; \\ B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a)N_{z0} - (I_{\lambda 0} - I_a)N_{z2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Перед програмною реалізацією доцільно спростити вираз (9). Приймаємо, що елемент матриці  $A_{21} = 0$ . З цього випливає рівність нулю  $N_{x0}$  і  $N_{x2}$ . Крім того умова  $A_{12} = 0$  можлива лише, якщо  $N_{y0} = N_{y1} = 0$ . Тоді вектори нормалі приймають наступні значення

$$\begin{aligned} N_0 &= (0, 0, 1); \quad N_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta); \\ N_2 &= (0, \cos\phi, \sin\phi). \end{aligned}$$

Внаслідок цього, вираз (9) набуває вигляду

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де коефіцієнти

$$\begin{aligned} A_{11} &= (I_a - I_{\lambda 0}) \cos\theta; \\ A_{22} &= (I_a - I_{\lambda 0}) \cos\phi; \\ B_1 &= (I_{\lambda 1} - I_a) - (I_{\lambda 0} - I_a) \sin\theta; \\ B_2 &= (I_{\lambda 2} - I_a) - (I_{\lambda 0} - I_a) \sin\phi. \end{aligned} \quad (12)$$

Виявлено (рис. 1), що вектори  $N_1$  і  $N_2$  розташовані в двох ортогональних площинах, а  $N_0$  паралельний до осі  $Z$ .

Якщо підставити вирази (12) в (11) то отримаємо реконструкцію параметрів

$$\begin{aligned} P &= \operatorname{tg}\theta - \frac{I_{\lambda 1} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a) \cos\theta}, \\ Q &= \operatorname{tg}\phi - \frac{I_{\lambda 2} - I_a}{(I_{\lambda 0} - I_a) \cos\phi}. \end{aligned} \quad (13)$$

Загалом, якщо досліджувана ТП ізотропна у тривимірному просторі, то доцільно покласти  $\theta = \phi$ .

Розглянемо детальніше особливості алгоритму реконструкції параметрів  $P, Q$ .

### Комп'ютерне моделювання зображення тріади площин

Перехід до дискретних координат  $\{i, k\}$  дозволяє здійснити наступне:

- штучно створити цифрову модель ТП у вигляді масиву  $z_{ik}$ ;

- на основі  $z_{ik}$  визначити масиви похідних  $P_{ik}, Q_{ik}$ ;

- виконання попередніх умов є підґрунтям до дискретного запису векторів нормалі  $N_{ik} = N(P_{ik}, Q_{ik})$ ;

- на основі масиву  $N_{ik}$  визначити три вектори напрямків ТП  $N_j$ ;

- на основі  $N_{1x}$  ( $N_{2y}$ ) визначити кут  $\theta$  ( $\phi$ ).

Для формування зображень  $I_\lambda = I_\lambda(N_{ik}, L)$  використовується змінний напрямок освітлення  $L = L(P, Q)$ .

З врахуванням дискретизації координат - створити вектор напрямку  $L_{nm} = L(P_{nm}, Q_{nm})$ , де  $P_{nm}, Q_{nm}, \forall n = \overline{1, n_x}; \forall m = \overline{1, m_y}$  - масиви визначені в апертурі  $n_x m_y$ .

- виконання попередніх умов є підґрунтям до дискретного запису зображень  $I_{\lambda, nm} = I_\lambda(N_{ik}, L_{nm})$ . Зауважимо що на стадії комп'ютерного моделювання нехтуємо значенням інтенсивності фону  $I_a$ , а також додатково приймаємо, що дифузний коефіцієнт  $k_d$  є незмінним для змодельованого зразка ТП  $z_{ik}$ .

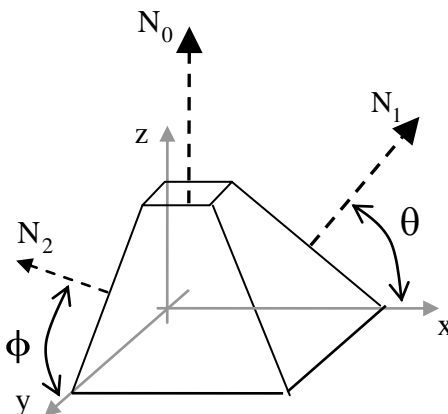


Рисунок 1 - Геометрична інтерпретація локалізації тріади площин з вектором нормалі до їхньої поверхні в тривимірному просторі

На додаток зауважимо, що вплив точності встановлення векторів напрямків ТП  $N_j$  в зображеннях (1) на реконструкцію на даному етапі не враховувався.

В подальшому моделюванні будемо враховувати вплив операції квантування.

**Реконструкція напрямку освітлення**

При виконанні попередніх умов зображення ТП  $I_{\lambda, nm}$  синтезуємо з індивідуальним кутом освітлення  $L_{nm}$ , який визначається похідними  $P_{nm}$ ,  $Q_{nm}$  на сфері.

З зображення  $I_{\lambda, nm}$  виділяємо три сегмента  $I_{j, nm}$ ,  $j=0,1,2$ , де кожний  $j$ -й сегмент містить частину зображення окремої  $j$ -ї площини.

Визначені кути  $\theta$ ,  $\phi$  дозволяють за системою (11) реконструювати похідні  $P_{nm}$ ,  $Q_{nm}$  вектору нормалі сфери.

Для оцінки якості реконструкції напрямку освітлення визначимо абсолютні похибки

$$\begin{aligned} \Delta P_{nm} &= \underline{P}_{nm} - P_{nm}, \\ \Delta Q_{nm} &= \underline{Q}_{nm} - Q_{nm}, \end{aligned} \quad \forall n = \overline{1, n_s} \quad (14)$$

$$\forall m = \overline{1, m_s}$$

**Програмна реалізація алгоритму**

Задамося апертурою поля  $n_x m_y$ , приймаючи, що  $n_x = m_y = 100$ .

Для параметрів  $P$  ( $Q$ ) сформуємо поверхню, елементи якої  $P_{nm}$  ( $Q_{nm}$ ) заповнюють апертуру поля  $n_x m_y$ . Параметр  $P_{nm}$  змінювався від -1,225, до 1,25 з кроком 0,025. Параметр  $Q_{nm}$  теж змінювався у діапазоні [-1,225, 1,25] з тим же самим кроком. Як показали результати практичних досліджень тривимірної реконструкції за тріадою зображень застосування такого діапазону є достатнє для неруйнівного контролю дефектів у випадку пітингів [10].

За виразом (6) розраховувався вектор напрямку  $L_{nm} = L(P_{nm}, Q_{nm})$ .

Для аналізу залежності зображення  $I(P, Q)$  від параметрів  $P, Q$  сформуємо масив зображень, елементи якого  $I_{nm}$  заповнюють апертуру поля  $n_x m_y$ . Для цього на основі масиву векторів нормалей  $N_{ik}$  та вектора напрямку  $L_{nm}$  за виразом (1) генерувалось зображення  $I_{nm}$ . Відеосигнал  $I_{nm}$  квантується. Для спрощення, доцільно, на стадії комп'ютерного моделювання, вважати інтенсивність фону відомою і покласти  $I_a = 0$ .

Для розрахунку відеосигналів  $I_{nm}$  додатково прийнято умову, що

$$I_{p\lambda} k_d = 250. \quad (15)$$

З масиву зображень  $I_{nm}$ , визначених в точках апертури  $n_x m_y$  на рис. 2 представлені п'ять основних зображень. Чотири зображення розташовані в кутах апертури, а п'яте зображення в центрі апертури. Ці синтезовані об'єкти та їх проміжні продукти представлені у спектрі жовтих, коричневих та чорних відтінків. Крім того, щоб з'ясувати взаємозв'язок або відмінність зображень детальніше, основні кількісні параметри цієї п'ятірки зображень представлені у таблиці.

Процедура реконструкції напрямку світла, на базі зображення ТП містять наступні основні операції.

З зображення ТП  $I_{nm}$  виділяються три  $j=0,1,2$  сегменти  $I_{j, nm}$  таким чином, що кожний сегмент містить інформацію про окрему частину лише однієї з трьох площин.

На основі сегментів  $I_{j, nm}$  та кутів  $\theta$  і  $\phi$ , які отримані на основі векторів напрямків двох бокових площин ТП, за виразом (13) визначаються параметри напрямку світла  $P_{n, m}$ ,  $Q_{n, m}$ . Реконструйовані параметри  $P_{n, m}$  і  $Q_{n, m}$  представлені на рис. 2 у спектрі червоних, синіх та зелених відтінків.

За виразом (14) визначимо абсолютну похибку реконструкції  $\Delta P_{nm}, \Delta Q_{nm}$ . Результати роботи програми по визначенню абсолютної похибки реконструкції параметрів напрямку світла  $\Delta P_{nm}, \Delta Q_{nm}$  для всіх точок апертури подані на рис. 2. Як бачимо, що застосувавши поворот в площині апертури відносно вертикальної осі то ці обидва розподіли подібні між собою. Крім того

Таблиця 1. Параметри п'яти основних зображень

n, m	Інтенсивність відбиття $I_{j, nm}$			Параметри напрямку світла	
	j-площина			$P_{nm}$	$Q_{nm}$
	0, верх	1, низ	2, ліва		
100,1	125	163	75	1,25	-1,225
100,100	124	74	74	1,25	1,25
50,50	250	240	240	0	0
1,1	125	164	164	-1,225	-1,225
1,100	125	75	163	-1,225	1,25

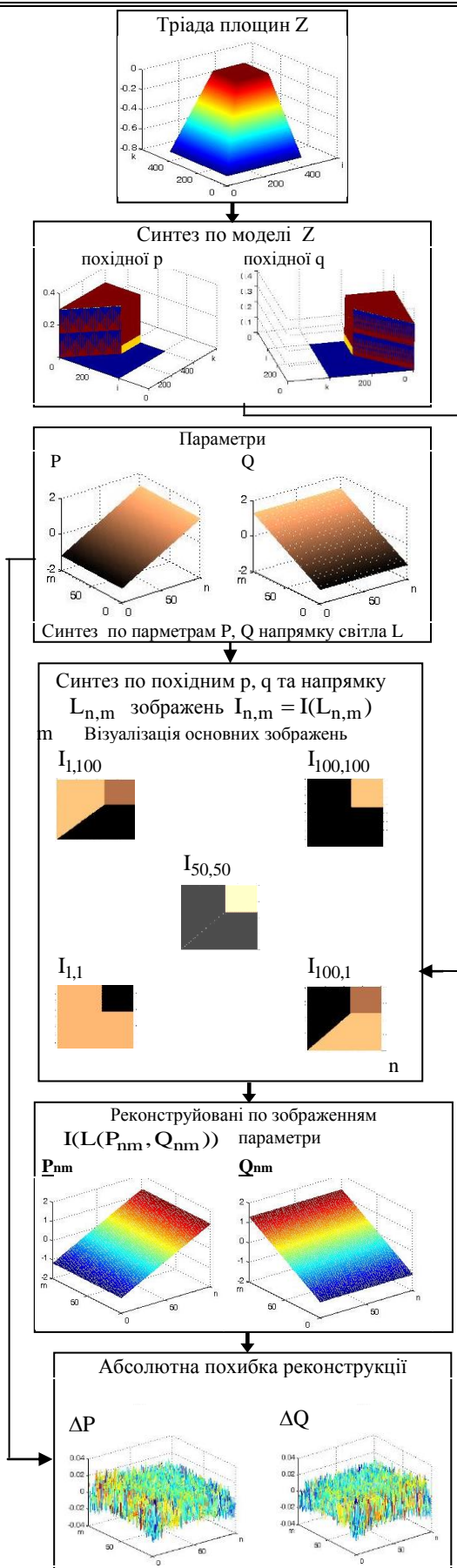


Рисунок 2 - Тривимірна реконструкція напрямку освітлення

видно, що обидві похибки, у першому наближенні, рівні між собою і приймають значення  $|\Delta P_{nm}| < 0,04$ ,  $|\Delta Q_{nm}| < 0,04$ .

На рис. 3 наведено проекцію розподілу похибки  $\Delta P_{nm}$  на площину  $\Delta P_n$ .

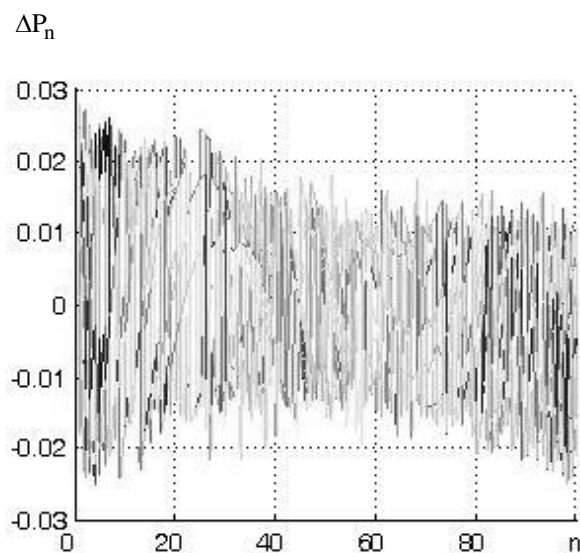


Рисунок 3 - Проекція розподілу похибки  $\Delta P_n$  на площину

З рис. 3 видно, що похибка лежить в межах

$$-0,025 \leq \Delta P_n \leq 0,028. \quad (16)$$

В центрі розподілу, в околі точки  $n=50$  ( $P=0$ ) похибка приймає наступні значення

$$-0,019 \leq \Delta P_n \leq 0,018. \quad (17)$$

В правій частині розподілу, в околі точки  $n=100$  ( $P=1,25$ ) похибка лежить в межах

$$-0,025 \leq \Delta P_n \leq 0,018. \quad (18)$$

Використовуючи проекцію розподілу похибки  $\Delta Q_{nm}$  на площину  $\Delta Q_m$  було встановлено, що похибки  $\Delta Q_m$  (з застосуванням підставлення  $\Delta Q_m = \Delta P_n$ ) приймають такі ж значення (16)-(18).

Оцінка точності (17) орієнтує на застосування основного напрямку освітлення в околі точки (50, 50), де  $(P,Q)=(0, 0)$ .

Оцінка точності (18) для  $\Delta P_n$  та (17) для  $\Delta Q_m$  вказує на необхідність застосування бокового напрямку освітлення в околі точки (100, 50), де  $(P,Q)=(1, 25, 0)$ .

А оцінка точності (17) для  $\Delta P_n$  та (18) для  $\Delta Q_m$  вказує на застосування другого бокового напрямку освітлення в околі точки (50, 100), де  $(P,Q)=(0, 1, 25)$ .

Отримана загальна оцінка точності дозволяє застосувати представлений метод для дистанційного визначення напрямку світла в тривимірній реконструкції поверхні за тріадою зображень.

Крім того на основі точності (17, 18) визначені зони оптимального розміщення напрямку світла в тривимірній реконструкції за тріадою зображень.

## Висновки

**Наукова новизна роботи** полягає в тому, що удосконалено метод тривимірної реконструкції за тріадою зображень. Вперше запропоновано розв'язок системи рівнянь тривимірної реконструкції здійснювати для випадку, коли кути освітлення мають довільне розташування у тривимірному просторі. Очевидно, що для реконструкції необхідна інформація про напрямки освітлення. Для визначення напрямків освітлення запропоновано новий метод дистанційної оцінки напрямку освітлення зображення тестового зразка, що має тріаду площин. Для функціональної залежності інтенсивності відбиття від вектора нормалі площини (інші параметри моделі відбиття фіксовані), похідні напрямку освітлення, що є вектором нормалі до поверхні одичинної сфери, описали у вигляді системи рівнянь реконструкції, створеної на основі інформації зображення тріади площин, затіненого зображення тріади площин та трьох векторів нормалі площин. Для перевірки працездатності запропонований метод реалізований у вигляді віртуальної системи обробки інформації, придатної для штучного генерування серії зображень тріади площин на основі дифузної моделі відбиття. При формуванні серії зображень змінювався напрямок освітлення, але кожне зображення серії синтезовано з фіксованим напрямком освітлення. Інформація зображення тріади площин поступає у систему рівнянь реконструкції, розв'язок якої є реконструкція похідних вектора нормалі сфери. Абсолютна похибка розрахункової частини методу дистанційної оцінки горизонтальної та вертикальної похідної вектора нормалі сфери становить  $[-0,025, 0,028]$ , коли похідні сфери належать діапазону  $[1,225; 1,25]$ .

**Практична цінність роботи** полягає в тому, що оскільки запропонована система тривимірної реконструкції не вимагає метрологічної корекції напрямків освітлення, то в перспективі, при розповсюдженні дії запропонованого методу на реконструкцію об'єктів з реальних зображень, це дозволить проводити тривимірну реконструкцію з вищою оперативністю і меншими технологічними затратами.

**Список літератури**

1. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice, 2<sup>nd</sup> Edition, Technology & Engineering, New York, 2002, 742 p.
2. Sharland S. M. A review of the theoretical modelling of crevice and pitting corrosion, Corrosion Science, 1987, V. 27. No. 3., pp. 289-323.
3. Szlarska-Smialowska Z. Pitting Corrosion of Metals, NACE, Houston, TX, 1986, pp: 120-145.
4. Wood W. A. Recent observations on fatigue fracture in metals, ASTM STP 237, 1958, pp. 110-121.
5. Maria E. Angelopoulou, Maria Petrou. Evaluating the effect of diffuse light on photometric stereo reconstruction, Machine Vision and Applications., V. 25, Issue 1, 2014, pp. 199-210
6. Yoshizawa T. Handbook of Optical Metrology –principle and applications,- CRC Press, New York, 2009, 744 p.
7. Zhang Z. High-resolution 3-D profilometry with binary phase-shifting methods, Appl. Opt., 50(12), 2011, pp.1753–1757.
8. Sinha Sudipta N., Scharstein D., Szeliski R. Efficient high-resolution stereo matching using local plane sweeps. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014, pp. 1219-1222.
9. Szeliski R.. Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer, New York, 2010, 655p.
10. Русин Б.П., Ануфрієва Н.Р., Грабовська Н.Р., Іванюк В.Г. Неруйнівний контроль стану поверхонь, уражених корозійними пітингами. Фізико- хімічна механіка матеріалів, 2013, №. 4, с. 90–96.
11. Русин Б.П., Іванюк Б.П., Капший О.В., Ануфрієва Н.П. Оцінка глибини тріщини за триадою зображень. Радіоелектроніка і інформатика, 2010, №2, с. 70–78
12. Lambert, J. H. (1760), Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, sumptibus viduae E. Klett,
13. Watanabe, S., Miyajima, K. Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions, ICIP 2001, pp.201-204.
14. Потемкин В.Х. Система MATLAB. М., Диалог-МИФИ, 1998, 350 с.

*Надійшла до редакції 10.03.2017***Н.Р. ГРАБОВСЬКА<sup>1</sup>, Б.П. РУСИН<sup>1</sup>, В.Г. ІВАНЮК<sup>1</sup>, Ю.В. ЛЫСАК<sup>1</sup>.**<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАНУ, Україна**ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СВЕТА В ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПО ТРИАДЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В статье рассмотрена проблема трехмерной реконструкции поверхности за триадой двумерных изображений с использованием ламбертовской модели отражения света. Для видеосъемки изображений предложено использовать три направления освещения. В составе реконструкции предложен метод дистанционного определения направления света. В методе на основе ламбертовской модели отражения света проводится анализ изображения триады тестовых плоскостей, которые имеют разные векторы нормали. В модели для описания направления света применен вектор нормали к поверхности единичной сферы, который в каждой точке однозначно определяется горизонтальной и вертикальной производными. Параметры модели, которыми являются и производные, описали в виде системы уравнений реконструкции, созданной на основе информации изображения триады плоскостей и трех векторов нормали плоскостей. Параметры модели определены за изменением пространственного положения вектора нормали плоскости с использованием дополнительного затенения и неизменного положения приемника.

**Ключевые слова:** трехмерная реконструкция, изображения, направление света.**N.R. HRABOVCSKA<sup>1</sup>, B.P. RUSYN<sup>1</sup>, V.H. IVANIUK<sup>1</sup>, YU.V. LYSAK<sup>1</sup>**

Karpenko Physico- Mechanical Institute of NAS of Ukraine (Ukraine).

**THE REMOTE EVALUATION OF ILLUMINATION DIRECTION IN THE THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION USING TRIAD IMAGES**

The article considers the method of three-dimensional surface reconstruction from the triad of two-dimensional images. This method is based on Lambertian reflection model. The 3D reconstruction method of the prospected surface is described step by step. It is proposed to use three directions of illumination for the recording process of the triad of images. It is proposed to use the personal direction of illumination for the recording process of every image. These directions of illumination are unknown.

The article considers the new method of illumination direction in reconstruction from the image of the triad of test planes. This method of 3D reconstruction of the prospected unknown direction of illumination is described step by step:

1. From an analytical point of view it is suggested to use function of the two angles. First angle of direction of illumination belong to the orthogonal plane of XZ. Second direction angle of illumination belongs to the orthogonal plane of YZ.

2. This method is based on Lambertian reflection model. That model is describe unknown albedo, two unknown angles of direction and known normal vector of the plane.

The first plane has vertical normal vector. In this case we get Lambertian model with vertical normal vector. It is the first reconstructions equation.

The second plane has lateral normal vector. This lateral direction of normal vector belongs to the orthogonal plane of XZ. In this case we get Lambertian model with lateral normal vector. It is the second reconstructions equation.

The third plane has lateral normal vector. This lateral direction of normal vector belongs to the orthogonal plane of YZ. In this case we get Lambertian model with lateral normal vector. It is the third reconstructions equation.

3. During the recording process every image of triad is applied prospected unknown direction of illumination. During the recording process image of triad of test planes is applied this prospected unknown direction of illumination.

4. After image recording starts reconstruction of two unknown direction angles. The reconstruction is described in the three stages: segmentation of pixel value for every image plane, three pixels values are send to three reconstructions equations, reconstruction of two angles of illumination directions.

An application example of the proposed method is given.

**Keywords: 3D reconstruction, direction of illumination.**

## REFERENCES

1. Marcus, P. (2002), *Corrosion mechanisms in theory and practice*, 2<sup>nd</sup> Edition, Technology & Engineering, New York, 742 p.
2. Sharland, S. M. (1987) "A review of the theoretical modelling of crevice and pitting corrosion", *Corrosion Science*, V. 27. No. 3., pp. 289-323.
3. Szlarska-Smialowska, Z. (1986), "Pitting Corrosion of Metals", NACE, Houston, TX, pp: 120-145.
4. Wood, W. A. (1958), "Recent observations on fatigue fracture in metals", ASTM STP 237, pp. 110-121.
5. Maria E. Angelopoulou, Maria Petrou. (2014), "Evaluating the effect of diffuse light on photometric stereo reconstruction", *Machine Vision and Applications*, V. 25, Issue 1, pp. 199-210
6. Yoshizawa, T. (2009), *Handbook of Optical Metrology –principle and applications*, - CRC Press, New York, 744 p.
7. Zhang Z., (2011), "High-resolution 3-D profilometry with binary phase-shifting methods", *Appl. Opt.*, 50(12), pp.1753–1757.
8. Sinha, Sudipta N., Scharstein, D., Szeliski, R. (2014), "Efficient high-resolution stereo matching using local plane sweeps". IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1219-1222.
9. Szeliski, R.. (2010), *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, New York, 655p.
10. Rusyn, B.P., Anufrijeva, N.P., Hrabovs'ka, N.R., Ivanjuk, V.G. (2013), Non-destructive control the state of surfaces staggered corrosive pits ["Nerujnivnyj kontrol' stanu poverhon', urazhenyh korozijnymy pityngamy"], *Fiz.-him. mehanika materialiv*. No. 4, pp. 90–96.
11. Rusyn, B.P., Ivanyuk, V.G., Kapshiy, O.V. Anufriyeva, N.P. (2010), "Crack depth estimation using triad of images" ["Ocinka glybiny trishhyny za triadoju zobrazhen'"] *Radioelektronika i informatika*. No. 2., pp. 70–78
12. Lambert, J. H. (1760), *Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, sumptibus viduae E. Klett,
13. Watanabe, S., Miyajima, K. (2001), "Detecting Building Changes Using Epipolar Constraint From Aerial Images Taken At Different Positions" *ICIP 2001*, pp.201-204.
14. Potemkin, V.H. (1998), *System MATLAB. Certificates manual*, Moscow, DIALOG MIFI. 350 p.