

УДК 517

к.т.н., доцент Р.В. Шульц,
Київський університет будівництва і архітектури

ПЕРЕТВОРЕННЯ МІЖ РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ ПРИ ВИКОНАННІ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ТА ЦИФРОВОГО ФОТОГРАФУВАННЯ

Виконано аналіз сучасного стану можливостей методу наземної фотограмметрії та лазерного сканування і аналіз методів інтегрування даних фотограмметрії і лазерного сканування. Розглянуто варіанти створення 3D моделей за даними цифрового фотознімання та лазерного сканування місцевості.

Постановка проблеми. Для виконання архітектурних обмірів найчастіше використовують метод наземного фотограмметричного знімання. Цей метод дозволяє отримати повну просторову інформацію про об'єкт знімання. Задача створення архітектурних креслень виникає при вирішенні цілого ряду задач, серед яких будівництво нових об'єктів в умовах існуючої забудови, реконструкція існуючих будівель, створення інформаційних та пошукових систем та ін. Останнім часом все більшого розповсюдження набувають методи пов'язані з безпосереднім отриманням тривимірних моделей до яких належить метод наземного лазерного сканування [1;2]. За своїм принципом методи наземного фотограмметричного знімання та лазерного сканування суттєво відрізняються і дозволяють отримати різну інформацію про об'єкти архітектури. Головна відмінність полягає у вихідній інформації яку використовують в кожному методі: у методі лазерного сканування – це хмара координат точок, у фотограмметричному методі – це цифрові знімки. Найбільшого значення зараз набувають методи, що базуються на інтегруванні даних лазерного сканування та наземної фотограмметрії.

Огляд попередніх публікацій. Використанню методів наземної фотограмметрії в архітектурі присвячено дуже велику кількість публікацій і фактично на сьогоднішній день більшість питань в цьому напрямку вирішені. Фактично нове дихання метод наземної фотограмметрії отримав з появою цифрової фотограмметрії. Найбільш цікавим є використання автоматизованих та автоматичних методів фотограмметрії для створення тривимірних моделей об'єктів. Конкуренцію методам фотограмметрії складає метод наземного лазерного сканування [3;4]. При використанні комбінації методів фотограмметрії з результатами наземного лазерного сканування виникає

можливість отримати найбільш якісні результати які відповідатимуть дійсному стану об'єкту архітектури [5;6].

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз сучасного стану можливостей методу наземної фотограмметрії та лазерного сканування і аналіз методів інтегрування даних фотограмметрії і лазерного сканування.

Основний зміст роботи. Для виконання порівняльного аналізу методу наземної фотограмметрії та лазерного сканування необхідно порівнювати останні розробки цих технологій. Стосовно наземної фотограмметрії для порівняння необхідно використовувати метод фотограмметричного сканування,

Робочі формули визначення координат наземним лазерним сканером:

$$\left. \begin{aligned} X_C &= X_P + R \sin \alpha \cos \beta \\ Y_C &= Y_P + R \sin \alpha \sin \beta \\ Z_C &= Z_P + R \cos \alpha \end{aligned} \right\} (1)$$

Позначення використані в цих виразах зрозумілі з рис. 1, на якому наведено принципову схему визначення координат точки методом наземного лазерного сканування.

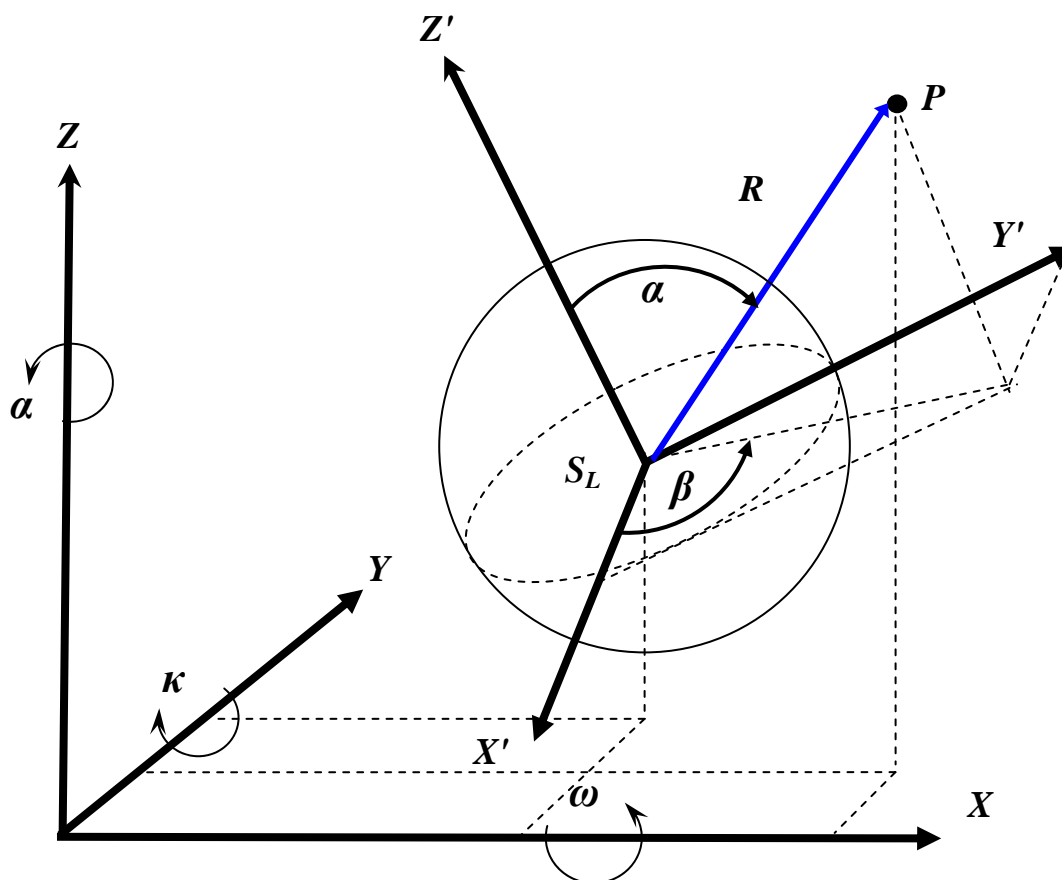


Рис. 1. Елементи орієнтування лазерного сканера

Відповідно зворотні перетворення можуть бути представлені:

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{(X_P - X_C)^2 + (Y_P - Y_C)^2 + (Z_P - Z_C)^2} \\ \alpha &= \arccos\left(\frac{Z_P - Z_C}{R}\right) \\ \beta &= \arccos\left(\frac{X_P - X_C}{R \sin \alpha}\right) \end{aligned} \right\} (2)$$

Панорамна цифрова фотокамера

Методика роботи цифровою камерою неможлива без врахування її геометричної моделі та її математичного опису. Знання цих залежностей дозволяє з одного боку використовувати різні виміряні величини (відстані, кути, фото координати), з іншого боку виконувати калібрування вимірювальних засобів. У випадку використання панорамної фотокамери її геометрична модель відрізняється від моделі центральної проекції.

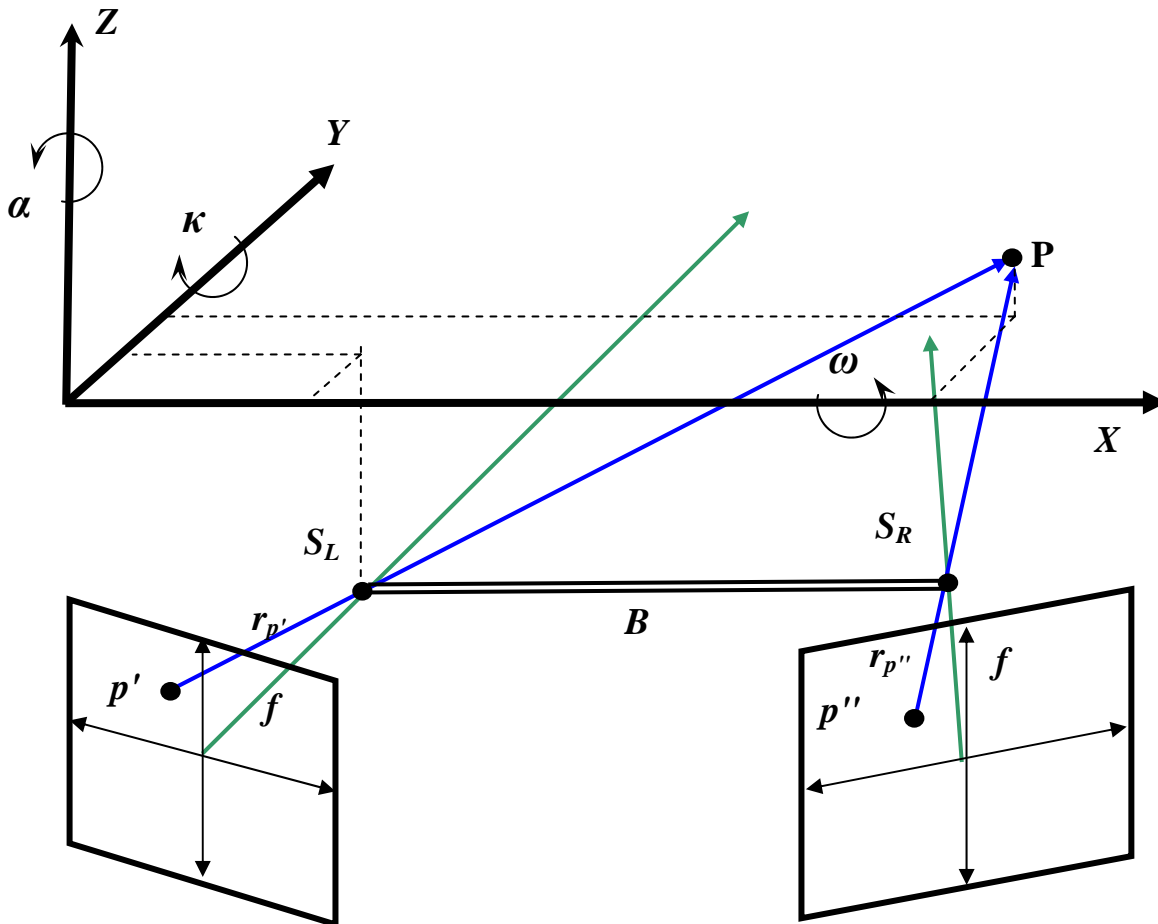


Рис. 2. Елементи орієнтування центральної проекції

де, i, j - номер стовпчика і рядка ПЗЗ матриці; u_0, v_0 - номер стовпчика і рядка початкового пікселя ПЗЗ матриці; $(i - u_0)p_x = x, (j - v_0)p_y = y$ - значення координат. Координати точки Р визначають за формулами прямої фотограмметричної засічки.

$$x' = x_0' - f \frac{x}{z}; \quad y' = y_0' - f \frac{y}{z} \quad (3),$$

Для панорамної камери маємо:

$$x'_{panor} = x_0' - f \arctan\left(\frac{-y}{x}\right); \quad y'_{panor} = y_0' - \frac{fz}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (4),$$

$$\begin{aligned} x &= a_1(X - X_0) + b_1(Y - Y_0) + c_1(Z - Z_0) \\ y &= a_2(X - X_0) + b_2(Y - Y_0) + c_2(Z - Z_0) \\ \text{Де, } z &= a_3(X - X_0) + b_3(Y - Y_0) + c_3(Z - Z_0); \end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} - \text{матриця напрямних косинусів;}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa; \quad a_2 = \sin \alpha \cos \omega; \quad a_3 = -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa; \\ b_1 &= -\sin \alpha \cos \kappa - \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa; \quad b_2 = \cos \alpha \cos \omega; \quad b_3 = \sin \alpha \sin \kappa - \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa \\ c_1 &= \cos \omega \sin \kappa; \quad c_2 = \sin \omega; \quad c_3 = \cos \omega \cos \kappa. \end{aligned}$$

- напрямні косинуси.

Для вимірювання координат на знімку використовують або цифрову систему координат, або систему координат знімку. У подальших обчисленнях в будь-якому випадку використовують фото координати в системі координат знімку. Сучасну обробку знімків виконують тільки на цифрових фотограмметричних станціях, отже в будь-якому випадку знімки представляють в цифровому вигляді. Зв'язок між цифровою системою координат та системою координат знімка представлено на рисунку 3.

Аналітично зв'язок між піксельною системою координат і знімка представляють виразами (5):

$$x = \left(u - \frac{n_u}{2}\right) \cdot p_y + x_0, \quad y = \left(\frac{n_v}{2} - v\right) \cdot p_x + y_0 \quad (5)$$

n_u - кількість стовпчиків; n_v - кількість рядків; x_0, y_0 - координати головної точки; x, u, y, v - координати точки в тотемі координат знімка і піксельній системі відповідно, p_x, p_y - розмір пікселя.

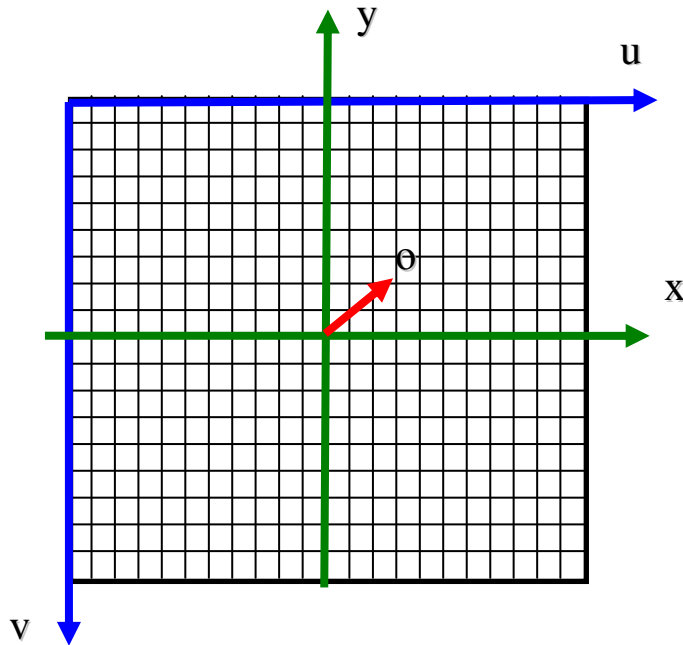


Рис. 3. Зв'язок між системами координат на знімку

Якщо аналогові знімки попередньо від скановані то зв'язок між системами координат визначають як афінне перетворення на площині.

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 u + \alpha_2 v; \quad y = \beta_0 + \beta_1 u + \beta_2 v. \quad (6)$$

Вимірявши координати для кожної з координатних міток, для кожного з вимірювань записують два рівняння поправок відповідно до моделі (6):

$$\left. \begin{aligned} x &= \alpha_0 + \alpha_1 u + \alpha_2 v + \beta_0 \cdot 0 + \beta_1 \cdot 0 + \beta_2 \cdot 0; \\ y &= \beta_0 + \beta_1 u + \beta_2 v + \alpha_0 \cdot 0 + \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_2 \cdot 0. \end{aligned} \right\} (7)$$

Використавши рівняння (7) записують рівняння поправок, складають систему нормальних рівнянь та вирішують її одним з відомих способів. За отриманими виразами для перетворення координат перетворюють всі виміряні на знімку координати точок.

Запропонована цифрова панорамна фотокамера за принципом функціонування відповідає лазерному скануванню.

Якщо цифрова камера жорстко закріплена на головці сканера, то камера обертається разом із сканерною головкою в горизонтальній площині.

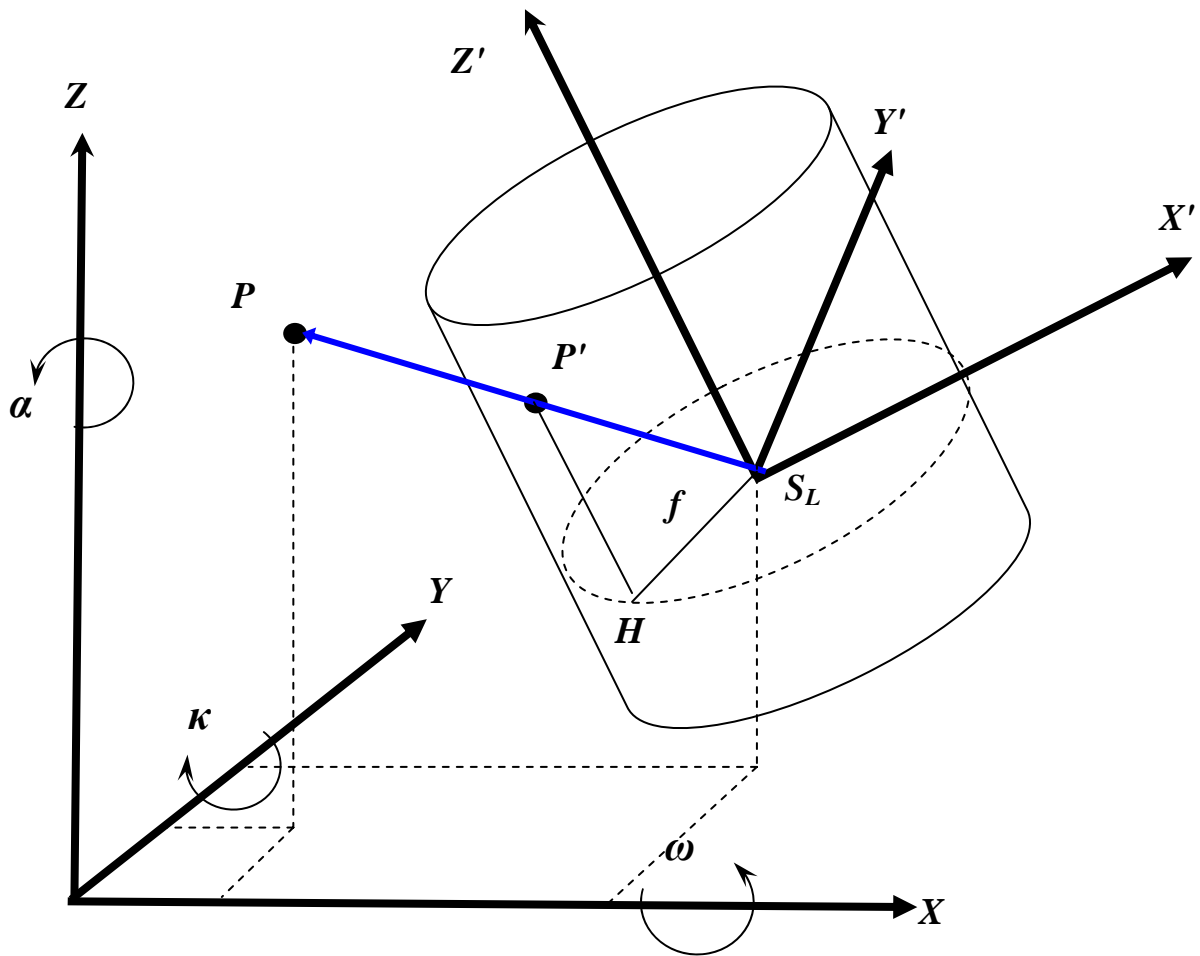


Рис. 4. Елементи орієнтування панорамної проєкції

Отже параметри зв'язку між цими системами, виражені в одній з цих систем, залишаються постійними. Технічно неможливо створити лазерний сканер та цифрову камеру з співпадаючими осями. В залежності від типу лазерного сканера (рис. 1) можливі два варіанти встановлення камери на лазерному сканері. При цьому виділяють наступні системи координат:

- система координат сканера (СКС)
- система координат проекту (СКПр)
- глобальна система координат (ГСК)
- система координат камери (СКК).

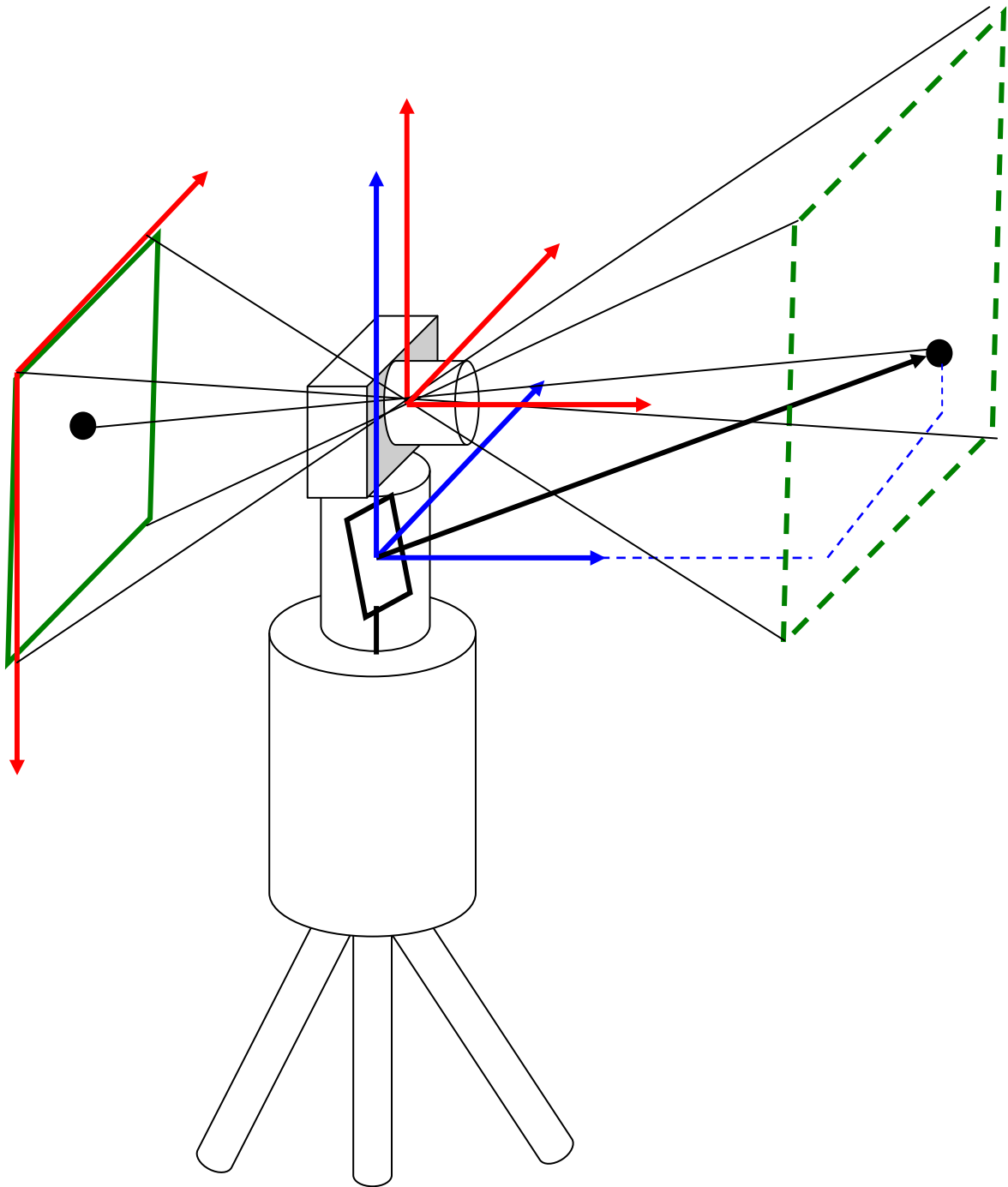


Рис. 5. Лазерний сканер + цифрова камера

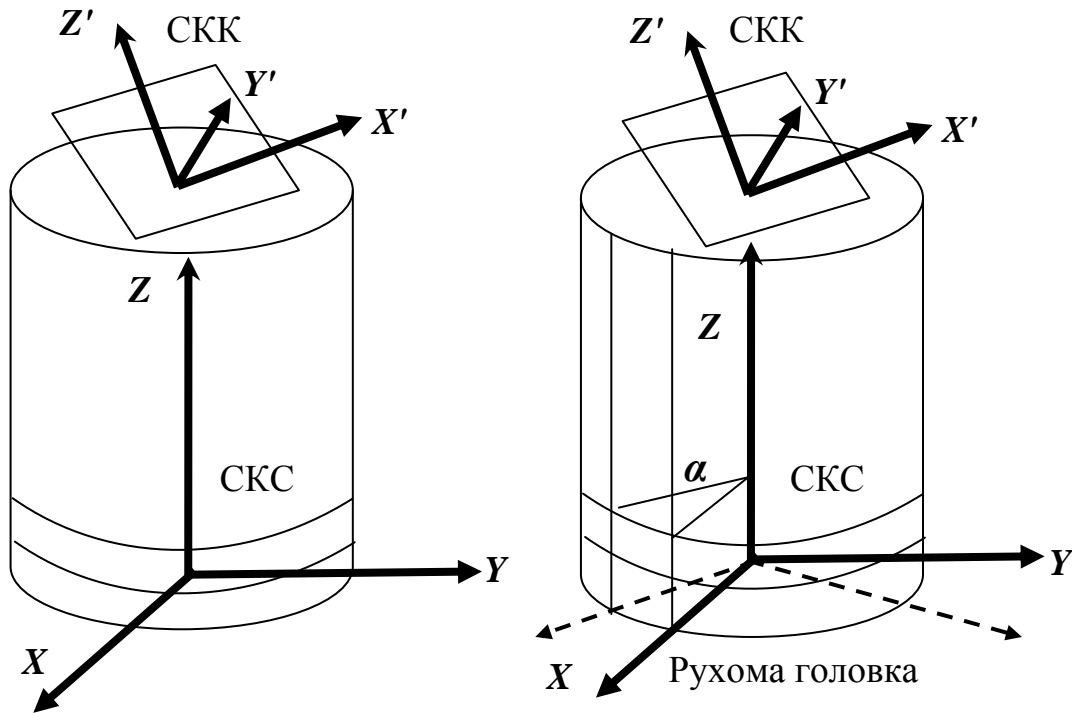


Рис. 6 Положення систем координат при нерухомій та рухомій скануючій головці

Якщо камера обертається разом із сканером, тобто камера обертається відносно СКС. В такому випадку перетворення координат виконують в два етапи:

1. Поворот, що залежить від часу відносно початкового 0-азимуту M_{SOP} ;
2. Поворот та зміщення СКК відносно СКС, що не залежать від часу M_{MOUNT} .

Наступні вирази визначають перетворення вимірних координат з СКС в ГСК та з СКК в ГСК.

$$X_{\tilde{A}\tilde{N}\tilde{E}} = M_{POP} M_{SOP,n} X_{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{N},n}$$

$$X_{\tilde{A}\tilde{N}\tilde{E}} = M_{POP} M_{SOP,n} M_{COP,n,m} M_{MOUNT}^{-1} X_{\tilde{N}\tilde{E}K,n,m} \quad (9)$$

де n визначає положення сканера в проєкті, m визначає (при положенні сканера n) положення камери (визначене за азимутом α)

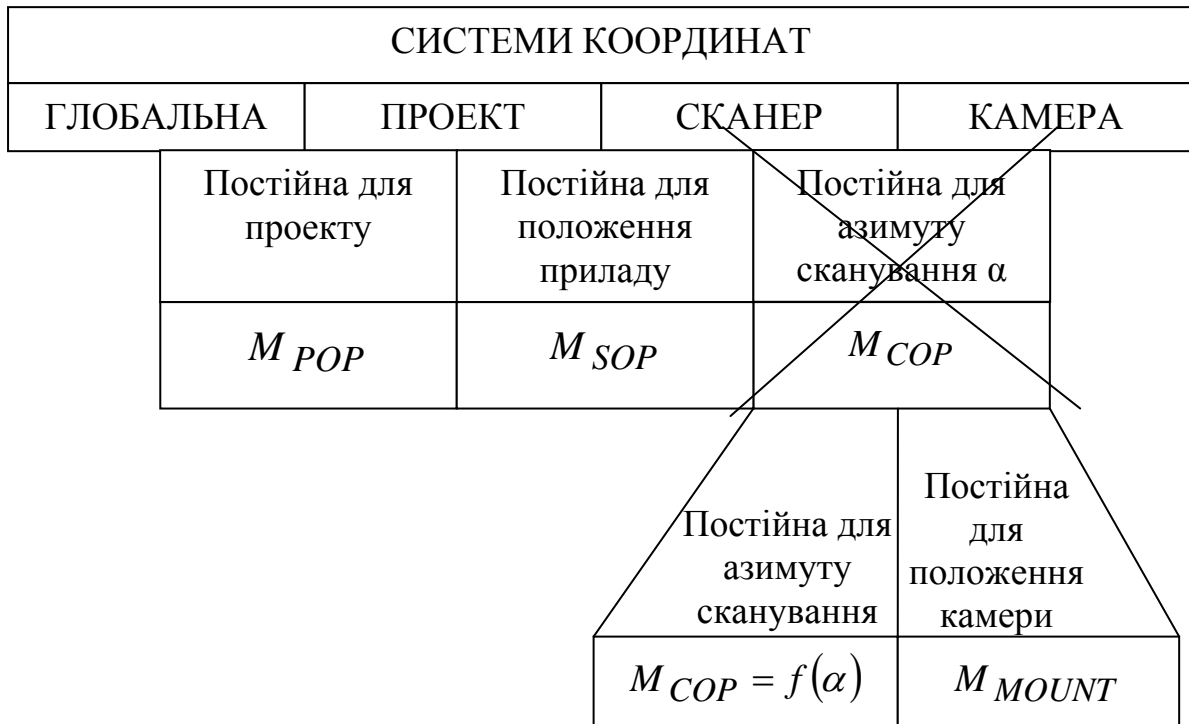


Рис. 7 Зв'язок між системами координат

Параметри $(DX^{CKC-CKK}, DY^{CKC-CKK}, DZ^{CKC-CKK}, r_X^{CKC-CKK}, r_Y^{CKC-CKK}, r_Z^{CKC-CKK})$ взаємного орієнтування визначаються за методом найменших квадратів в результаті калібрування. Виробники систем лазерного сканування найчастіше надають елементи взаємного орієнтування, також виробники надають програмне забезпечення та керівництво для виконання калібрування.

Перетворення системи координат окремої хмари точок в систему координат загальної моделі – проекту.

Найчастіше таке перетворення є 6-ти параметричне. Визначення цих параметрів можливе при скануванні достатньої кількості марок.

$$R^{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{I}\tilde{\delta}} = DR^{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{N} - \tilde{N}\tilde{E}\tilde{\delta}} + M^{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{N} - \tilde{N}\tilde{E}\tilde{\delta}} R^{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{N}} \quad (10)$$

Перетворення системи координат загальної моделі – проекту в глобальну систему координат.

Найчастіше таке перетворення є 6-ти параметричне. Визначення цих параметрів можливе при скануванні достатньої кількості марок, положення яких відоме в глобальній системі координат.

$$R^{\tilde{A}\tilde{N}\tilde{E}} = DR^{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{\delta}} - \tilde{A}\tilde{N}\tilde{E} + \lambda M^{\tilde{N}\tilde{E}\tilde{\delta}} - \tilde{A}\tilde{N}\tilde{E} R^{\tilde{A}\tilde{N}\tilde{E}} \quad (11)$$

Перетворення системи координат проекту в систему координат цифрової камери.

Це перетворення визначають через рівняння колінеарності. Координати на знімку є функцією наступних параметрів:

$$\begin{aligned} x_A^i &= f(x_0^i, z_0^i, X_A^G, Y_A^G, Z_A^G, X_O^G, Y_O^G, Z_O^G, \omega_A, \varphi_A, \kappa_A, f) \\ z_A^i &= g(x_0^i, z_0^i, X_A^G, Y_A^G, Z_A^G, X_O^G, Y_O^G, Z_O^G, \omega_A, \varphi_A, \kappa_A, f) \end{aligned}$$

Для визначення 9-ти невідомих параметрів $x_0^i, z_0^i, X_O^G, Y_O^G, Z_O^G, \omega_A, \varphi_A, \kappa_A, f$ необхідно мати мінімум 5 точок в двох системах.

Запропоновані методики виконання робіт та методики обробки цілком вкладаються в запропоновані в першому розділі технологічні схеми.

Висновки. Виконано аналіз сучасного стану можливостей методу наземної фотограмметрії та лазерного сканування і аналіз методів інтегрування даних фотограмметрії і лазерного сканування. Розглянуто варіанти створення 3D моделей за даними цифрового фотознімання та лазерного сканування місцевості. Відповідно до розглянутих варіантів в подальшому буде розроблено відповідні технологічні схеми виконання робіт.

Список літератури

1. *Murphy M., McGovern E., Pavia S.* Parametric Vector Modelling of Laser Surveys of 17th Century Classical Architecture in Dublin. // The 8th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST 2007.
2. *Balis V., Karamitsos S., Kotsis I., Liapakis C., Simpas N.* 3D Laser Scanning: Integration of Point Cloud and CCD Camera Video Data for the Production of High Resolution and Precision RGB Textured Models: Archaeological Monuments Surveying Application in Ancient Iliada. // FIG Working Week 2004, Athens, Greece 22-27 May 2004.
3. *Boehler W., Marbs A.* 3D Scanning and Photogrammetry for Heritage Recording: a Comparison. // Proceeding 12th International Conference on Geoinformatics, University of Gavle, Sweden 7-9 June 2004.
4. *Ronnholm P., Honkavaara E., Litkey P., Huuppa H., Huuppa J.* Integration of Laser Scanning and Photogrammetry. // IAPRS Volume XXXVI, Part 3, 2007.
5. *Дишлик О., Марков С., Тревого І.* Підхід до побудови тривимірних моделей складних просторових об'єктів при комплексному використанні технологій лазерного сканування та фотограмметрії. // Сучасні досягнення геодезичної науки і техніки (II), Львів, 2008 р. – С. 101-105.
6. *Белоус Н., Горб А., Ковтун В.* Лазерное 3D сканирование в дальних и варяжских пещерах Свято-Успенской Киево-Печерской Лавры. // Сучасні досягнення геодезичної науки і техніки (I), Л

АННОТАЦІЯ

Выполнен анализ современного состояния возможностей метода наземной фотограмметрии и лазерного сканирования и анализ методов интегрирования данных фотограмметрии и лазерного сканирования. Рассмотрены варианты создания 3D моделей по данным цифровой фотосъемки и лазерного сканирования местности.