

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВОЇ ФОТОКАМЕРИ ШЛЯХОМ ЇЇ КАЛІБРУВАННЯ

У роботі проведено аналіз можливостей та доцільності використання існуючих підходів калібрування відеокамер. Визначено, що одним із шляхів зменшення та врахування похибки графічного перетворення координат об'єкту дослідження в координати пристрою є процедура калібрування відеокамери та отримання так званої моделі відеокамери, що приблизно описує її параметри. Описано методологія визначення внутрішніх параметрів цифрової фотокамери шляхом використання плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки, що дозволяє значно зменшити кінцеву похибку вимірювання координат і тим самим підвищити точність побудови траєкторії руху об'єктів.

Зроблено висновок, що одночасне застосування автоматичного та ручного визначення ключових точок під час калібрування відеокамери дозволяє підвищити точність побудови траєкторії руху вертексу в кефалографічній системі.

Ключові слова: відеокамера, калібрування, матриця, матриця калібрування, координати руху об'єкту.

Вступ. В умовах ведення сучасних мереже центричних та гібридних війн важливу роль відведено оптико-електронним засобам ведення розвідки. За рахунок застосування оптико-електронних пристроїв є можливість своєчасно виявити загрозу та прийняти рішення по її нейтралізації. Між тим науково технічний прогрес зумовив появу принципово нових оптико-електронних пристроїв (ОЕП), які можуть суттєво розширювати можливості з охорони об'єктів та виконання завдань ведення розвідки. Вони здатні працювати в пасивному режимі, тобто не демаскувати себе, а в умовах постановки навмисних завад оптико-електронні пристрої стають практично єдиним джерелом інформації про обстановку.

ОЕП, що застосовуються для виконання завдань розвідки та охорони вирішують такі основні завдання, як: розпізнавання та класифікація образів, побудова 3D-моделі, вимірювання відстаней, розпізнавання рухомих об'єктів та відновлення траєкторії їх руху, тощо. Усі ці задачі розглядають математичну модель камери з точки зору певного набору її внутрішніх параметрів. Ці параметри іноді можна отримати у специфікаціях камер. Але дуже часто зустрічаються ситуації відсутності у відкритому доступі адекватної технічної документації та впливу процесу виробництва на можливе відхилення цих параметрів від норми, що призводить до необхідності розробки прикладних алгоритмів їх вимірювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, постановка задачі.

Одним із шляхів зменшення та врахування похибки графічного перетворення координат об'єкту дослідження в координати пристрою є процедура калібрування відеокамери та отримання так званої моделі відеокамери, що приблизно описує її параметри [1]. Існує декілька підходів для проведення процедури калібрування.

Серед них можна виокремити наступні відомі реалізації: Roger Y. Tsai, OpenCV calib3d, Camera Calibration Toolbox for Matlab:

а) алгоритм Roger Y. Tsai [2]. Він складається з двох етапів, на першому з яких визначаються параметри зовнішнього калібрування (це параметри, що зв'язують систему координат камери з фіксованою реальною (світовою) системою координат, а також описують її положення й орієнтацію в просторі), на другому – внутрішнього калібрування (це параметри, які пов'язують систему координат камери з ідеальною системою координат, що визначають оптичні властивості камери, такі як: фокусна відстань, розміри пікселів, і положення центру зображення, де оптична вісь перетинає площину зображення та дисторсії);

б) «нова гнучка технологія калібрування камери» [3], що заснована на використанні плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки;

в) автокалібрування – отримання калібрувальних даних безпосередньо по зображеннях, причому в сцені не потрібна присутність спеціальних калібрувальних об'єктів.

Основними кроками даного методу є:

- пошук особливих точок на всіх зображеннях;
- пошук точкових відповідностей між зображеннями;
- пошук параметрів калібрування з використанням алгоритму Bundle Adjustment.

Серед зазначених підходів найбільш поширеним є алгоритм Roger Y. Tsai. Даний алгоритм використовується в більшості програмних продуктів, призначених для калібрування відеокамер. При цьому суттєвим недоліком є, повна автоматизація процесу калібрування без можливості коригування положення контрольних точок зображення.

Мета статті – підвищення точнісних характеристик побудови траєкторії руху об'єкту, шляхом розробки методу визначення внутрішніх та зовнішніх параметрів калібрування відеокамери.

Викладення основного матеріалу. Калібрування камери складається з вирішення задачі відновлення внутрішніх та зовнішніх параметрів камери, по набору зображень, відзнятих нею. Зовнішні параметри відносяться до положення камери в просторі і є специфічними для кожного зображення, внутрішні параметри відносяться лише до будови камери і для кожного зображення залишаються сталими. Внутренние параметры уникальны для каждой камеры и не зависят от других камер и положения в пространстве. Их можно определить индивидуально для каждой камеры с помощью геометрической калибровки по методике, описанной в [4-5]. Останні, в свою чергу, можна умовно поділити на дві групи - ті, що спричинені кривизною лінзи (для простоти вважатимемо, що вона одна), їх ще називають дисторсією лінзи, та ті, що відносяться до її положення відносно матриці камери. Зазвичай, калібрування теж ділять на дві окремі під задачі, отже в подальшому до певного моменту будемо вважати, що у лінзи камери відсутня дисторсія.

Завдання вирішується в припущенні, що внутрішні параметри камери: фокусна відстань і координати головної точки (перетини головної оптичної осі з площиною проєкцій) - залишаються незмінними при реєстрації використовуваного набору зображень. Проблема полягає в тому, що невідомі положення і орієнтація камери при зйомці. Рішення цієї задачі, як правило, здійснюється після знаходження фундаментальних матриць, що зв'язують точки попарно узятих зображень. Знання матриці калібрування потрібне для подальшого визначення положення камер, тобто зовнішніх параметрів камери. У роботі [6] запропонований метод рішення задачі знаходження параметрів камери по відомих фундаментальних матрицях, одним з етапів якого є рішення перевизначеної системи лінійних рівнянь.

Зазвичай, калібрування теж ділять на дві окремі підзадачі, отже в подальшому до певного моменту будемо вважати, що у лінзи камери відсутня дисторсія.

Розглядатимемо такі параметри:

f_x, f_y – фокусні відстані, виражені у пікселях (вважаємо їх різними, адже пікселі у матрицях камер зазвичай не квадратні, а прямокутні),

C_x, C_y – координати в пікселях центральної вісі (зазвичай це точка, близька до центру матриці камери)

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрицю M будемо називати матрицею калібрування. Усі подальші міркування та обчислення будуть націлені на знаходження цієї матриці по певному набору зображень,

відзнятих камерою. Процес вычислення матриці проєцирования називається калібрівкою камери [7-8]. Для вычислення матриці проєцирования производится съёмка калібрівочної сцени. Далее на изображениях определяются характерные точки, положение в пространстве которых известно.

Відображення об'єктів реального світу на матрицю камери можна описати як проєктивне 3D-2D перетворення. Очевидно, що воно не є однозначним, адже будь-яка точка з матриці камери має своїм прообразом промінь – ГМТ можливого знаходження точки у просторі, зображення якої отримане на матриці. Це дає підстави до використання однорідних координат. Опишемо математичну модель цього перетворення. Нехай

$\bar{Q} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ - координати точкового об'єкту у просторі

$\bar{q} = [x \ y \ 1]^T$ - координати зображення цього ж об'єкту на матриці камери

Тоді $\bar{q} = sH\bar{Q}$, де H визначається з точністю до коефіцієнта s . Його виносять для подальшого отримання матриці M у нормалізованому вигляді з одиницею у правому нижньому кутку.

Матриця перетворення H природним чином розкладається на добуток двох, адже відображення \bar{Q} в \bar{q} складається зі зведення координат камери або об'єкту до єдиної системи координат системи відносно камери (або, відносно об'єкту) і подальшого застосування перетворення самої камери, що має представлення у вигляді матриці M .

Отже $H = M[R \ t]$, де R – матриця повороту 3×3 (отримана як добуток матриць повороту на певні кути відносно осей x, y та z), t – вектор зсуву 3×1 системи координат об'єкту відносно системи координат камери.

З існуючих підходів оберемо запропонований Zhengyou Zhang, та описаний в [9-10], як той, що на наш погляд має найпростішу математичну модель та зручне практичне застосування. Калібрівальний об'єкт – об'єкт з відомими геометричними характеристиками, маючи набір зображень якого у різних конфігураціях (повороти та зсуви відносно камери), матимемо змогу скласти певну систему рівнянь з невідомою матрицею M та розв'язати її. Пропонується як калібрівальний об'єкт використовувати шахову дошку. Вигляд набору, що можна використати для калібрівання надано на рис. 1.

Це дає змогу дещо спростити подальшу математичну модель.

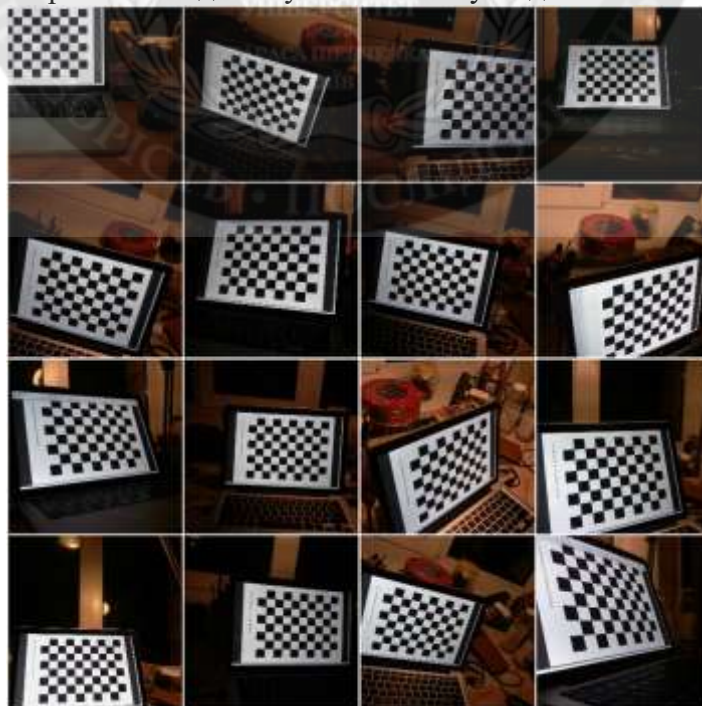


Рис. 1. Приклад набору даних, що можна використати для калібрівання

Так як калібрувальний об'єкт вибрано плоским, то, перейшовши у систему координат відносно нього таким чином, щоб всі точки на об'єкті мали координату $Z = 0$, зможемо знехтувати однією розмірністю матриці H (перейшовши від матриці 3×4 до матриці 3×3):

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sM[R \ t] = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для кожного зображення шахової дошки можемо скласти таке рівняння (рис. 2)

$$p_{dst} = Hp_{src}, \text{ де } p_{src} = \begin{bmatrix} x_{src} \\ y_{src} \\ 1 \end{bmatrix} - \text{однорідні координати, відповідні координатам вузлів}$$

шахової дошки (у системі координат, з початком у лівому верхньому вузлі), їх можемо отримати із знань про геометричну структуру дошки,

$$p_{dst} = \begin{bmatrix} x_{dst} \\ y_{dst} \\ 1 \end{bmatrix} - \text{однорідні координати, відповідні координатам зображень відповідних}$$

вузлів шахової дошки, їх можемо отримати або вручну, або за допомогою відомих алгоритмів. Вигляд застосування до зображення шахової дошки відповідної їй матриці перетворення H на дано на рис. 2.

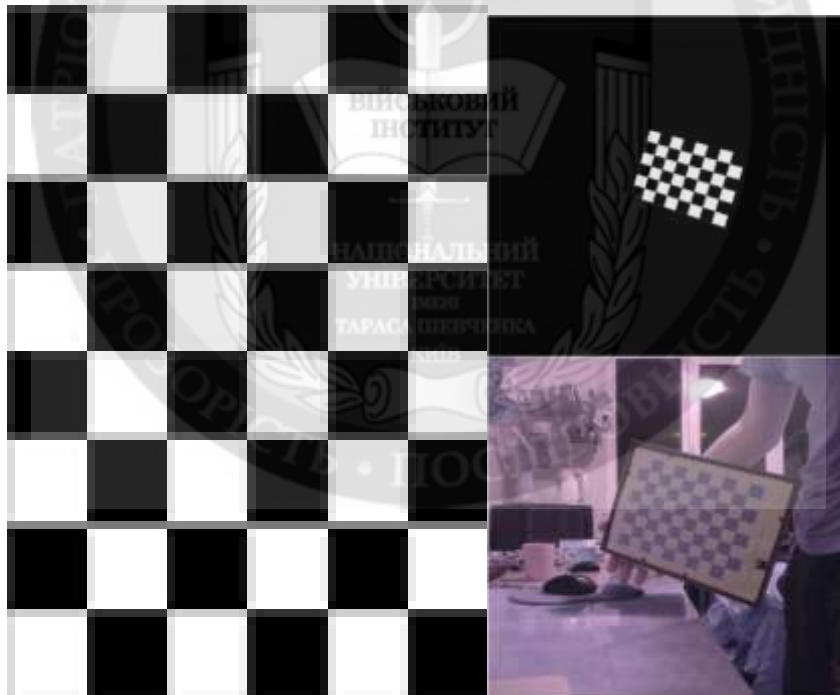


Рис. 2. Приклад застосування до зображення шахової дошки відповідної їй матриці перетворення H

Розв'яжемо цю систему відносно H . Розглянемо по елементний розклад цієї матриці

$$H = [h_1 \ h_2 \ h_3] = sM[r_1 \ r_2 \ t]$$

$$r_1 = s^{-1}M^{-1}h_1 = \lambda M^{-1}h_1$$

$$r_2 = s^{-1}M^{-1}h_2 = \lambda M^{-1}h_2$$

$$t = s^{-1}M^{-1}h_3 = \lambda M^{-1}h_3$$

Використаємо ортогональність та рівність довжин векторів r_1 та r_2

$$\begin{cases} r_1^T r_2 = 0 \\ \|r_1\| = \|r_2\| \end{cases}.$$

Враховуючи вищевказані співвідношення для r_1 та r_2 , маємо систему

$$\begin{cases} h_1^T (M^{-1})^T M^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T (M^{-1})^T M^{-1} h_1 = h_2^T (M^{-1})^T M^{-1} h_2 \end{cases}. \quad (3)$$

Введемо, для зручності, нове позначення

$$B = (M^{-1})^T M^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}.$$

Знаючи матрицю M , обчислимо її обернену та знайдемо матрицю B

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{f_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{f_y} & 0 \\ -\frac{C_x}{f_x} & -\frac{C_y}{f_y} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{f_x} & 0 & -\frac{C_x}{f_x} \\ 0 & \frac{1}{f_y} & -\frac{C_y}{f_y} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & -\frac{C_x}{f_x^2} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & -\frac{C_y}{f_y^2} \\ -\frac{C_x}{f_x^2} & -\frac{C_y}{f_y^2} & \frac{C_x^2}{f_x^2} + \frac{C_y^2}{f_y^2} + 1 \end{pmatrix}.$$

Бачимо, що ця матриця є симетричною, і містить лише шість невідомих параметрів.

Запишемо систему (3) в загальному вигляді (вона містить в собі доданки вигляду $h_s^T B h_j$) та

виконаємо нескладні перетворення, згрупувавши коефіцієнти біля елементів матриці B

$$\begin{pmatrix} h^3_1 \\ h^3_2 \\ h^3_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^j_1 \\ h^j_2 \\ h^j_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} h^3_1 + B_{12} h^3_1 + B_{13} h^3_1 \\ B_{12} h^3_2 + B_{22} h^3_2 + B_{23} h^3_2 \\ B_{13} h^3_3 + B_{23} h^3_3 + B_{33} h^3_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^j_1 \\ h^j_2 \\ h^j_3 \end{pmatrix} = (B_{11} h^3_1 + B_{12} h^3_2 + B_{13} h^3_3) h^j_1 + \\ + (B_{12} h^3_1 + B_{22} h^3_2 + B_{23} h^3_3) h^j_2 + (B_{13} h^3_1 + B_{23} h^3_2 + B_{33} h^3_3) h^j_3 = B_{11} (h^3_1 h^j_1) + B_{12} (h^3_1 h^j_2 + h^3_2 h^j_1) + \\ + B_{13} (h^3_1 h^j_3 + h^3_3 h^j_1) + B_{22} (h^3_2 h^j_2) + B_{23} (h^3_2 h^j_3 + h^3_3 h^j_2) + B_{33} (h^3_3 h^j_3)$$

Позначимо $a_{sj} = \begin{pmatrix} h^s_1 h^j_1 \\ h^s_1 h^j_2 + h^s_2 h^j_1 \\ h^s_3 h^j_1 + h^s_1 h^j_3 \\ h^s_2 h^j_2 \\ h^s_3 h^j_2 + h^s_2 h^j_3 \\ h^s_3 h^j_3 \end{pmatrix}^T$, $b = \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{13} \\ B_{22} \\ B_{23} \\ B_{33} \end{pmatrix}$, тоді система (3) перепишеться у вигляді

$$\begin{cases} a_{1,2}^T b = 0 \\ (a_{1,1} - a_{2,2})^T b = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Отримавши n різних зображень шахової дошки, отримаємо $2 * n$ рівнянь вигляду системи (4). Можемо зібрати їх у єдину систему $Ab = 0$, та знайти з неї невідомий вектор b . Знаючи структуру матриці B , зможемо по вектору b однозначно відновити шукану матрицю калібрування M .

Так як нуль-вектор як розв'язок системи нас не цікавить, у неї додається умова. Тоді, розв'язання отриманої системи еквівалентне знаходженню власного вектора, відповідного найменшому власному числу матриці A . Для цього використаємо метод SVD розкладу.

SVD розкладом матриці називатимемо її представлення у вигляді: $A = USV^T$, де $U^T U = E$, $V^T V = E$, S -діаг.матриця.

Якщо $A - (m \times n)$, то $U - (m \times n)$, $V = (n \times n)$, $S - (m \times n)$: $S_{ss} = \sigma_s$, $S_{ij} = 0$ при $i \neq j$

Перейдемо до розв'язку нашої системи $Ab = 0$

$$USV^T b = 0$$

$$U^T USV^T b = U^T 0 = 0$$

$$SV^T b = 0$$

$$\begin{pmatrix} \delta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \delta_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{n2} \\ - & - & - & - \\ v_{1n} & v_{2n} & \dots & v_{nn} \end{pmatrix} b = 0.$$

Позначимо $b = \mu v^n = \mu(v_{1n}, v_{2n}, \dots, v_{nn})^T$, тоді

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ v_{1n} & v_{2n} & \cdot & v_{nn} \end{pmatrix} \mu \begin{pmatrix} v_{1n} \\ v_{2n} \\ \cdot \\ v_{nn} \end{pmatrix} = \mu \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \sigma_n \end{pmatrix}.$$

Розв'язком системи буде вектор b

$$b = \mu v_n = \mu(v_{1n}, v_{2n}, \dots, v_{nn})^T, \sigma_n = \min_{1 \leq i \leq n} \sigma_i$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 v_{11} & \sigma_1 v_{21} & \dots & \sigma_1 v_{n1} \\ \sigma_2 v_{12} & \sigma_2 v_{22} & \dots & \sigma_2 v_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma_n v_{1n} & \sigma_n v_{2n} & \cdot & \sigma_n v_{nn} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \mu \begin{pmatrix} v_{1n} \\ v_{2n} \\ \cdot \\ v_{nn} \end{pmatrix} =$$

$$= \mu \begin{pmatrix} \sigma_1 (v_{11} v_{1n} + v_{21} v_{2n} + \dots + v_{n1} v_{nn}) \\ \sigma_2 (v_{12} v_{1n} + v_{22} v_{2n} + \dots + v_{n2} v_{nn}) \\ \dots \\ \sigma_n (v_{1n}^2 + v_{2n}^2 + \dots + v_{nn}^2) \end{pmatrix} = \mu \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \sigma_n \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Псевдокод алгоритму:

chessBoardCorners = список точок, що відповідає структурі шахової дошки;

X = результуюча матриця розмірності $(2 \times k \times \text{сть зображень } x \text{ б})$;

Для кожного зображення:

imgCorners = список точок шахової дошки на зображенні, у відповідному з *chessBoardCorners* порядку;

Знайти матрицю перетворення H між *chessBoardCorners* та *imgCorners*;

Записати у X внесок отриманої матриці H ;

$[U, S, V] = \text{SVD-розклад матриці } X$;

b = останній стовпчик матриці V ;

знаходимо внутрішні параметри камери, знаючи елементи вектора b ;

Наведений алгоритм легко переноситься на будь-яку з сучасних мов програмування. Авторами статті були запрограмовані та протестовані реалізації мовами Python, C++, Matlab. Збіжність наведеного методу перевірена на практиці, що слідує з експериментальних даних, наведених у наступній таблиці 1 (де Q_x – вибіркове середньо-квадратичне відхилення величини: x):

Таблиця 1

Таблиця збіжності експериментальних даних наведеного методу

	f_x	σf_x	f_y	σf_y	c_x	σc_x	c_y	σc_y
1.	2645.620	245.384	2487.355	248.320	1393.977	124.503	934.357	56.477
2.	2592.541	126.602	2419.541	131.129	1345.612	61.172	922.526	37.483
3.	2567.770	105.015	2396.792	108.540	1332.942	53.648	911.968	34.334
4.	2540.205	76.470	2367.162	81.253	1324.941	41.886	919.444	22.324
5.	2525.062	62.886	2350.248	67.651	1320.616	31.332	921.033	16.827
6.	2536.624	76.398	2363.904	81.810	1327.441	37.790	920.012	15.947
7.	2518.646	62.740	2345.397	65.607	1322.611	33.828	919.231	11.382
8.	2551.091	85.153	2381.445	93.033	1342.022	46.754	915.480	13.204
9.	2552.931	86.993	2382.689	94.277	1343.617	48.349	912.834	13.526
10.	2528.806	63.720	2357.564	70.239	1332.698	39.085	914.992	11.119
11.	2510.424	44.546	2337.603	49.995	1325.538	31.734	916.778	7.635
12.	2510.591	51.369	2336.996	52.759	1320.932	30.174	917.099	9.054
13.	2478.432	17.296	2306.399	21.078	1319.713	28.044	922.383	2.543
14.	2487.954	22.016	2317.847	29.434	1331.289	36.021	923.793	0.620
15.	2479.923	15.884	2307.242	19.966	1318.374	25.470	923.559	3.235
16.	2471.880	7.363	2297.158	9.609	1305.781	12.419	925.380	0.968
17.	2476.576	10.638	2302.301	13.889	1312.978	17.710	922.567	1.845
18.	2464.809	1.129	2287.766	0.646	1294.878	0.390	925.190	0.778
19.	2465.938	0	2288.412	0	1295.268	0	924.412	0

Порівняння отриманих результатів з іншими доступними реалізаціями наведеного алгоритму та даними, отриманими із специфікації камери наведене у табл. 2.

Порівняння отриманих результатів з іншими доступними реалізаціями наведеного алгоритму:

	f_x	f_y	c_x	c_y
Наведена реалізація	2466	2288	1295	924
OpenCV	2583	2583	1360	925
Matlab Toolbox	2540	2367	1312	924
Специфікації камери	2500	2500	1296	972

Висновки:

1. Проведений аналіз існуючих підходів калібрування відеокамер показав доцільність використання плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки.

2. Одночасне застосування автоматичного та ручного визначення ключових точок під час калібрування відеокамери дозволяє підвищити точність побудови траєкторії руху вертексу в кефалографічній системі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Лунев А.А. Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры [Электронный ресурс] / А.А. Лунев. — Режим доступа: \www/URL: http://www.info.donntu.edu.ua/el_izdan/geolog/sborniki/ggf111t2.pdf

2. Tsai R.Y. A versatile camera calibration technique for highaccuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [Text] / R. Y. Tsai // IEEE Int. Journal Robotics and Automation. — 1987. — Vol. 3(4). — P. 323—344.

3. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [Text] / Z. Zhang // IEEE Trans. on PAMI. — 2000. — Vol. 22(11). — P. 1330—1334.

4. Adrian Kaehler, Gary Bradski. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library, O'Reilly Media, 2016

5. Гельман Р.Н. Комбинированный способ калибровки цифровых камер / Р.Н. Гельман, А.Л. Дунц // Геодезия и картография. — 2005. — № 7. — С. 20 – 24.

6. Lunds University: Computer Vision Lectures, 2015. <http://www.ctr.maths.lu.se/media/FMA270/2015/alllectures.pdf>

7. Гельман Р.Н. Опыт использования цифровых камер при совместной аэрофотосъемке с аэрофотоаппаратом / Р.Н. Гельман, М.Ю. Никитин А.Л. Дунц // Геодезия и картография. — 2006. — № 1. — С. 25 – 31.

8. Richard Hartley, Andrew Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision: Second Edition, Cambridge University Press, March 2004

9. Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications: Springer, 2011 - 979 p.

10. Jernej Mrovlje, Damir Vrančić. Distance measuring based on stereoscopic pictures: 9th International PhD Workshop on Systems and Control October 2008 - 6 p.

REFERENCES:

1. Lunev A.A. Vybory optimal'nykh parametrov kalibrovki cifrovoj kamery. http://www.info.donntu.edu.ua/el_izdan/geolog/sborniki/ggf111t2.pdf. (accessed 13 February 2017)

2. Tsai R. Y. (1987) A versatile camera calibration technique for highaccuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. Vol. 3(4), pp.323—344.

3. Zhang Z. (2000) A flexible new technique for camera calibration. Vol. 22 (11). pp.1330—1334.

4. Adrian Kaehler, Gary Bradski. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library: O'Reilly Media, 2016 - 571 p.

5. Gel'man R.N. (2005) Kombinirovannyj sposob kalibrovki cifrovyyh kamer. Geodeziya i kartografiya. no. 7, pp. 20 – 24.

6. Lunds University: Computer Vision Lectures, 2015. <http://www.ctr.maths.lu.se/media/FMA270/2015/alllectures.pdf>

7. Gel'man R.N., Nikitin M.Y., Dunc A.L. (2006) Opyt ispol'zovaniya cifrovyyh kamer pri sovmestnoj aehrofotos"emke s aehrofotoapparatom. Geodeziya i kartografiya. no. 1, pp. 25 – 31.
8. Richard Hartley, Andrew Zisserman. (2004) Multiple View Geometry in Computer Vision: Second Edition, Cambridge University Press.
9. Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications: Springer, 2011. - 979 p.
10. Jernej Mrovlje, Damir Vrančić. Distance measuring based on stereoscopic pictures: 9th International PhD Workshop on Systems and Control October 2008. - 6 p.

Без рецензії.

к.т.н., доц. Пампуха И.В., к.воен.н. Никифоров М.Н.,
к.физ.-м.н., с.н.с. Стеля О.Б., Катричук Д.А.

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ ПУТЕМ ЕЕ КАЛИБРОВАНИЯ

В работе проведен анализ возможностей и целесообразности использования существующих подходов калибровки видеокамер. Определено, что одним из путей уменьшения и учета погрешности графического превращения координат объекта исследования в координаты устройства есть процедура калибровки видеокамеры и получения так называемой модели видеокамеры, которая приблизительно описывает ее параметры. Описано методология определения внутренних параметров цифровой фотокамеры путем использования плоского калибровочного объекта в виде шахматной доски, что позволяет значительно уменьшить конечную погрешность измерения координат и тем самым повысить точность построения траектории движения объектов.

Сделан вывод, что одновременное применение автоматического и ручного определения ключевых точек во время калибровки видеокамеры позволяет повысить точность построения траектории движения вертексу в кефалографичний системе.

Ключевые слова: видеокамера, калибрование, матрица, матрица калибрования, координаты движения объекта.

Ph.D. Pampuha I.V., Ph.D. Nikiforov M.M., Ph.D. Stelia O.B., Katrychuk D.O.
**METHODOLOGY OF DETERMINATION OF INTERNAL PARAMETERS OF DIGITAL
PHOTOCAMERA BY ITS CALIBRATION**

The analysis of possibilities and expedience of the use of existent approaches of calibration of video cameras is in-process conducted. Certainly, that one of ways of diminishing and account of error of graphic transformation of co-ordinates of object of research in the co-ordinates of device there is procedure of calibration of video camera and receipt of the so-called model of video camera which describes its parameters approximately. It is described methodology of determination of internal parameters of digital photocalera by the use of flat gauge object as a chess-board, that allows considerably to decrease the eventual error of measuring of co-ordinates and the same to promote exactness of construction of trajectory of motion of objects. A conclusion is done, that simultaneous application of automatic and hand determination of key points during calibration of video camera allows to promote exactness of construction of trajectory of motion of verteksu in the kefalografichniy system.

Keywords: video camera, calibration, matrix, matrix of calibration, co-ordinate of motion of object.