

КАЛІБРУВАННЯ КАМЕРИ МОДУЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ВИКОНАВЧОГО ЕЛЕМЕНТА РОБОТА

А.В. Воловік

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: andrii.volovik@nure.ua

Анотація: В роботі розглянуто теоретичні та практичні питання калібрування камер модуля визначення положення виконавчого елемента робота за допомогою системи технічного зору. Робота спрямована на створення програмного забезпечення, яке дозволяє визначати та зберігати калібровочні налаштування камери (матрицю камери та коефіцієнти спотворення) для використання їх надалі. Це означає, що внутрішні параметри камери не потрібно щоразу перераховувати і для певної моделі вони будуть постійні.

Ключові слова: технічний зір, спотворення зображень, калібрування камер, програмування.

CALIBRATION OF THE CAMERA OF THE MODULE FOR DETERMINING THE POSITION OF THE ROBOT ACTUATOR

A.V. Volovik

Kharkiv National University of radio electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauki Ave

E-mail: andrii.volovik@nure.ua

Abstract: The paper discusses the theoretical and practical issues of calibration of cameras of the module for determining the position of the robot actuator using the vision system. The work is aimed at creating software that allows you to determine and save the calibration settings of the camera (camera matrix and distortion coefficients) for use in the future. This means that the internal parameters of the camera do not need to be recalculated every time and for a certain model they will be constant.

Keywords: technical vision, image distortion, camera calibration, programming.

В даний час з розвитком технологій в промисловості, виробництві і автоматизації для підвищення якості процесу використовуються системи технічного зору. Основними прикладами є робота з об'єктами, де потрібне візуальне детектування на основі зображення отриманого з камер.

Перед початком використання, камера модуля повинна бути відкалібрована. Калібрування дозволяє врахувати спотворення, що вносяться оптичною системою.

Калібрування камери зводиться до отримання внутрішніх та зовнішніх параметрів камери за наявними фотографіями або відео, отриманими з її допомогою. Калібрування камери зазвичай провадиться на початковому етапі вирішення багатьох задач комп'ютерного зору. Крім того, ця процедура дозволяє виправити дисторсію на фотографіях та відео.

Існує кілька різних підходів до вирішення задачі калібрування.

1. Класичний підхід – алгоритм Roger Y. Tsai [1], що складається з двох етапів, на першому визначаються параметри зовнішнього калібрування, на другому – внутрішнього калібрування та дисторсії.

2. «Гнучке калібрування», запропоноване в роботі [2] і засноване на використанні плоского калібрувального об'єкта у вигляді шахівниці (рисунк 1).

3. Автоматичне калібрування – отримання калібрувальних даних безпосередньо за зображеннями, без використання спеціальних калібрувальних об'єктів [3].

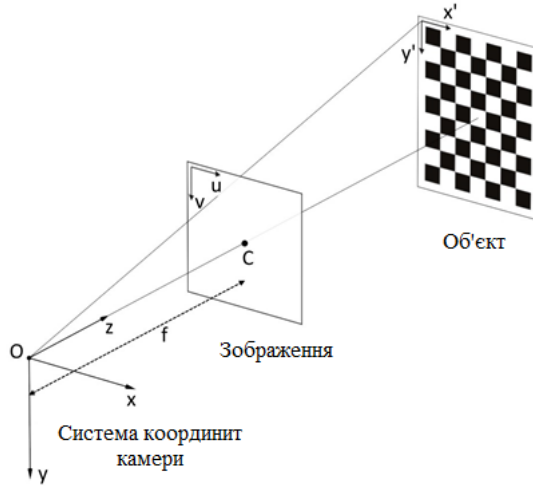


Рисунок 1 – Калібрування на основі шахівниці

У даній роботі використовується «гнучке калібрування», в силу простоти реалізації. Використання шахової дошки можливе завдяки тому, що відомо, які саме в неї точки можна подивитися, в які точки вони перейшли на зображенні.

Якщо багато разів показати цей шаблон камері, можна побачити, куди проєктуються точки, отже, можна встановити ці параметри.

В результаті виникає задача оптимізації. Відомі тривимірні координати кутів (можна виміряти розміри квадрата і записати тривимірні координати шахівниці), можна продетектувати ці куточки на зображенні – це стандартна задача. Таким чином, буде відповідність між тривимірною точкою та двовимірною точкою. І потрібно буде знайти такі параметри, щоб тривимірні точки переходили саме у ці двовимірні точки. Тобто потрібно оптимізувати параметри камери так, щоб виходила правильна проєкція. Для калібрування потрібно показувати дошку під різними кутами (рисунок 2), повертаючи, її потрібно показати у всіх частинах камери для того, щоб надійно встановити її параметри. Тому що якщо показувати шаблон в одній і тій же позиції в одному кутку, то добре буде відомо, як камера проєктує цей кут, але у всій іншій частині зображення все може бути дуже погано.

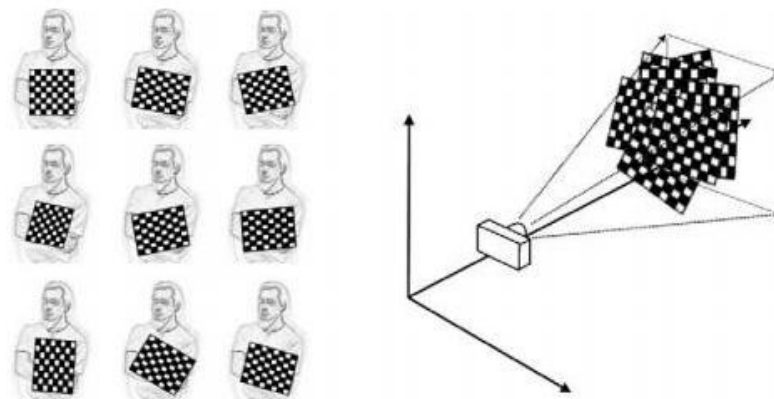


Рисунок 2 – Процес калібрування камери

Крім шахової дошки можна використовувати і інші шаблони – наприклад, шаблон із намальованих кіл, він показує більш точні результати, тому що центр кола можна знайти з більшою точністю, ніж кут шахової дошки. Відповідно, калібрація виходить точнішою. Можна використовувати складніші шаблони, наприклад, тривимірні.

У звичайних умовах достатньо одного калібрування для однієї камери (виробники камер надають технічні дані необхідні для калібрування). Проблема в тому, що для однієї моделі ці параметри трошки відрізнятимуться. Можна надати якісь параметри за замовчуванням і такі камери існують, для яких вони порашовані – для моделі. Але для конкретної камери цієї моделі вони можуть трохи відрізнятися. Тому що, якби вони не відрізнялися, це означало б, що матриця розташована абсолютно на тому самому місці, абсолютно такі ж лінзи. Насправді таке неможливо. Завжди будуть невеликі відхилення, отже параметри калібрації теж будуть трохи іншими. Тому для більш точних параметрів потрібно робити калібрування самому. Можна намагатися робити автокалібровку – знімати камерою звичайне зображення – без шаблонів шахівниці, і при цьому намагатися зрозуміти, які у неї внутрішні параметри. Автоматично, без шаблонів, намагатися зрозуміти, як вона спотворює. Але на практиці виходить, що це іноді працює, іноді це не працює. В алгоритмі автокалібровки є кілька параметрів – ці параметри потрібно підбирати для того, щоб запустити алгоритм, тому що за одних параметрів алгоритм спрацює добре, за інших спрацює погано. У ситуації ж із використанням шаблонів із значно більшою надійністю можна отримати хорошу калібрацію камери.

Як було сказано раніше, камери-обскури призводять до великих спотворень зображень. Двома основними спотвореннями є тангенціальні спотворення (а) та радіальні спотворення (в).

Через радіальне спотворення прямі лінії будуть вигнутими. Цей ефект збільшуватиметься з віддаленням від центру зображення. Наприклад, на рисунку 3, де два краї шахівниці відзначені червоними лініями. Але можна побачити, що межа не є прямою і не відповідає червоному рядку. Усі очікувані прямі лінії вигнуті [4].



Рисунок 3 – Радіальне спотворення на шахівниці

Це спотворення вирішується так:

$$\begin{aligned} X_{corrected} &= x (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6), \\ Y_{corrected} &= y (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6). \end{aligned}$$

Іншим спотворенням є тангенціальне спотворення, яке відбувається, тому що зйомка зображення не вирівнюється ідеально паралельно площині зображення. Тому деякі області зображення можуть виглядати ближчими, ніж очікувалося. Воно вирішується так:

$$X_{corrected} = x + [2p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (r^2 + 2x^2)],$$

$$Y_{corrected} = y + [2p_2 \cdot x \cdot y + p_1 \cdot (r^2 + 2y^2)].$$

У результаті потрібно знайти п'ять параметрів, відомих як коефіцієнти спотворення, що визначаються:

$$Distortion\ coefficients = (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3).$$

На додаток до цього нам потрібно знайти ще деяку інформацію, наприклад, внутрішні та зовнішні параметри камери. Внутрішні характеристики специфічні для камери. Вони включають таку інформацію, як фокусна відстань f_x f_y , оптичні центри c_x c_y і т. д. Їх також називають матрицею камери. Це залежить лише від камери, тому після обчислення вона може зберігатися для майбутніх цілей. Вона виражається як матриця 3×3

$$I = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Зовнішні параметри відповідають векторам обертання та трансляції, що переводять координати тривимірної точки в систему координат.

Для того щоб коректно вимірювати ці спотворення необхідно спочатку скоригувати. Щоб знайти всі ці параметри, потрібно надати кілька зразкових зображень чітко визначеного шаблону (наприклад, шахівниці).

Як згадано вище, нам потрібно щонайменше кілька тестових шаблонів для калібрування камери. Для досягнення найкращих результатів, як радить сайт розробників бібліотеки OpenCV, необхідно зробити 10 тестових шаблонів. У результаті для камери №1 було зроблено п'ятнадцять шаблонів (рисунок 4, а), а для камери №2 десять (рисунок 4, б).

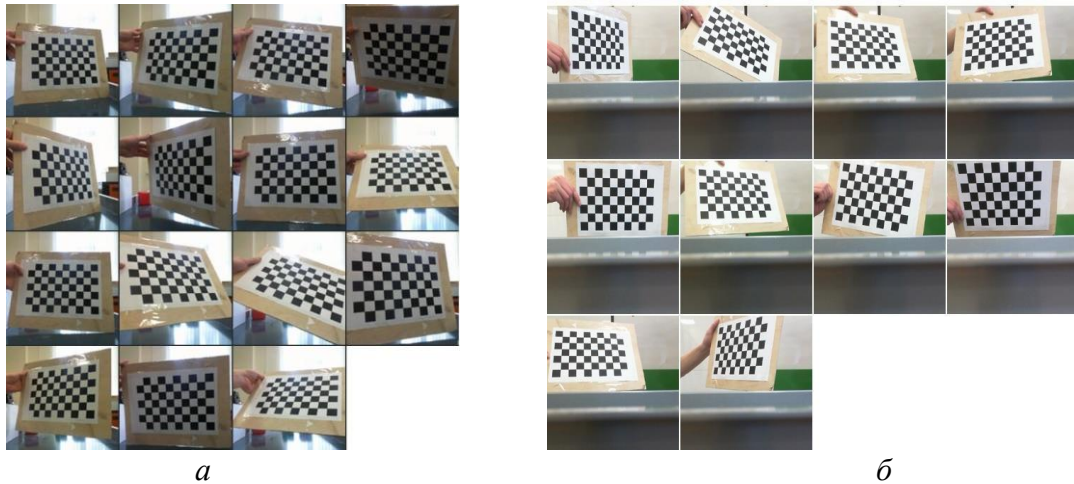


Рисунок 4 – Тестові шаблони для камер №1 і №2

Важливими вхідними даними, необхідними для калібрування камери, є набір тривимірних точок реального світу і відповідні їм точки 2D-зображення. 3D-точки називаються об'єктними точками, а точки 2D-зображення називаються точками зображення.

Отже, щоб знайти шаблон на шахівниці, ми використовуємо функцію `cv2.findChessboardCorners()`. Нам також потрібно встановити, який тип шахової сітки використовується. В даній роботі використовується сітка розмірністю 6×9 (зазвичай шахова

дошка має 8×8 квадратів та 7×7 внутрішніх кутів). Ця функція повертає кутові точки, якщо шаблон був успішно знайдений. Ці кути будуть розміщені у порядку (зліва направо, зверху донизу). Ця функція може виявитися не в змозі знайти потрібний шаблон у всіх зображеннях. Тому потрібно по черзі перевіряти кожен шаблон. Як тільки кути знайдені, можна підвищити точність їхнього відображення, використовуючи `cv2.cornerSubPix()`. Після цього можемо нарисувати їх на шаблоні, використовуючи `cv2.drawChessboardCorners()`. На основі перелічених вище кроків створена програма. Результат роботи програми, один із використуваних шаблонів з успішно знайденими кутами, показаний на рисунку 5.



Рисунок 5 – Калібрувальний шаблон із знайденими кутами

Отже, тепер у нас є точки об'єкта та точки зображення, які були необхідні для калібрування камери. У бібліотеці OpenCV для калібрування використовується функція `cv2.calibrateCamera()`. Вона повертає матрицю камери, коефіцієнти спотворення, вектори обертання та трансляції тощо.

Після отримання параметрів калібрування можна отримати неспотворене зображення. Але до цього спочатку потрібно уточнити матрицю камери на основі вільного параметра масштабування, використовуючи `cv2.getOptimalNewCameraMatrix()`.

Функція обчислює та повертає оптимальну нову матрицю камери на основі параметра вільного масштабування (α). Змінюючи цей параметр, можна отримати лише чутливі пікселі $\alpha = 0$, зберегти всі вихідні пікселі зображення, якщо є цінна інформація у кутах $\alpha = 1$ або отримати щось середнє між ними. Коли $\alpha > 0$, неспотворений результат, ймовірно, матиме деякі чорні пікселі, що відповідають «віртуальним» пікселям за межами захопленого спотвореного зображення [6].

Одне з отриманих неспотворених зображень представлено на рисунку 6. У результаті можна побачити, що всі грані прямі.



Рисунок 6 – Неспотворене зображення шахівниці

Тепер можна зберігати матрицю камери та коефіцієнти спотворення, використовуючи функції запису в NumPy (np.savez, np.savetxt і т.д.) для використання їх надалі. Це означає, що внутрішні параметри камери не потрібно щоразу перераховувати, для певної моделі вони постійні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Roger Y. Tsai A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(4), 1987. P. 323–344.
2. Zhang B., Li Y. F. *Automatic Calibration and Reconstruction for Active Vision Systems, Intelligent Systems, Control, and Automation. Science and Engineering*. V. 57, Springer, 2012. P. 175.
3. Svoboda T., Martinec D., Pajdla T. A convenient multicamera self-calibration for virtual environments. *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments* 14, 4, 2005. P. 407-422.
4. Camera Calibration. Режим доступу: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_calib3d/py_calibration/py_calibration.html#calibration (дата звернення: 8.10.25).
5. Система технічного зору: особливості, завдання, принципи роботи, основні компоненти. Режим доступу: <http://bigbro.com.ua/sistematetchnichnogo-zoru-osoblivosti-zavdannya-printsipi-roboti-osnovni-komponenti/> (дата звернення: 5.10.2025).
6. Mavrogiannis, P., & Maglogiannis, I. (2025). Using synthetic camera poses for camera calibration in soccer videos. *Multimedia Tools and Applications*, 84(18), 18967-18991.
7. Rezaei, S., & Arefi, H. (2025). Evaluation of Network Design and Solutions of Fisheye Camera Calibration for 3D Reconstruction. *Sensors*, 25(6), 1789.
8. He, X., Xu, G., Zhang, B., Chen, H., Cui, Y., & Guo, D. (2025, April). DiffCalib: Reformulating monocular camera calibration as diffusion-based dense incident map generation. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 39, No. 3, pp. 3428-3436).
9. Chen, H., Li, H., Yao, C., Liu, G., & Wang, Z. (2025). Image super-resolution based on improved ESRGAN and its application in camera calibration. *Measurement*, 242, 115899.

10. Cheng, L., Guo, L., Zhang, T., Bang, T., Harris, A., Hajj, M., ... & Cao, S. (2025). CalibRefine: Deep Learning-Based Online Automatic Targetless LiDAR-Camera Calibration with Iterative and Attention-Driven Post-Refinement. arXiv preprint arXiv:2502.17648.
11. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. Computational intelligence and neuroscience, 2022, 3046116
12. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services Technologies and Smart Health Care. International Journal of Crowd Science, 9(2), 110-125.
13. Methods for Optimizing the Building of Collaborative Robot Routes in a Dynamic Environment / I. Nevliudov, Murad Anver oglu Omarov, V. Yevsieiev, Elgun Jabrayilzade // Current issues of science, prospects and challengesn : IX International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference , September 12, 2025. - P. 48-51. - DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-12.09.2025>.
14. Yevsieiev V. Implementation of STEM education in distance learning conditions during martial law in Ukraine: challenges, tools and prospects for training future engineers / V. Yevsieiev, S. Starikova // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGA (MC&FPGA-2025) : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE. – P. 21-25.
15. Hybrid Approaches to Building Intelligent Robotic Systems on FPGAs and MCUs for Industry 5.0 Tasks / V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Demska, N. Starodubcev // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2025) : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE – P.30-35.
16. Nevliudov I. Sh. Adjusting the Movements of the Robotic Platform Through Inverse Kinematics / Igor Nevliudov, Dmytro Gurin, Vladyslav Yevsieiev // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs, MC&FPGA-2025 : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE. – P. 4-8.
17. Yevsieiev V. Features of the Development of a Humanoid Robot Control System on ESP8266MOD(12F) / V. Yevsieiev, S. Maksymova // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs, MC&FPGA-2025 : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE. – P. 12-16.
18. Yevsieiev V. Comparative Analysis of Neural Network Architectures for Intelligent Microclimate Control in Production / V. Yevsieiev, I. Holod // Manufacturing & Mechatronic Systems 2025 : Theses of Reports of IX-st International Conference, October 25-26, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 15-17.
19. Chebanchyk D. Analysis of Object Identification Methods for FPV Drones / D. Chebanchyk, V. Yevsieiev // Manufacturing & Mechatronic Systems 2025 : Theses of Reports of IX-st International Conference, October 25-26, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 30-33.
20. Moisieiev M. Research on Methods for Controlling a Group of Mobile Robots Under Uncertainty / M. Moisieiev, V. Yevsieiev // Manufacturing & Mechatronic Systems 2025 : Theses of Reports of IX-st International Conference, October 25-26, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 26-29.

Науковий керівник: Фролов Андрій Віталійович, доц. каф. КІТАР, Харківського національного університету радіоелектроніки