

АВТОМАТИЗОВАНЕ КАЛІБРУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КАМЕР З ШИРОКИМ КУТОМ ЗОРУ

С. М. Шульга^{1, 2}, В. Ю. Сдобніков²

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

² Apostera GmbH, RnD Department

Анотація

В роботі описано процес калібрування набору ширококутних камер. Запропоновано, реалізовано та перевірено методи для кожного етапу розглянутого процесу калібрування. Такі установки з набором камер використовуються, наприклад, для систем кругового моніторингу оточення автомобіля. Розглянуто основні проблеми, що виникають на практиці, та запропоновано підходи до їх вирішення. Для кількісної оцінки результатів калібрування використовується середньоквадратична похибка, простір визначення якої обирається оптимально для кожного з етапів. Наведено кінцеві результати калібрування системи кругового моніторингу та кількісне порівняння отриманих результатів з результатами, що дають інші методи.

Ключові слова: система кругового моніторингу автомобіля, внутрішні і зовнішні параметри камери, калібрування, «риб'яче око»

Вступ

У роботі описуються деякі моделі ширококутних камер та процес калібрування набору таких камер. Точне калібрування параметрів камери – необхідний крок для визначення надійної тривимірної метричної інформації. Взагалі цей процес включає у себе два етапи: калібрування внутрішніх параметрів кожної камери окремо і калібрування зовнішніх параметрів набору камер. У нашому випадку з ширококутними камерами додатковим етапом буде вибір адекватної математичної моделі, за якою відбувається перепроєктування тривимірних об'єктів на площину зображення. Нелінійні моделі, що виникають у випадку ширококутних камер, задаються видом функції та набором її параметрів.

Перший етап – калібрування внутрішніх параметрів – полягає у визначенні функції, яка найточніше підходить для даної камери, та у пошуку оптимальних параметрів обраної функції. За заданої функції, процес калібрування являє собою оптимізаційну задачу. Така задача для калібрування одночасно внутрішніх та зовнішніх параметрів описана в роботі [1]. В рамках однієї моделі процес калібрування внутрішніх параметрів розглянуто також у роботі [2]. Другий етап – калібрування зовнішніх параметрів – також оптимізаційна задача, але якість калібрування суттєво залежить від предметної області, що включає в себе розміщення і кількість камер, їх тип та параметри, основну задачу для якої проводиться калібрування, тобто ціль, з якої виходить підхід до оцінки результатів тощо. Для фіксованого типу камер, у контексті задачі одночасної локалізації та побудови мапи, підхід до калібрування зовнішніх па-

раметрів розглянуто у роботі [3]. Вичерпно загальна математична модель для калібрування внутрішніх та зовнішніх параметрів описана у роботі [4].

Особливість даної роботи полягає в тому, що одночасно з калібруванням відбувається процес підбору оптимальної моделі камери. Формально, цей процес можна описати додатковим параметром у задачі оптимізації, що відповідає за тип камери, і в нашому випадку приймає значення зі скінченної множини. Також, запропонований підхід використовується у контексті побудови системи кругового моніторингу в автомобілі, що задає вигляд функції енергії, що використовується для калібрування зовнішніх параметрів набору камер. Отримані результати порівнюються з тими, що запропоновані в розглянутих роботах, і показано, що вони кращі у контексті розглянутої прикладної задачі.

1. Вибір моделі камери

Внутрішня модель камери – математична модель, яка довільній тривимірній точці ставить у відповідність двовимірну точку на зображенні: $q = f_I(Q)$, q – координати проекції точки на зображенні, Q – координати точки відносно камери, I – набір внутрішніх параметрів камери.

У випадку зі звичайними **pinhole** камерами зазвичай використовують просту лінійну модель $s(x \ y \ 1)^T = K(X \ Y \ Z)^T$, де $K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ [4]. Оскільки у реальних камерах лінзи суттєво деформують зображення, до цієї моделі також додають

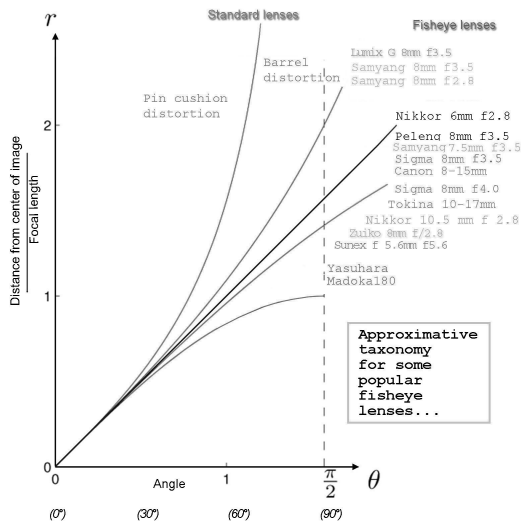


Рис. 1. Різні функції проекції ширококутних камер

моделі деформації. Зазвичай це радіальна

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

і тангенціальна

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ p_1(r^2 + 2y^2) + p_2 xy \end{pmatrix}$$

деформації, які описані, наприклад, у [5]. Тут позначено $r = x^2 + y^2$ – відстань від точки зображення до точки перетину оптичної осі камери з площиною зображення.

При моделюванні ширококутних камер не достатньо моделі радіальної деформації. Ще більше ускладнює їх моделювання те, що кожен виробник робить камеру опираючись на різні функції проекції (Рис. 1). У таблиці 1 наведено п'ять «класичних» моделей для ширококутних камер. Більше інформації можна знайти у [2, 6, 7, 8]. Зокрема у [8] описується «універсальна» модель для ширококутних камер. Варто відзначити, що найчастіше використовуються камери з функцією проекції *equisolid*.

При калібруванні внутрішніх параметрів для кожної із моделей камери оптимізація відбувається незалежно. Обирається така модель, що за результатом оптимізації на основі одних і тих самих вхідних даних призводить до найменшого значення енергії.

2. Калібрування внутрішніх параметрів

Сформулюємо задачу калібрування внутрішніх параметрів наступним чином: маючи набір з N зображень і калібрувальний об'єкт з M характерними точками, знайти набір внутрішніх параметрів камери I . Отримуємо систему рівнянь:

$$q_{ij} = f_I(\hat{T}_i Q_j) \quad (1)$$

де $\hat{T} = [R \ t]$ – матриця повороту та зміщення калібрувального об'єкту відносно камери, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M$. Оскільки у загальному випадку моделі нелінійні і точного розв'язку такої системи не існує, переформулюємо дану задачу у задачу мінімізації

енергії E :

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_I(\hat{T}_i Q_j) - q_{ij})^2$$

У цій задачі Q_j та q_{ij} – відомі; I , \hat{T}_i – параметри мінімізації, що потрібно знайти.

Для розв'язання задачі мінімізації можна використовувати будь-які методи оптимізації нелінійних функцій, але в залежності від функції що оптимізується, вони можуть давати кращі або гірші результати. У розглянутих раніше роботах було показано, що для приведеного виду оптимізаційної функції доцільно використовувати алгоритм Левенберга-Марквардта [9, 10], або, як у цій роботі, його покращену модифікацію, а саме [11], що відома також як *dogleg* алгоритм. На практиці зручно використовувати бібліотеку *Ceres Solver* компанії Google.

3. Калібрування зовнішніх параметрів

Зовнішні параметри камери – положення камери та її орієнтація у просторі. Точне формулювання задачі залежить від ситуації. Наприклад у задачі SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) зазвичай є одна камера що рухається і відсутній калібрувальний об'єкт. Задача полягає у тому, щоб знайти шлях цієї камери відносно початкового її положення. У задачі кругового моніторингу є набір камер, які можуть рухатись у просторі, але залишаються нерухомими одна відносно одної. У цій задачі важлива точність, тому для калібрування відносних положень камер зазвичай використовують калібрувальний об'єкт.

Далі розглянемо процес калібрування зовнішніх параметрів саме у контексті задачі кругового моніторингу. Нехай камери розташовані як показано на рис. 2.

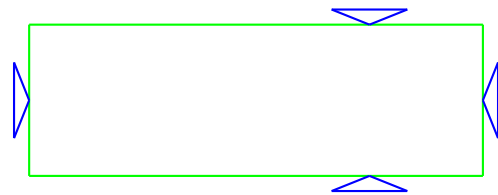


Рис. 2. Розташування камер на автомобілі

У цій задачі відразу виникає ряд проблем. По-перше, камери не можна калібрувати попарно. Звісно теоретично це можна зробити, але при послідовному калібруванні камери 1 з камерою 2, 2 з 3, 3 з 4 накопичується похибка. У результаті камери 1 і 4 між собою будуть відкалібровані погано. Звідси випливає, що калібрувати їх потрібно разом, розв'язуючи загальну задачу оптимізації.

По-друге, камера, що розташована позаду, віддалена від бокових камер більше ніж на 3 метри. При використанні калібрувального об'єкту довжиною порядку 1.5 метра важко розташувати цей об'єкт так, щоб його одночасно чітко бачили камера позаду та камера збоку. Звісно, за наявності відповідних ресурсів можна зробити великий калібрувальний об'єкт

Табл. 1. Класичні функції проекції ширококутних камер

	Rectilinear	Stereographic	Equidistant	Equisolid	Orthographic
Forward projection	$r_d = f \tan \theta$	$r_d = 2f \tan \frac{\theta}{2}$	$r_d = f\theta$	$r_d = 2f \sin \frac{\theta}{2}$	$r_d = f \sin \theta$
Reverse projection	$\theta = \arctan \frac{r_d}{f}$	$\theta = 2 \arctan \frac{r_d}{2f}$	$\theta = \frac{r_d}{f}$	$\theta = 2 \arcsin \frac{r_d}{2f}$	$\theta = \arcsin \frac{r_d}{f}$

розміром більшим за автомобіль, але не завжди це можливо. Цю задачу можна вирішити, якщо точно виміряти положення калібрувального об'єкту у єдиній глобальній системі координат.

По-третє, прив'язувати функцію енергії у задачі оптимізації до пікселів (як при калібруванні внутрішніх параметрів) не можна, так як відстані у пікселях також залежать від відстані від калібрувального об'єкту до камери та від того, куди на зображенні проектується точки об'єкту (через значні викривлення ширококутних камер).

Тепер сформулюємо задачу калібрування зовнішніх параметрів камер: маючи набір знайдених моделей камер з відомими внутрішніми параметрами I_1, \dots, I_L , калібрувальний об'єкт з M характерними точками, набір з N зображень для кожної камери, зроблених одночасно, і відповідні їм положення $\hat{T}_{1\dots N}^p$ калібрувального об'єкту, знайти положення $\hat{T}_{1\dots L}^c$ кожної камери у просторі.

$$q_{ijk} = f_{I_i}((\hat{T}_i^c)^{-1} \hat{T}_k^p Q_j) \quad (2)$$

Для розв'язання цієї задачі використовується функція енергії наступного вигляду:

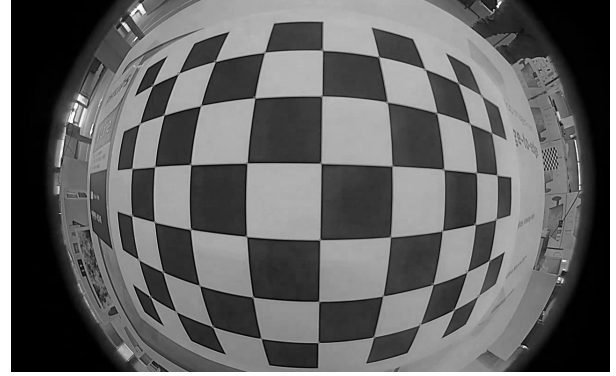
$$E = \sum_{i=1}^L \sum_{(j,k) \in J_i} \text{dist}_i(q_{ijk}, f_{I_i}((\hat{T}_i^c)^{-1} \hat{T}_k^p Q_j))^2$$

де $J_i = \{(j,k) | j = 1, \dots, M; k = 1, \dots, N; f_{I_i}((\hat{T}_i^c)^{-1} \hat{T}_k^p Q_j) = q_{ijk}\}$, тобто ті точки калібрувального об'єкту j , що попадають на зображення k камери i , $\text{dist}_i(a, b) = Pr(a, I_i, T_i^c) - Pr(b, I_i, T_i^c)$, $Pr(a, I, T)$ – проекція пікселя a з камери з параметрами I і T на площину, на якій стоїть автомобіль. Тут параметри оптимізації це $\hat{T}_{1\dots L}^c$.

4. Результати

Експерименти проводилися на 4-х камерах «риб'яче око», розташованих на автомобілі як показано у рис. 2.

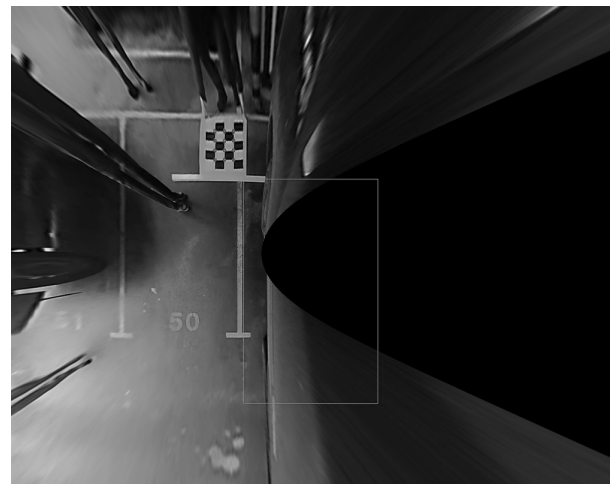
Перший етап – калібрування внутрішніх параметрів камер. Після перебору різних моделей внутрішніх параметрів, за результатами оптимізації для наявних камер було обрано модель *equisolid* з радіальною та тангенціальною деформаціями. На рис. 3а точками зображені результати перепроєктування точок калібрувального об'єкту на камеру за формулою 1. Середня похибка калібрування внутрішніх параметрів склала порядку 0.8 пікселя. Варто відзначити, що до введення моделей деформацій (в особливості радіальної) похибка складала порядку



(а) Зображення для калібрування внутрішніх параметрів



(б) Зображення для калібрування зовнішніх параметрів



(в) Результати перепроєктування зображення на землю

Рис. 3. Результати калібрування

2-5 пікселів (за рахунок більшого відхилення на границях зображення, при чому ці області важливі для нашої задачі).

Другий етап – калібрування зовнішніх параметрів камер. Середньоквадратична похибка за результатами серії експериментів склала ~ 5.8 мм. Для порівняння, так само вирахована середня похибка у мм при використанні стандартних цільових функцій (мінімізація відхилення точок у пікселях на площинах зображень) на площині дороги склала ~ 45.4 мм. Більше того, ця похибка суттєво залежала від позиції характерних точок калібрувального об'єкту на площині зображення, а, отже, призводила до суттєвих похибок проектування на відстані будьяке 1.5 м від автомобілю. На рис. 3а зображені результати перепроєктування точок калібрувального об'єкту на камеру за формулою 2. Результати використання отриманих параметрів зображені на рис. 3в.

За результатами калібрування всіх чотирьох камер будується панорамний круговий огляд, результати якого показано на рис. 4,



Рис. 4. Кінцевий результат роботи системи кругового моніторингу, вид згори

Висновки

У статті показано метод калібрування внутрішніх і зовнішніх параметрів системи ширококутних камер для системи кругового моніторингу в автомобілі. Запропоновано підхід, за якого сама модель внутрішніх параметрів ширококутних камер оцінюються у сукупності з її параметрами. Наведено результати калібрування реальної системи ширококутних камер. Показано, що для прикладної задачі, що розглядається, описаний підхід до калібрування дозволяє отримати кращі результати, ніж за використання стандартних доступних методів.

Автори вбачають розвиток запропонованого підходу у розвиненні другого етапу калібрування – ка-

лібрування зовнішніх параметрів – без прив'язки до калібрувального об'єкту. Такий розвиток є доцільним з точки зору індустрії, оскільки дозволяє суттєво зменшити витрати на етапі виробництва та налаштування кожного автомобіля.

Перелік використаних джерел

1. An improved method for fisheye camera calibration and distortion correction / S. Chan, X. Zhou, C. Huang et al. // 2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). — 2016. — Aug. — P. 579–584.
2. Mei C., Rives P. Single View Point Omnidirectional Camera Calibration from Planar Grids // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 2007. — April. — P. 3945–3950.
3. Calibration of omnidirectional cameras in practice: A comparison of methods / Luis Puig, J. Bermúdez, Peter Sturm, J.J. Guerrero // Computer Vision and Image Understanding. — 2012. — Vol. 116, no. 1. — P. 120–137. — Virtual Representations and Modeling of Large-scale Environments (VRML). Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314211001858>.
4. Hartley R., Zisserman. A. Multiple View Geometry in Computer Vision. — 2 edition. — Cambridge University Press, 2013.
5. A new calibration model of camera lens distortion / Jianhua Wang, Fanhuai Shi, Jing Zhang, Yuncai Liu. — 2008. — 02. — Vol. 41. — P. 607–615.
6. Kannala Juho, Brandt Sami S. A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-Angle, and Fish-Eye Lenses. — 2006. — 08. — Vol. 28. — P. 1335–1340.
7. Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision / Peter Sturm, Srikanth Ramalingam, Jean-Philippe Tardif et al. — 2011. — 01. — Vol. 6. — P. 1–183.
8. Gennery Donald B. Generalized Camera Calibration Including Fish-Eye Lenses // International Journal of Computer Vision. — 2006. — Jul. — Vol. 68, no. 3. — P. 239–266. — Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11263-006-5168-1>.
9. Levenberg Kenneth. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares // Quarterly of Applied Mathematics. — 1944. — Vol. 2. — P. 164–168.
10. Marquardt Donald. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM Journal on Applied Mathematics. — 1963. — Vol. 11. — P. 431–441.
11. POWELL M.J.D. A New Algorithm for Unconstrained Optimization // Nonlinear Programming / Ed. by J.B. Rosen, O.L. Mangasarian, K. Ritter. — Academic Press, 1970. — P. 31–65. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780125970501500063>.