ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Киреев Олег Сергеевич

младший научный сотрудник

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАНУ

г. Киев, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТЕРЕОЗРЕНИЯ

***Аннотация**: в работе детально рассмотрены математические модели стереопары и приведен обзор существующих методов калибровки, проведено их сравнение на основе экспериментальных данных.*

***Ключевые слова**: стереопара, модель камеры, калибровка.*

1. Введение

Многие задачи машинного зрения требуют знания о связи между изображениями и объектами в трехмерном пространстве, с которых эти изображения сделаны. Две камеры, снимающие один и тот же предмет, позволяют произвести триангуляцию – восстановить трехмерные координаты каждой точки пространства, изображения которой есть на обоих снимках. Для возможности триангуляции необходимо провести калибровку, то есть определить значения параметров модели стереопары. Существует много различных моделей и подходов к калибровке [1; 4], на которых остановимся ниже более подробно и проведем сравнение их точности на основе экспериментальных данных.

2. Калибровка стереопары: теоретические положения

В подавляющем большинстве случаев камеры, составляющие стереопару, калибруются отдельно. Такой подход уменьшает количество неизвестных параметров калибровки и, соответственно, улучшает устойчивость работы численных методов. Далее приведем краткий обзор возможных подходов к калибровке камеры [1]. Калибровка камеры включает в себя выбор модели камеры, численных алгоритмов поиска параметров модели и объекта калибровки. В данной работе мы более подробно остановимся на методе явной калибровки по известным 3D-точкам и с нелинейной моделью камеры.

Итак, рассмотрим математическую модель камеры. Наиболее простой является модель камеры-обскуры (pinhole camera):

$$^{I}X_D = \frac{P_{11}\,{}^{W}X_W + P_{12}\,{}^{W}Y_W + P_{13}\,{}^{W}Z_W + P_{14}}{P_{31}\,{}^{W}X_W + P_{32}\,{}^{W}Y_W + P_{33}\,{}^{W}Z_W + P_{34}}$$

$$^{I}Y_D = \frac{P_{21}\,{}^{W}X_W + P_{22}\,{}^{W}Y_W + P_{23}\,{}^{W}Z_W + P_{24}}{P_{31}\,{}^{W}X_W + P_{32}\,{}^{W}Y_W + P_{33}\,{}^{W}Z_W + P_{34}} \tag{1}$$

или в матричном представлении:

$$\begin{pmatrix} s\ {}^{I}X_D \\ s\ {}^{I}Y_D \\ s \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} {}^{W}X_W \\ {}^{W}Y_W \\ {}^{W}Z_W \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где P – проекционная матрица 3x4; $\left({}^{I}X_D,\ {}^{I}Y_D \right)^T$ – координаты проекции в пикселах; $\left({}^{W}X_W, {}^{W}Y_W\ , {}^{W}Z_W\right)^T$ – 3D-координаты точки в мировой системе координат.

Более сложные модели представляют проектирование 3D-точки на плоскость изображения камеры в виде четырех последовательных преобразований [3].

Во-первых, переходят от мировой системы координат в пространстве к системе координат камеры. При этом точка P_W в мировой системе координат имеет координаты P_C в системе координат камеры.

$$\begin{pmatrix} {}^{C}X_W \\ {}^{C}Y_W \\ {}^{C}Z_W \end{pmatrix} = {}^{C}R_W \begin{pmatrix} {}^{W}X_W \\ {}^{W}Y_W \\ {}^{W}Z_W \end{pmatrix} + {}^{C}T_W. \tag{3}$$

Далее производят линейное проектирование точки P_C на плоскость изображения, получая точку P_U. Пусть плоскость изображения расположена на расстоянии f от оптического центра O_C и параллельна плоскости, заданной осями X_C и Y_C. Тогда проекция производится согласно следующим уравнениям:

$${}^{C}X_U = f\,\frac{{}^{C}X_W}{{}^{C}Z_W};\ {}^{C}Y_U = f\,\frac{{}^{C}Y_W}{{}^{C}Z_W}. \tag{4}$$

Третий шаг моделирует дисторсию линз, то есть нелинейные искажения в камере. Он вносит поправку к линейной проекции P_U, чтобы получить точку реальной проекции P_D:

$$^{C}X_U = {}^{C}X_D + \delta_X;\ {}^{C}Y_U = {}^{C}Y_D + \delta_Y. \tag{5}$$

Поправки δ_X и δ_Y моделируют аберрации физических камер и представляются в виде рядов. Обычно рассматривают два вида дисторсии: радиальную и тангенциальную. Радиальная и тангенциальная дисторсии задаются уравнениями (6) и (7) соответственно.

$$\begin{aligned} &r^2 = {}^{C}X_D^2 + {}^{C}Y_D^2; \\ &\delta_{XR} = {}^{C}X_D(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6 + \ldots), \\ &\delta_{YR} = {}^{C}Y_D(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6 + \ldots), \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} &\delta_{XT} = (g_1 + g_3)\,{}^{C}X_D^2 + g_4\,{}^{C}X_D\,{}^{C}Y_D + g_1\,{}^{C}Y_D^2, \\ &\delta_{YT} = g_2\,{}^{C}X_D^2 + g_3\,{}^{C}X_D\,{}^{C}Y_D + (g_2 + g_4)\,{}^{C}Y_D^2. \end{aligned} \tag{7}$$

Общая дисторсия равна их сумме:

$$\begin{aligned} &\delta_X = \delta_{XR} + \delta_{XT}, \\ &\delta_Y = \delta_{YR} + \delta_{YT}. \end{aligned} \tag{8}$$

И, наконец, необходимо перейти от метрической системы координат камеры на плоскости изображения P_D к системе координат компьютерного изображения в пикселах P_I.

$$\begin{aligned} &^{I}X_D = -k_U\,{}^{C}X_D + U_0; \\ &^{I}Y_D = -k_V\,{}^{C}Y_D + V_0. \end{aligned} \tag{9}$$

Для приведенной выше нелинейной модели камеры обычно используются смешанные двухшаговые методы калибровки. Сначала проводится линейная оценка параметров, которая затем используется в итеративной оптимизации как начальное приближение [2].

3. Экспериментальная установка и результаты эксперимента

Сконструированный нами калибровочный стенд представляет собой узкий длинный деревянный брус с наклеенной на него калибровочной сеткой. В качестве калибровочной сетки используется обычная «шахматка». На «шахматке» в одной из клеток поставлен черный крест, который задает нам опорную точку при связывании левого и правого снимков друг с другом и пространственными координатами. Разработанная нами программа автоматически определяет координаты калибровочных точек на изображении с точностью до пиксела, а также находит положение опорной точки.

В результате эксперимента было получено около 2000 калибровочных точек. Около 80% из них использовано для калибровки (Train), по остальным проводилось тестирование точности калибровки (Test). Калибровка осуществлялась следующими методами:

– линейным. Использованы модель камеры-обскуры (1) и алгоритм псевдоинверсии для нахождения ее параметров;

– без учета дисторсии. Использована модель камеры Bouguet [2]: (3) – (8), (12). При этом все коэффициенты дисторсии считались равными нулю;

– с учетом первого коэффициента дисторсии. Использованы модель камеры Bouguet и калибровка Bouguet;

– с учетом дисторсии. Здесь также использована модель камеры Bouguet, но с учетом всех пяти коэффициентов дисторсии.

В табл. 1 показан результат 3D-реконструкции при калибровке каждым из этих методов.

Таблица 1

Ошибка 3D-реконструкции

Метод	Ошибка 3D-реконструкции, мм					
	Train			Test		
	Mean	STD	Max	Mean	STD	Max
Линейный	7.7	5.6	38.0	7.0	5.0	24.4
Bouguet без дисторсии	7.8	6.3	42.9	6.8	5.1	27.0
Bouguet только с k1	7.7	6.8	41.3	7.2	4.8	25.1
Bouguet с дисторсией	7.2	5.9	37.7	6.4	4.6	22.5

Как видно из таблицы, лучший результат показала калибровка по Bouguet с учетом всех пяти коэффициентов дисторсии. Однако он ненамного лучше результата, полученного при калибровке линейным методом с моделью камеры-обскуры. Этого следовало ожидать, так как в эксперименте использовались камеры с малой дисторсией.

4. Заключение

В работе детально разобрана математическая модель стереопары и приведен обзор существующих подходов к задаче калибровки. Описана конструкция простого в изготовлении калибровочного стенда и реализована программа автоматической обработки калибровочных снимков. Проведено экспериментальное сравнение разных моделей стереопары и методов калибровки.

Список литературы

1. Armangue X., Salvi J., Battle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation // Pattern Recognition. – 2002. – Vol. 35 (7). – P. 1617–1635.

2. Bouguet J.-Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc

3. Heikkila J., Silven O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction // CVPR97. – 1997. – P. 1106-1112.

4. Sturm P.F., Maybank S.J. On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications // CVPR99. – 1999. – P. 432–437.