

АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ВСТАНОВЛЕННЯ ЗНІМАЛЬНИХ КАМЕР ВІДНОСНО ОРІЄНТУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

© Глотов В., 2005

Предлагается анализ способа установки съемочной камеры относительно ориентирующего устройства. Приведена априорная оценка точности способа, которая выполнена по строгим формулам. Делаются соответствующие выводы.

Analysis of the method of establishment of surveying camera relating to orienting device is considered in the paper. A priori accuracy evaluation of the method implemented using rigorous formulas is described. The proper conclusions are made.

Постановка проблеми. Сьогодні цифрові неметричні камери знайшли застосування в багатьох галузях народного господарства, що приводить до різноманітних розробок цифрових фототеодолітів на базі цифрових камер та теодолітів, а також способів удосконалення точності та оперативності орієнтування приладів і врахування систематичних похибок систем. Отже, дослідження способу дасть змогу встановити точні параметри, а відтак підвищити точність запропонованого способу.

Зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями. Дослідження та аналіз способу встановлення цифрових знімальних камер відносно орієнтуючих пристроїв значно розширить застосування цифрового фототеодолітного знімання у різноманітних галузях науки й техніки, підвищить продуктивність відповідних проектно-архітектурних споруд, інженерно-будівельних робіт, при вишукуванні автомобільних доріг та залізничних колій у горбистій та гірській місцевості тощо [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених вирішенню цієї проблеми. У роботі [1] запропоновано спосіб з'єднання цифрової камери з теодолітом Т-30 за допомогою механічного кріплення. Автори звертають увагу на те, що при закріпленні камери до зорової труби теодоліта "вочевидь виникає деяка непаралельність їх оптичних осей та поворот камери у площині знімка". Наводяться способи визначення поправок в елементи зовнішнього орієнтування та зазначається, що всі способи є польовими. Однак технологічна схема запропонованих способів вимагає відповідного часу під час виконання польових робіт, тобто не є оперативною. Окрім того, під час виконання фототеодолітного знімання в закритих регіонах, наприклад, при зніманні

архітектурних споруд та внутрішніх інтер'єрів та під час короткобазисної фотограмметрії здебільшого немає можливості вибрати віддалені об'єкти.

У публікації [5] наведено камеральний спосіб калібрування знімальних цифрових камер. Із цією метою застосовується металева платівка $500 \times 500 \times 5$ мм, у якій знаходяться 792 отвори (24×33) діаметром 3 мм із кроком 15 мм. Дослідження проводилися камерою Kodak 660 (фокусна віддаль 20 мм). Знімання виконувалось на восьми станціях із кутом конвергенції до 30° . Відстань до об'єкта знімання була відповідно 2 та 0,5 м. Функціональна залежність – умова компланарності. До недоліків способу необхідно віднести точність розташування калібрувальних точок на макеті (0,01 мм), а, окрім того, вплив кореляційних зв'язків при розв'язуванні системи рівнянь, що значною мірою спотворює величини елементів орієнтування.

У роботі [6] аналогічно, як і в попередній, пропонується застосовувати камеральний спосіб калібрування цифрових знімальних камер. Автор пропонує виміряти висоти об'єктів на місцевості та скласти рівняння відносно висоти фотографування та відношення висот об'єктів. У цьому випадку пропонується використовувати умову колінеарності. Однак, як і в попередньому випадку, вплив кореляційних зв'язків приводить до невеликої точності визначення просторових координат точок на місцевості $m_x = 0,1$ м, $m_y = 0,04$ м, $m_z = 0,08$ м, для відстані до об'єкта 3–2 м.

Невирішені частини загальної проблеми. Визначення точнісних параметрів запропонованого способу, а також встановлення технологічних можливостей використання цифрових фототеодолітних систем, що дасть змогу у подальшому врахувати систематичні похибки системи.

Постановка завдання. Аналіз способу встановлення цифрових камер відносно орієнтуючого пристрою вимагає:

- використовуючи строгі формули, визначити середні квадратичні похибки шуканих величин за всіма аргументами;
- на підставі отриманих результатів провести аналіз величин стосовно вивчення систематичних похибок та способи усунення їх впливу на остаточний результат.

Виклад основного матеріалу. Коротко нагадаємо технологію запропонованого способу [2]. У лабораторних умовах камеру встановлюють на теодоліт і наближено орієнтують. Після чого зорову трубу теодоліта приводять у горизонтальне положення і точно візують на перетин контрольно-вимірної сітки, яку закріплено на підставці штатива на мінімально можливу відстань від фототеодоліта. Сітка за допомогою накладних або рамних рівнів приводиться у вертикальне положення, а суміщення сітки ниток зорової труби теодоліта з перетином контрольно-вимірної сітки можливо виконати паралельно за допомогою вивідних гвинтів підставки. Виконують знімання сітки камерою з установленою фокусною віддаллю, з якою буде у подальшому експлуатуватися фототеодоліт. Зображення сітки передають на ЦФС і за допомогою програмного забезпечення "Models" у вікні "Взаємне орієнтування" виміряють координати перетину сітки, що відповідає зоровій трубці теодоліта відносно положення центра знімка. Знаючи планові координати точки O та фокусну віддаль камери, обчислюють кути нахилу головного оптичного променя камери відносно оптичної осі орієнтуючого пристрою. Для цього застосовують формули зв'язку між координатами точок вертикального та нахильного знімків, усунувши з них члени, де присутній кут K , оскільки, як показано в публікації [8], його встановлюють з відповідною точністю.

Отже, визначаючи кути α та ω як поправки в аналогічні кутові елементи зовнішнього орієнтування, враховують їх при виконанні зовнішнього орієнтування, алгебраїчно сумуючи з встановленими при зніманні кутовими елементами.

Для однозначної фіксації камери відносно теодоліта пропонується кріплення типу "ластівчиний хвіст" із стопорною кулькою. Визначивши поправки кутів при виконанні польових робіт, немає потреби виконувати виміри для визначення координат опорних точок; існує можливість застосовувати пряму фотограмметричну засічку.

Перейдемо тепер до визначення апіорної оцінки точності величин, які фігурують у технологічній схемі способу. Для цього скористаємося формулами аналітичного трансформування, враховуючи те, що похибка кута κ на порядок менша від кутів скосу та нахилу камери, і отримаємо [4]:

$$\begin{aligned} x_i &= f \cdot \frac{x \cdot \cos \alpha + f \cdot \sin \alpha \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega}{-x \cdot \sin \alpha + f \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \omega} \\ z_i &= f \cdot \frac{f \cdot \sin \omega + z \cdot \cos \omega}{-x \cdot \sin \alpha + f \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \omega} \end{aligned} \quad (1)$$

Спочатку обчислимо точність, із якою визначається відстань між головними оптичними променями камери та теодоліта, тобто значення $-z_i$:

Знайдемо часткові похідні

$$\frac{\partial z_i}{\partial x} = \frac{f \cdot \sin \alpha \cdot (z \cdot \cos \omega + f \cdot \sin \omega)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial z_i}{\partial z} = \frac{f \cdot (f \cdot \cos \alpha \cdot (2 \cdot \cos^2 \omega - 1) - x \cdot \sin \alpha \cdot \cos \omega)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial z_i}{\partial \alpha} = \frac{f \cdot (x \cdot \cos \alpha \cdot (z \cdot \cos \omega + f \cdot \sin \omega) + \sin \alpha \cdot ((z^2 + f^2) \cdot \sin \omega \cdot \cos \omega + f \cdot z))}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial z_i}{\partial f} = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot ((z^2 + f^2) \cdot \cos \omega + 2 \cdot f \cdot z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha \cdot (z \cdot \cos \omega + 2 \cdot f \cdot \sin \omega)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial z}{\partial \omega} = \frac{f \cdot ((z^2 - f^2) \cdot \cos \alpha + x \cdot \sin \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega - z \cdot \sin \omega))}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial x} = \frac{f \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial z} = \frac{f \cdot x \cdot \sin \omega}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \alpha} = \frac{f \cdot ((z^2 - f^2) \cdot \cos^2 \omega - 2 \cdot f \cdot z \cdot \sin \omega \cdot \cos \omega - x^2 - z^2)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial f} = \frac{x \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \omega - \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot ((z^2 - f^2) \cdot \cos^2 \omega - 2 \cdot f \cdot z \cdot \sin \omega \cdot \cos \omega + x^2 - z^2) - x \cdot \sin^2 \alpha \cdot (2 \cdot f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \omega} = \frac{f \cdot x \cdot (f \cdot \sin \omega + z \cdot \cos \omega)}{(\cos \alpha \cdot (f \cdot \cos \omega + z \cdot \sin \omega) - x \cdot \sin \alpha)^2};$$

Враховуючи вирази отриманих похідних, визначимо середні квадратичні похибки відстані між головними оптичними променями:

$$m_{z_i} = \left(a^2 \cdot m_x^2 + b^2 \cdot m_z^2 + c^2 \cdot m_\alpha^2 + d^2 \cdot m_f^2 + e^2 \cdot m_\omega^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де a, c, d, e – значення наведених вище часткових похідних для $f_k = 90$ мм, $x = 1$ мм, $z = 10$ мм, $\alpha = 0,6^\circ$, $\omega = 6^\circ$, $m_f = m_x = m_z = 0,005$ мм, $m_\alpha = m_\omega = 3''$. У результаті обчислень отримаємо $m_z = 0,006$ мм. Як бачимо, отримане значення відповідає точності вимірів координат точок на знімках.

Визначимо тепер величину апіорної похибки поправки у поперечний кут нахилу із системи рівнянь (1), що враховується у поперечний кут нахилу камери. Ця поправка аналітично вводиться у кутовий елемент зовнішнього орієнтування, що встановлюється при зніманні на орієнтуючому пристрої цифрового фототеодоліта. Отже, отримаємо:

$$\omega = \arctg \left(\frac{2f \cdot \sin \alpha \cdot z \cdot \sin \alpha \pm \left[(4f^2 \sin^2 \alpha \cdot z^2 \cdot \sin^2 \alpha - 4(x^2 \cos^2 \alpha - z^2 \sin^2 \alpha)) \right]}{2(x^2 \cos^2 \alpha - z^2 \sin^2 \alpha)} \right), \quad (3)$$

$$\cdot \frac{\left[(x^2 \cos^2 \alpha - f^2 \sin^2 \alpha) \right]^{\frac{1}{2}}}{1}$$

Знайдемо часткові похідні

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{x \cdot \cos^2 \alpha \left((x^2 + z^2)(z^2 - f^2) \cos^4 \alpha + (f^2 - z^2)(x^2 + 2z^2) \cdot \cos^2 \alpha + \right)}{\left(4 \cdot f \cdot z \cdot \sin^2 \alpha \right) \left((x^2 + z^2) \cdot \cos^2 \alpha - z^2 \right) \cdot \left(- (x^4 + x^2 \cdot (z^2 + f^2) + f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^4 \alpha + \right.}$$

$$\left. + z^2 (2f^2 \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2) \right)}$$

$$+ \frac{x^2 (z^2 + f^2) + 2f^2 z^2 \cdot \cos^2 \alpha + f^2 z^2 (\sin^4 \alpha - 1)}{1} \cdot \frac{\left((x^2 + z^2) \cdot \cos^4 \alpha \cdot (4f^2 \cdot z^2 (x^2 + z^2) \cdot \right. \right.}$$

$$\left. \left. \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2) - \cos^2 \alpha (8f^2 \cdot z^4 (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + (x^2 + 2z^2)(z^2 - f^2)) + z^2 (f^2 (4z^4 + 1)) \right)}{1}$$

$$\cdot \frac{\left(\sin^4 \alpha + z^2 - f^2 \right) \cdot \left(- (x^2 + f^2)(x^2 + z^2) \cdot \cos^4 \alpha + (x^2 (z^2 + f^2) + 2 \cdot f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha + \right)}{1}$$

$$+ f^2 \cdot z^2 \cdot (\sin^4 \alpha - 1)}{2}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{2f \cdot \sin^2 \alpha \left((x^2 + z^2)^2 \cos^4 \alpha - 2z^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \cos^2 \alpha + z^4 \right) \cdot \left(- (x^4 \right. \right.}$$

$$\left. \left. \cdot \cos^4 \alpha \cdot (4f^2 \cdot z^2 (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2) - \cos^2 \alpha \right)}{\left((x^2 + z^2) \cdot \cos^4 \alpha - (x^2 (z^2 + f^2) + 2f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha + f^2 \cdot z^2 (\sin^4 \alpha - 1) \right)^{\frac{1}{2}} -}$$

$$\frac{\left(8f^2 \cdot z^4 (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + (x^2 + 2z^2)(z^2 - f^2) + z^2 (f^2 \cdot (4z^4 + 1) \sin^4 \alpha - f^2) \right) \cdot}$$

$$\left(- z \cdot \left(\cos^4 \alpha \cdot ((x^2 + f^2) \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^2 \alpha - x^2 \cdot (z^2 + f^2) - 2f^2 \cdot z^2) - \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left(- (x^4 + x^2 (z^2 + f^2)) \cdot \cos^4 \alpha + (x^2 \cdot (z^2 + f^2) + 2 \cdot f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha + f^2 \cdot z^2 (\sin^4 \alpha - 1) \right)^{\frac{1}{2}} \right. \right.$$

$$\left. \left. - \cos^2 \alpha \cdot (f^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + 2(x^2 (z^2 + f^2) + 2f^2 \cdot z^2)) \cdot \sin^2 \alpha - \right. \right.$$

$$\left. - 4f \cdot z \cdot \sin^2 \alpha \cdot ((x^2 + f^2)(x^2 + z^2) \cos^6 \alpha - (x^2 + z^2) \cdot (x^2 \cdot (2z^2 + f^2) + 3f^2 \cdot z^2) \cos^4 \alpha - \right. \right.$$

$$\left. - x^2 (z^2 + f^2) - 3 \cdot f^2 \cdot z^2) - f^2 \cdot z^2 \cdot (2 \cdot \sin^6 \alpha - \sin^4 \alpha - 2 \cdot \sin^2 \alpha + 1) \right)}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \alpha} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \left(4 + 2 \cdot ((x^2 + z^2)^2 \cdot \cos^4 \alpha - 2z^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \cos^2 \alpha + z^4) \right)}{\left((x^2 + z^2) \cdot \cos^4 \alpha - (4f^2 \cdot z^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2) - \right.}$$

$$\left. \left((x^4 + x^2 \cdot (z^2 + f^2) + f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^4 \alpha + (x^2 (z^2 + f^2) + 2f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha + f^2 \cdot z^2 \cdot (\sin^4 \alpha - 1) \right)^{\frac{1}{2}} -}$$

$$\left. - \cos^2 \alpha \cdot (8f^2 \cdot z^4 (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + (x^2 + 2z^2) \cdot (z^2 - f^2) + z^2 \cdot (f^2 (4z^4 + 1) \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2) \right. \right.$$

$$\left. - x^2 \left((x^2 \cdot (z^2 - f^2) + z^2 \cdot (z^2 + f^2)) \cdot \cos^2 \alpha - z^2 \cdot (z^2 + f^2) \right) \right)}$$

$$\frac{\left(- (x^4 + x^2 (z^2 + f^2) + f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^4 \alpha + (x^2 \cdot (z^2 + f^2) + 2f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha + \right)}{1}$$

$$\frac{1}{f^2 \cdot z^2 \cdot (\sin^4 \alpha - 1)^{1/2} - 4f \cdot z \cdot \sin^2 \alpha - ((x^2 + z^2) \cdot (x^4 + x^2 \cdot (z^2 + f^2) + f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^6 \alpha -$$

$$\frac{1}{(x^4 \cdot (2z^2 + f^2) + 2x^2 \cdot z^2 \cdot (z^2 + 2f^2) + 3f^2 \cdot z^4) \cdot \cos^4 \alpha - z^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot$$

$$\frac{1}{(f^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha - x^2 \cdot (z^2 + 2f^2) - 3f^2 \cdot z^2) + f^2 \cdot z^4 \cdot (\sin^4 \alpha - 1))}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial f} = \frac{(2z \cdot \sin^2 \alpha ((z^2 + f^2) \cdot \cos^2 \alpha - z^2) \cdot ((-(x^4 + x^2 \cdot (z^2 + f^2) + f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^4 \alpha -$$

$$\frac{1}{((x^2 + z^2) \cdot \cos^4 \alpha \cdot (4f^2 \cdot z^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2) -$$

$$\frac{1}{\cdot \cos^4 \alpha + (x^2 \cdot (z^2 + f^2) + 2f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha + f^2 \cdot z^2 (\sin^4 \alpha - 1))}{- \cos^2 \alpha \cdot (8f^2 \cdot z^4 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha + (x^2 + 2z^2)(z^2 - f^2) + z^2(f^2 \cdot (4z^2 + 1) \cdot \sin^4 \alpha + z^2 - f^2))} \cdot$$

$$\frac{1}{- f((x^2 + z^2) \cdot \cos^4 \alpha - (x^2 + z^2) \cdot \cos^2 \alpha - z^2(\sin^4 \alpha - 1))^{1/2} \cdot ((x^2 + z^2) \cdot \cos^2 \alpha - z^2)}$$

$$\frac{1}{((-(x^4 + x^2 \cdot (z^2 + f^2) + f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^4 \alpha + (x^2 \cdot (z^2 + f^2) + 2f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^2 \alpha +$$

$$\frac{1}{+ f^2 \cdot z^2 \cdot (\sin^4 \alpha - 1) - 4f \cdot z \cdot \sin^2 \alpha \cdot ((x^2 + f^2) \cdot (x^2 + z^2) \cdot \cos^6 \alpha - (x^2 + z^2)(x^2 \cdot$$

$$\frac{1}{\cdot (2z^2 + f) + 3f^2 \cdot z^2) \cdot \cos^4 \alpha - z^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (f^2 \cdot (x^2 + z^2) \cdot \sin^4 \alpha -$$

$$\frac{1}{- x^2 \cdot (z^2 + 2f^2) - 3f^2 \cdot z^2) + f^2 \cdot z^4 (\sin^4 \alpha - 1))^{1/2}}$$

Аналогічно, як і у попередніх викладках, визначимо середню квадратичну похибку ω . У результаті обчислень отримаємо $m_\omega = 4''$. Це значення також відповідає порядку виміряних кутів.

Для перевірки вищенаведених розрахунків проведено відповідні експериментальні дослідження, в яких застосовувався цифровий фототеодоліт, що складався з цифрової камери Olympus E-20p та теодоліта Theo 010B. Попередньо розраховано апіорну оцінку точності просторових координат. Розв'яжемо цю задачу для паралельного випадку знімання:

$$X_\phi = B \frac{x_1}{p} \sin \phi;$$

$$Y_\phi = B \frac{f}{p} \sin \phi; \tag{4}$$

$$Z_\phi = B \frac{z_1}{p} \sin \phi.$$

З цих формул отримаємо середні квадратичні похибки координат:

$$m_{X_\phi}^2 = \left(\frac{\partial X_\phi}{\partial B}\right)^2 m_B^2 + \left(\frac{\partial X_\phi}{\partial p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\partial X_\phi}{\partial x_1}\right)^2 m_{x_1}^2;$$

$$m_{Y_\phi}^2 = \left(\frac{\partial Y_\phi}{\partial B}\right)^2 m_B^2 + \left(\frac{\partial Y_\phi}{\partial p}\right)^2 m_p^2;$$

$$m_{Z_\phi}^2 = \left(\frac{\partial Z_\phi}{\partial B}\right)^2 m_B^2 + \left(\frac{\partial Z_\phi}{\partial p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\partial Z_\phi}{\partial z_1}\right)^2 m_{z_1}^2, \tag{5}$$

де m_x m_y m_z – середні квадратичні похибки координат X , Y , Z ; m_B – середня квадратична похибка виміру базису фотографування; m_x m_y m_p – середні квадратичні похибки виміру координат знімка x , y , z та паралакса p . Знайдемо часткові похідні та, враховуючи ці значення, отримаємо

$$m_{x_\phi}^2 = \left(\frac{m_B x_1}{Bf}\right)^2 Y_\phi^2 + \left(\frac{m_p x_1}{Bf^2}\right)^2 \frac{Y_\phi^4}{\sin^2 \varphi} + \left(\frac{m_x}{f}\right)^2 Y_\phi^2;$$

$$m_{y_\phi}^2 = \left(\frac{m_B}{B}\right)^2 Y_\phi^2 + \left(\frac{m_p}{Bf}\right)^2 \frac{Y_\phi^4}{\sin^2 \varphi};$$

$$m_{z_\phi}^2 = \left(\frac{m_B z_1}{Bf}\right)^2 Y_\phi^2 + \left(\frac{m_p z_1}{Bf^2}\right)^2 \frac{Y_\phi^4}{\sin^2 \varphi} + \left(\frac{m_z}{f}\right)^2 Y_\phi^2.$$
(6)

В нашому випадку:

для $B = 30$ м, $f = 86$ мм, $x_1 = 40$ мм, $z_1 = 30$ мм, $\varphi = 30^\circ$, $m_B = 5$ мм, $m_x = m_z = m_p = 5$ мкм. Значення похибок подано у табл. 1.

Таблиця 1

Апріорна оцінка точності просторових координат

Відстань (м)	m_{xp} (м)	m_{yp} (м)	m_{zp} (м)
300	0.16	0.35	0.12
700	0.89	1.90	0.67

Знімання проводилось на території Закарпатської області в районі Терезля-Рікської гідроелектростанції. Фотографування виконувалося на регіон урочища “Криничі”. Місцевість є горбистою, лісистою, із чагарниками та вирубною дерев. Ліс переважно листяний – граб та бук, їхня середня висота – 17 м. Перепад висот місцевості від 300 до 700 м. У нижній частині розташований населений пункт.

Для визначення оцінки точності запропонованого комплексу на місцевості, що підлягала зніманню, були визначені ситуаційні точки як на місцевості, так і на знімках. За допомогою тахеометра-автомата були визначені координати вищевказаних розпізнавальних знаків. При обробці стереопар на ЦФС “Дельта-2” було визначено координати цих розпізнавальних знаків на знімках. Порівнявши отримані результати координат під час експерименту, виконано оцінку точності.

У табл. 2 наведено результати оцінки точності визначення просторових координат, отриманих за допомогою цифрового комплексу.

Таблиця 2

Похибки просторових координат контрольних точок

№	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1	2	3	4
1	0,10	0,10	0,20
2	-0,10	-0,30	-0,11
3	-0,02	-0,13	-0,01
4	-0,12	-0,23	0,09
5	-0,15	-0,10	0,10
6	0,89	-1,24	-0,53
7	-0,80	1,73	-0,32

Продовження табл. 2

1	2	3	4
8	0,02	1,90	0,73
9	1,00	-0,34	0,24
10	0,03	0,27	0,10
11	0,09	-0,30	0,10
12	-0,10	0,17	0,12
13	-0,03	0,21	0,15
14	0,74	-1,45	-0,50
15	0,91	-1,83	-0,67
16	0,69	1,57	0,37
17	-0,42	1,03	-0,51
18	-0,90	-0,99	-0,70
19	0,24	-0,49	0,19
20	0,19	0,21	-0,10
21	-0,10	0,45	0,21
22	-0,64	0,87	0,40
23	0,89	1,08	-0,54
24	-0,73	-0,90	0,43
25	-0,85	-1,27	0,60

Середні квадратичні похибки, є такими: $m_x = 0,57$ м, $m_y = 0,98$ м, $m_z = 0,40$ м.

Висновки. 1. Перегляд останніх праць за проблемою, що розглядається, дає можливість зробити однозначний висновок про актуальність та необхідність розробляти у подальшому технології калібрування цифрових камер та фототеодолітних систем, що створюються на їх основі.

2. Аналізуючи результати обчислень, видно, що значення z_i знаходиться в межах точності виміру знімків на ЦФС,

3. Порівнюючи результати оцінки точності з апіорною оцінкою, необхідно зробити висновок, що точність визначення просторових координат об'єктів відповідає розрахунковій.

1. Гельман Р.Н., Никитин М.Ю. Применение принципа фототеодолита при наземной цифровой съёмке // Геодезия и картография. – М., 2004. – С. 32–37. 2. Глотов В. Спосіб встановлення цифрових знімальних камер відносно орієнтувальних пристроїв // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2005. – С. 248–252. 3. Глотов В.М., Чижевський В.В. Особливості технологічної схеми цифрового фототеодолітного знімання для складання фронтальних планів // Геодезія картографія і аерофотознімання. – 2003. – № 64. – С. 114–117. 4. Лобанов А.Н. Фотомонография. – М.: Недра, 1983. – 263 с. 5. Imoto H., Hattori S., Akimoto K., Ohnishi Y. Camera calibration technique by pan-closeup exposures for industrial vision metrology // The international archives of the remote sensing and spatial information sciences. XXXV congress ISPRS. – Istanbul, 2004. – P. 73–76. 6. Meidow J. Calibration of stationary cameras by observing objects of equal heights on a ground plane. The international archives of the remote sensing and spatial information sciences. XXXV congress ISPRS. – Istanbul, 2004. – P. 1067–1072.