

文章编号: 1000-5013(2011)04-0364-04

双目立体视觉摄像机标定及精度分析

林俊义, 黄常标, 刘斌, 江开勇

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 以 VC++ 为开发平台, 采用开源的 OpenCV 函数库实现张氏标定算法; 以标定板上的角点为测量对象, 进行双目立体视觉系统的三维数据测量. 采用标定获得的摄像机参数对模板图像进行校正, 使用 Harris 算子进行角点提取, 并对各行各列角点进行最小二乘直线拟合, 以其交点为最终的角点位置, 最后进行角点匹配与反求. 测量结果的精度分析表明: 该方法具有较高的测量精度, 符合实际的测量要求.

关键词: 双目立体视觉; 张氏标定算法; OpenCV; 精度分析

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A

双目立体视觉由于结构灵活、安装方便、成本低而被广泛采用. 摄像机是双目立体视觉系统获取图像信息的主要工具, 计算获取摄像机内部参数和外部参数的过程称为摄像机标定. 它是双目立体视觉系统的关键环节, 直接关系到系统的测量精度^[1]. 随着摄影测量和计算机视觉理论的发展, 摄像机标定技术有了新的发展^[2-6]. 在现有的摄像机标定方法中, 根据标定过程对标定物的要求不同, 将摄像机标定分为传统标定方法、自标定方法和基于主动视觉的标定法. 传统标定法需要精确的标定物, 同时有些场合不适合放置标定物; 自标定法灵活性强, 操作空间不受限制, 可以实现摄像机的在线标定, 但是其算法鲁棒性差, 精度水平则无法与传统的标定方法相比; 基于主动视觉的标定法是利用已知摄像机的某些运动信息对其进行标定, 其算法简单, 往往能够获得线性解, 故鲁棒性高, 但是系统的成本高, 实验设备昂贵且条件要求高, 不适合于运动参数未知或无法控制的场合^[7]. 张氏标定算法^[2]虽然也使用了针孔模型和标定物, 但是它的具体标定方法介于自标定与传统标定之间, 既具有较好的鲁棒性, 又不需要昂贵的精制标定块, 在计算机视觉领域得到了较多的运用. 本文在 VC++ 平台上, 使用 OpenCV 实现了张氏标定算法, 并通过实验对标定精度进行了分析.

1 摄像机标定模型与方法

1.1 摄像机标定模型

理想的摄像机成像模型就是小孔成像模型, 如图 1 所示, 整个模型共有 4 套坐标系: (1) 世界坐标系 (O_w, X_w, Y_w, Z_w), 是由用户任意定义的三维空间坐标系; (2) 摄像机坐标系 (O_c, X_c, Y_c, Z_c), 以摄像机光心 O_c 为原点, 以垂直于图像平面的摄像机光轴为 Z_c 轴, X_c 轴和 Y_c 轴平行于图像平面; (3) 图像物理坐标系 (O_l, x, y), 它的原点是摄像机光轴与像平面的交点 O_l (也成为主点), 单位为 mm; (4) 图像像素坐标系 (O_0, u, v), 是以图像左上角 O_0 为原点, 以像素为单位的坐标系.

空间某点 P 到其像点 p 的坐标转换, 主要是通过这 4 套坐标系之间的 3 次转换来实现的. 首先, 将 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 进行坐标旋转和平移得到 $P(X_c, Y_c, Z_c)$; 然

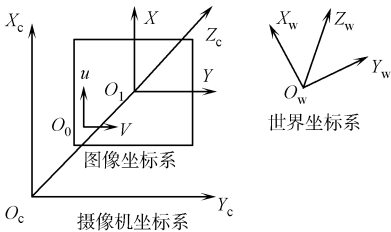


图 1 理想的摄像机模型
Fig. 1 Ideal model of camara

后,根据三角几何变换得到图像物理坐标系 (x,y) ;最后,根据公制单位和像素单位之间的转换关系得到像点 p 的图像像素坐标 (u_v,v_v) .其数学表达式为

$$\begin{bmatrix} u_v \\ v_v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/d_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

式(1)中: d_x 和 d_y 是单位像素的物理尺寸; $\alpha=f/d_x,\beta=f/d_y$,分别定义为 x,y 方向的比例因子; f 为成像系统的焦距; γ 为倾斜因子; (u_0,v_0) 为图像像素坐标系中的主点坐标; \mathbf{A} 为内参数矩阵;正交旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 组成外参数矩阵.假设 $\mathbf{H}=\mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$,则称矩阵 \mathbf{H} 为单应性矩阵.

由于现实中使用的摄像机都不可能是理想的针孔模型,因此必须考虑摄像机的透镜畸变.畸变一般有径向畸变和切向畸变,张正友^[2]提出的平面模板标定法中只考虑了径向畸变,其模型为

$$\left. \begin{aligned} x_d &= x_u + x_u[k_1(x_u^2 + y_u^2) + k_2(x_u^2 + y_u^2)^2], \\ y_d &= y_u + y_u[k_1(x_u^2 + y_u^2) + k_2(x_u^2 + y_u^2)^2]. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式(2)中: (x_d,y_d) 为实际检测到的坐标; (x_u,y_u) 为理想的坐标.

1.2 标定方法

张氏标定算法中采用平面模板作为标定物,假设空间坐标系的位于模板平面上,且 $Z_w=0$,并用 \mathbf{r}_i 来表示 \mathbf{R} ,则式(1)可简化为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{t} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{t} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

相应的单应性矩阵为 $\mathbf{H}=\mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}]$.每幅给定的平面模板图像都可以获得一个单应性矩阵,记 \mathbf{H} 为 $[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$,求出的 \mathbf{H} 和真正的单应性矩阵相差一个比例因子,所以有

$$[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] = \lambda \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}]. \tag{4}$$

由于 \mathbf{r}_1 与 \mathbf{r}_2 正交, $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2=0,\|\mathbf{r}_1\|=\|\mathbf{r}_2\|=1$,所以每幅图像可以获得两个对内参数矩阵的基本约束.即

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0, \tag{5}$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2. \tag{6}$$

$\mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$ 是个对称矩阵,可以用一个6维向量 \mathbf{b} 来表示.

如果有 n 幅图像,就可以构成一个 $2n \times 6$ 的矩阵,只要 $n>3$ 就可以解出 \mathbf{b} .一旦 \mathbf{b} 知道了,摄像机的内外参数就可以解出.然后,再以这些参数为初始值,在考虑畸变的同时,应用Levenberg-Marquardt算法,对图像点与再投影点之间的距离之和进行非线性最小优化,可以得到更高精度值的一组参数.

2 实验及精度分析

2.1 标定实验

OpenCV^[8-9]是因特尔公司开发的开源的计算机视觉库,由一系列的C函数和少量的C++类组成,在图像处理和计算机视觉方面的功能强大,可以实现相机的标定、校正,三维重构等算法.其中,OpenCV 1.1版本采用的是张氏标定算法中实现的摄像机标定方法.所以,选择VC++.NET为软件开发平台,采用OpenCV函数库来实现相机的标定.

实验采用两台WATEC-902B的CCD相机,焦距为5 mm的计算机镜头,通过Adlink的RTV24图像采集卡进行图像采集.所采集的图像分辨率为768 px \times 576 px,标定模板采用高精度激光打印机打印方形黑白相间棋盘格,棋盘格大小为每格10 mm,格数为15 \times 12格,用双面胶纸打印后贴于光滑玻璃板上.标定时,模板离相机的距离为150 mm.

标定实验有如下5个步骤:(1)打印制作黑白相间棋盘格玻璃平面模板;(2)采用摄像机从5个不

同角度采集标定模板的图像(图 2);(3) 对采集到的图像进行高斯滤波,并采用 Harris 算子提取角点的图像坐标(图 3);(4) 在开发的 VC 软件上,读入模板角点真实坐标与对应的图像坐标,采用 OpenCV 视觉函数库中的张氏标定算法进行相机标定;(5) 保存标定内外参数,左摄像机的参数标定结果: $A_1 =$

$$\begin{bmatrix} 622.266 & 608.7 & 0 & 379.132 & 755 \\ 0 & 616.285 & 409 & 273.818 & 520 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, k_1 = -0.125\ 585, k_2 = 0.107\ 501;$$

左摄像机的参数标定结果: $A_2 =$

$$\begin{bmatrix} 620.893 & 817 & 0 & 380.068 & 657 \\ 0 & 614.529 & 575 & 279.684 & 141 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, k_1 = -0.132\ 532, k_2 = 0.226\ 690.$$

在 OpenCV 中采用的是张氏标定算法,以左摄像机坐标系为世界坐标系的,5 个不同角度的每幅平面模板都有一组外参数,这里不一一列出。



图 2 5 个不同角度采集的图像
Fig. 2 Image gained from 5 different views

2.2 标定结果精度分析

以标定模板上的角点为测量对象,进行测量值与理论值之间的精度分析.为了便于进行误差分析,又不影响张氏标定算法的结果,固定标定好的相机内参数,取第 1 张平面模板为测量对象,并把世界坐标系从左摄像机移至平面模板位置,其原点为模板中心角点位置. X 轴为平行于角点行, Y 轴平行于角点列,则所有的 Z 坐标应该为 0.

以世界每格棋盘为 10 mm,计算各个角点的理论坐标值. 为获得精确的测量值,通过以下 4 个步骤来实现:(1) 以张氏标定算法的摄像机内外参数为基础,固定内部参数,利用 OpenCV 进行双目标定;(2) 利用求出的内外参数,采用 Bouguet 算法,对获取的左右图像进行立体校正;(3) 利用 Harris 算子,提取校正之后的角点图像坐标,并利用最小二乘法,对各行各列进行最小二乘直线拟合,求其各直线的交点为精确角点位置;(4) 按角点顺序进行角点立体匹配,求其各角点三维坐标值,获得的角点用 CopyCAD 软件显示(图 4).

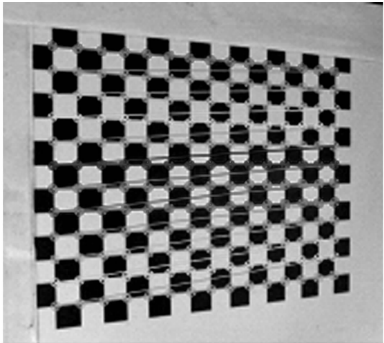


图 3 角点提取结果
Fig. 3 Results of tracing conner

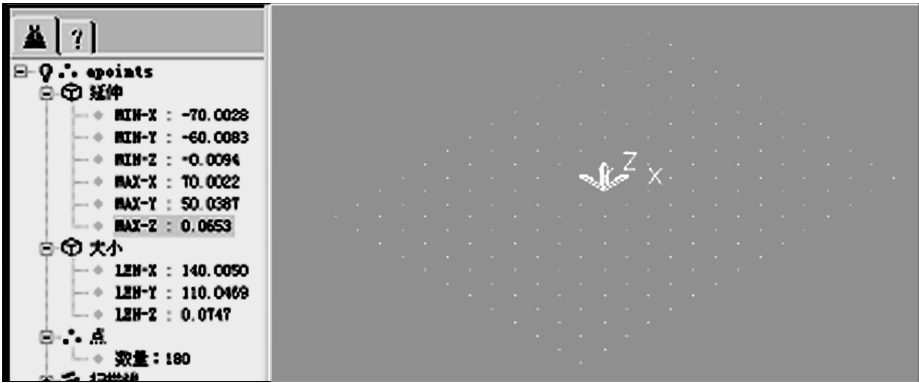


图 4 基准模板角点三维结果
Fig. 4 3D results of conners of standard model

由于采用的是 15×12 的棋盘格,所以总共可以测出 180 个角点,由于点数较多这里不一一列出,只进行整体尺寸比较. 把坐标系建立在棋盘中间,理论值应为 X=140 mm, Y=110 mm, Z=0 mm;测量

值为 $X=70.002\ 2+70.002\ 8=140.005\ \text{mm}$, $Y=50.038\ 7+60.008\ 3=110.047\ \text{mm}$, $Z=0.074\ 7\ \text{mm}$. 由此可以看出, 测量误差在 X,Y 轴方向上小于 $0.05\ \text{mm}$, Z 轴方向上小于 $0.1\ \text{mm}$. 这是由于 Z 坐标是由左右图像视差来计算获取的, 而且经过了从左摄像机到平面模板的坐标转换计算, 所以精度有所损失, 但整体精度能满足测量要求.

3 结束语

研究分析双目立体视觉摄像机标定的方法, 实际测量标定模板并进行精度分析, 证明该方法能满足一般的三维测量要求, 为进行视觉测量的标定工作提供参考. 在标定精度和算法鲁棒性方面还需要进一步研究, 未来重点应放在有关标定方法各个步骤的优化方面. 此外, 在实际测量应用中, 标定模板和所获取图像信息的精确提取直接影响系统的测量精度.

参考文献:

[1] 李中伟, 王从军, 史玉升. 3D 测量系统中的高精度摄像机标定算法[J]. 光电工程, 2008, 35(4): 58-63.

[2] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[3] SONG Li-mei, WANG Ming-ping, LU Lu, et al. High precision camera calibration in vision measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(7): 1413-1420.

[4] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE J Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.

[5] 杨雪荣, 张湘伟, 成思源, 等. 视觉测量中的相机标定方法进展研究[J]. 机械设计与制造, 2009(3): 259-261.

[6] 郭陆峰, 江开勇, 吴明忠. 一种新的非线性相机模型标定方法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 502-506.

[7] GAO Hong-wei, WU Cheng-dong, GAO Li-fu, et al. An improved two-stage camera calibration method[C]// Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian: IEEE, 2006: 9514-9518.

[8] 田克微, 张爱武, 王少敏. 一种基于 OpenCV 的摄像机标定方法[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 14-16.

[9] 高文娟, 李健. 基于 OpenCV 的摄像机标定问题研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(12): 128-130.

Camera Calibration and Accuracy Analysis of Stereo Vision

LIN Jun-yi, HUANG Chang-biao,
LIU Bin, JIANG Kai-yong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The Zhang's camera calibration method is realized by using the OpenCV function library on the VC++ platform. The corners of the calibration planar are measured by the stereo vision to get 3D data. The camera calibration parameters are used to rectify the image of the planar pattern. The Harris corner extraction algorithm is used, and the linear least-squares method is applied to every row and column, the intersection points of these lines are taken as the final corners position. The corresponding corner matching and 3D reversing algorithm are used to get the real points. The precision analysis indicates that the method has high measuring precision and meets the real measuring requirements.

Keywords: stereo vision; Zhang's camera calibration; OpenCV; accuracy analysis

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)