

А.В.Козырева

О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ КАЛИБРОВКИ ВИДЕОКАМЕРЫ

В данной статье речь идет о некоторых способах калибровки видеокамер. Одной из центральных задач в области машинного зрения является задача определения ориентации и расположения камеры в пространстве по изображению, полученному с ее помощью. Эту задачу также называют задачей калибровки камеры или определения ее параметров. Решение данного вопроса требуется в различных областях: картографии, системах распознавания объектов, системах управления компьютером посредством определения положения рук или направления взгляда, системах управления роботами и т.д.

Технологии калибровки можно разделить на 2 вида.

1. Фотограмметрическая калибровка.

Калибровка камер производится наблюдением за калибровочным объектом, геометрия которого в 3D пространстве известна с большей точностью. Калибровка может быть сделана очень рационально. Калибровочный объект обычно состоит из 2 или 3 плоскостей ортогональных друг другу. Иногда плоскости подвергаются точно заданному преобразованию. Эти подходы нуждаются в дорогих калибровочных аппаратах и их скрупулезной установке.

2. Самокалибровка.

Технологии этой категории не используют калибровочных объектов. Только движение камеры в статической сцене. Если изображения будут братья от тех же самых камер с фиксированными внутренними параметрами, соответствия между тремя картинками достаточно для получения и внутренних, и внешних параметров, которые позволят реконструировать 3D структуру.

Способ 1

Технология, представленная Zhengyou Zhang [1] требует только камеру для наблюдения за плоским объектом, показанным с нескольких сторон. Объект может быть отпечатан на лазерном принтере и прикреплен к приемлемой плоской поверхности (рис. 1). Камера или объект могут двигаться, при этом характер движения не известен заранее. Предложенный подход лежит между фотограмметрической калибровкой и самокалибровкой, потому что мы используем больше 2D информацию, нежели 3D или вообще

только её одну. По сравнению с самокалибровкой этот метод более устойчив.

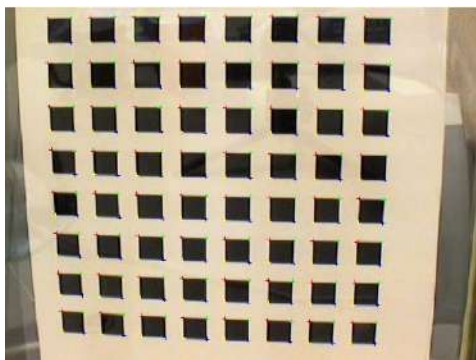


Рис.1. Шаблон для самокалибровки камеры

Пусть у нас есть точка на плоскости $m = [u, v]^T$, которая является проекцией некоторой точки $M = [X, Y, Z]^T$ в пространстве. Соотношение между этими двумя точками можно выписать в следующем виде:

$$sm = K[R \ t]M, \quad (1.1)$$

где s — некоторый скаляр, пара $(R \ t)$ — так называемые внешние параметры камеры, и K — искомая матрица, представляющая собой внутренние

параметры камеры: $K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & x_0 \\ 0 & \beta & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, где (x_0, y_0) — координаты основной

точки, α и β — коэффициенты сжатия по осям Ox и Oy , соответственно, и γ — коэффициент асимметрии между осями изображения.

Без потери общности можем принять $Z = 0$. Обозначим через r_i i -й столбец матрицы вращения R . Тогда из (1.1) для точки на объекте $\tilde{M} = [X, Y, 1]^T$ и соответствующей точки на изображении \tilde{m} имеет место следующее соотношение:

$$s\tilde{m} = H\tilde{M}, \quad (1.2)$$

где H — матрица гомографии изображения, $H = K [r_1 \ r_2 \ t]$.

Существует много способов вычисления гомографии, один из них приведен в [2]. Мы подсчитаем матрицу гомографии, используя критерий максимального правдоподобия. Введем ковариационную матрицу Λ_{m_i} :

$$\sum_i (m_i \hat{=} \hat{m}_i)^T \Lambda_{m_i}^{-1} (m_i \hat{=} \hat{m}_i)$$

$$\hat{m}_i = \frac{1}{\bar{h}_3^T M_i} \begin{bmatrix} \bar{h}_1^T M_i \\ \bar{h}_2^T M_i \end{bmatrix}, \text{ где } \bar{h}_i \text{ — } i\text{-я строка матрицы } H.$$

На практике $\Lambda_{m_i} = \sigma^2$ для всех i . В этом случае выражение выше преобразуется в более простое нелинейное: $\min_H \sum_i \|m_i \hat{=} \hat{m}_i\|^2$. Это выражение минимизируем методом Левенберга (алгоритм представлен в [3]).

Положим, что $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$, тогда из (1.2) мы получим:

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda K [r_1 \ r_2 \ t],$$

где λ — скаляр.

Используя то, что r_1 и r_2 ортогональны, получаем

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \quad (1.3)$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2 \quad (1.4)$$

Положим

$$v_{ij} = [h_{i1} h_{j1}, h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1}, h_{i2} h_{j2}, h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3}, h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3}, h_{i3} h_{j3}]^T,$$

тогда (1.3) и (1.4) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0. \quad (1.5)$$

В (1.5) b — это 6D вектор, равный $[B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]$, где B_{ij} — элементы матрицы $B = K^{-T} K^{-1}$. Используя n изображений шаблона и ниже указанные уравнения (1.6), мы можем вычислить внутренние параметры камеры (матрицу K) при помощи (1.5).

$$\begin{aligned}
 v_0 &= (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\
 \lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11} \\
 \alpha &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\
 \beta &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\
 \gamma &= -B_{12}\alpha^2\beta / \lambda \\
 u_0 &= cv_0 / \alpha - B_{13}\alpha^2 / \lambda.
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

С.О. Новиков, О.А. Лебедев и Г.В. Захаренко в своей статье «Измерение и исследование трехмерных объектов в условиях неполной информации» [2] предлагают иной способ расчета матрицы H . Желаящие могут о нем прочитать самостоятельно.

Способ 2

Рассмотрим вариант калибровки камеры при помощи объектива с переменным фокусным расстоянием. Этот способ предложила Марина Колесник в своей статье «Техника калибровки для объективов с переменным фокусным расстоянием» [3].

Введем понятие фрейма. Под фреймом будем понимать множество изображений, полученных при одном фокусном расстоянии.

Рассмотрим камеру, оснащенную объективом с переменным фокусным расстоянием. Камера выполняет последовательную съемку сцены, что позволит рассмотреть подпоследовательность фреймов N и $N + 1$. Сделаем следующие предположения относительно камеры и изображений.

Оптический центр камеры постоянен вне зависимости от изображений и фреймов.

Камера может вращаться, но изображения фреймов N и $N + 1$ должны в достаточной мере перекрывать друг друга для установления соответствия между точками.

Оптическое искажение удалено с обоих изображений. Внутренние параметры камеры известны для изображения фрейма N .

Эти условия позволят нам решить уравнения, описывающие вариацию фокальной линзы между изображениями фреймов N и $N + 1$.

Будем работать в координатной системе камеры (стандартная координатная система). Перспективная проекция матрицы P моделируется четырьмя внутренними параметрами:

$$\mathbf{P} = \begin{vmatrix} -\alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & -\alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2.1)$$

где u_0, v_0 — координаты центральной точки и α_u, α_v — скалярные множители для строк и столбцов соответственно. Положим $\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$ как известные внутренние параметры для изображения рамки N . Заметим, что α_u и α_v — линейные функции фокальной линзы, параметры $\alpha'_u, \alpha'_v, u'_0, v'_0$ рамки $N + 1$ определены как:

$$\{f' = \mu f\} \Rightarrow \{\alpha'_u = \mu \alpha_u, \alpha'_v = \mu \alpha_v, u'_0 = u_0, v'_0 = v_0\}. \quad (2.2)$$

Фокусное расстояние f, f' соответствующих рамок $N, N + 1$ и μ — известные переменные. Уравнение оптического луча $\langle C, a \rangle$ определено как пиксель (точка) \mathbf{a} и оптический центр камеры C связаны уравнением:

$$A = \lambda \mathbf{P}^{-1} \tilde{\mathbf{a}}, \quad (2.3)$$

где $\tilde{\mathbf{a}} = [a_1, a_2, 1]$ — однородный координатный вектор точки \mathbf{a} , 3D вектор A определен как точка на оптическом луче $\langle C, a \rangle$ и λ — изменения между $-\infty$ и $+\infty$.

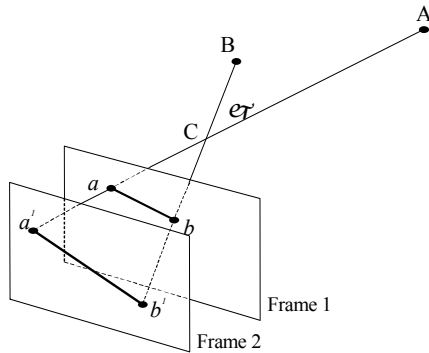


Рис. 2. Геометрия двух последовательных изображений для камеры с переменным фокусом

Будем рассматривать геометрию двух последовательных изображений, представленную на рис. 2. Выберем две 3D точки А и В на сцене и их проекции на изображения a, a^1 и b, b^1 рамок N и N+1 соответственно. Угол, определенный оптическими лучами $\langle a, C \rangle$ и $\langle b, C \rangle$, и угол, определенный соответствующими точками $\langle a^1, C \rangle$ и $\langle b^1, C \rangle$, физически равны между собой и выражены следующим уравнением:

$$\cos \varphi = \frac{A^T B}{|A||B|}, \quad (2.4)$$

где AB — скалярное произведение 3D векторов А и В. Комбинируя (2.3) и (2.4) для рамок N и N+1, запишем:

$$\frac{(\mathbf{P}_1^{-1} \tilde{a})^T (\mathbf{P}_1^{-1} \tilde{b})}{|\mathbf{P}_1^{-1} \tilde{a}| |\mathbf{P}_1^{-1} \tilde{b}|} = \frac{(\mathbf{P}_2^{-1} \tilde{a}^1)^T (\mathbf{P}_2^{-1} \tilde{b}^1)}{|\mathbf{P}_2^{-1} \tilde{a}^1| |\mathbf{P}_2^{-1} \tilde{b}^1|}, \quad (2.5)$$

где: $\tilde{a}, \tilde{a}^1, \tilde{b}, \tilde{b}^1$ — однородные координаты точек изображения a, a^1, b и b^1 , и \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 — перспективная проекция матрица для рамок N и N+1, выраженных в (2.1). Положим M в качестве значения левой стороны уравнения (2.5), что не содержит неизвестных переменных. На основе (2.5), используя выражения (2.1) и (2.2) для матриц \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 , имеем:

$$\begin{aligned} & \frac{(u_0 - a_1^1)(u_0 - b_1^1)}{\mu^2 \alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2^1)(v_0 - b_2^1)}{\mu^2 \alpha_v^2} + 1 = \\ & = M \sqrt{\frac{(u_0 - a_1^1)^2}{\mu^2 \alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2^1)^2}{\mu^2 \alpha_v^2} + 1} \times \sqrt{\frac{(u_0 - b_1^1)^2}{\mu^2 \alpha_u^2} + \frac{(v_0 - b_2^1)^2}{\mu^2 \alpha_v^2} + 1}. \end{aligned}$$

Из этого получаем квадратичное уравнение для неизвестных $\mu_1 = \mu^2$:

$$\mu_1^2(1 - M^2) + \mu_1(2\Delta - M^2(\Delta_1 + \Delta_2)) + \Delta^2 - M^2\Delta_1\Delta_2 = 0$$

где:

$$\Delta = \frac{(u_0 - a_1)(u_0 - b_1)}{\alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2)(v_0 - b_2)}{\alpha_v^2} \quad (2.6)$$

$$\Delta_1 = \frac{(u_0 - a_1)^2}{\alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2)^2}{\alpha_v^2}$$

$$\Delta_2 = \frac{(u_0 - b_1)^2}{\alpha_u^2} + \frac{(v_0 - b_2)^2}{\alpha_v^2}.$$

Резюмируя, получаем следующую процедуру обновления калибровки для камеры с переменным фокусом.

1. Вычисляем соответствие для пар выбранных точек на двух изображениях фреймов N и $N + 1$, полученных камерой с переменным фокусным расстоянием.
2. Выпишем уравнение (2.6) для пар соответствующих точек.
3. Решим (2.6) для вещественного положительного корня и обновим скаляр α_u, α_v .

Способ 3

Опишем идею алгоритма, представленную Ричардом Хартли [4]. Допустим, у нас дано N перекрывающихся изображений J_0, J_1, \dots, J_N , где $N \geq 2$. Все изображения получены одной и той же камерой либо несколькими камерами с одинаковыми внутренними параметрами. Основные шаги алгоритма.

1. Установить точечное соответствие между изображениями.
2. Для каждого $j = 1, \dots, N$ посчитаем 2D проективное преобразование P_j от J_0 к J_j .

3. Найдем верхнетреугольную матрицу K такую, что $K^{-1}P_jK = R_j$ является матрицей вращения для всех $j > 0$. Матрица K будет калибровочной матрицей для камер (или камеры), а R_j представляет собой ориентацию j -й камеры по отношению к 0-й.

4. Улучшим расчетную матрицу, используя итеративное приближение Levenberg—Marquardt [5, 6].

Остановимся более подробно на шаге 3, оставив остальные выкладки желающим изучить материал самостоятельно.

Итак, нам известны преобразования P_j для $j = 1, \dots, N$, и мы желаем найти калибровочную матрицу K , которая должна представлять собой верхнетреугольную матрицу, удовлетворяющую условию

$$K^{-1}P_jK = R_j, \quad (3.1)$$

где R_j является матрицей вращения для любого j . Матрица P должна быть сопряженная (conjugate) к матрице вращения, это значит, что P довольно специфична, как будет показано далее. Из соотношений (3.1) и $R = R^{-T}$ следует

$$R_j = K^T P_j^{-T} K^{-T}. \quad (3.2)$$

Из эквивалентности (3.1) и (3.2) следует

$$(KK^T)P_j^{-T} = P_j(KK^T). \quad (3.3)$$

Положим

$$C = KK^T = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & f \end{pmatrix}.$$

Уравнение (3.3) дает нам девять линейных уравнений с шестью неизвестными. Чтобы найти матрицу C , необходимо знать как минимум три различные матрицы P_j . В частности, для каждого изображения и соответствующей матрицы P_j для $j = 1, \dots, N$ будет 9 уравнений. Эту переопределенную систему уравнений можно записать в виде $Xa = 0$, где X — матрица размерности $9N \times 6$ и вектор a состоит из неизвестных матрицы C . Это проблема минимизации и решается методом наименьших квадратов, на котором мы не будем заострять внимание.

Найдя матрицу C , матрицу K можно найти, используя факторизационный метод Choleski [7]. Решение для матрицы K возможно лишь при условии положительно определенной матрицы C .

Способ 4

Процесс калибровки камеры, предложенный в [8], проходит в два шага. На первом шаге вычисляется изменение эпиполярных линий. В статье рассматриваются два метода расчета эпиполяр, один основанный на проективных инвариантах, второй — на обобщении основной матрицы. На втором шаге используются так называемые уравнения Круппа, которые связывают эпиполярное преобразование с изображением. Уравнения Круппа могут быть решены после как минимум трех перемещений камеры. Затем, уже можно найти внутренние параметры камеры.

Способ 5

Идея, предложенная в статье Колесник Марины [9], представляет собой способ вычисления внутренних параметров камеры, используя угловую информацию для множества соответствующих точек так, как они видятся на плоскости изображения. Такую калибровку автор называет угловой. Для описываемого процесса необходим лазер для генерации образцов с известными угловыми характеристиками.

Способ 6

В статье Питера Стурма [10] рассматривается проблема самокалибровки движущейся камеры, внутренние параметры которой известны за исключением фокусного расстояния, которое может изменяться в течение времени наблюдения за сценой. Условия, под действием которых определяется значение фокусного расстояния для последовательности изображений, не являются необходимыми, но вторичны. Это зависит только от характера движения камеры. Расчет фокусного расстояния высчитывается на основе так называемых критических последовательностей движения. Рассмотрим последовательность изображений. Положим (R_i, t_i) — внешние параметры изображения i . Если евклидово преобразование вырождено для последовательности изображений, то мы говорим, что $\{(R_i, t_i) \mid i = 1, \dots, n\}$ является критической последовательностью движения для преобразования Евклида.

Способ 7

Совместная статья [11] Пауло Мендонца и Роберто Сиполла знакомит с расширенной техникой самокалибровки Хартли [12], основанной на свойствах основной матрицы, позволяющей стабильно рассчитывать изменяющееся фокусное расстояние и принципиальные точки. Известно, что три сингулярных значения основной матрицы должны удовлетворять двум условиям: одно из значений должно быть нулевым, а другие два — идентичными. Основная же матрица получается из фундаментальной матрицы пу-

тем преобразования входящих в нее внутренних параметров пар камер, связанных двумя сценами. Таким образом, работа с основной матрицей сводится к работе с внутренними параметрами пар камер. Это позволяет искать пространство внутренних параметров камер в порядке минимизации функции стоимости. Этот подход показывает более простой, нежели другие, метод с аналогичной точностью в результате. Другое преимущество данной техники в том, что ей не требуется последовательное направление слабо откалиброванной матрицы камеры для всей последовательности изображений, т.е. множества согласующихся камер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // Microsoft Research, One Microsoft Way, США, Рэдмонд. — 1998.
2. Новиков С.О., Лебедев О.А., Захаренко Г.В. Измерение и исследование трехмерных объектов в условиях неполной информации. — www.imvs.ru/imvs/itvs/03_1_2/novikov.pdf
3. Kolesnik M. Calibration Update Technique for a Zoom Lens // CAIP, 1999, — P.435–443.
4. Hartley R.I. Self-Calibration of Stationary Cameras // G.E. CRD, Schenectady, NY, 12301.
5. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares // Quart. Appl. Math. V.2, 1944, P.164–168.
6. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM J. Appl. Math. V.11, 1963, — P.431–441.
7. Atkinson K.E. An Introduction to Numerical Analysis, 2nd Edition // John Wiley and Sons, New York — 1989.
8. Luong Q.-T., Faugeras O., Maybank S.J. Camera Self-Calibration: Theory and Experiments // Internat. J. of Computer Vision, 1992. — P.123–151.
9. Kolesnik M. Using Angles for Internal Camera Calibration. — viswiz.gmd.de/~marina/pubs.html
10. Sturm P.F. Critical Motion Sequences for the Self-Calibration of Cameras and Stereo Systems with Variable Focal Length // Computational Vision Group, Department of Computer Science. — The University of Reading, 1992.
11. Mendonca P.R.S., Cipolla R. A Simple Technique for Self-Calibration // Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Colorado V.I, 1999 — P. 500–505.
12. Hartley R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras // Proc. 2nd European Conf. on Computer Vision. — Lect. Notes Comput. Sci. — 1992. — Vol. 588. — P. 579–587.