

УДК 621.385.833

НЕПАРАЛАКТИЧНИЙ МЕТОД ФОТОГРАМЕТРИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ

А. Шостак

Луцький національний технічний університет

Ключові слова: непаралактичний метод, РЕМ-зображення.

Постановка проблеми

Комп'ютерний аналіз зображень, отриманих за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ-зображень), сьогодні є одним з найактуальніших. Зростання інтересу до цієї проблеми зумовлене загальною тенденцією процесу комп'ютеризації у дослідженнях на мікронному та субмікронному рівнях [1, 2]. При цьому відкриваються нові можливості, які є додатковим стимулом швидшого переведення традиційних технологій на новий якісний рівень.

Автоматизовані системи для визначення кількісних характеристик мікрооб'єктів на зображеннях, таких як розмір, форма, орієнтація, взаємне розміщення тощо, можуть застосовуватися в багатьох прикладних галузях науки і техніки [3]. Сьогодні аналіз мікрозображень вже широко використовується для створення робототехнічних комплексів, систем контролю та управління виробництвом, в медицині, навігації, геодезії тощо. У деяких випадках вивчення мікросвіту, якщо неможливо виконати безпосередні інструментальні вимірювання, тільки кількісний аналіз РЕМ-зображень мікрооб'єктів дає змогу точно оцінити багато важливих показників [4].

Незважаючи на велику кількість робіт в цій галузі, все ще є невирішені проблеми, серед яких передусім необхідно назвати задачу ефективності повністю автоматизованої тривимірної реконструкції поверхонь за плоскими зображеннями та пов'язані з нею питання отримання інших об'ємних морфологічних характеристик досліджуваних мікрооб'єктів.

Мета досліджень – розроблення методу фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень, в якому відсутня операція вимірювання повздовжніх паралаксів. Передбачена можливість ефективної адаптації пропонованого методу з алгоритмами сучасної комп'ютерної графіки.

Зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями

Дослідження виконувались відповідно до програми DAAD “Східне партнерство” на факультеті № 6 машинної техніки та мехатроніки м. Лемго (Вища школа Оствестфалія Ліппе, Німеччина)

Виклад основного матеріалу проблеми

1. Принцип РЕМ-стереовимірювань.

Розглянемо суть тривимірної реконструкції в електронній мікроскопії за умов паралельного проектування. Для аналізу використовується система координат, в якій

початок координат розміщений на осі нахилу, а вісь Z паралельна до оптичної осі мікроскопа. Приймається також, що пучок, що падає (електронний зонд) паралельний в точках зразка і кут його конвергенції в точках зразка надзвичайно малий. Окрім цього, вибрана і зафіксована відповідна точка зразка, позначена символом A на рис. 1.

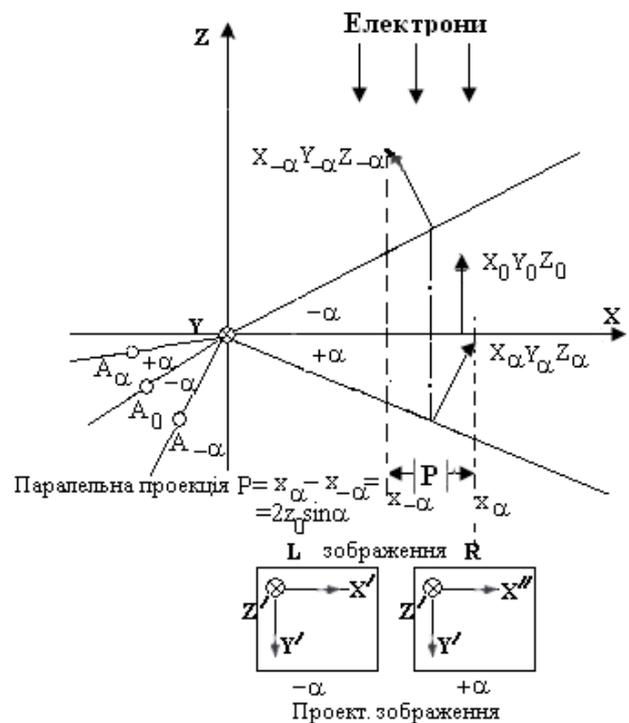


Рис. 1. До виведення формул (2, 3, 4)

На цьому рисунку координати $(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$ точки, розташовані на зразку, з кутом нахилу 0° подають як

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ y_\alpha \\ z_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Після простих перетворень рівняння (1) набуде вигляду:

$$x_0 - x_\alpha(A) = \frac{x_\alpha - x_\alpha(A) + (x_{-\alpha} - x_{-\alpha}(A))}{2 \cos \alpha} \quad (2)$$

$$y_0 - y_\alpha(A) = \frac{y_\alpha - y_\alpha(A) + (y_{-\alpha} - y_{-\alpha}(A))}{2} \quad (3)$$

$$y_0 - z_0(A) = \frac{x_\alpha - x_\alpha(A) - (x_{-\alpha} - x_{-\alpha}(A))}{2 \sin \alpha} z \quad (4)$$

Рівняння (2-4) показують, що відстані $x_\alpha - x_\alpha(A)$, $x_{-\alpha} - x_{-\alpha}(A)$ і т.д. дають відносно положення компоненти зразка щодо опорної точки A і результати не залежать від розміщення осі нахилу. Величини $x_\alpha - x_\alpha(A)$, $x_{-\alpha} - x_{-\alpha}(A)$ є відносними до паралаксу, який базується на опорній точці A .

У реальних умовах (якщо збільшення менше за $500\times$) апроксимація паралельної проекції не витримується [4, 5]. Пучки, які падають, не завжди паралельні між собою і кут їх конвергенції в місці розміщення зразка є кінцевим. В загальному випадку в неспокосованих зображеннях спостерігається зміна збільшення та розмиття його. Зміна збільшення залежить практично від умов знімання.

2. Точність стереовимірювань. Точність РЕМ-стереовимірювань великою мірою залежить від таких факторів [6, 5]:

- можливості системи з побудови достовірного зображення, її роздільної здатності, наявності спотворень і ступеня їх компенсації;
- можливостей вимірювальної системи;
- типу досліджуваного мікрооб'єкта, наявності чітких контурів в зображенні, а також від розмірів і форми мікрооб'єктів;
- проекційної геометрії тощо.

Подібно, як і в традиційній фотограмметрії, найбільше зацікавлення викликає точність визначення висот просторових координат Δz_0 , отримуваних із РЕМ-стереовимірювань:

$$\frac{\Delta z_0}{z_0} = -\frac{\Delta \alpha}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (5)$$

Похибки тривимірних координат (X_0, Y_0, Z_0) визначаються з цифрових стереозображень з нахилами $\pm \alpha^\circ$ (див. рис. 2).

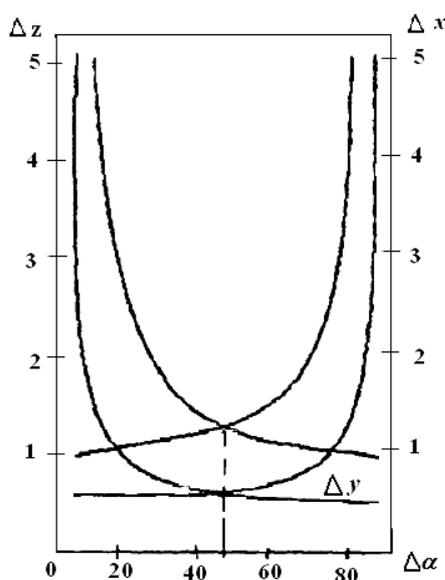


Рис. 2. Похибки тривимірних координат за кутом нахилу $\pm \alpha^\circ$

На рис. 2 показано похибки визначення тривимірних координат, що розраховані до цифрового зображення у випадку конвергентно-симетричних нахилів і показані в одиницях розміру елемента зображення, тобто в пікселях. Видно, що точність визначення z_0 істотно зменшується до кутів нахилу $\pm 90^\circ$. Такі нахили можливі в просвічувальній електронній мікроскопії. Величини похибок координат для z_α і x_α мають взаємодзеркальне відображення й однакові при кутах нахилу $\pm 45^\circ$. На рис. 2 крива 1 – похибки X_0, Y_0, Z_0 ; крива 2 – кути нахилу $\pm \alpha^\circ$.

3. 3-D фотограмметрична інтерпретація бінарних РЕМ-зображень. Для тривимірної реконструкції необхідно мати ряд цифрових РЕМ-зображень, коли одне із зображень має як мінімум 1024×1024 елементів розбиття (пікселів) і кожен елемент зображення – 256 рівнів сірого.

Радіометрична корекція тривимірної інформації, як правило, передбачає розв'язання головної задачі фотограмметрії – задачі ототожнення (ідентифікації) зображень. Щоб підвищити оперативність фотограмметричного опрацювання, спростимо цей етап. Після попередньої обробки РЕМ-зображень (вирівнювання контрастності) і порогової обробки отримуємо бінарне зображення.

Пропонуємо бінаризацію здійснювати у такий спосіб [7, 8]. На бінарному зображенні білі пікселі відповідають фону, а чорні – шуканому об'єкту. Щоб усунути (зменшити) шумові перешкоди, замість поелементної бінаризації здійснюватимемо цей процес за зонами (окремими ділянками). Для кожного піксела зображення розглядали окіл розміром b_R , визначаючи мінімальне $G_{B_{\min}}$ та максимальне $G_{B_{\max}}$ значення інтенсивності та розраховуючи відносно них границю перетворення:

$$L_B = \frac{L_A}{100} (G_{B_{\max}} - G_{B_{\min}}), \quad (6)$$

де L_A – відносна границя перетворення, %.

Приймали, що $L_A = 20\%$, а радіус адаптивного вікна дорівнює 100 пікселів.

Результатом бінарного перетворення є матриця $B = \{b_i\}$, кожен елемент якої

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{коли } g_{Fi} < L_B, \\ 1, & \text{коли } g_{Fi} \geq L_B. \end{cases} \quad (7)$$

З отриманими у результаті висококонтрастними РЕМ-зображеннями виконують скелетонізацію [9, 6].

Скелетонізоване зображення одержують так:

- 1) введення напівтонового РЕМ-зображення;
- 2) попередня обробка (корекція затемнення, медіанна фільтрація; лапласівська фільтрація, усереднення тощо);
- 3) бінарна обробка;
- 4) скелетонізація (потоншення);
- 5) напівавтоматична корекція;
- 6) виведення зображення.

Для збереження неперервності ліній скелетонізована лінія коректується також у напівтоновому режимі. Отримана лінія (ланцюжок точок) – це

центральна лінія досліджуваної структури (наприклад, волокна, “циліндри”, мікротріщини тощо).

Для визначення відповідних точок на цифрових зображеннях як опорні точки використовуються різні похилі зображення, наприклад, з нахилом $\pm\alpha^\circ$. Ці три скелетонізовані бінарні зображення (біт-площини) зображуються на екрані монітора мікроскопа, на якому найхарактернішу точку (точку відліку) вибирають як початок координат всіх нахилених зображень і вісь нахилу встановлюється точно паралельно до осі Y . Кожна біт-площина має різні рівні сірого. Спочатку вибирають будь-яку скелетонізовану лінію на кожній біт-площині і простежують неперервно, використовуючи методи напівавтоматичної перевірки після вказання початкової і кінцевої точок. Потім з координат скелетонізованих зображень при нахилі $\pm\alpha^\circ$ з використанням рівнянь (2)–(4) обчислюють координати X_0, Y_0, Z_0 (глибина) при нахилі 0° , враховуючи розбіжності. Якщо розбіжності в межах допустимої похибки, то координати запам'ятовуються і процедура продовжується для інших ділянок зображення. Практично допустима похибка встановлюється дещо більшою, ніж розрахунково-теоретична. При застосуванні високопрецизійних гоніометричних століків похибки кутів нахилу не враховуються.

Як показує практика, в загальному випадку за цією методикою неможливо визначити всі відповідні точки через явище перекриття. Тому, оскільки форма елементів мікроструктури проста, вибирається тільки ланцюжок центральних точок (наприклад, “циліндрів”, мікротріщин). Навіть в таких простих випадках потрібно більше (ніж 2) зображень для врахування явища перекриття.

Принципова схема рекомендованого стереознімання показана на рис. 3.

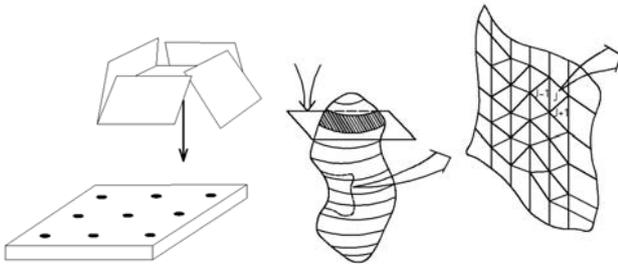


Рис. 3. Принципова схема фотографічного знімання в РЕМ

Рис. 4. Псевдоциліндрична форма зразків

Для перевірки надійності використано комп'ютерно-моделі зразки. Після отримання комп'ютерних РЕМ-зображень за умови паралельного проектування вони зазнавали цифрової обробки, після чого були виділені центральні точки просторових ліній окремих секцій зразка відповідно до програми скелетонізації. Після скелетонізації зображень (як мінімум трьох) точки суміщуються на екрані монітора. Для того щоб визначити всі відповідні точки навіть у найпростішому (“циліндричному”) зразку, необхідно використати дві пари стереозображень, в яких осі нахилу взаємно перпендикулярні.

4. Експериментальні дослідження. Для експериментальної апробації отримано комп'ютерно-моделі зразки. Одержані за умови паралельного проектування зображення проходили цифрову обробку, а потім було виділено центральні точки просторових ліній окремих секцій зразка відповідно до програми скелетонізації. Скелетонізовані зображення (як мінімум три) суміщуються на екрані монітора.

3-D-реконструкція мікрооб'єкта або його окремих частин полягає у визначенні просторових координат, на основі яких обчислюються морфометричні параметри: довжини просторових відрізків, площі та об'єми окремих секцій. Досліджувані зразки мали псевдоциліндричну форму (рис. 4). Дослідження таких зразків фотографічними методами, як відомо, пов'язане з певними труднощами. У наше завдання входило отримання певних рекомендацій щодо їх РЕМ-дослідження.

Щоб зробити висновок про точність методу, обмежимося визначенням довжин просторових відрізків за відомою формулою (8):

$$L = \sqrt{\sum_{n=1}^{N-1} \left\{ (x_n - x_{n+1})^2 + (y_n - y_{n+1})^2 + (z_n - z_{n+1})^2 \right\}} \quad (8)$$

У таблиці наведено результати відповідних обчислень довжин ліній. За одиницю визначення довжини відрізків (наприклад, P і Q) прийнята одиниця одного елемента зображення (пікселя); N – кількість точок.

Кут нахилу	Точки		Вибрані точки		Середні значення точок	
	Довжина, ps	Точки, N	Довжина, ps	Точки, N	Довжина, ps	Точки, N
$\pm 5^\circ$	493	293	448	76	427	98
$\pm 15^\circ$	455	292	404	123	384	139
$\pm 45^\circ$	429	292	385	141	371	147
0	292	293	Проектована довжина при нахилі 0°			
Дійсна довжина -363						

Як видно з табл. 1, розбіжності довжин просторових відрізків можуть бути значними (до 30 %) залежно від кутів одержання стереозображень. Такі великі розбіжності утруднюють отримання ортоскопічної (без спотворень) просторової моделі досліджуваних мікрооб'єктів.

Цей метод має переваги: по-перше, він достатньо точний і простий; по-друге, дослідник може отримати третє нахилене зображення і/або візуальне стереозображення, якщо необхідно.

На рис. 5, а наведена геометрія реконструкції циліндра при однакових кутах і однакових збільшеннях стереозображення. Просторова стереомодель не спотворена.

Рис. 5, б відображає асиметричний випадок за неоднакових кутів нахилу, що зумовлює загальний нахил стереозображення на кут Φ , який становить різницю між дійсним кутом нахилу і половинним кутом при симетричному нахилі. Рис. 5, в ілюструє приклад, коли мікрофотографії, що утворюють стереопару, отримані за різних збільшень. При цьому також спостерігається спотворення реконструйованого стереозображення.

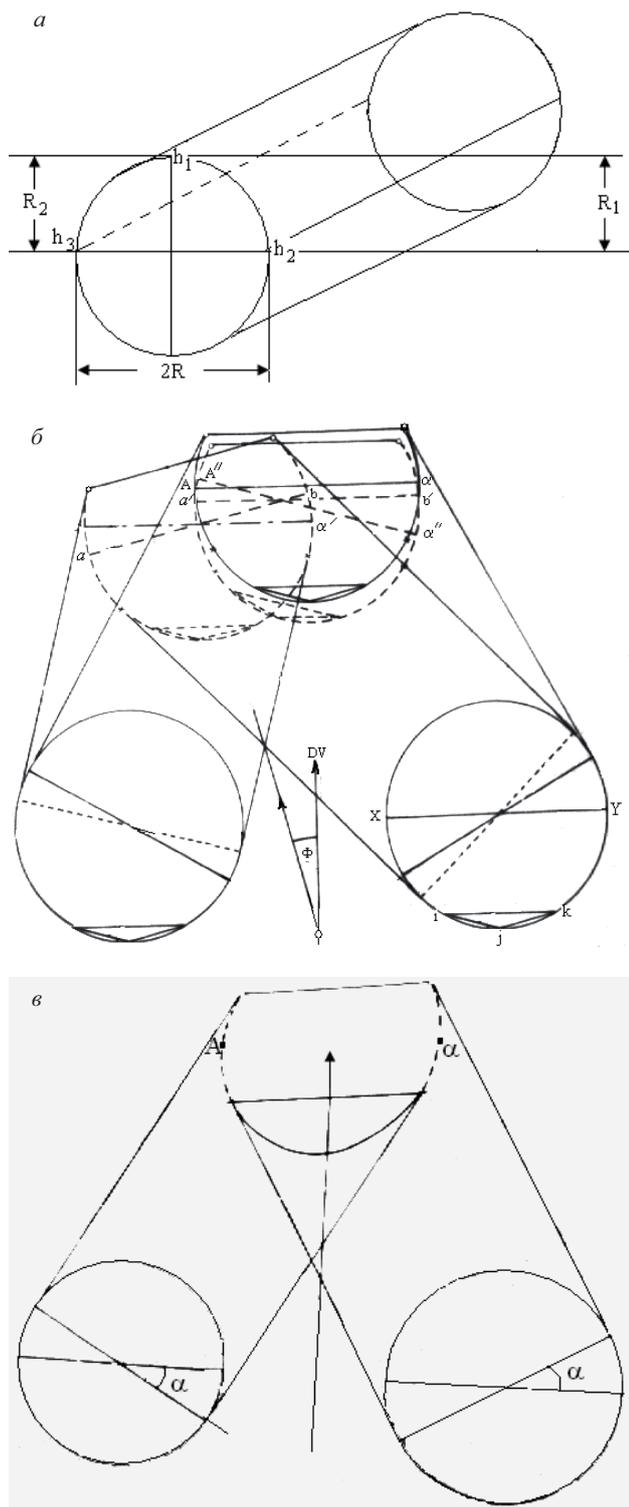


Рис. 5. Геометрія реконструкції циліндра

Вказані особливості необхідно брати до уваги спеціалістам-нефотограмметристам під час вивчення мікрооб'єктів циліндричної форми.

Висновки

1. Запропонований метод дає змогу здійснювати 3-D-реконструкції мікрооб'єктів без вимірювання паралаксів, тобто не розв'язуючи задачі ідентифікації відповідних точок РЕМ-стереозображень.

2. Метод є перспективним у поєднанні з сучасними засобами комп'ютерної графіки.

Література

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, З. Дудс, С. Эддинс / Пер. с англ. В.В. Чепыжева). – М.: Техносфера, 2006. – 612 с.
2. Дорожинський О.Л. Фотограмметрія / О.Л. Дорожинський, Р. Тукай. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. – 330 с.
3. Ясній П.В. Автоматизована оцінка полів деформації методом координатних сіток / П.В. Ясній, І.В. Коноваленко, П.О. Марущак // Фізико-хімічна механіка матеріалів, 2009. – № 2. – С. 130–136.
4. Мельник В.М. Кількісна стереомікрофрактографія: моногр. / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: Твердиня, 2019. – 457 с.
5. Іванчук О.М. Фотограмметричний метод оперативного опрацювання РЕМ-стереопар для кількісної оцінки мікроповерхонь твердих тіл / О.М. Іванчук // Вісник геодезії та картографії. – К., 1998. – № 2. – С. 51–53.
6. Tatsuo Arai and Kiyoshi Naha. Method of Three-Dimensional from HVTEM Stereo Images of Biological Materials // J/Electron Microsc. – Vol. 36. – № 4. – 1987. – С. 177–195.
7. Schenk T. Digital photogrammetry, 1998. – 500 p.
8. Автоматизований аналіз поверхневих трихін у конструкційних елементах / П.В. Ясній, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, Р.Т. Бішак // Фізико-хімічна механіка матеріалів, 2008. – № 6. – С. 83–88.
9. Алиевский Д.М. Алгоритмы скелетонизации линейных структур / Д.М. Алиевский, В.М. Алиевский, Р.М. Кадушников. – Екатеринбург: SIAMS, 2008. – С. 10–16.

Непаралактичний метод фотограмметричного опрацювання РЕМ-зображень

А. Шостак

Запропоновано новий метод 3-D-реконструкції мікрооб'єктів за їхніми РЕМ-зображеннями. Метод не передбачає використання процесів стереотоотоження. Виконана практична апробація.

Непаралактический метод фотограмметрической обработки РЭМ-изображений

А. Шостак

Предложен новый метод 3-D-реконструкции микрообъектов по их РЭМ-изображениям. Метод не предполагает использование процессов стереотождествления. Выполнена практическая апробация.

No-parallax method of photogrammetric processing of SEM-images

A. Shostak

A new method of 3D reconstruction of microscopic objects by their SEM-images is proposed. The method does not involve processes of identification. Made practical testing.