第 33 卷 第 2 期 计 算 机 工 程 2007 年 1 月
Vol.33 No.2 Computer Engineering January 2007
·开发研究与设计技术· 文章编号：1000—3428(2007)02—0255—02 文献标识码：A 中图分类号：TP273

摄像机标定系统的设计与实现

张 伟，程 鸿，韦 穗
（安徽大学计算智能与信号处理重点实验室，合肥 230039）

摘 要：系统采用的是直接标定摄像机内部参数的算法，算法借助于标定参照物直接计算摄像机的内参数。整个系统是在 VC++环境下设计并实现的，并借助了 IPL 和 OpenCV 的帮助，只要输入标定物的图像，系统就可以迅速而又准确地输出摄像机内参数的结果。通过 3D 重构实验证明了该系统的有效性。相对于 MATLAB 实现方式，该系统使用更加方便、快捷。

关键词：摄像机标定；内部参数；VC++；IPL；OpenCV

Design and Implementation of Camera Calibration System

ZHANG Wei, CHENG Hong, WEI Sui
(Key Lab of Intelligence Computing and Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039)

【Abstract】This paper presents a calibration system，which adopts a method named direct calibration for intrinsic parameter of camera by the use of reference object. The whole system is implemented under VC++ by the help of IPL and OpenCV. With an image of reference object, the intrinsic parameter can be computed and displayed accurately in a minute by the system. The authors came to a conclusion of its validity by 3D reconstruction experiments. Compared with the Matlab procedure, it is a swifter system which can be used conveniently.

【Key words】 Camera calibration; Intrinsic parameter; VC++; IPL; OpenCV

摄像机标定是计算机视觉的重要问题之一。它是二维图像获取三维空间信息的关键和必要步骤，如基于图像的物体重构、基于图像的测量等。摄像机标定可以分为 3 种不同的形式：基于标定物的方法，自标定方法[1,2]和基于主动视觉的标定方法[3,4]。基于标定物的方法[5,6]是指用一个结构已知、加工精度很高的标定块作为空间参照物，通过空间点和图像点之间的对应关系来建立摄像机模型参数的约束，通过优化算法来求取这些参数。这种方法根据所使用的标定物的不同又可以分为 3 种：基于一维物体的标定，基于二维物体的标定和基于三维物体的标定。相比于自标定和基于主动视觉的标定方法，此方法的优点是可以使用任意的摄像机模型，标定精度高，因此当应用场合所要求的精度很高时，常选用这种方法。本文采用的是基于三维物体标定的方法，为了降低这种标定过程的复杂度，在VC环境下，借助于OpenCV的帮助，开发了一套标定系统，它适用于任何普通的计算机，用户可以通过简单的操作直接得到摄像机的内参数。

1 IPL 和 OpenCV 介绍

1.1 简介

IPL(Image Processing Library)[7]和OpenCV(Open Source Computer Vision Library)[8]是在数字图像处理和计算机视觉方面功能强大的类库，能给编程带来极大的方便，可轻松实现很多复杂的数字处理功能，缩短程序的开发周期。

IPL 以标准 DLLs 和静态库的形式提供了一系列底层图像处理函数，不同版本的库是针对不同的处理器进行开发的。该库函数可以进行图像滤波、阈值计算、像素的算术和逻辑运算、图像的颜色转换、图像统计学处理、以及图像的形态学处理等操作。

OpenCV 是英特尔公司于是 1999 年在俄罗斯设立的软件开发中心“ Software Development Center ”开发的。OpenCV 是在 IPL 基础上发展起来的，在 IPL 支持下，可轻松地进行图像的几何处理、形态学处理、图像特征提取、主动轮廓算法、相机的较正、姿势的识别等很多操作。而且还可以应用于三维图像处理技术，这一技术使计算机获得了深度视觉的能力，提高了各种视觉应用的功能。

1.2 IPL 和 OpenCV 中常用的数据结构

IPL 中的函数只处理一种格式的图像，该格式的头结构是 IpIImge。IpIImage 是这两个库中基本的数据结构，包含了图像的所有信息，还有指向图像数据指针。具体定义如下：

```
Typedef struct_IplImage{
  int nSize; /*IpIImage 结构的大小*/
  int ID; /*图像头的版本*/
  int nChannels;
  /*通道数,据不同颜色类型的位图可取决于 1、3、4*/
  int alphaChannel; /*Alpha 通道数,没有取 0,有则取 4*/
  int depth; /*每个通道的位数,可取 1、8、16、32*/
  char colorModel[4];
  /*颜色模式,有 Gray、RGB、RGBA、CMYK 等*/
  char channelSeq[4]; /*通道顺序,如“ RGB"、“ BGR"、等*/
  int dataOrder; /*数据的排列方式,使用像素格式*/
  int origin; /*坐标原点,有左上角和左下角两种*/
  int align; /*图像数据的排列方式*/
  int imageSize; /*图像的大小*/
  char *imageData; /*指向图像数据的指针*/
  int widthStep; /*校准后的行字节数*/
  int BorderMode[4]; /*边缘像素的模式*/
```

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60473102)
作者简介：张 伟(1981－)，男，硕士生，主研方向：计算机视觉，图像处理等；程 鸿，硕士生；韦 穗，教授、博导
收稿日期：2006-03-27 **E-mail：**zwsl@ahu.edu.cn

```
    int BorderConst[4]; /*表示 4 个边的常数*/
    char *imageDataOrigin;
    /*该指针指向完整的、没有校准的图像*/
}IplImage;
```

OpenCV 提供了一些存储动态数据结构的方法——存储器结构(如 CvMemStorage)、序列(如 CvSeq)和结合(如 CvSet)。下面介绍一下 CvMemStorage 和 CvSeq 的具体结构：

```
Typedef struct CvMemStorage{
    CvMemBlock* bottom; /*第 1 个划分的块*/
    CvMemBlock* top; /*当前块*/
    StructCvMemStorage* parent; /*新块的来源*/
    Int block_size; /*块大小*/
    Int free_space; /*当前块的空域空间*/
} CvMemStorage;
typedef struct CvSeq{
    CV_SEQUENCE_FIELDSO /*用户可通过
    CV_SE-QUENCE_FIELDSO /*定义自己的域*/
}CvSeq;
```

2 基于三维物体的标定方法

在所要标定的线性摄像机前放置一个特制的标定参照物(立方体)，利用摄像机获取该物体的图像，并由此计算摄像机的内外参数。标定参照物上的每一个特征点(立方体上每一个小方块的顶点)相对于世界坐标系的位置在制作时应精确测定，世界坐标系可选为参照物的物体坐标系。在得到这些已知点在图像上的投影位置后，便可计算出摄像机的内外参数[6]。对于线性摄像机来说,投影模型为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & s & x_0 \\ 0 & a_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} [R|t] \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} = M_1 M_2 X_W = M X_W \tag{1}$$

M_1只与摄像机的内部结构有关，称为摄像机的内参数矩阵；M_2完全由摄像机相对于世界坐标系的方位决定，称为摄像机的外参数矩阵。求M的过程就成为摄像机的标定。式(1)又可以写为式(2)：

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{Wi} \\ Y_{Wi} \\ Z_{Wi} \\ 1 \end{pmatrix} \tag{2}$$

其中 $(X_{Wi}, Y_{Wi}, Z_{Wi}, 1)$ 为空间第i点的坐标；$(x_i, y_i, 1)$ 为第i点的图像坐标；m_{ij}为投影矩阵M的第i行j列元素。由此我们可以得到 $2n$个关于M矩阵元素的线性方程。因为对于式(2)来说，M乘以任何不为零的常数都不影响 (X_w, Y_w, Z_w) 与(x,y)的关系，所以可以指定m_{34}=1，从而得到关于M矩阵其他元素的$2n$个线性方程，这些未知元素的个数为 11 个，记为 11 维向量m，于是这个线性方程可以简写为

$$K m = U \tag{3}$$

其中，K 为已知的 $2n\times 11$ 矩阵，m 为未知的 11 维向量，U 为已知的 $2n$ 维向量。当 $2n>11$ 时，就可以用最小二乘法求得上述线性方程得解为

$$m = (K^T K)^{-1} K^T U \tag{4}$$

m向量与m_{34}构成了所求解得M矩阵，由空间 6 个点与它们的图像坐标，就可求出M矩阵。在实际应用中，常使已知点个数远大于 6，这样方程数大大超过未知量的个数，用最小二乘法求解就可以降低误差所造成的影响。M矩阵本身也代表了摄像机参数，但它没有具体的物理意义，但在有些场合，则需要将M进行分解。本文利用RQ分解求摄像机内参数，即对M的前三列进行分解，得出的上三角矩阵R可以认为是摄像机的内参数M_1。

3 系统主要设计思想

在设计上，由于系统要得到标定物图像上特征点的坐标，如果采用手工采集图像坐标的方式，则精度很难得到保证，因此采用了Hariss的角点检测技术，先利用角点检测来确定图像上的所有特征点，然后根据需要，可以任取其中有代表性的若干个点，而且在VC++环境下[9]，结合C++和OpenCV的帮助，可以很容易地向系统直接输入所取特征点的坐标值，直接参与标定计算。这样不仅保证了图像点坐标的精度，也提高了最终标定结果的精度。

得到图像点后，可以根据预先设定好的三维点的世界坐标，直接进行标定计算，因为 C++对图像的处理能力有限，所以这里面大多数运算都要依靠 IPL 和 OpenCV 的帮助，正如前面已经叙述，通过 VC++的强大平台支持，就生成了一个使用方便、快捷的标定系统。

4 标定实验

为了验证标定结果，我们做了一个基于图像对的 3D 重构实验。

步骤：(1)拍摄标定物的视角变化不大的两幅图像，如图 1 所示；(2)利用本系统对其中一幅图进行标定，求出摄像机的内参数，如图 2 所示；(3)假设两幅图的内参不变，利用这两幅图进行重构，得到了非常逼真的欧式重构结果，从而验证了此标定结果，如图 3 所示。

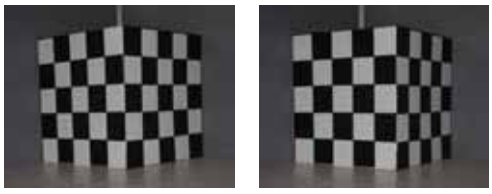


图 1 标定物的两视图

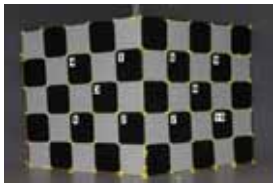


图 2 在标定物上取 10 个特征点

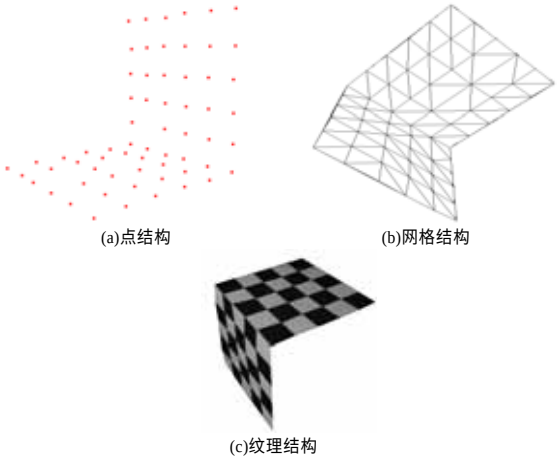


图 3 标定物的重构结果

标定结果如下：

(下转第 276 页)