

УДК 004.932.2

Кобзар А.Ю., аспірант

Калібрування камери через пошук відстаней до ключових точок

Детально описано метод пошуку внутрішніх параметрів камери всього лише за одним знімком доволі простого об'єкта калібрування.

Метод перевірено на працездатність та збіжність на реальних даних. Проведено порівняння з іншими існуючими алгоритмами.

Ключові слова: параметри камери, обробка зображень, комп'ютерне бачення.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4д, e-mail: taras55@gmail.com

A. Kobzar, postgraduate (PhD)

On calibration of a camera through estimation of the distances to the key points of the image

The proposed method of getting the internal parameters of a camera is described in detail with a single photo of a rather simple object of calibration.

The method was tested for operability and convergence on real data. The comparative analysis of existing methods was performed.

Key Words: camera parameters, image processing, computer vision.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4d, e-mail: taras55@gmail.com

Статтю представив д. т. н., проф. Гарашенко Ф.Г.

Вступ

Побудова просторових об'єктів та панорам за знімками з камери починається з визначення їх параметрів. Вони діляться на внутрішні та зовнішні. Внутрішні параметри, такі як: кут огляду, середина зображення та величина викривлення (distortion) – сталі для конкретної камери. Зовнішні ж параметри, такі як: ейлерові кути та зміщення – залежать від положення камери в просторі та змінюються від кадру до кадру. Процедура пошуку внутрішніх параметрів також називається калібруванням камери. Саме розв'язку цієї задачі присвячена дана стаття.

Всього розрізняють два чисто алгоритмічні підходи до пошуку параметрів:

- Перший полягає в тому, що внутрішні параметри камери знаходяться на ряду з зовнішніми параметрами, прямо під час роботи алгоритму. Такий підхід називається самокалібруванням. Зазвичай він дає доволі низьку точність, однак його використання не потребує ніяких попередніх розрахунків.
- Другий метод передбачає обробку спеціально зроблених знімків. Зазвичай в якості таких зображень служать знімки об'єктів з наперед відомим характеристиками. Зокрема шахівниці, для якої ми можемо ввести такий координатний простір, що положення

клітин буде відомим. Такий метод дозволяє отримати високу точність, але він потребує попередніх розрахунків щонайменше для кожної моделі камери.

На даний момент розроблено доволі багато алгоритмів, які ведуть пошук внутрішніх параметрів камери за зовнішніми об'єктами. Класичним є алгоритм представлений Tsai в [1] та [2]. Також це питання вирішують Zhengyou Zhang в роботі [3] та Xiaojiao Meng з Zhanyi Hu в [4].

Загальною схемою роботи таких алгоритмів є:

1. Пошук початкового наближення для параметрів камери за допомогою геометричних властивостей простору. Таке наближення може ігнорувати деякі параметри, або ж вести неточний розрахунок.
2. Уточнення параметрів алгоритмом Левенберга-Марквардта. В якості похибки найдоцільніше брати відхилення знятої точки на зображенні від спроектованої на нього ж.

Деякі з алгоритмів, зокрема [4], не використовують другий етап. Однак це веде до слабкої стійкості відносно шумів.

Також слід відмітити підхід до пошуку кута огляду камери завдяки побудові кільцевих панорамних знімків. Згідно цього методу слід зняти кільцеву панораму. Похибка для певного

кута вимірюється як похибка при побудові панорамного знімку алгоритмом описаним в [5]. Мінімізувавши цю похибку отримується оптимальне значення кута огляду камери.

В даній роботі пропонується алгоритм аналітичного розрахунку зовнішніх параметрів камери при заданих внутрішніх параметрах. Які визначаються на другому етапі алгоритмом Левенберга-Марквардта. Об'єктом для калібрування обирається рівномірна сітка на площині.

Просторова модель

В рамках задачі розглядається простір об'єкту з правою системою координат. В цьому просторі розташована камера, яка теж в свою чергу має локальну систему координат (рис. 1).

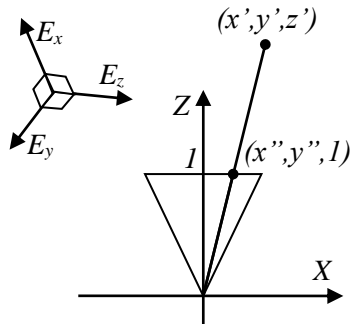


Рис. 1 Системи координат.

В якості внутрішніх параметрів камери обираються: деякий фіксований кут огляду α (по ширині), центр зображення як центральна точка камери, точки на зображенні вважаються квадратними, а викривлення лінз (distortion) ігнорується.

Щоб визначити положення точки (x, y, z) простору на зображенні, слід спочатку перевести її в систему координат камери:

$$(x', y', z')^T = E_x x + E_y y + E_z z,$$

де E_x, E_y, E_z – базисні вектори простору об'єкту в просторі камери. Далі отриманий вектор проектується на площину $z=1$, в результаті отримуємо:

$$(x'', y'') = \left(\frac{x'}{z'}, \frac{y'}{z'} \right)^T.$$

Переводимо отриману точку до масштабу знімку камери:

$$(x_s, y_s)^T = \left(\frac{W}{2} \left(\frac{x''}{\tan \frac{\alpha}{2}} + 1 \right), \frac{H}{2} \left(\frac{y''}{\frac{H}{W} \tan \frac{\alpha}{2}} + 1 \right) \right)^T,$$

розміри якого W та H .

Тепер за відомими координатами проекції на зображення $(x_s, y_s)^T$ знайдемо координати точки в системі координат камери:

$$(x', y', z')^T = de,$$

$$e = \frac{\left(\left(2 \frac{x_s}{W} - 1 \right) \tan \frac{\alpha}{2}, \left(2 \frac{y_s}{H} - 1 \right) \frac{H}{W} \tan \frac{\alpha}{2}, 1 \right)^T}{\left| \left(\left(2 \frac{x_s}{W} - 1 \right) \tan \frac{\alpha}{2}, \left(2 \frac{y_s}{H} - 1 \right) \frac{H}{W} \tan \frac{\alpha}{2}, 1 \right)^T \right|},$$

тут d – відстань від центру проекції до точки, а e – одиничний вектор направлений з центру проекції до точки.

Пошук відстаней від камери до точок

Нехай нам відомі координати трьох точок в просторі об'єкту $(x_i, y_i, z_i), i=1,3$ та координати їх положення на зображенні (x_{si}, y_{si}) . Знайдемо відстані між цими точками:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, i, j = \overline{1,3}.$$

При переході до системи координат камери відстані l_{ij} не змінюються.

Розглянемо площину що проходить через перші дві точки та центр проекції камери (рис. 2). Кут ω – знаходиться як

$$\omega = \arccos(e_1 e_2),$$

l_{12} – ми вже

знайшли. При відомому d_1 , значення d_2 знаходиться з теореми синусів:

$$d_2(d_1) = d_1 \cos \omega \pm \sqrt{l_{12}^2 - d_1^2 \sin^2 \omega} = d_1 e_1 e_2 \pm \sqrt{l_{12}^2 - d_1^2 (1 - (e_1 e_2)^2)}.$$

Два варіанти відповідають гострому та тупому куту φ . Аналогічно запишемо формулу для першої і третьої точки:

$$d_3(d_1) = d_1 e_1 e_3 \pm \sqrt{l_{13}^2 - d_1^2 (1 - (e_1 e_3)^2)}.$$

Далі можемо записати формулу для відстані l_{23} :

$$l_{23}^2 = (p'_2 - p'_3)^2.$$

Після деяких перетворень це рівняння можна переписати як:

$$C_1 d_1^8 + C_2 d_1^6 + C_3 d_1^4 + C_4 d_1^2 + C_5 = 0,$$

в якому коефіцієнти знаходяться як:

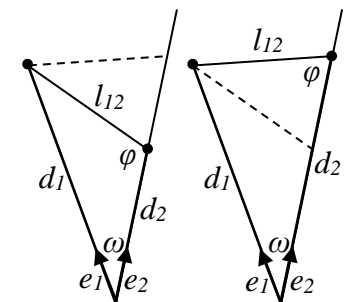


Рис. 2 Площина що містить дві точки та центр проекції.

$$\begin{aligned}
 c_{ij} &= e_i e_j, s_{ij}^2 = 1 - c_{ij}^2, \\
 A_1 &= c_{12}^2 + c_{13}^2 - 2c_{12}c_{13}c_{23} - s_{12}^2 - s_{13}^2, \\
 A_2 &= l_{12} + l_{13} - l_{23}, \\
 A_3 &= -(\pm_1 1)(\pm_2 1)2c_{23}, \\
 A_4 &= \pm_1(c_{13}c_{23} - c_{12}), \\
 A_5 &= \pm_2(c_{12}c_{23} - c_{13}), \\
 B_1 &= A_1^2 + A_3^2 s_{12}^2 s_{13}^2 + A_4^2 s_{12}^2 + A_5^2 s_{13}^2, \\
 B_2 &= -A_3^2 (s_{12}^2 l_{13} + s_{13}^2 l_{12}) + 2A_1 A_2 - A_4^2 l_{12} - A_5^2 l_{13}, \\
 B_3 &= A_2^2 + A_3^2 l_{12} l_{13}, \\
 B_4 &= 2A_4 A_5 - 2A_1 A_3, \\
 B_5 &= -2A_2 A_3, \\
 C_1 &= B_1^2 - B_4^2 s_{12}^2 s_{13}^2, \\
 C_2 &= 2B_1 B_2 + B_4^2 (l_{12} s_{13}^2 + l_{13} s_{12}^2) - 2B_4 B_5 s_{12}^2 s_{13}^2, \\
 C_3 &= B_2^2 + 2B_1 B_3 - B_4^2 l_{12} l_{13} + 2B_4 B_5 (l_{12} s_{13}^2 + l_{13} s_{12}^2) - \\
 &\quad - B_5^2 s_{12}^2 s_{13}^2, \\
 C_4 &= 2B_2 B_3 - 2B_4 B_5 l_{12} l_{13} + B_5^2 (l_{12} s_{13}^2 + l_{13} s_{12}^2), \\
 C_5 &= B_3^2 - B_5^2 l_{12} l_{13}.
 \end{aligned}$$

Тут знаки \pm_1 та \pm_2 обираються незалежно. Таким чином отримуємо 4 варіанти рівняння 8-го степеня, яке зводиться до рівняння 4-го степеня і розв'язується методом Феррарі. Зі специфіки задачі випливає, що нас задовольняють лише додатні значення. Знаючи d_1 відповідні значення d_2 та d_3 знаходяться за описаними вище формулами.

В результаті ми отримуємо, не більше 16-ти, варіантів розташування точок в координатах камери. Ця процедура знаходить точні розв'язки не використовуючи ітераційні чисельні методи.

Після цього розглянемо $n+1$ точку p, p_1, p_2, \dots, p_n . Застосуємо вище описану схему до трійок $(p, p_1, p_2), (p, p_2, p_3), \dots, (p, p_n, p_1)$. Серед отриманих варіантів здійснюється повний перебір і в результаті вибирається той, який дає найменшу похибку. Таким чином ми однозначно отримали розташування точки p в системі координат камери.

Визначення положення камери

Положення камери знаходиться на основі співставлення координат точок в системі координат об'єкту та знайдених на попередньому етапі координатах в системі координат камери.

Найкращим об'єктом для даної цілі є шахівниця, або ж будь-яка плоска поверхня розділена на квадратні клітини. В даній роботі

автор використовує сітку, яка зображена на екрані монітора (рис. 3).

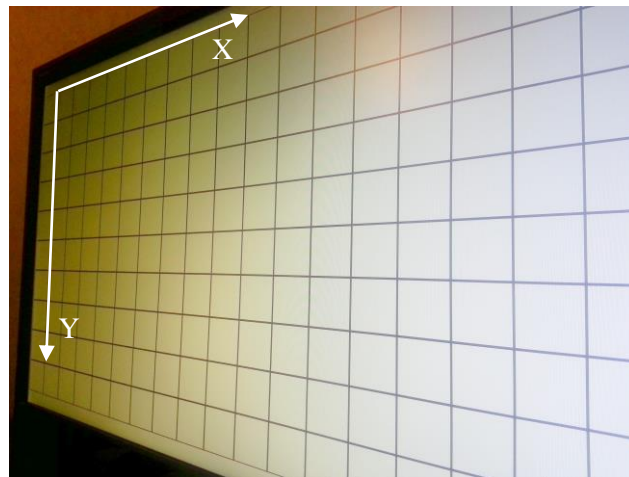


Рис. 3 Об'єкт калібрування.

Простір об'єкту обираємо таким чином, щоб площа екрану задовольняла рівнянню $z=0$ в цьому просторі. Розмір клітини приймаємо за одиничний, а вісі абсцис та ординат направляємо по сітці.

В якості точок обираються вузли сітки, їх можна отримати як перетин вертикальних та горизонтальних ліній зображення. Положення ліній уточняється алгоритмом на базі методу найменших квадратів. Це збільшує точність, якість вхідних даних та стійкість до шумів.

Виділивши точки, можемо скористатись алгоритмом, запропонованим раніше. Він дозволяє знайти відстань від камери до всіх обраних точок та їх координати в системі координат зображення.

Схема вибору точок дозволяє без проблем знайти базис системи координат об'єкту в системі координат камери. Він однозначно визначає ейлерові кути перетворення з системи координат об'єкту в систему координат камери. Зміщення ж знаходиться на основі центрів мас точок в цих системах координат.

Градiєнтна оптимізація параметрів

Для знаходження кута скористаємося алгоритмом Левенберга-Марквардта. В якості параметрів для оптимізації будемо розглядати всі параметри камери. За початкове наближення візьмемо деякий кут та розраховані для нього зовнішні параметри камери, знайдені вище описаним способом. Критерієм для мінімізації береться відстань між спроектованими на зображення точками об'єкту та їх реальним

положенням на цьому зображенні. Розмірністю такої похибки є піксель зображення.

Завдяки точному визначенню параметрів для певного кута та неперервності функції похибки ітераційна процедура оптимізації збігається до оптимального значення, успішно оминаючи локальні мінімуми функції похибки.

Чисельний експеримент

Для перевірки результатів роботи алгоритму, він був реалізований у вигляді програми на мові С#. Застосовувалась ця програма для пошуку кута огляду камер декількох пристроїв. Для цього було зроблено серію знімків та на їх основі виміряно шукане значення (табл. 1).

Таблиця 1

Результати вимірів

Пристрій	Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3	Вимір 4	Вимір 5	Вимір 6	Середнє
Samsung Galaxy S3	62,9626°	63,2276°	62,0787°	62,7392°	61,7678°	62,6444°	62,5701°
Samsung Wave	50,7110°	50,1112°	50,7612°	50,7472°	49,2832°	49,9386°	50,2587°
Nokia Asha 300	58,0514°	56,7530°	59,3823°	56,4061°	58,9862°	58,8680°	58,0745°

Можлива неточність пошуку зовнішніх параметрів ніяк не впливає на похибку, оскільки вона нівелюється на етапі градієнтної оптимізації. Отриману ж похибку можна пояснити відсутністю серед внутрішніх параметрів оптичного викривлення та неідеальними умовами проведення експерименту.

Найкращого результату алгоритм досягає, якщо в межах кадру значно міняється відстань від камери до вузлів сітки. Зокрема автор нахилив камеру під кутом близьким до 45° (рис. 3). Таким чином забезпечується достатня зміна відстані та практично вся сітка попадала в фокус.

Висновки

Проведене дослідження черговий раз підтвердило ефективність роздільного пошуку зовнішніх та внутрішніх параметрів камери. Це

не тільки прискорює роботу алгоритму, а й збільшує точність його роботи.

За сучасного розвитку алгоритмів калібрування, все більше постає питання зручності цього процесу. Однією з вимог стає як найменша попередня підготовка об'єктів калібрування. Для роботи запропонованої схеми достатньо одного знімку об'єкту калібрування. Також можна відмітити алгоритм на базі панорам, об'єктом для якого служить практично будь-яке навколишнє середовище.

Неможна переоцінити заключний етап уточнення результату на базі градієнтних методів. Завдяки йому зникає похибка утворена в результаті роботи попереднього етапу, яка до того ж немає геометричної інтерпретації.

В цілому автор пропонує ще один ефективний підхід до вирішення задачі калібрування, елементи якого можна використовувати для вирішення інших задач.

Список використаних джерел

1. Tsai, Roger Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL. – 1986. – P.364–374.
2. Tsai, Roger Y. 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, Vol. RA-3. – 1987. – N 4. – P.323–344.
3. Z. Zhang A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22. – 2000. – N 11. – P.1330–1334.
4. Xiaoqiao Menga, and Zhanyi Hub A new easy camera calibration technique based on circular points // Pattern Recognition 36. – 2003. – P.1155–1164.
5. Verchenko A., Kobzar A. About one of the algorithms of panoramic images building // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kiev. Series: Physics & Mathematics. – 2011. N 3. – P.109–114.

Надійшла до редколегії 26.12.12