

УДК 004.93

©2010. А.В. Старостин

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В геометрическом смысле цель калибровки камеры – это определение множества параметров камеры, которые определяют отображение между соответствующими трёхмерными координатами сцены и двумерными координатами изображения. В этой работе рассмотрим технику калибровки, основанную на методе наименьших квадратов. Этот подход достаточно быстрый для использования в системах реального времени.

Ключевые слова: калибровка камеры, точечная модель, дополнительная реальность, параметры камеры

1. Введение. Термин „дополнительная реальность” используется чтобы описать системы, совмещающие виртуальные (сгенерированные с помощью компьютера) объекты с реальным окружением. С помощью технологии дополнительной реальности, пользователь может видеть реальный мир, расширенный некоторой дополнительной информацией.

Для того, чтобы дополнительная информация имела смысл, реальные и виртуальные объекты должны быть точно позиционированы относительно друг друга. Для этого необходимо провести некоторые измерения и калибровки при старте системы.

Калибровка — это процесс, в контексте трёхмерного компьютерного зрения, определения внутренних оптических и геометрических характеристик камеры (внутренние параметры) и 3D позиции и ориентации кадра камеры относительно мировой системы координат (внешние параметры).

2. Модель камеры. Модель — это математическая формулировка, которая приблизительно описывает параметры камеры. Моделируется внутренняя геометрия, позиция и ориентация камеры. В системе дополнительной реальности, на сцене присутствуют реальные объекты окружения и виртуальные объекты. Калибровка — это процесс для определения параметров камеры, чтобы сопоставить виртуальные объекты с их реальными соответствиями. Этими параметрами могут быть как оптические характеристики физической камеры, так и информация о позиции и ориентации различных объектов.

Камера может быть смоделирована с помощью множества внутренних и внешних параметров. Внутренние — это параметры, которые связывают систему координат камеры с идеальной системой координат, определяющие оптические свойства камеры, такие как: фокусное расстояние, размеры пикселей, и положение центра изображения, где оптическая ось пересекает плоскость изображения. Внешние — это параметры, связывающие систему координат камеры с фиксированной реальной (мировой) системой координат, а также описывающие её положение и ориентацию

в пространстве.

3. Точечная модель. Существуют различные модели камер, в зависимости от требуемой точности. Рассмотрим простейшую точечную модель камеры.



Рис. 1. Точечная модель камеры

Простая точечная модель (рис. 1) [3,4] используется для камеры, которая возвращает простую геометрию, с помощью которой 3D объект будет проецироваться на 2D плоскость изображения. Эта идеальная модель часто используется в компьютерной графике для получения геометрии изображения. Она не может описать определённые оптические эффекты (например, нелинейная дисторсия), которые обычно свойственны реальным камерам, но могут быть проигнорированы в большинстве случаев.

Плоскость изображения Π (C_0xy или cuv) параллельна плоскости CX_cY_c . Оптическая ось CZ_c пересекает плоскость изображения в главной точке $C_0(u_0, v_0)$, которая также называется центром изображения. Расстояние CC_0 равно фокусному расстоянию f камеры.

Пусть P 3D точка и Q её проекция на Π. Координаты P в координатах камеры (C, X_c, Y_c, Z_c) будут $[X_c, Y_c, Z_c]^T$, и в мировых координатах (O, X, Y, Z) будут $[X, Y, Z]^T$. Получим следующее соотношение между P и Q :

$$\frac{f}{Z_c} = \frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c}. \quad (1)$$

Если единицы измерения на плоскости изображения будут изменены, то $x = \frac{u'}{k_u}$, $y = \frac{v'}{k_v}$ и центр будет перенесён, где $u' = u - u_0$ и $v' = v - v_0$, то получим:

$$x = \frac{u - u_0}{k_u}, \quad (2)$$

$$y = \frac{v - v_0}{k_v}. \quad (3)$$

Пусть $f_u = k_u f$ и $f_v = k_v f$, то (1), (2), (3) могут быть записаны при $Z_c \neq 0$ как линейное отношение в однородных координатах:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 1 \\ 0 & f_v & v_0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Вид сцены, сформированный проектированием 3D точек на плоскость изображения, используя перспективное преобразование, можно записать как:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A [Rt] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где (X, Y, Z) — координаты 3D точки в мировой системе координат, (u, v) — координаты проекции точки в пикселях. A матрицы камеры или матрица внутренних параметров. (u_0, v_0) — главная точка (центр изображения), определяет положение (в единицах измерения пикселей) точки C_0 в системе координат чувствительной области, $1/k_u$ и $1/k_v$ — горизонтальный и вертикальный размеры пикселя, и f_x и f_y — фокусное расстояние, выраженное в пикселях. Таким образом, если изображение с камеры масштабировано с некоторым коэффициентом, то все параметры также должны быть масштабированы (умножены, разделены) с тем же коэффициентом. Матрица внутренних параметров не зависит от рассматриваемой сцены, и после расчёта может быть использована повторно (если фокусное расстояние постоянно (в случае объектива с переменным фокусным расстоянием)). Объединённая матрица вращения-перемещения $[Rt]$ называется матрицей внешних параметров (R — вращение, t — сдвиг между мировой системой координат и системой координат камеры). Она используется для описания движения камеры вокруг статической сцены, или движения объекта перед неподвижной камерой. Т. е. $[Rt]$ переводит координаты точки (X, Y, Z) в некоторую систему координат, фиксированную относительно камеры. Трансформация, приведённая выше, эквивалентна следующей (когда $Z_c \neq 0$):

$$[X_c \ Y_c \ Z_c]^T = R [X \ Y \ Z]^T + t, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x' = X_c/Z_c \\ y' = Y_c/Z_c \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} u = f_u x' + u_0 \\ v = f_v y' + v_0 \end{aligned}. \quad (7)$$

Линзы имеют некоторые искажения, в основном радиальную дисторсию и немного тангенциальную дисторсию. Поэтому расширим модель следующим образом:

$$\begin{aligned} x'' &= x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2), \\ y'' &= y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y', \end{aligned} \quad (8)$$

где $r^2 = x'^2 + y'^2$, из (7) и (8) получим

$$\begin{aligned} u &= f_u x'' + u_0, \\ v &= f_v y'' + v_0, \end{aligned} \tag{9}$$

k_1, k_2, k_3 — коэффициенты радиальной дисторсии, p_1, p_2 — коэффициенты тангенциальной дисторсии. Коэффициенты дисторсии не зависят от рассматриваемой сцены, поэтому они также относятся к внутренним параметрам камеры. Они остаются постоянными в независимости от разрешения изображения. Для примера, если камера была калибрована на изображениях с разрешением 320x240, те же коэффициенты дисторсии могут быть использованы для изображений с разрешением 640x480 с той же самой камеры, в тоже время коэффициенты f_u, f_v, u_0, v_0 должны быть масштабированы соответствующим образом.



Рис. 2. Коррекция радиального искажения

(5) можно записать как:

$$U = MX, \tag{10}$$

где M — матрица перспективной трансформации. Система может быть рассмотрена с разных сторон. Если X и M нам известны, то (10) позволит нам найти 2D координаты (u, v) точки P . Если известны U и M , то (10) позволит нам провести 3D реконструкцию. Если U и X известны, то можно найти матрицу перспективной трансформации M .

Из (5) и (10) получим матрицу M :

$$M = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Проекция (u, v) каждой 3D точки $P(X, Y, Z, 1)$ на изображении:

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = M \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^T. \tag{12}$$

Из (11) и (12) получим:

$$\begin{cases} u = \frac{m_{11}X + m_{12}Y + m_{13}Z + m_{14}}{m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z + m_{34}} \\ v = \frac{m_{21}X + m_{22}Y + m_{23}Z + m_{24}}{m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z + m_{34}} \end{cases}. \tag{13}$$

Каждая точка даёт два уравнения, поэтому шести точек достаточно для оценки двенадцати коэффициентов матрицы M .

Полученная модель камеры, которая может использоваться для: получения проекции 3D точек на плоскость изображения с заданными внутренними и внешними параметрами; расчёта внешних параметров с заданными внутренними параметрами, несколькими 3D точками и их проекциями; оценка внутренних и внешних параметров из нескольких видов известного калибровочного образца [1,2,3,4] (каждый вид описан несколькими 3D-2D соответствиями).

4. Калибровка камеры. Рассмотрим процесс геометрической калибровки камеры, связанный с оценкой внутренних и внешних параметров камеры. Предполагается, что камера наблюдает набор характерных элементов, таких как точки или прямые, положение которых известно относительно определённой фиксированной внешней системы координат. В таком случае калибровку камеры можно смоделировать как процесс оптимизации, при котором разница между элементами наблюдаемого изображения и их теоретическими положениями (предсказанными через уравнения перспективной проекции) минимизируются относительно внутренних и внешних параметров камеры.

Если камера откалибрована, то с произвольной точкой изображения можно связать строго определённый луч, проходящий через эту точку и оптический центр камеры, а также выполнить точные трёхмерные измерения с помощью оцифрованных изображений.

Процедура калибровки: распечатать тестовое изображение и закрепить его на плоской поверхности; сделать несколько изображений модельной плоскости с различной ориентацией, двигая либо плоскость, либо камеру; найти характеристические точки на изображениях; оценить внутренние параметры и все внешние параметры; подстроить все параметры минимизацией.



Рис. 3. Калибровочная сетка с найденными точками

Будем считать, что камера наблюдает калибровочную установку, и что положения (u_i, v_i) n точек изображения P_i ($i = 1, \dots, n$) с известными однородными координатными векторами P_i были определены (автоматически или вручную) на сетке установки. Разделим процесс калибровки на: вычисление матрицы перспективной проекции M (11), соотнесённой с камерой в этой системе координат, оценка внутренних и внешних параметров камеры по данной матрице.

Рассмотрим систему p -линейных уравнений с q неизвестными на основании точек, полученных с калибровочной сетки (рис. 3):

$$Kx = y. \tag{14}$$

В этом уравнении

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1q} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{p1} & k_{p2} & \dots & k_{pq} \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_q \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_p \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Прямую, которая лучше всего соответствует n точкам на плоскости, можно определить как прямую, среднееквадратическое расстояние от которой до этих точек минимально [3,4]. Полученные данные будут использоваться для вычисления коэффициентов дисторсии (8) и внутренних параметров камеры (11) (13).

5. Оценка внешних параметров. Для оценки внешних параметров камеры, будем использовать метод, основанный на использовании точек в мировой системе координат, расстояние между которыми нам известно. Матрица поворота R и матрица сдвига t для каждой координатной системы, будут получены на основании дистанций между вершинами отмеченного треугольника, сформированного тремя рассматриваемыми точками.

В нашей задаче требуется определить данные о точках на плоскости в мировой системе координат, поэтому, выберем специальную мировую систему координат, такую что $Z = 0$, то из (11) (12), (13) преобразуется в:

$$\begin{cases} u = \frac{m_{11}X+m_{12}Y+m_{14}}{m_{31}X+m_{32}Y+m_{34}} \\ v = \frac{m_{21}X+m_{22}Y+m_{24}}{m_{31}X+m_{32}Y+m_{34}} \end{cases}, \quad (16)$$

m_{34} можно установить в 1. Получили 8 неизвестных, значит достаточно будет 4 точки для оценки параметров матрицы M (рис. 4).

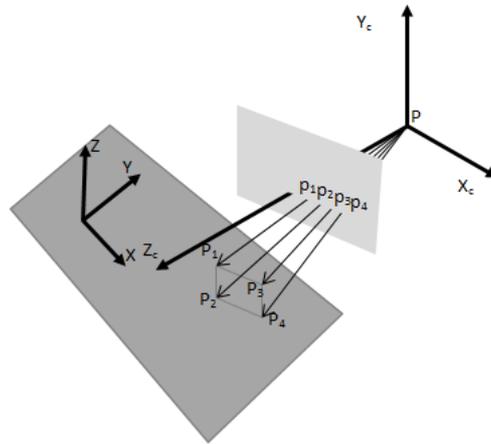


Рис. 4. Модель камеры и плоскость поверхности

6. Отображение дополнительной информации. После вычисления матрицы M (11) можно сгенерировать некоторую дополнительную информацию, зная мировые координаты объекта, с помощью (10) можно спроектировать её на плоскость изображения, полученного с камеры.

7. Висновки. Розглянута задача моделювання і калібровки камери. Розглянуті методи оцінки внутрішніх і зовнішніх параметрів. Отримана модель камери, яка може використовуватися для: отримання проекції 3D точок на площину зображення з заданими внутрішніми і зовнішніми параметрами, розрахунок зовнішніх параметрів з заданими внутрішніми параметрами, кількома 3D точками і їх проекціями, оцінки внутрішніх і зовнішніх параметрів з кількох видів відомого калібровочного зразка.

Показано, що для оцінки зовнішніх параметрів камери для задачі виведення додаткової інформації на площину, достатньо відстань між чотирма точками в світовій системі координат.

1. *R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, and S. Julier* Recent advances in augmented reality // IEEE Computer Graphics and Applications, 21(6), 2001. - P. 34-47.
2. *E. McGarrrity, and M. Tuceryan* A Method for Calibrating See-through Head-mounted Displays for AR // 2nd International Workshop on Augmented Reality. - San Francisco, CA, Oct 20-21, 1999.
3. *S. Malek, N. Zenati-Henda, M. Belhocine and S. Benbelkacem* Calibration Method for an Augmented Reality System // World Academy of Science, Engineering and Technology, 45, 2008.
4. *Z. Zhang* Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review. International Journal of Computer Vision, 27(2):161-195, March/April 1998.

A.V. Starostin

Modeling and calibration of camera for an augmented reality system.

In geometrical camera calibration, the objective is to determine a set of camera parameters that describe the mapping between 3D references coordinates and 2D image coordinates. In this paper, a technique of calibration and tracking based on both a least squares method is presented and a correlation technique developed as part of an augmented reality system. This approach is fast and it can be used for a real time system

Keywords: camera calibration, point model, augmented reality, camera parameters.

A.B. Старостін

Моделювання і калібрування камери для системи додаткової реальності.

У геометричному сенсі мета калібрування камери - це визначення множини параметрів камери, які визначають відображення між відповідними тримірними координатами сцени і двомірними координатами зображення. У цій роботі розглянемо техніку калібрування засновану на методі найменших квадратів. Цей підхід досить швидкий для використання в системах реального часу.

Ключові слова: калібрування камери, точкова модель, параметри камери.

Ин-т прикл. математики и механики НАН Украины, Донецк
itmyaddress@gmail.com

Получено 07.12.10