

КАРТОГРАФІЯ І АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

УДК 528.721.287:537.533.35

О. ІВАНЧУК¹, О. ТУМСЬКА²

¹Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38(068)0720575, ел. пошта: ivanchuk_oleh@ukr.net

²Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38(050)7455711, ел. пошта: ol.tums@gmail.com

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.050>

АВТОМАТИЗОВАНА ПОБУДОВА ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІКРОПОВЕРХНІ ОБ’ЄКТА ЗА РЕМ-СТЕРЕОПАРОЮ МЕТОДОМ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ОТOTOЖНЕННЯ ІДЕНТИЧНИХ ДІЛЯНОК

Запропоновано спосіб зсуву параметрів, який зменшує пошук та ймовірність помилкової ідентифікації і, крім того, прискорює процедуру ототожнення в парі зображень. Отримано формули для розрахунку координат центру вікна пошуку та відповідної точки на правому зображенні на k -му кроці процесу зсуву. Для оцінювання точності обчислені різниці між висотами тестової моделі і висотами, інтерпольованими в тих самих точках з використанням створених моделей. Для мікроповерхні зразка хромованої сталі близько 79 % точок, а для мікроповерхні зразка лесового ґрунту близько 70 % точок містяться в межах допуску $\Delta Z \leq \pm 2$ мкм. Вперше в Україні розроблено метод автоматизованого пошуку відповідних точок стереопари на основі зсуву параметрів з урахуванням особливостей РЕМ-знімання. На основі вищевказаного методу розроблено технологію автоматизованого створення цифрової моделі мікроповерхні об’єкта за стереопарою РЕМ-зображень і створено авторське програмне забезпечення, яке показує її ефективність і доцільність. Можливість відтворювати мікрорельєф поверхні об’єкта автоматизовано з використанням стереопари цифрових РЕМ-зображень відповідно до вимог точності визначення просторових координат точок та структури мікроповерхні об’єкта.

Ключові слова: РЕМ-стереопара, кореляційне ототожнення, точність, 3D-модель.

Вступ

Сучасні високотехнологічні галузі виробництва і науки, зокрема машинобудування, авіабудування, мікроелектроніка, матеріалознавство, геологія (вивчення мікроструктури геологічних порід, ґрунтів), медицина та інші потребують отримання високоточної кількісної інформації про метричні параметри мікроповерхні.

Методи РЕМ-фотограмметрії дають змогу створювати цифрові моделі мікроповерхонь експериментальних об’єктів за їх РЕМ-стереозображеннями і отримувати їх кількісні параметри (профілі поверхні, величини її деформації, розміри мікротріщин, площу мікроповерхні тощо) [Baghaie et al., 2017; Bałamucki et al., 2006; Cornille et al., 2003; Іванчук, 2019; Kudryavtsev, 2017; Marturi et al., 2013; Мельник і ін., 1999, 2009, 2010, 2017; Nicolls, 2004; Шостак, 2012; Tafti, 2016; Волошин, 2004; Zhu et al., 2011]. Використання

цифрових моделей дає змогу візуально подати структуру мікроповерхонь, змінюючи кут, точки огляду, проекції, масштаб.

Як правило, оброблення РЕМ-стереопар мікрооб’єктів дослідження, тобто вимірювання їхніх характерних точок на ЦФС “Дельта” в режимі стерео займає чимало часу. У цьому разі після 2–3 годин роботи очі оператора втомлюються і точність вимірювання знижується.

Тому завдання автоматизації вимірювання РЕМ-зображень і створення цифрової моделі мікроповерхні об’єкта – актуальне завдання сучасних досліджень у галузі нанотехнологій. Ця проблема стала метою нашого дослідження.

Короткий огляд публікацій, пов’язаний з метою досліджень

Основою автоматичного методу тривимірного відновлення об’єкта за стереопарою зображень є алгоритми виявлення і ототожнення точок зображення. Для кращого

ототожнення необхідно вибрати точки, околиці яких мають відмінні риси. Такі точки називають точками інтересу або ключовими точками. Огляд і аналіз наявних алгоритмів виявлення точок інтересу поданий у [Lowe, 2004; Krig, 2014; Tafti, 2016; Kudryavtsev, 2017; Popielski, & Wróbel, 2012], їх порівняння наведено в [Mikolajczyk, & Schmid, 2005; Супрун, 2016; Salahat, & Qasaimeh, 2017].

Вчені давно вивчають питання щодо автоматизації вимірювань зображень у фотограмметрії та інших науках, і їх відображено в бібліографіях [Визильтер, Желтов, 2010; Горбачёв, 2014; Дорожинський, Тукай, 2008].

Опрацювання РЕМ-стереозображень має свою специфіку. Вперше питання автоматизації вимірювань в Україні вивчав проф. В. М. Мельник результати досліджень якого подано в монографії [Мельник, Шостак, 2009]. Останніми роками ці питання відображені у працях його учнів [Мельник Ю., 2013, Іванчук, Тумська, 2016–2019]. Пропонована авторами стаття є продовженням розвитку цієї актуальної теми.

Метод автоматичного генерування цифрової моделі мікроповерхні об'єкта

РЕМ-стереопари отримують із нульового базису, нахиляючи гоніометричний столик із досліджуванним об'єктом під фіксованими кутами вздовж осі x РЕМ-зображення. У цьому разі виникає поздовжній паралакс точок, завдяки якому можна отримати висоти точок мікроповерхні об'єкта. Внаслідок ортогонального сканування електронним променем мікроповерхні практично відсутній поперечний паралакс точок стереопари РЕМ.

Автори розробили спосіб побудови цифрової моделі мікроповерхні об'єкта, оснований на генерації щільного набору вхідних точок на лівому зображенні РЕМ-стереопари і пошуку відповідних точок з використанням методу кореляційного ототожнення. Оскільки поперечного паралакса майже немає, пошук відповідних точок на правому РЕМ-зображенні виконують, зсуваючи параметри уздовж осі x [Визильтер, 2010]. Це означає: а – генерація вхідних точок на краях (край – це межа між двома ділянками, з різними яскравостями) і на

контурах зображення; б – пошук відповідних точок на основі зсуву параметра вздовж осі x на величину з можливого діапазону паралаксів; в – обчислення просторових координат отриманих точок; г – оцінювання точності створеної моделі з використанням тестової моделі. Точність побудованої моделі оцінювали, порівнюючи з тестовою моделлю за стандартним відхиленням (СКВ) і за максимальною похибкою перевищення.

Алгоритм створення цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за РЕМ-стереопарою складається з таких етапів:

1. Побудова Гауссової піраміди РЕМ-зображень.
2. Генерація вхідних точок на лівому зображенні верхнього рівня піраміди.
3. Розрахунок координат початкових центрів пошукових вікон на правому зображенні.
4. Формування послідовності зсувів центрів пошукових вікон на правому зображенні.
5. Знаходження відповідних точок у парі РЕМ-стереозображень на верхньому рівні піраміди.
6. Уточнення координат відповідних точок за рівнями піраміди зображень.
7. Розрахунок просторових координат точок X, Y, Z мікроповерхонь об'єкта.
8. Побудова цифрової *grid* моделі мікроповерхні об'єкта.
9. Усунення аномальних підвищень за допомогою адаптивної медіанної фільтрації.
10. Оцінювання точності створення цифрової моделі мікроповерхні з використанням тестової моделі.

Генерація вхідних точок на РЕМ-зображенні

Вхідні точки згенеровано на лівому верхньому рівні зображення піраміди з використанням операторів Собеля і глобального порога Отсу [Otsu, 1979] для отримання відповідно точок країв і на контурах ділянок. Точки на контурах ділянок розріджують із використанням морфологічного градієнта [Гонсалес, 2005, 2006]. Результати цих операцій після зменшення кількості точок до заданого діапазону об'єднані в один масив. Можна

очікувати, що в околиці точок, отриманих вищевказаним способом, наявні локальні особливості. Отже, зростає ймовірність знаходження відповідної ділянки на правому зображенні за методом кореляційного ототожнення.

Формування послідовності центрів зміщення вікон пошуку на правому РЕМ-зображенні

Якщо мінімальні й максимальні значення паралакса відомі, то значення зміщення p_k центрів вікна пошуку уздовж осі x визначається як

$$p_k = p_0 + k \cdot \Delta p_x; \quad (1)$$

$$n = \text{round}((p_{\max} - p_{\min}) / \Delta p_x), \quad (2)$$

де $k = 1, 2, \dots, n$; n – кількість зсувів; p_0 – величина початкового зсуву; Δp_x – крок зсуву по осі x (значення вибирають у діапазоні 3–7 пікселів); $p_{\min}$, $p_{\max}$ – мінімальне і максимальне значення паралакса.

Якщо рельєф мікроповерхні характеризується зростальною функцією $Z(h)$, то як початкове значення зсуву вибираємо $p_0 = p_{\max}$, в іншому разі $p_0 = p_{\min}$. Значення зсуву p_k центрів вікна пошуку задовольняє умовам

$$\begin{cases} Z(h) \geq 0 : \Delta p_x \leq 0, p_{\max} = p_0 > p_1 > \dots > p_k > \dots > p_n; \\ Z(h) < 0 : \Delta p_x > 0, p_{\min} = p_0 < p_1 < \dots < p_k < \dots < p_n. \end{cases} \quad (3)$$

У разі, якщо межі паралакса невідомі, їх можна знайти в інтерактивному режимі, змінюючи значення $p_{\min}$ і $p_{\max}$ і спостерігаючи на екрані проміжні результати процесу зміщення.

Обчислення значень координат початкових центрів вікон пошуку на правому РЕМ-зображенні

Для згенерованих точок відповідні точки розраховані з урахуванням зміщення за кут нахилу правого зображення

$$\left. \begin{aligned} x_{C_{0,i}} &= \text{round}((x_{li} - x_{Ol}) \cdot \cos \alpha_n + x_{On}) \\ y_{C_{0,i}} &= \text{round}((y_{li} - y_{Ol}) + y_{On}) \end{aligned} \right\}, \quad (i=1,2, \dots, N), \quad (4)$$

де N – кількість згенерованих точок; операція $\text{round}(\dots)$ означає заокруглення виразу в дужках до найближчого цілого числа; O_l (O_n) – початок системи координат в центрі лівого (правого) зображення; α_n – кут нахилу правого

зображення. Знайдені точки прийнято за початкові центри $C_{0,i}$ вікон пошуку W_i на правому зображенні. Розмір вікна пошуку W вказано в пікселях $m \times n$, де значення m дорівнює значенню зсуву для непарного значення $m = \Delta p_x$ і для парного $m = \Delta p_x + 1$.

Отже, ділянка пошуку і ймовірність помилкової ідентифікації зменшуються. Щоб уточнити y -координату, вікно пошуку задають у формі прямокутника або квадрата для невеликих розмірів вікна.

Знаходження відповідних координат точок на правому РЕМ-зображенні за кореляцією

Центри вікон пошуку на правому зображенні послідовно зміщено уздовж осі x параметрами зсуву, які вибрано з діапазону можливих значень x -паралакса, зумовлених рельєфом поверхні. Коефіцієнт кореляції обчислюють на кожному етапі процесу зсуву між вікном шаблону, центрованим в згенерованій точці на лівому зображенні, і аналогічною ділянкою, центр якої переміщався від пікселя до пікселя у вікні пошуку на правому зображенні. Відповідною точкою у вікні пошуку є точка з максимальним значенням коефіцієнта кореляції $r_{\max}$, якщо його значення відповідає критерію кореляції R_c . Координати центру вікна пошуку на k -му кроці процесу зсуву задають співвідношеннями:

$$\begin{aligned} x_{C_{k,i}} &= x_{C_{0,i}} + p_k, \\ y_{C_{k,i}} &= y_{C_{0,i}}, \end{aligned} \quad (5)$$

де p_k – величина зсуву в допустимому діапазоні значень паралаксів.

Координати відповідної правої точки на k -му кроці процесу зсуву такі:

$$\begin{cases} x_{r_i}^{(k)} = x_{C_{k,i}} + \delta_{x_i} \\ y_{r_i}^{(k)} = y_{C_{k,i}} + \delta_{y_i} \end{cases}, \quad i=1,2, \dots, N_{k,1}, k=1,2, \dots, n, \quad (6)$$

де $(\delta_{x_i}, \delta_{y_i})$, $|\delta_{x_i}, \delta_{y_i}| \leq \frac{m}{2}$ – координати точки відносно центру вікна пошуку $C_{k,i}$, а $N_{k,1}$ – кількість точок, в яких знаходиться коефіцієнт кореляції $r_{\max_i} \geq R_c$. $N_{k,2}$ – кількість точок, які

не задовольняють вищевказаній умові, і які проходять на наступний крок зсуву. Процес завершується, якщо кількість зсувів дорівнює n або $N_{k,2} = 0$. Множину пар точок $(x_l, y_l, x_n, y_n)_i$, що задовольняють критерію кореляції, об'єднують і записують у масив результатів.

Зверніть увагу, що деякі з множин можуть бути порожніми. Після процедури зміщення всі

точки, які відповідають критеріям кореляції, переходять на наступний рівень піраміди зображень для уточнення.

На рис. 1 показано послідовність зміщення центрів вікон пошуку уздовж осі x для випадку додатних значень висот (значення паралаксу зменшуються із додатних до від'ємних значень).

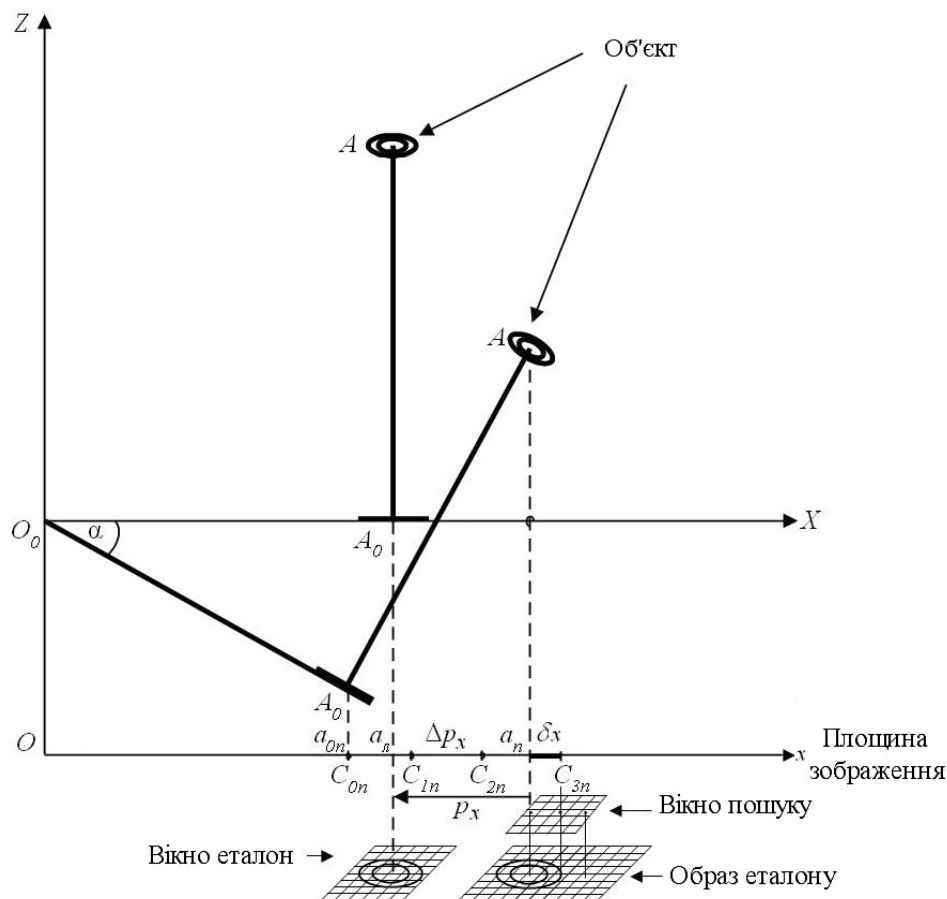


Рис. 1. Зміщення центру вікна пошуку уздовж осі x на правому зображенні для випадку нормально-конвергентного РЕМ-знімання ($\alpha_n = 0^\circ$, $\alpha_n \neq 0^\circ$): a_l – центр вікна еталону (шаблону) на лівому зображенні (a – проекція тривимірної точки A); a_{0r} – початковий центр C_{0n} вікна пошуку на правому зображенні (a_{0r} – проекція тривимірної точки A_0); C_{in} ($i = 1, 2, 3$) розташування центрів вікон пошуку на правому зображенні; p_x – параметр зсуву; δx – координата відповідної точки щодо C_{3r} , p_x – шуканий паралакс

Просторові умовні координати точок мікроповерхні X , Y , $Z(h)$ визначають за формулами нормально конвергентного випадку РЕМ-знімання [Іванчук, 2016]. Під час розрахунку просторових координат враховано значення геометричних спотворень, властивих РЕМ-знімку [Іванчук, 2015].

На основі отриманих просторових координат створених точок побудовано *grid*-

модель мікроповерхні в пакеті Surfer. Враховуючи високу щільність згенерованих вхідних точок, для побудови *grid*-моделі обраний простий і швидкий метод *Inverse Distance to a Power*, який для локальної інтерполяції забезпечує вимоги до точності визначення просторових координат.

Щоб усунути аномальні значення *grid*-моделі мікроповерхні, використано адаптивний

медіанний фільтр [Baghaie et al., 2017]. Перед фільтрацією *grid*-модель перетворено в зображення, де значення висот відображено пропорційно значенням яскравості в діапазоні [0,1].

Оцінювання точності цифрової моделі поверхні мікрорельєфу об'єкта за допомогою тестової моделі

Тестова модель формується з просторових координат точок мікроповерхонь X , Y , $Z(h)$, мкм, обчислених із координат точок, виміряних вручну на лівому і правому РЕМ-зображеннях стереопари. Вимірювання стереозображень виконано рівномірно по всьому полю мікроповерхні в характерних точках [Іванчук, Хрупін, 2012].

Щоб оцінити точність моделювання, висоти в координатах X , Y точок тестової моделі інтерпольовані з використанням побудованої *grid*-моделі мікроповерхні. Висоту точки $Z_{int}(X, Y)$ визначено за висотою чотирьох найближчих вершин комірки сітки методом білінійної інтерполяції [Дорожинський, Тукай, 2008]. Номери рядка і стовпця нижнього лівого кута комірки сітки для точки з координатами X , Y розраховують так:

$$i = \left\lceil \frac{X}{\Delta X} \right\rceil + 1; \quad j = \left\lceil \frac{Y}{\Delta Y} \right\rceil + 1, \quad (7)$$

де значення в квадратних дужках означає найбільше ціле число, яке не перевищує частки від ділення; ΔX , ΔY – відповідно ширина і висота комірки. Вершини комірки пронумеровані проти годинникової стрілки, починаючи з нижнього лівого кута. Тоді координати точки 1 дорівнюють:

$$X_1 = (i - 1) \cdot \Delta X, \quad Y_1 = (j - 1) \cdot \Delta Y \quad (8)$$

Значення висоти $Z_{int}(X, Y)$ інтерполюють зі значень її сусідів, використовуючи співвідношення:

$$Z_{int} = Z_1 + \frac{Z'_4}{\Delta X} \cdot X' + \frac{Z'_2}{\Delta Y} \cdot Y' + \frac{Z'_3 - Z'_2 - Z'_4}{\Delta X \cdot \Delta Y} \cdot X' \cdot Y' \quad (9)$$

де $X' = X - X_1$, $Y' = Y - Y_1$, $Z'_i = Z_i - Z_1$, $i = 2, 3, 4$.

Точність оцінено за різницею між значеннями висот, які розраховані з використанням виміряних вручну координат точок тестової моделі Z_{test} і інтерпольованої Z_{int} за мікроповерхнею побудованої моделі сітки.

$$\Delta Z = Z_{test} - Z_{int}. \quad (10)$$

Для нормально-конвергентного випадку РЕМ-знімання теоретичну точність отримання просторових координат X , Y , Z (у мм) мікроповерхні об'єктів визначають за виразом [Іванчук, 2016]

$$m_{X(Y)} = m_{x(y)} / M,$$

$$m_{Z(h)} = m_{\Delta p(x)} / (2M \cdot \sin(\alpha_n / 2)) \quad (11)$$

якщо $M = \text{Const}$, M – збільшення (масштаб) РЕМ-зображення, α_n – кут нахилу правого зображення.

Запропонований метод реалізований в авторській програмі для моделювання мікроповерхні, написаної в системі MatLab.

Експериментальні дослідження та результати

Для дослідження використано дві стереопари цифрових РЕМ-зображень, а саме: цифрові зображення зразка хромованої сталі з деформованою поверхнею і зображення зразка лесового ґрунту.

Створення цифрової моделі мікроповерхні за стереопарою РЕМ-зображень зразка хромованої сталі

Характеристики РЕМ-зображень зразка хромованої сталі

Цифрові зображення зразка хромованої сталі з деформованою поверхнею отримано на JSM 7100F (JEOL) зі збільшенням $750\times$. Ліве РЕМ-зображення отримано в горизонтальному положенні зразка (рис. 2, а, $\alpha_n = 0^\circ$), а праве зображення отримано нахилом гоніометричного столу на кут $\alpha_n = 8^\circ$ уздовж осі x . Розмір лівого (правого) зображення становить 1024×1280 пікселів (96×120 мм). Розмір пікселя становить $0,099375$ мм, приблизно $0,1$ мм. Розрізнення становить $270,94$ dpi.

Генерація вхідних точок на РЕМ-зображенні зразка хромованої сталі

На рис. 2 показано процес генерації вхідних точок на лівому зображенні верхнього рівня піраміди з використанням операторів Собеля і глобального порога Отсу.

Для згенерованих точок відповідні точки визначені з урахуванням зсуву за нахил правого зображення (4).

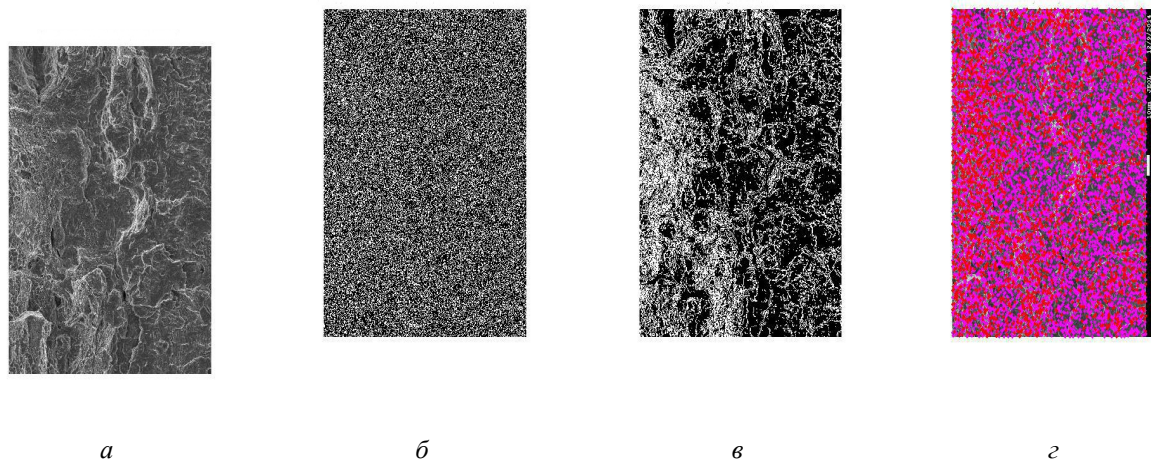


Рис. 2. Ілюстрація генерації точок на лівому зображенні: а – початкове ліве зображення (1024x1280 пікселів); б – точки країв, отримані з порогом $T = 3$ (415776 точок); в – точки на межах областей (924112 точок) після проріджування областей з використанням морфологічного градієнта (376004 точки); г – результат об'єднання б) і в) після зменшення до заданого діапазону кількості точок (10057: 3009 червоних меж; 7048 пурпурних країв)

*Зсув параметрів на правому зображенні
РЕМ-стереопари зразка сталі*

На рис. 3 показано процес послідовного зсуву центрів вікон пошуку на правому зображенні уздовж осі x параметрами зсуву, які обрані з діапазону можливих значень x -паралаксів. Для кожної згенерованої точки обчислено нормалізований коефіцієнт кореляції між вікном шаблону і подібною областю, центр якої переміщався від пікселя до пікселя у вікні пошуку на правому зображенні. Точки, для яких максимальний коефіцієнт кореляції не задовольняв заданому критерію, зміщувались на наступний параметр зсуву з заданого набору. Після процедури зміщення всі точки, що задовольняють критерій кореляції, переходять на наступний рівень піраміди зображень для уточнення.

Після об'єднання всіх точок, що задовольняють критерію кореляції, кількість згенерованих точок (10057) зменшилася в 1,3 раза. (Розмір вікна шаблону 17x17 пікселів, розмір вікна пошуку 5x5 пікселів; критерій кореляції $R_c = 0,7$). Швидкість обчислень в системі Matlab в режимі інтерпретації для вхідного зображення становила близько 18 точок / с. Щоб уточнити координати відповідних точок на правому зображенні

зразка сталі, виконаний перехід до детальнішого нульового рівня піраміди зображень [Горбачёв, 2014]. На 0 рівні Гауссової піраміди ліві і праві вхідні зображення розширені удвічі, відповідно, значення координат точок подвоїлися [Гонсалес, 2006]. Для центрів вікон пошуку взяті відповідні точки, знайдені на 1 рівні піраміди зображень. Унаслідок фільтрації з критерієм кореляції $R_c = 0,7$ кількість точок на 0 рівні піраміди зменшилася на 0,4 %. Параметри опрацювання на 0 рівні піраміди такі: розміри вікон в пікселях: шаблону 25x25, пошуку 21x21; критерій кореляції $R_c = 0,7$. За цими параметрами швидкість обчислень в системі Matlab в режимі інтерпретації становила приблизно 5 точок / с.

*Створення 3D-моделі мікроповерхні
зразка сталі*

3D-моделі мікроповерхні зразка сталі, побудовані на основі просторових координат, визначених на 1 і 0 рівнях піраміди зображень, представлені на рис. 4. Просторові координати точок мікрорельєфу поверхні розраховано з врахуванням значень геометричних спотворень, властивих РЕМ-знімку [Іванчук, Тумська, 2017]. Щільність отриманих точок на 1 і 0 рівнях піраміди зображень складає 0,41 точок/мкм.

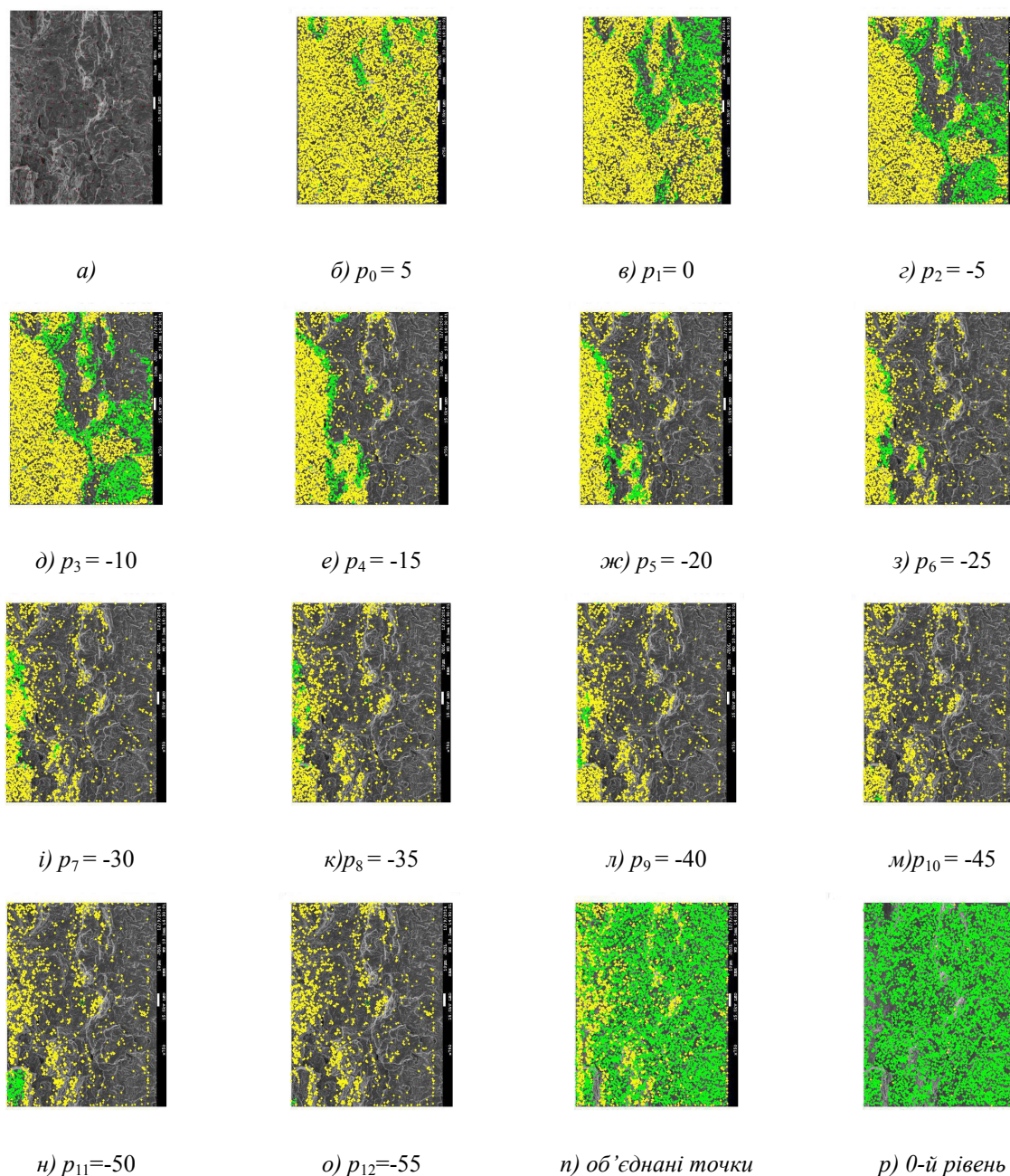


Рис. 3. Ілюстрація процесу зміщення центрів вікон пошуку на правому зображенні РЕМ-стереопари зразка сталі і результати кореляційного ототожнення (зелені в допуску $R_c = 0,7$, жовті – ні): а – початкове праве зображення, б–о – результати послідовного зсуву вздовж осі x на 5 пікселів в діапазоні паралаксів від $p_0 = 5$ до $p_{12} = -55$; п – об'єднані точки, р – уточнені місцезоположення відповідних точок на 0-му рівні піраміди зображень

Бачимо, що тривимірна модель на 0 рівні піраміди зображень гладша (рис. 4, б), ніж на 1 рівні піраміди (рис. 4, а). Щоб усунути аномальні висоти, адаптивна медіанна фільтрація застосована до *grid*-моделей, отриманих на 1 і 0 рівнях піраміди. Для цього *grid*-моделі перетворені в зображення.

Оцінювання точності тривимірної моделі мікроповерхні взірця хромованої сталі

Щоб оцінити точність, обчислено різниці між висотами тестової моделі й висотами, інтерпольованими в тих самих точках із використанням створених моделей (10). Тестова модель взірця хромованої сталі створена на основі вимірюваних вручну 250 точок. Розподіл різниць ΔZ за п'ятьма класами до і після адаптивної медіанної фільтрації показано на рис. 5.

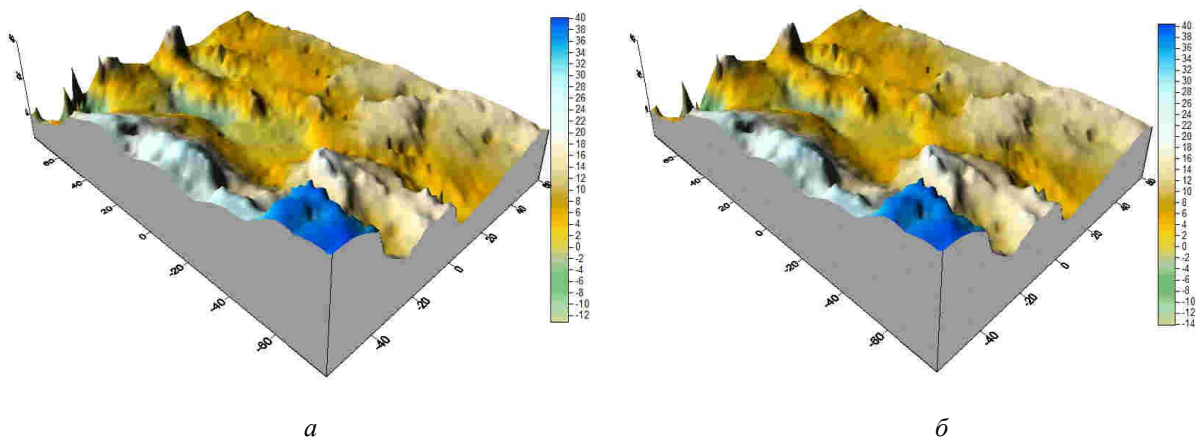


Рис. 4. Тривимірні моделі мікроповерхні зразка сталі (розмір сітки 100x76), розраховані за даними, отриманими на 1 (а) та 0 (б) рівнях піраміди зображень

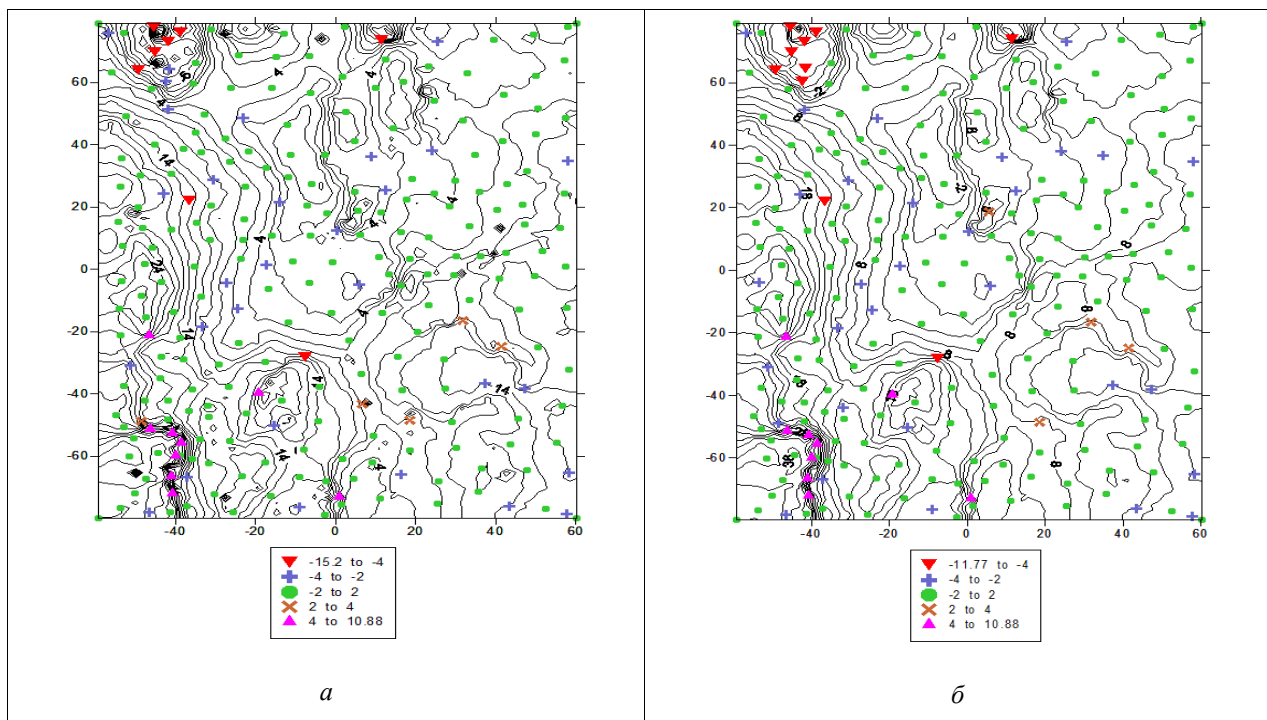


Рис. 5. Мікроповерхня зразка хромованої сталі в горизонталях, масштаб 750^x. Символи показують відмінності між висотами тестової моделі та інтерпольованими з використанням побудованих grid-моделей до (а) і після (б) адаптивної медіанної фільтрації. Горизонталі проведені через 2 мкм

Аналіз розподілу Z за п'ятьма класами показує, що кількість точок до і після застосування адаптивної медіанної фільтрації в діапазоні $Z = \pm 2$ мкм становить близько 79 % як на 1, так і на 0 рівнях (рис. 5). Майже 13 % мають похибку в межах $\pm 2 \div \pm 4$ мкм. Отже, приблизно 92 % точок розташовані в межах $2m_{Z(h)}$. Значення апіорної точності визначення

висоти мікроповерхні точок взірця сталі становить $m_{Z(h)} = 0,96$ мкм, для $m_x = 0,1$ мм, $M = 750x$. [Іванчук, 2019].

Створення цифрової моделі мікроповерхні за РЕМ-стереопарою зображень зразка лесового ґрунту. Характеристики стереопари цифрових РЕМ-зображень зразка лесового ґрунту.

Зображення зразка лесового ґрунту отримані на РЕМ Hitachi S-800 зі збільшенням $1000\times$, записані на фотоплівку з геометричним розрізненням 0,03-0,05 мм і відскановані з роздільною здатністю 1200 dpi фотограмметричним сканером [Gruber, Leber, 2000]. Кут нахилу

лівого зображення становить 0° , правого – 8° .

Побудова Гауссової піраміди РЕМ-зображень зразка лесового ґрунту

Для зображень зразка лесового ґрунту створені чотири рівні Гауссової піраміди від низького до високого розрізнення (рис. 6).

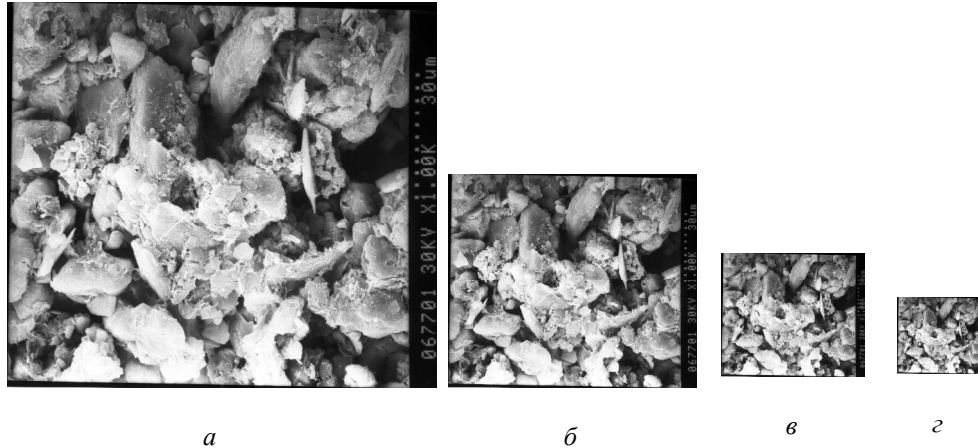


Рис. 6. Зображення Гауссової піраміди зразка лесового ґрунту:

а – початкове ліве зображення; а–г) – рівні з 1 до 4 відповідно розрізнення в дрі:

1200, 600, 300, 150; відповідно розміри зображення в пікселях: 3243x2785, 1622x1393, 811x697, 406x349

Генерація вхідних точок на РЕМ-зображенні зразка лесового ґрунту і знаходження відповідних точок за рівнями піраміди зображень

Перед створенням Гауссової піраміди зображень низько контрастні РЕМ-зображення зразка ґрунту поліпшені з використанням методу еквалізації гістограми. Внаслідок цього згенеровані точки з'явилися в ділянках, незаповнених до еквалізації, а кількість відповідних точок збільшилася на 2,6 % на 2 рівні піраміди зображень. Як і в попередньому разі, точки згенеровані двома способами на лівому зображенні 4 рівня піраміди, де контури узагальнені й немає додаткових деталей. На рис. 7, в показані результати процесу зміщення параметрів на 4 рівні піраміди правого зображення і уточнення місцерозташувань відповідних точок за рівнями піраміди (рис. 7, г, д, е).

Послідовність параметрів зсуву початкових центрів вікон пошуку (рис. 7, б) така: {0, 2, 5, 8, 11, 14} пікселів. Розміри вікон на правому зображенні 4 рівня піраміди, в

пікселях: пошуку 5×5 ; шаблона 25×25 . Координати відповідних точок уточнені на 3, 2, 1 рівнях піраміди правого зображення з такими розмірами вікон в пікселях: пошуку 11×11 , 21×21 , 41×41 ; шаблона 25×25 . Критерій кореляції для всіх рівнів $R_c = 0,7$. Кількість успішно ототожнених точок подано в таблиці.

Створення 3D-моделі мікроповерхні зразка лесового ґрунту

Цифрову модель мікроповерхні зразка ґрунту (рис. 8) створено з використанням обчислених просторових координат точок. Щільність отриманих точок за рівнями піраміди зображень становить, точок/мкм: 4 рівень – 0,96; 3 рівень – 0,91; 2 рівень – 0,87; 1 рівень – 0,74. Як і вище, просторові координати точок мікрорельєфу поверхні зразка ґрунту розраховано з урахуванням величин геометричних спотворень, властивих РЕМ- зображенню. У таблиці наведено характеристики вхідних даних і параметри цифрових моделей мікроповерхонь до і після застосування адаптивної медіанної фільтрації.

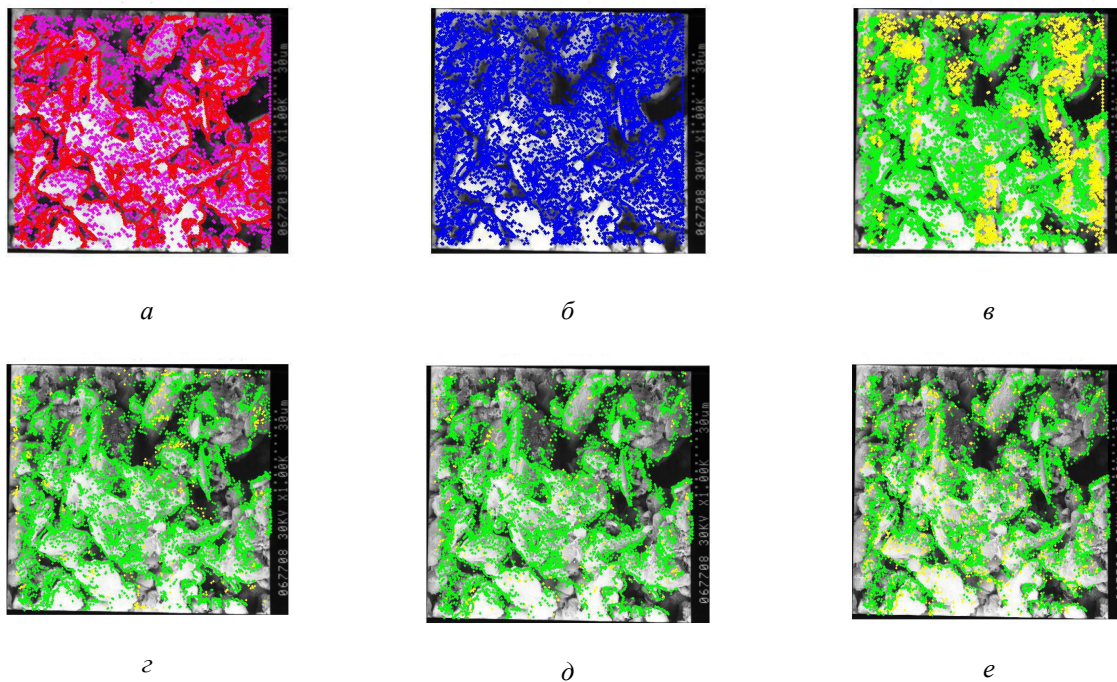


Рис. 7. Ілюстрація процесу кореляційного ототожнення точок за рівнями піраміди зображень. Верхній ряд: 4 рівень піраміди. а – згенеровані точки (11 687) на лівому зображенні зразка ґрунту; б – початкові центри вікон пошуку на правому зображенні; в – відповідні точки як результат кореляційного ототожнення (зелені в допуску $R_c = 0,7$, жовті – ні). Нижній ряд: г–е – уточнення місцезнаходження відповідних точок на 1, 2, 3 рівнях піраміди

Порівняння тривимірних моделей мікроповерхні візця лесового ґрунту за рівнями піраміди зображень до і після адаптивної медіанної фільтрації

Рівні піраміди зображень	Розмір сітки 100x87; критерій кореляції $R_c = 0.7$									
	Розрізнення, дрі	К-ть вхідних точок	До адаптивної медіанної фільтрації				Після адаптивної медіанної фільтрації			
			$Z_{\min}$, мкм	$Z_{\max}$, мкм	$\sum \Delta Z/n$, мкм	СКВ $m_{\Delta Z}$, мкм	$Z_{\min}$, мкм	$Z_{\max}$, мкм	$\sum \Delta Z/n$, мкм	СКВ $m_{\Delta Z}$, мкм
4	150	8723	-33,45	10,43	–	–	–	–	–	–
3	300	8176	-32,86	10,38	-2,47	4,03	-29,53	4,97	-2,44	3,92
2	600	7851	-31,51	5,93	-1,77	3,67	-29,76	3,14	-1,73	3,55
1	1200	6706	-31,73	4,23	-1,50	3,69	-30,24	3,38	-1,49	3,58
Тест-модель: кількість контрольних точок: 626, $Z_{\min} = -34,64$ мкм, $Z_{\max} = 2,98$ мкм										

СКВ і різниці між максимальними висотами тестової моделі й створених моделей на 2 і 1 рівнях піраміди зображень після фільтрації підтверджують, що недоцільно сканувати плівку, яка має геометричне розрізнення 0,03–0,05 мм, з роздільною

здатністю більше ніж 600 дрі.

В системі MatLab в режимі інтерпретації за рівнями піраміди зображень швидкість обчислення точок в секунду така: 4 рівень – 25,3; 3 рівень – 11; 2 рівень – 4; 1 рівень – 1,3.

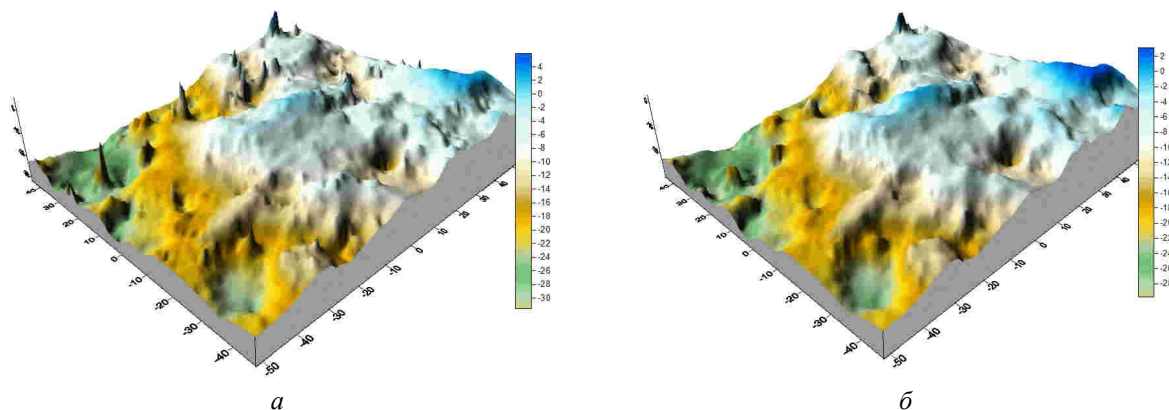


Рис. 8. 3D-моделі мікроповерхні зразка ґрунту, створені за даними 2 рівня піраміди зображень; (а) до і (б) після адаптивної медіанної фільтрації

Оцінювання точності виконано для моделі, створеної за даними 2 рівня піраміди зображень, яка має мінімальне СКВ і, крім того, швидкість обчислень більша, ніж на наступних рівнях.

Оцінювання точності цифрового моделювання мікроповерхні зразка ґрунту

На рис. 9 показані карти розподілу різниць ΔZ між висотами за класами. Різниці ΔZ розраховані між висотами тестової моделі зразка ґрунту та інтерпольованими висотами з використанням *grid*-моделей до і після адаптив

ної медіанної фільтрації. Тестова модель для складнішого мікрорельєфу поверхні зразка лесового ґрунту створено на основі 626 точок, виміряних вручну. *Grid*-моделі створені за даними 2 рівня піраміди зображень. Подано також розподіл різниць між 3D-моделями, побудованими до і після використання адаптивної медіанної фільтрації.

Розподіл за класами різниць між висотами тестової моделі та інтерпольованими з *grid*-моделлю зразка ґрунту

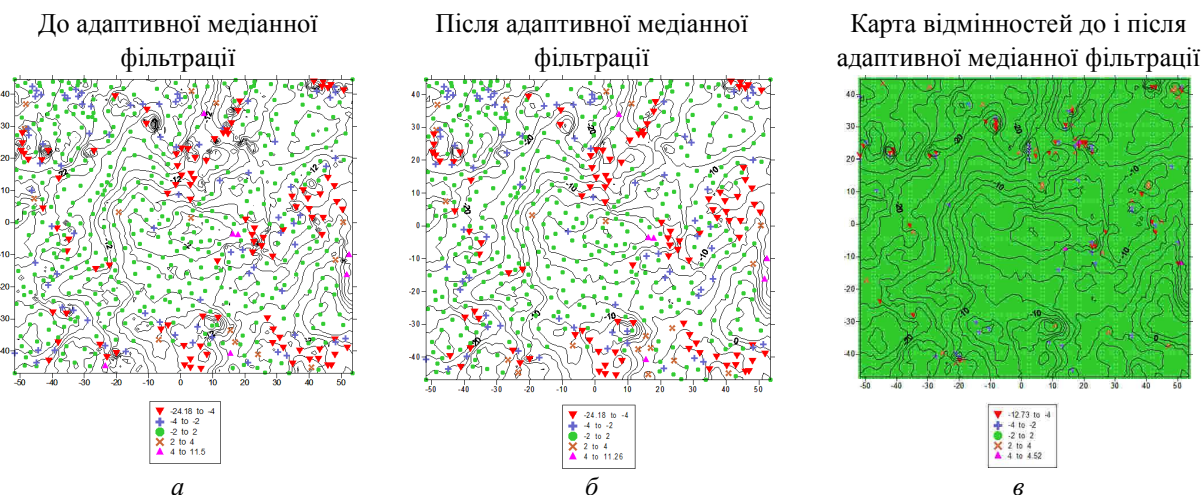


Рис. 9. Мікроповерхні зразка ґрунту в горизонталях, масштаб 1000^х.

Символи показують відмінності між висотами тестової моделі й інтерпольованими з використанням побудованих *grid*-моделей: до (а) і після (б) адаптивної медіанної фільтрації. Праворуч (в) подано карту відмінностей між 3D-моделями до і після адаптивної медіанної фільтрації. Горизонталі проведені через 2 км

Різниця ΔZ між висотами контрольних точок, інтерпольованих за *grid*-моделлю зразка ґрунту, і відповідними висотами тестової моделі до і після застосування адаптивної медіанної фільтрації в діапазоні ± 2 мкм становить 66–68 %. Приблизно 16 % мають помилки в межах ($\pm 2 - \pm 4$ мкм). Практично ідентичні результати отримано до і після застосування адаптивної медіанної фільтрації: близько 85 % точок розташовані в межах $2m_{Z(h)}$. Значення апріорної точності визначення висоти точок мікроповерхні зразка ґрунту становить $m_{Z(h)} = 0,30$ мкм, для $m_x = 0,04233$ мм, $M = 1000^x$.

Публікацію фінансує Польське національне агентство із питань академічного обміну за програмою Міжнародних академічних партнерств з проекту “Організація 9 Міжнародної науково-технічної конференції “Інженерія довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку”.

Висновки

1. Автори запропонували технологію автоматизованого ітераційного ототожнення відповідних точок РЕМ-стереопари за рівнями піраміди зображень з застосуванням процедури зсуву параметрів із діапазону можливих значень поздовжніх паралаксів. Пропонований спосіб зсуву параметрів зменшує пошук, ймовірність помилкового ототожнення і, зокрема, прискорює процедуру кореляційного ототожнення в парі зображень.

2. Запропонована комбінація двох способів створення вхідних точок (оператори Собеля і вибір порогу методом Отсу) дала змогу отримати більшу кількість точок в областях з локальними особливостями.

3. Унаслідок поліпшення малоконтрастних зображень зразка лесового ґрунту методом вирівнювання гістограми кількість успішно ототожнених точок збільшилася на 2,6 % (критерій кореляції $R_c = 0,7$).

4. Перехід до детальнішого нульового рівня піраміди зображень зразка хромованої сталі допоміг уточнити координати відповідних точок. Унаслідок цього отримано гладшу 3D-модель, що наочно підтверджується картою різниць висот між тривимірними моделями,

побудованими за даними 1 і 0 рівнів піраміди зображень.

5. Аналіз розподілу за п'ятьма класами різниць ΔZ між висотами тестової моделі й висотами, інтерпольованими з використанням побудованих *grid*-моделей свідчить, що для мікроповерхні зразка хромованої сталі близько 79 % точок, а для мікроповерхні зразка лесового ґрунту близько 70 % точок розташовані в межах допуску $\Delta Z \leq \pm 2$ мкм.

6. Побудовані за значною кількістю точок 3D-моделі характеризуються гладкістю і відтворюють дрібні елементи структури мікроповерхні. Найбільші відхилення (8 %) висот, інтерпольованих із використанням створеної мікроповерхні моделі, від тестових значень спостерігають на межах моделі й у ділянках зі складною формою мікроповерхні.

Такі ділянки потрібно доповнити координатами точок, вимірними вручну за допомогою програми “Dimicros”.

7. Запропонований автоматизований метод ототожнення відповідних точок РЕМ-стереопари мікроповерхонь дослідних зразків дає змогу значно скоротити час на їх опрацювання і побудову цифрової моделі мікроповерхні з необхідною точністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Ососков М. В., Моржин А. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий. Москва, 2010. 672 с.
- Волошин В. У. Розробка методів РЕМ-фотограмметрії та морфолого-фрактального аналізу (на прикладі дослідження деструкції кісткової тканини): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Львів, 2004, 21 с.
- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2005, 1072 с.
- Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва: Техносфера, 2006. 616 с.
- Горбачёв В. А. Разработка алгоритмов высоко-детального моделирования объектов на основе анализа цифровых изображений. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. МФТИ (ГУ). Москва, 2014.
- Дорожинський О. Л., Тукай Р. Фотограмметрія: Підручник. Видавництво Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008, 332 с.

- Іванчук О., Хрупін І. Структура та функції програмного комплексу "Dimicros" для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2012. Вип. I (23). С. 193–197.
- Іванчук О. Особливості калібрування геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на різних РЕМ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2015. Вип. I (29). С. 168–173.
- Іванчук О. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ - зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія) та точність їх апроксимації. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Львів, 2015. Вип. 81. С. 101–109.
- Іванчук О. Математична модель взаємозв'язку просторових координат точок мікроповерхні дослідного об'єкта з відповідними їх координатами на РЕМ-стереозображеннях. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2016. Вип. I (31). С. 122–126.
- Ivanchuk O., Tumska O. Development and research of technology for automation of the calibration and account of digital SEM images geometric distortion obtained with JCM-5000 (NeoScope) (JEOL, Japan). *Geodesy, cartography and aerial photography*. Lviv, 2016. Vol. 84. P. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.23939/istegcap2016.02.056>
- Іванчук О. М. Технологія опрацювання цифрових РЕМ-зображень мікроповерхонь твердих тіл. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, КНУБА, 2017. Вип. 63. С. 170–184.
- Іванчук О., Тумська О. Методика автоматизованого визначення координат центрів вузлів тест-об'єкта за його РЕМ-зображеннями з використанням засобів MatLab. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2017. Вип. I (33). С. 158–165.
- Ivanchuk O., Tumska O. A study of fractal and metric properties of images based on measurements data of multiscale digital SEM-images of a test object obtained. *Geodesy, cartography and aerial photography*. Lviv, 2017. Vol. 85. - P. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.23939/istegcap2017.01.053>
- Іванчук О. М. Теоретичні та методологічні основи просторового моделювання мікроповерхонь об'єктів за даними цифрової РЕМ-фотограмметрії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук. Львів, 2019. 44 с.
- Іванчук О., Тумська О. Автоматизована побудова цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарою цифрових РЕМ-зображень. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2019. Вип. II (38). С. 72–96.
- Мельник В. М., Волошин В. У., Тарасюк Ф. П., Бліндер Ю. С. Методи кількісної характеристики мікроструктури ґрунту. *Вісн. Льв. держ. ун-ту. Серія географічна*. Львів. держ. ун-т ім. Івана Франка; голов. ред.. С. П. Позняк. Львів, 1999. № 25. С. 24–27.
- Мельник В. М., Шостак А. В. Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія. Луцьк: Вежа, 2009. 469 с.
- Мельник В. М., Радзій В. Ф., Мельник Ю. А. РЕМ-аналіз мікроструктури дерново-підзолистих ґрунтів. *Вісник геодезії і картографії*. Київ, 2010. № 5. С. 29–34.
- Мельник В., Бліндер Ю., Піскунова О. Методологія досліджень міграції радіонуклідів у ґрунтового покриві. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2015. Вип. II (30). С. 56–60.
- Мельник Ю. А. Визначення структури та мікротопографії характеристичних поверхонь матеріалів методом 3D реконструкції: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Луцьк, 2013. 20 с.
- Супрун Д. Е. Алгоритм сопоставлення зображень по ключовим точкам при масштабуемості и вращении объектов. *Вестник МГТУ им. Н. Е. Баумана. Серия инструментоведение*. Москва, 2016. № 5. С. 86–98.
- Шостак А. В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук. Київ, 2012. 28 с.
- Baghaie A., Tafti Pahlavan A., Owen H. A., D'Souza R. M., Yu Z. Three-dimensional reconstruction of highly complex microscopic samples using scanning electron microscopy and optical flow estimation. *PloS one*, 2017, 12(4), e0175078.
- Balamucki J., Czarnecki P., Gotszalk T., Marendziak A., Rangelow I., Wilk J., Kowalski Z. W. Profilometric, SEM and AFM Investigations of Titanium and Steel Surface Micro- and Nanoroughness Induced by Neutralized Krypton Ion Beam as a First Stage of Fractal Analysis. *Physics and Chemistry of Solid State*, v. 7, № 3 (2006), pp. 577–584.
- Cornille N., Garcia D., Sutton M., McNeil S., Orteu J.: Automated 3-D reconstruction using a scanning electron microscope. In: SEM annual conf. & exp. on experimental and applied mechanics, 2003.
- Gruber M., Leber F. High Quality Photogrammetric Scanning for Mapping. In *China International*

- Geoinformatics Industry, Technology and Equipment Exhibition*, 2000, pp. 1–15.
- Krig S. Interest Point Detector and Feature Descriptor Survey. In *Computer vision metrics* (pp. 187–246).
- Kudryavtsev A. V. *3D Reconstruction in Scanning Electron Microscope: from image acquisition to dense point cloud* (Doctoral dissertation, Bourgogne Franche-Comté). 2017, pp. 1–152,
- Kudryavtsev A. V., Dembélé S., Piat N.: Stereo-image rectification for dense 3D reconstruction in scanning electron microscope. *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, Montreal, 2017, pp. 1–6.
- Lowe David G.. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 2004, 60(2), pp. 91–110.
- Marturi N., Dembélé S., Piat N. Fast Image Drift Compensation in Scanning Electron Microscope using Image Registration. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, CASE'13., Jan 2013, United States. pp. 1–6.
- Mikolajczyk K., Schmid C. A performance evaluation of local descriptors, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, vol. 27, no. 10, pp. 1615–1630.
- Nicolls F. Structure and motion from SEM: a case study. In *Fifteenth Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa*, 2004. p. 19.
- Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Sys., Man. 1979. Cyber. 9.* pp. 62–66.
- Popielski P., Wróbel Z. The Feature Detection on the Homogeneous Surfaces with Projected Pattern. In *Information Technologies in Biomedicine*, 2012, (pp. 118–128). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Salahat E. and Qasaimeh M. Recent advances in features extraction and description algorithms: A comprehensive survey. In *2017 IEEE international conference on industrial technology (ICIT)*, 2017, (pp. 1059–1063). IEEE.
- Tafti A. P. *3D SEM surface reconstruction: An optimized, adaptive, and intelligent approach*. PhD thesis, 2016, pp. 1–140.
- Zhu T., Sutton M. A., Li N., Orteu Jean-José, Cornille Nicolas, et al. Quantitative Stereovision in a Scanning Electron Microscope. *Experimental Mechanics*, 2011, 51 (1), pp. 97–109.

O. IVANCHUK¹, O. TUMSKA²

¹ Department of Photogrammetry and Geoinformatics of Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79013, tel. +38(096)4143409, e-mail: ivanchuk_oleh@ukr.net

² Department of Photogrammetry and Geoinformatics of Lviv Polytechnic National University, 12 Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79013, tel. +38(050)7455711, e-mail: ol.tums@gmail.com

AUTOMATED GENERATION OF A DIGITAL MODEL OF AN OBJECT'S MICRO SURFACE FROM A SEM-STEREO PAIR BY AREA-BASED IMAGE MATCHING

Purpose. The goal of this work was the development and research of a method of automatically constructing a digital model of the micro surface of an object from SEM stereo pair of digital images taking into account the specifics of the survey SEM and evaluating the accuracy of digital modeling. **Methods.** The developed method consists, firstly, in generating a dense set of input points in the left SEM image of a stereo pair in regions with local features and using an iterative process in accordance with the levels of the image pyramid. Secondly, the search for the corresponding points in the right SEM image of the stereo pair is carried out on the basis of sequentially shifting the points (centers of the search windows) by a shift parameter from the possible parallax's range using the correlation method. For research, we have used two stereo pairs of digital SEM images. Digital images of the deformed surface chrome steel specimen were acquired with the JSM 7100F (JEOL) with magnification 750x. Images of loess soil were acquired with the SEM "Hitachi" S-800 with magnification 1000x. When calculating the spatial coordinates of the points of the surface micro relief, the values of geometric distortion inherent in the SEM image were taken into account. To eliminate some anomalous values of the heights of the 3D model, an adaptive median filtering procedure was applied. To evaluate the accuracy of micro surface simulation test models were created by manually measuring coordinate feature points of the digital stereo pairs for both specimens. **Results.** The proposed method for shifting parameters reduces the search area and the probability of mismatch and, in addition,

speeds up the matching procedure in a pair of images. Formulas are obtained for calculating the coordinates of the center of the search window and the corresponding point in the right image at the k -th step of the shift process. To estimate the accuracy, the differences between the heights of the test model and the heights interpolated at the same points using the created models were computed. For the chrome steel specimen micro surface about 79 % of the points, and for the micro surface specimen of the loess soil about 70 % of the points were within tolerance $\Delta Z \leq \pm 2 \mu\text{m}$. **Scientific novelty.** For the first time in Ukraine, a method was developed for an automatic search of corresponding points based on a shift of parameters taking into account the features of SEM survey. The proposed technological reconstruction automation scheme of a digital model of an object's micro surface from SEM stereo pair, and the creation of this authoring software show its efficiency and expediency. **The practical significance.** The ability to reproduce the surface micro relief of an object automatically using a stereo pair of SEM digital images was established in accordance with the requirements of both the accuracy of determining the spatial coordinates of points and the structure of the micro surface of the object.

Key words: scanning electron microscope (SEM), SEM stereo pair, image matching, accuracy, 3D model.

Надійшла 23.10.2019 р.