

УДК 528.073

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ КООРДИНАТ ОПОРНИХ ТОЧОК ПРИ СТВОРЕННІ ФРОНТАЛЬНИХ ПЛАНІВ СКУЛЬПТУР

В. Глотов, Є. Ковальов

Національний університет “Львівська політехніка”

Ключові слова: скульптурні групи, точність зовнішнього орієнтування, цифрове знімання, оцінка точності координат.

Постановка проблеми

Актуальність застосування цифрового стереофотограмметричного методу сьогодні безперечна, що пояснюється великою кількістю публікацій не тільки в Україні, але й за кордоном. Цей метод давно й успішно використовують в архітектурі для виконання різноманітних робіт:

- архітектурно-будівельні обміри існуючих споруд;
- архітектурні обміри історичних споруд за архівними знімками;
- фіксація результатів зондування історичних пам'ятників;
- знімання інтер'єру, скульптур;
- дослідження деформації;
- інвентаризаційне знімання;
- археологічні пошуки архітектурних пам'ятників;
- дослідження моделей споруд;
- автоматизація виготовлення макетів проектів;
- нанесення запроєктованої споруди на фотографію забудови;
- створення макетів, моделей скульптур тощо.

Порівняльний аналіз планів і фасадів споруд, отриманих стереофотограмметричним методом, із планами, здобутими за натурними вимірюваннями, показує повну перевагу методу за всіма техніко-економічними показниками: точністю, повнотою зображень, культурою й безпекою праці тощо. Отже, перевага використання фотограмметрії для обмірних робіт безперечна.

Зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями

Основна мета полягала у виконанні порівняльного аналізу точності орієнтування цифрових зображень скульптур різними способами та створення фронтального плану скульптурної групи, що, безумовно, дасть можливість підвищити точність та докладність утворювальних фронтальних планів скульптур та скульптурних груп. Тобто реставратори отримають детальніші плани, а відтак поліпшиться якість реставраційних робіт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблем.

У [7] розглянуто використання високоякісного цифрового зображення і автоматичних фотограмметричних методів. Основні проблеми виникають у 3D текстурі. Близько 30 фотографій отримали в поляризованому світлі із застосуванням камери Linhof

Technica формату 84x114 мм, зберігаючи камеру фіксованою і обертаючи навколо її осі, щоб забезпечити постійну умову освітленості на поверхні кулі. Nikon D3x (CMOS сенсор з 24 Мп і 6 мікрон розмір пікселя), у поєднанні з Nikon 50 мм f/1.4 D об'єктивом, використано для отримання 14-бітних зображень. Для того, щоб перевірити якість зображення безпосередньо на місці, камеру під'єднали до ноутбука за допомогою каліброваного екрана і контролювали у спеціальному програмному забезпеченні.

Незважаючи на високий рівень виконання робіт, радіометричні відмінності між зображеннями викликали різні проблеми. По-перше, в автоматизованих відповідностях зображення, де основні труднощі виникли в ході текстурування. Отже, щоб добитися однорідної текстури, потрібне розрізнення 0,1 мм.

Отримання високої точності реконструкції текстури 3D моделі скульптури описано в роботі [8]. Реконструкція з високим ступенем точності 3D-моделі скульптури охоплює два аспекти: моделювання геометрії і текстур реконструкції. З швидким розвитком лазерної сканувальної системи та технології геометрії обробки даних, уможливилось високоточне моделювання геометрії з даних лазерного сканування. З іншого боку, є багато нагальних проблем, як і тих, що раніше існували в методі реконструкції текстури для 3D-моделі скульптури. Хоча деякі сканери можуть генерувати колір хмар точок за допомогою вбудованої камери або комбінації декількох джерел спектрального зворотного розсіювання світла, інформація про колір не підходить для текстури реконструкції через низьке розрізнення.

Більшість досліджень щодо реєстрації 2D в 3D зосереджено на відновленні просторового положення камери в момент захоплення зображення. Так зареєстровано побудову їх моделей у перспективній проекції. У всіх випадках в основному використовують три різних підходи.

У роботі запропоновано метод накладання текстур на основі нежорсткого перетворення. Перша реєстрація 2D зображення в 3D-модель ведеться з прямим лінійним перетворенням (DLT). Тоді жорстка реєстрація оптимізована під зважені тонкі функції пластини сплайна. На основі оптимізації, яку також називають нежорсткою реєстрацією, 2D зображення можна точно спроекувати на 3D-модель так, щоб отримати текстуру.

Сптворення текстури зображень і помилки в 3D геометричній моделі не допускають використання традиційних жорстких методів реєстрації високоточних текстур. І запропонований у цій статті метод накладання текстури на моделі лазерного сканування

оснований на нежорсткому перетворенні. Цей метод реєстрації точно вирівнює текстуру і модель глобально й локально.

Невирішені частини загальної проблеми

Оптимізація стереофотограмметричного способу складання фронтальних планів споруд

Постановка завдання

Аналіз та дослідження способу розташування опорних та контрольних точок.

Виклад основного матеріалу

Для детального та коректного аналізу запропонованого способу необхідно визначити апріорну оцінку точності. Це дасть можливість порівняти отримані величини, причому не за внутрішньою збіжністю.

Попередній розрахунок точності виконаємо, щоб довести можливість застосування цифрового стереофотограмметричного методу для складання фронтальних планів у масштабі 1:10 [1]. У нашому випадку:

$$m = \frac{Y}{f} = 154 \text{ – знаменник масштабу знімання,}$$

$Y = 7700$ мм – відстань до об'єкта; $f = 50$ мм – фокусна віддаль об'єктива знімальної камери; $m_x = m_z = m_p = 0,005$ мм – точність вимірювання координат точок знімка на ЦФС "Дельта-2"; $m_a = m_o = m_k = m_\phi = 3''$ – точність визначення куткових елементів; $x = 7$ мм, $z = 11$ мм (максимальні координати на зображенні, згідно з розмірами ПЗЗ-матриці), $p = 2,3$ мм. Після підстановки відомих значень у ці формули отримаємо:

$$m_x = 2,8 \text{ мм;}$$

$$m_y = 4,2 \text{ мм;}$$

$$m_z = 14,8 \text{ мм.}$$

Окреме розташування опорних точок від об'єкта, але в безпосередній близькості від нього дуже поширене в архітектурних обмірах не тільки за кордоном, але і в Україні [4, 5]. Однак автори пропонують встановлювати так звані ПОЖ на великих відстанях від об'єкта, що, безумовно, приведе до виникнення похибок за рельєф. Тому опорні точки повинні розташовуватися тільки у середній площині знімання об'єкта. З іншої сторони закріплювати марки на поверхні скульптури іноді неможливо через унікальність витвору або відсутність чітких контурів.

Для виготовлення засобу для розташування опорних точок, який повинен мати, на наш погляд, вигляд незамкнутої прямокутної рамки потрібних розмірів, попередньо визначено габарити самої скульптури (висоту і ширину). Для реалізації використано: три дюралюмінієві трубки, дві косинки, гайково-гвинтові кріплення та дві геодезичні підставки. Рамка являє собою конструкцію розміром 315 x 200 см.

Потім на поверхню труб було нанесено марки на полістироловій плівці розміром 2x2 см з товщиною штрихів 0,5 мм, які використовувались як опорні та контрольні точки (рис. 1).

Загалом нанесено 53 марки, які розміщені за периметром через відповідну відстань (приблизно 15 см). Для рамки вибрано умовну систему координат з початком у лівій нижній марці, координати якої ($X_\phi = 1000,00$ мм; $Y_\phi = 1000,00$ мм; $Z_\phi = 1000,00$ мм).

Встановлення рамки у вертикальне положення забезпечується за допомогою підставок, які вставляються у нижні кінці рамки за допомогою втулок, що жорстко закріплені на кінцях рамки (рис. 2, 3). Для стійкішого положення рамки у вертикальному положенні підставки закріплюються на масивних металевих плитках.

Щоб добитись максимальної точності визначення координат, рамку розташовували горизонтально і вимірювали рівність діагоналей цього прямокутника за допомогою компарованої рулетки, після чого виконали безпосереднє визначення координат рамки. Виміри виконували штангенциркулем (точність 0,05 мм) та вищевказаною рулеткою.

Для реалізації запропонованої технології застосовано цифрову знімальну камеру. Однак, оскільки камера не є метричною (Canon EOS-450D), то, безумовно, необхідно визначити внутрішні елементи цієї камери та дисторсію об'єктива при відповідній фокусній віддалі.



Рис. 1. Фрагмент труби рамки з нанесеними марками

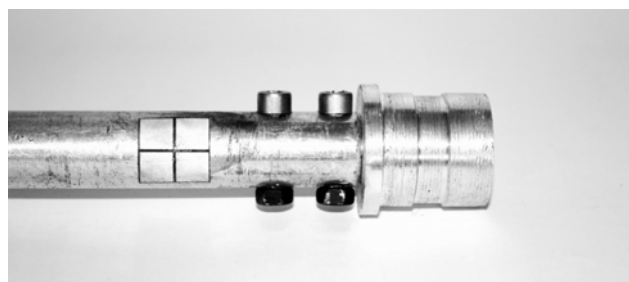


Рис. 2. Втулка закріплена на нижньому кінці труби рамки

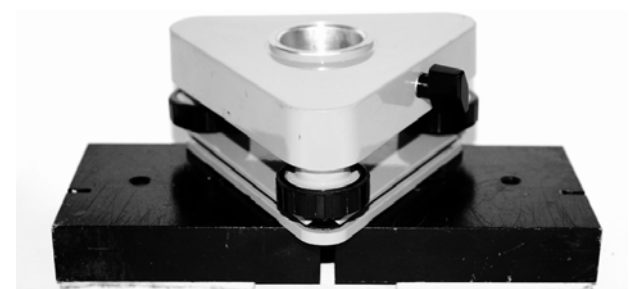


Рис. 3. Підставка для труби рамки, закріпленої на плиті

Для визначення елементів внутрішнього орієнтування x_0, z_0 камери запропоновано метод [3]. В результаті вимірів і обчислень отримали: $x_0 = 8$ мкм, $z_0 = -169$ мкм. Ці результати свідчать, що визначати елементи внутрішнього орієнтування необхідно, оскільки величини досить значні. Це пояснюється тим, що цифрова камера, яка застосовувалась для знімання, не є метричною.

Для визначення дисторсії застосовано умовно-статистичний метод, алгоритм якого розроблено в роботі [2]. В результаті обробки дисторсії практично не було виявлено, оскільки фокусна віддаль об'єктива камери становила 50 мм, що для цифрової камери Canon EOS-450D довгофокусна.

Загальну технологічну схему способу подано на рис. 4.

Перед виходом на об'єкт потрібно було провести експеримент стосовно правильності встановлення рамки, тим самим переконавшись, чи задовільна точність визначення координат точок об'єкта відносно апріорної. Рамку встановлювали у вертикальне положення за допомогою підймальних гвинтів підставок і рівня (точність циліндричного рівня 20"). Знімання проводили цифровою неметричною знімальною камерою EOS 450-D з відстанню до об'єкта 7700 мм, висотою знімання 1650 мм і базисом 1000 мм.

Після знімання з двох точок базису, враховуючи, що рамка стояла на горизонтальній поверхні, вимірювали висоту двох перших марок лівої і правої сторони рамки. Виявилось, що висота лівої марки на 6,1 мм більша, ніж правої. Отже, рамка фактично розмістилась, як на рис. 5. Відповідно до цього внесено поправки в координати за нахил рамки, виходячи з прямокутного трикутника :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta X}{X_{S_2} - 1000},$$

$\Delta X = 6,1$ мм, $X_{S_2} = 3059$ мм, звідси $\alpha = 0,16974$.

Формули для переходу до виправлених координат відповідно:

$$\begin{aligned} X' &= X \cos \alpha - Y \sin \alpha, \\ Y' &= X \sin \alpha + Y \cos \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Поправки вводили в опорні точки (рис. 6).

Після цього здійснено зовнішнє орієнтування зображень. В результаті орієнтування отримано такі значення СКП: $m_x = 7,7$ мм, $m_y = 6,0$ мм, $m_z = 9,5$ мм. Однак, порівнюючи результати орієнтування з попередньою оцінкою точності ($m_x = 2,8$ мм, $m_y = 4,2$ мм, $m_z = 14,8$ мм), необхідно зробити висновок, що вони є незадовільними.

Аналіз цього негативного явища показав, що рамка для знімання була виставлена недостатньо вертикально, що дало похибку -15 мм. Це, своєю чергою, внесло похибку в аплікату та при обчисленні системи рівнянь у інші координати елементів зовнішнього орієнтування.

Оскільки визначення координат точок об'єкта безпосереднім методом виявилось незадовільним, запропоновано метод визначення координат опорних

та контрольних точок за допомогою електронного тахеометра TCR405 Ultra.

Середнє квадратичне відхилення при вимірах горизонтальних і вертикальних кутів цього тахеометра не перевищує 5", а точність виміру довжин ліній на вищевказаних віддальях (від 8 до 9 м) не перевищувала 2 мм.

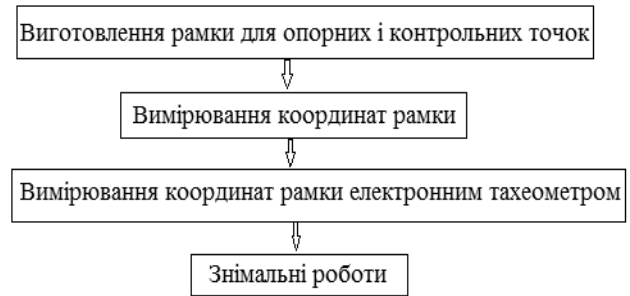


Рис. 4. Загальна технологічна схема способу

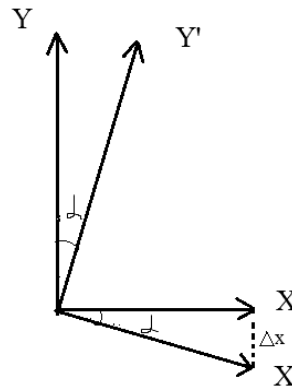


Рис. 5. Положення рамки: X, Y – теоретичне; X', Y' – реальне



Рис. 6. Знімок рамки з позначенням опорних точок (у дужках нумерація згідно із загальною таблицею)

Похибки координат за контрольними точками

№	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм	№	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм	№	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм
2	-3	-2,5	1	22	0	0,5	0,5	42	1,5	6	-2
3	-3	-3,5	2	23	1	5	-0,5	43	3	1	-0,5
4	-3	-3	0,5	24	0	0	0,5	45	2,5	-6	2,5
5	-2	0	1	25	1,5	4,5	-0,5	46	2	6	1,5
6	-2	-1	1	26	0	2	0	47	1	6	1,5
7	-1	0	1	28	0	4	-1	48	2	2	2
8	-1,5	2,5	-1	29	0	0,5	-1,5	49	1,5	-3	3
9	-1	2,5	-0,5	30	0	7	-1	50	1,5	0	3
11	-1	2	-1,5	31	0	3	0	51	1	0	3
12	-2	4	-2	32	0	1	-1	52	2	-1	2
13	-1,5	1	-2	33	0	2	0,5				
14	-1	0	-2	35	0	5	-2				
15	1	-1,5	-2,5	36	1,5	5	-2,5				
16	0	0,5	2,5	37	1	1,5	-2,5				
17	0,5	2	2	38	1,5	2	-3				
18	0	3	-3	39	2	-3	-2				
19	0	4	-2	40	2,5	0	-2,5				
21	0	0	1,5	41	1,5	6	-2				

Вимірювання виконано способом полярної засічки. В результаті спостереження двома півприйомами одержано середні значення координат замаркованих опорних та контрольних точок.

Застосовуючи ці координати опорних точок, виконане зовнішнє орієнтування. В результаті орієнтування отримано такі значення СКП: $m_x = 1,6$ мм, $m_y = 1,7$ мм, $m_z = 2,5$ мм. Згідно з результатами орієнтування і порівняння з попередньою оцінкою точності необхідно зробити висновок, що вони відповідають допуску.

Для проведення коректної оцінки точності застосовано координати контрольних точок. Оцінку точності виконано за такими формулами:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X_{цфс} - X_m, \\ \Delta Y &= Y_{цфс} - Y_m, \\ \Delta Z &= Z_{цфс} - Z_m,\end{aligned}\quad (2)$$

де X_m , Y_m , Z_m – значення просторових координат контрольних точок, виміряних електронним тахеометром, взятих за теоретичні значення, а $X_{цфс}$, $Y_{цфс}$, $Z_{цфс}$ – значення просторових координат контрольних точок, виміряних у програмному пакеті “Digitals”, які відігравали роль практичних значень.

Вимірювання координат контрольних точок $X_{цфс}$, $Y_{цфс}$, $Z_{цфс}$ виконано на ЦФС “Дельта-2”. Стереоскопічно візували марку на центр першої контрольної точки і з лічильника знімали значення відповідних координат. За аналогією вимірювали координати всіх контрольних точок.

У результаті обчислення за формулою (3) отримано значення похибок між виміряними координатами контрольних точок на ЦФС “Дельта-2” та з допомогою електронного тахеометра (див. таблицю).

СКП визначення координат контрольних точок, з урахуванням СКП вимірів електронним тахеометром, виконано за формулою:

$$m_x = \left(m_{тах}^2 + \frac{[\Delta\Delta]}{n} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Аналогічно для m_y та m_z .

Після підстановки і обчислення отримали:

$$m_x = 2,5 \text{ мм}, m_y = 2,8 \text{ мм}, m_z = 6,1 \text{ мм}.$$

Як бачимо з результатів обчислень, вони не перевищують значення попередньої оцінки, тобто не виходять за межі допусків.

Отже, для $r = 13$ мм, $Y = 8$ м, $\Delta Y = 0,6$ м похибка $\delta h = 1,1$ мм, що фактично в межах допусків згідно з апріорною оцінкою точності. Ще раз підкреслимо недопустимість встановлення опорних марок.

Похибку за характер зміни поверхні, що зображається, щодо фронтальної площини проекції розраховують за формулою [6]:

$$\delta h = \frac{r\Delta Y}{Y - \Delta Y} \quad (4)$$

далеко за межами об'єкта. Наприклад, у нашому випадку фокальна відстань камери при 8 м до об'єкта, становить – $\Delta Y = 5,0$ м. Тоді $\delta h = 22$ мм. Порівняно з нашим випадком це значення абсолютно недопустиме. Окрім цього, з погляду вимірювання знімків виникатиме поперечний паралакс, що фактично не дасть змоги якісно обробити матеріали.

Висновки

1. Дослідження запропонованого способу створення фронтальних планів скульптурних груп, в якому застосовано рамку для розміщення опорних та контрольних точок, показало, що необхідно визначати координати цих точок за допомогою електронного тахеометра, а не безпосередніми промірами.

2. У результаті виконання роботи створено фронтальний план скульптурної групи за допомогою фронталей, причому СКП становило $m_x = 1,6$ мм, $m_y = 1,7$ мм, $m_z = 2,5$ мм, що порівняно з апріорною оцінкою точності не перевищує допустимих похибок.

3. Стосовно реалізації запропонованої схеми необхідно відзначити оперативність польових робіт, що не перевищували 1 год, а камеральні відповідно 2,5 год.

4. На перспективу планується дослідити, як впливає на точність визначення координат точок об'єкта зміна розташувань рамки з координатами опорних точок.

The international archives of the remote sensing and spatial information sciences. XXXIX congress ISPRS. Melbourne. – 2012. – P. 139–143.

Література

1. Глотов В. Визначення асиметрії у деталях архітектурних пам'яток / В. Глотов, Ю. Кордуба // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. ЗГТ. – Львів, 2012. – № 2. – С. 92–95.
2. Глотов В.М. Вдосконалений спосіб визначення дисторсії цифрових знімальних камер / В.М. Глотов, В.В. Чижевський // Вісник геодезії та картографії. – К., 2005. – № 2(37). – С. 42–45.
3. Глотов В. Спосіб визначення планових елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер / В. Глотов, О. Пащетник // Патент на корисну модель № 50155 Україна Бюл. № 10. 25.05.2010.
4. Катушков В.О. Побудова та орієнтування моделей просторових об'єктів / В.О. Катушков // Вісник геодезії та картографії. – 1996. – № 1. – С. 61–69.
5. Катушков В.О. Спільна обробка та аналіз неметричних камер та метричних моделей при вимірюванні архітектурно-історичних пам'яток / В.О. Катушков, С.Г. Рубцов, І.О. Дульський // Вісник геодезії та картографії. – 1998. – № 1. – С. 29–35.
6. Метелкин А.И. Фотограмметрия в строительстве и архитектуре / А.И. Метелкин. – М.: Стройиздат, 1981.
7. Menna F., Rizzi A., Nocerino E., Remondino F., Gruen A. High resolution 3d modeling of the behaim globe // The international archives of the remote sensing and spatial information sciences. XXXIX congress ISPRS. Melbourne. – 2012. – P. 115–120.
8. Zhang F., Huang H., Zhang Z., Fang W., Li D. High precision texture reconstruction for 3d sculpture model //

Аналіз точності координат опорних точок при створенні фронтальних планів скульптур

В. Глотов, Є. Ковальов

Наведено результати аналізу точності зовнішнього орієнтування цифрових зображень при складанні фронтальних планів скульптур цифровим стереофотограмметричним методом. Зосереджено увагу на розміщенні опорних точок відносно об'єкта та на способі отримання координат цих точок.

Анализ точности координат опорных точек снимков при создании фронтальных планов скульптур

В. Глотов, Е. Ковальов

Приведено результати аналізу точності зовнішнього орієнтування цифрових зображень при складанні фронтальних планів скульптур цифровим стереофотограмметричним методом. Акцентується на розміщенні опорних точок відносно об'єкта та на способі отримання координат цих точок.

Accuracy analysis of exterior orientation of digital images to create plans frontal sculptures

В. Glotov, E. Kovalyov

The results of the analysis of the accuracy of the external orientation of digital images in the preparation of plans frontal sculptures digital stereophotogrammetric method. Focuses on the placement of reference points to the object, and a method of obtaining the coordinates of these points.



33rd EARSeL Symposium - Italy

Towards Horizon 2020: Earth Observation and Social Perspectives

3–6 June

Matera, Italy

Web site: <http://www.earsel.org/symposia/2013-symposium-Matera>