

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДТВОРЕННЯ КООРДИНАТ РУХУ БІООБ'ЄКТУ

Abstract. The analysis of the results of determining the internal and external parameters camcorder for kefalografic system. Found a critical parameter that affects the direct determination of the coordinates of the center of the object. Determined the basic steps for calibrating cameras of kefalografic system.

Вступ

Сучасні системи технічного зору з використанням різного роду відео датчиків являються одним з ефективних інструментів в задачах безконтактного вимірювання біометричних характеристик і параметрів тіла людини, геометричних розмірів об'єктів в просторі, виявлення різноманітних дефектів продукції тощо. При цьому для вирішення таких задач можуть бути використані відносно недорогі цифрові відеокамери. Природно, що такі відеокамери по точності результатів не в змозі конкурувати зі спеціалізованою апаратурою, як наприклад для фотограмметрії, та незважаючи на це існує значне коло задач, де вони можуть успішно використовуватись.

Однією з таких задач є модифікація методики дослідження позних рефлексів людини – кефалографії [1]. В основі даної методики лежить застосування відеореєстрації інтегрального показника результуючої роботи статокінетичної функції – переміщення вертексу в просторі, що позначається маркером прямокутної форми [2].

Однією з основних задач при обробленні вихідної послідовності зображень кефалографічної системи є визначення координат центру заданого маркера. Отримані координати зберігаються в пам'яті. На основі цих координат будується траєкторія руху вертексу.

Необхідно звернути увагу на дві достатньо складні операції, а саме на процес перетворення реальних координат положення вертексу в координати пристрою відображення та розпізнавання границь маркеру. Опис графічного об'єкту – маркера – подається в вигляді значень координат в зовнішній системі відліку, яке представляє собою координати точки. Однак, коли відбувається перетворення стандартів розгортки в буфері кадрів відеокамери, вхідний опис трансформується в координати пікселів, що займають кінцеву площу екрана пристрою відображення, тому отримане растрове зображення відповідає заданому об'єкту з деякою похибкою.

Таким чином можна зробити висновок, що зведення даної похибки до мінімуму дозволить підвищити точність відтворення переміщення вертексу в

просторі і як наслідок покращити якість оцінювання статокінетичної функції людини.

Цим обґрунтовується актуальність проведення даних досліджень.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одним із шляхів зменшення та врахування похибки графічного перетворення координат об'єкта дослідження в координати пристрою відображення є процедура калібрування відеокамери та отримання так званої моделі відеокамери, що приблизно описує її параметри [3].

Існує ряд підходів для проведення процедури калібрування. Серед них можна виділити наступні:

а) алгоритм Roger Y. Tsai [4]. 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» [5], 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 реалізації даного методу є:

- пошук особливих точок на всіх зображеннях;
- пошук точкових відповідностей між зображеннями;
- пошук параметрів калібрування з використанням алгоритму Bundle Adjustment [6].

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.

Тому метою проведених досліджень є підвищення точності побудови траєкторії руху вертексу біооб'єкту шляхом розробки методу визначення внутрішніх та зовнішніх параметрів відеокамер з можливістю коригування впливу сумарної дисторсії на вихідне зображення кефалографічної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні задачі:

1. Проаналізувати переваги та недоліки існуючих підходів калібрування відеокамер та вибрати оптимальний з урахуванням мінімального впливу сумарної дисторсії на вихідне зображення;

2. Скоригувати вплив сумарної дисторсії на вихідне зображення;

3. Визначити основні кроки процедури калібрування відеокамери для кефалографічної системи.

Результати досліджень процедури калібрування

Об'єктом досліджень була обрана проста точкова модель камери [7,8], що повертає просту геометрію, за допомогою якої об'єкт дослідження (маркер) буде проектуватися на площину зображення (рис. 1). Ця ідеальна модель часто використовується в комп'ютерній графіці для отримання геометрії зображення.

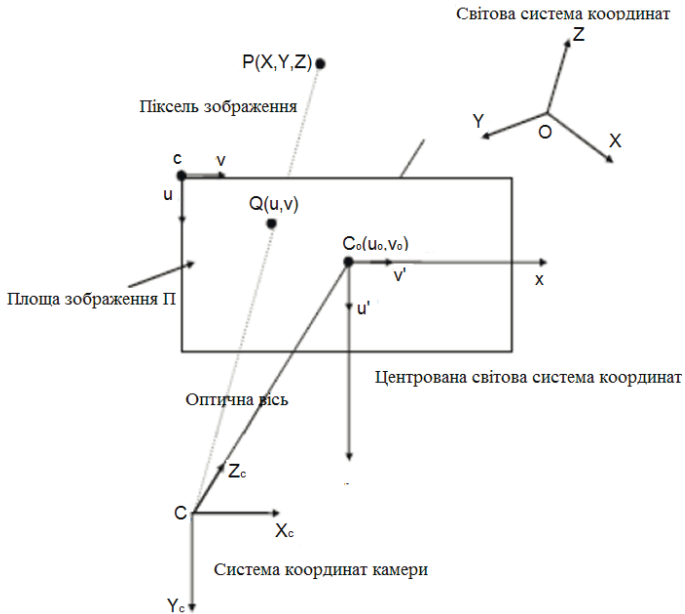


Рис. 1. Проста точкова модель камери

Основними кроками процедури калібрування є:

- отримання серії тестових зображень з використанням плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки;
- знаходження ключових точок в ручному та автоматичному режимах;
- коригування впливу сумарної дисторсії;
- обчислення внутрішніх та зовнішніх параметрів відеокамери.

Для реалізації процедури калібрування використовувалися:

- відкритий (open source) програмний пакет Matlab Calibration Toolbox;
- калібрувальний об'єкт у вигляді шахової дошки;
- відеокамера Logitech quickcam for notebooks pro.

Співвідношення для розрахунку внутрішніх та зовнішніх параметрів відеокамери можна отримати наступним чином.

Площина зображення Π (C_0xy або C_0uv) паралельна площині CX_cY_c (див. рис. 1). Оптична вісь CZ_c перетинає площину зображення в головній точці $C_0(u_0, v_0)$, яка також називається центром зображення. Відстань CC_0 дорівнює фокусній відстані f камери.

Нехай P 3D точка і Q її проєкція на Π . Координати P в координатах камери (C, X_c, Y_c, Z_c) будуть $[X_c, Y_c, Z_c]^T$, і у світових координатах (O, X, Y, Z) будуть $[X, Y, Z]^T$. Отримаємо наступне співвідношення між P і Q :

$$\frac{f}{Z_c} = \frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c} \quad (1)$$

Якщо одиниці виміру на площині зображення будуть змінені, то $x = \frac{u'}{k_u}$,

$y = \frac{v'}{k_v}$ і центр буде перенесений, де $u' = u - u_0$ і $v' = v - v_0$, то отримаємо:

$$x = \frac{u - u_0}{k_u} \quad (2)$$

$$y = \frac{v - v_0}{k_v} \quad (3)$$

Нехай $f_u = k_u f$ та $f_v = k_v f$, то (1), (2), (3) можуть бути записані при $Z_c \neq 0$ як лінійне відношення в однорідних координатах:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 1 \\ 0 & f_v & v_0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Вид сцени, сформований проектуванням 3D точок на площину зображення, використовуючи перспективне перетворення, можна записати як:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 1 \\ 0 & f_v & v_0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = A[Rt] \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

де (X, Y, Z) - координати 3D точки у світовій системі координат, (u, v) – координати проєкції точки в пікселях, A – матриця камери або матриця внутрішніх параметрів, (u_0, v_0) – головна точка (центр зображення), визначає положення (в одиницях виміру пікселів) точки C_0 в системі координат чутливої області, $1/k_u$ і $1/k_v$ – горизонтальний і вертикальний розміри пікселя, і f_x і f_y – фокусна відстань, виражена в пікселях. Таким чином, якщо зображення з камери масштабувати з деяким коефіцієнтом, то всі параметри також повинні бути масштабовані (помножені, розділені) з тим же коефіцієнтом.

Матриця внутрішніх параметрів не залежить від розглянутої сцени, і після розрахунку може бути використана повторно (якщо фокусна відстань постійна (у разі об'єктива зі змінною фокусною відстанню)). Об'єднана матриця обертання – переміщення $[Rt]$ називається матрицею зовнішніх параметрів (R – обертання, t - зсув між світовою системою координат і системою координат камери).

Вона використовується для опису руху камери навколо статичної сцени, або руху об'єкту перед нерухомою камерою. Тобто $[Rt]$ переводить координати точки (X , Y , Z) в деяку систему координат, фіксовану щодо камери.

Трансформація, наведена вище, еквівалентна наступній (коли $Z_c \neq 0$):

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}^T = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^T + t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x' &= \frac{X_c}{Z_c} \\ y' &= \frac{Y_c}{Z_c} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} u &= f_u x' + u_0 \\ v &= f_v y' + v_0 \end{aligned} \quad (7)$$

Лінзи мають певні спотворення, в основному радіальну дисторсію і невелику тангенціальну дисторсію. Тому розширимо модель таким чином:

$$\begin{aligned} x'' &= x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y'' &= y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \end{aligned} \quad (8)$$

де $r^2 = x'^2 + y'^2$, із (7) та (8) отримаємо:

$$\begin{aligned} u &= f_u x'' + u_0 \\ v &= f_v y'' + v_0 \end{aligned} \quad (9)$$

k_1 , k_2 , k_3 - коефіцієнти радіальної дисторсії, p_1 , p_2 - коефіцієнти тангенціальної дисторсії. Коефіцієнти дисторсії не залежать від розглянутої сцени, тому вони також належать до внутрішніх параметрів камери. Вони залишаються постійними в незалежності від дозволу зображення. [7, 9, 10].

Серед параметрів, що були отримані в процесі калібрування найбільший вплив на точність визначення координат центру досліджуваного маркера має сумарна дисторсія, векторна діаграма якої наведена на рис. 2. При чому коефіцієнти тангенціальної дисторсії p_1 , p_2 та коефіцієнт радіальної дисторсії k_3 мають настільки малі значення, що ними можна знехтувати.

Остаточні результати калібрування відеокамери Logitech quickcam for notebooks про наведено в табл. 1.

Як видно з отриманих результатів (табл.1) проведення процедури калібрування відеокамери для кефалографічної системи в ручному режимі дозволяє значно зменшити кінцеву похибку вимірювання координат центру маркера і тим самим підвищити точність побудови траєкторії руху вертексу.

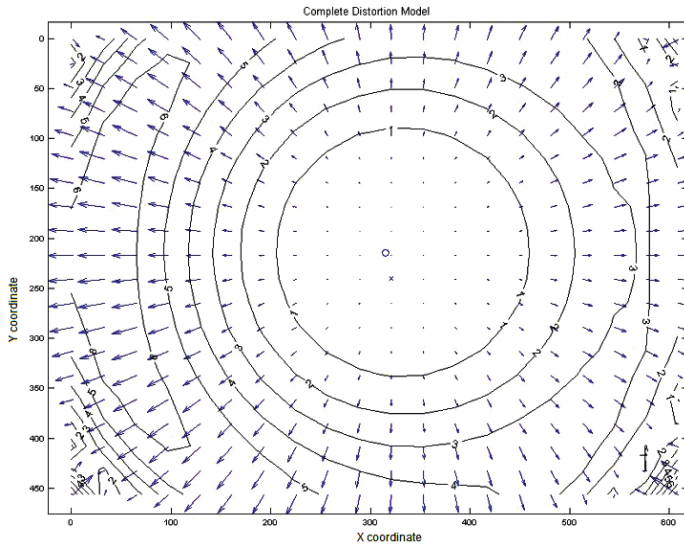


Рис. 2. Векторна діаграма сумарної дисторсії для відеокамери Logitech quickcam for notebooks pro

Таблиця 1.
Порівняльна характеристика результатів калібрування відеокамери Logitech quickcam for notebooks pro

Параметри (піксель)	Режими виявлення ключових точок під час калібрування			
	АВТОМАТИЧНИЙ		Ручний	
	вісь X	вісь Y	вісь X	вісь Y
1	2	3	4	5
Фокусна відстань	562,7	559,9	563,4	557,03
Головна точка	324,2	252,4	314,01	213,56
Дисторсія	[0,0572 -0,2153]	[0,0083 -0,0018]	[0,1851 -0,4708]	[0 -0,004]
1	2	3	4	5
Матриця камери	$\begin{bmatrix} 562,7 & 0 & 324,2 \\ 0 & 559,9 & 252,4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 563,4 & 0 & 314,01 \\ 0 & 557,03 & 213,56 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Похибка вимірювання	12,3	17,86	1,128	1,133

Висновки

1. Проведений аналіз існуючих підходів калібрування сучасних відеокамер показав доцільність використання алгоритму Roger Y. Tsai з плоским калібрувальним об'єктом у вигляді шахової дошки;

2. Одночасне застосування автоматичного та ручного визначення ключових точок по даним калібрування відеокамери дозволяє підвищити точність побудови траєкторії руху вертексу в кефалографічній системі за рахунок коригування впливу сумарної дисторсії на вихідне зображення;

3. Основними кроками процедури калібрування відеокамер для кефалографічної системи є:

- отримання серії тестових зображень з використанням плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахової дошки;
- знаходження ключових точок в автоматичному режимі;
- корекція визначених ключових точок в ручному режимі;
- коригування впливу сумарної дисторсії;
- обчислення внутрішніх та зовнішніх параметрів відеокамери.

1. *Бабияк В. И.* Клиническая вестибулология: Руководство для врачей [Текст] / В. И. Бабияк, А. А. Ланцов, В. Г. Базаров. – Ст-Петербург: Гиппократ. – 1996. – 336 с.

2. *Кузовик В. Д.* Особливості програмного забезпечення експериментальних досліджень біооб'єкту [Текст] / В. Д. Кузовик, В. Г. Гамов, Ю. Ю. Оникиєнко // Інженерія програмного забезпечення. – 2010. – №2. – С. 68–75.

3. *Лунев А. А.* Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры [Электронный ресурс] / А. А. Лунев: Режим доступа: http://www.info.donntu.edu.ua/el_jzdan/geolog/sborniki/ggf111t2.pdf

4. *Tsai R.Y.* A versatile camera calibration technique for high-accuracy 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

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

6. *Triggs B.* Bundle Adjustment – A Modern Synthesis [Text] / B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley, A. Fitzgibbon // ICCV 99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms. Springer-Verlag. – 1999. – P. 298-372.

7. *Malek S.* Calibration Method for an Augmented Reality System [Text] / S. Malek, N. Zenati-Henda, M. Belhocine, S. Benbelkacem // Proceedings of World Academy of Science: Engineering & Technology. – 2008. – Vol. 47. – P. 310-315

8. *Zhang Z.* Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review [Text] / Z. Zhang // International Journal of Computer Vision. – 1998. – Vol. 27(2). – P. 161-195

9. *Heikkila J.* Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points [Text] / J. Heikkila // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22, No. 10. - P. 1066-1077

10. *Жимбуева Л. Д.* Метод определения суммарной дисторсии цифровых изображений [Электронный ресурс] / Л. Д. Жимбуева: Режим доступа: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO35-3/350309.pdf>

Поступила 29.01.2014р.