

双目立体视觉中的摄像机标定技术研究

刘金颂,原思聪,张庆阳,刘道华

LIU Jin-song, YUAN Si-cong, ZHANG Qing-yang, LIU Dao-hua

西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055

College of Mechanical and Electronic Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China

E-mail: liuj1222@163.com

LIU Jin-song, YUAN Si-cong, ZHANG Qing-yang, et al. Research on camera calibration in binocular stereo vision. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(6): 237-239.

Abstract: Based on Zhang's method, the calibration method based on the centers of circles on a 2D plane is proposed. By contrasting this method with another two methods, based on corners of squares and based on centers of squares, the validity of this method presented in this paper is proved. In addition to, the implicit camera system model is made with BP neural network simulating the relationship between the 3D objects and its images in the stereo system, which avoiding the system errors caused by unperfected mathematic relation. Experiments show that the high calibration precision can be got by this way.

Key words: binocular stereo vision; camera calibration; BP neural network

摘要:以张氏标定方法为基础,提出以圆心作为标定点的2D平面模板标定方法,通过与基于方格角点的标定方法以及基于方格形心的标定方法进行比较,证明了该方法的有效性。又运用BP神经网络来模拟立体视觉系统三维空间与二维图像平面之间的物、像对应关系,建立了双目立体视觉系统的摄像机隐式标定模型,避免了因数学模型的不完善而带来的系统误差。实验证明该方法能够获得较高的标定精度。

关键词: 双目立体视觉; 摄像机标定; BP神经网络

文章编号: 1002-8331(2008)06-0237-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

1 引言

双目立体视觉系统的标定是建立在被测对象表面点的二维投影图像坐标与三维世界坐标之间的桥梁,是实现自由曲面三维重构的基础,也是立体视觉研究领域中的热点问题之一。微软研究院的张正友^[1]博士在1999年提出一种介于传统标定法和自标定法之间的新的、更灵活的方法——基于2D平面模板的摄像机标定方法。它既避免了传统标定方法设备要求高、操作繁琐等缺点,又较自标定方法精度高,鲁棒性更好,因此而得到广泛应用。在实验过程中发现,在自然光照下,摄像机采集的图像边缘受外界噪音影响较大,方格的边缘模糊与畸变势必造成所提取角点坐标的误差较大,相比之下图像的中心受外界噪音的影响要比边缘小。因此,本文对张正友的标定方法进行了改进,将方格换成圆,提取圆心坐标进行标定,并与基于平面方格角点的标定方法和基于平面方格形心的标定方法进行比较。此外又讨论了基于神经网络的双目立体视觉系统标定方法,并与前一种标定方法进行对比,证明本文所介绍的基于神经网络的标定方法能够获得比较精确的标定结果。

2 双目立体视觉系统标定步骤

假定双目立体视觉系统中左右摄像机的外部参数分别为

R_l, T_l 与 R_r, T_r , 则 R_l, T_l 表示左摄像机与世界坐标系的相对位置, R_r, T_r 表示右摄像机与世界坐标系的相对位置,两个摄像机之间的几何关系 R, T 可以用以下关系式表示^[2]:

$$R = R_r R_l^{-1} \quad T = T_r - R_r R_l^{-1} T_l \quad (1)$$

式(1)表示,如果对摄像机分别标定,得到 R_l, T_l 与 R_r, T_r , 则双摄像机的相对几何位置就可以由该式计算。因此,本文使用同一标定模板对两个摄像机同时进行标定,以分别获取两个摄像机的内外参数,从而不仅可以标定出两摄像机的内部参数,还可以同时标定出双目立体视觉系统的结构参数。其基本方法为:

- (1) 打印一张模板(9×10圆阵列,圆直径20mm,间隔10mm)并贴在一个平板上;
- (2) 两摄像机从不同角度拍摄若干张(大于或等于3张)模板图像,本文拍摄7张;
- (3) 检测每幅图像中的目标点(圆心);
- (4) 求出模板平面与其图像平面之间单应性矩阵 H ;
- (5) 在令畸变系数为0的前提下,利用求出的矩阵 H 计算摄像机的内参数和外参数;
- (6) 以(5)中内外参数为初始值,令畸变系数初始值为0,应用Levenberg-Marquardt算法进行非线性最小优化,从而得

作者简介: 刘金颂(1981-),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为智能测控技术;原思聪(1955-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为现代设计理论与方法、计算机辅助技术;张庆阳(1981-),男,硕士研究生;刘道华(1974-),男,博士研究生。

收稿日期: 2007-06-18 **修回日期:** 2007-09-05

到一组精度更高的摄像机内参数值,同时计算出各项畸变系数。

(7)利用标定出的左右摄像机参数计算双目立体视觉系统的结构参数。

3 双目立体视觉系统标定试验

3.1 双目立体视觉系统标定的 MATLAB 实现

运用 MATLAB7.1 进行编程实现了前述标定算法,制作了一个简单的 GUI,如图 1 所示。按前述标定方法,将标定板放置 7 个不同的位置,两摄像机即得到 7 对标定图像。计算标定板各圆心坐标值(世界坐标),并将其保存为文本文档,放在 MATLAB 工作目录中。通过 MATLAB 编程对所获取的 7 对图像进行平滑滤波降噪、对比度增强等图像预处理后,采用重心法提取图像中的圆心坐标(图像坐标),并将其保存至 MATLAB 工作目录中。

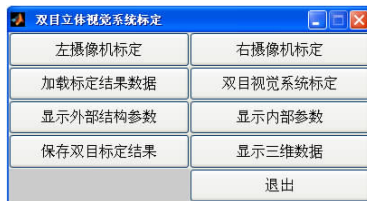


图 1 双目立体视觉系统标定界面

点击图 1 中的“左摄像机标定”按钮,即运行相应的子程序,加载已经保存的 7 组左摄像机标定图像中的圆心坐标文件以及标定模板中对应的世界坐标文件,对左摄像机进行标定。点击“右摄像机标定”按钮,以相同的方法标定右摄像机。并将两摄像机标定结果保存在 MATLAB 工作目录中。左右摄像机标定结果如下:

左摄像机内参数:

$$k_{l1}=-0.104\ 0, k_{l2}=-0.174\ 2$$

$$A_l = \begin{bmatrix} 989.895\ 6 & 0.000\ 0 & 425.799\ 1 \\ 0 & 987.951\ 1 & 248.351\ 9 \\ 0 & 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix}$$

右摄像机内参数:

$$k_{r1}=-0.088\ 9, k_{r2}=-0.101\ 6$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 991.648\ 1 & 0.000\ 0 & 410.851\ 4 \\ 0 & 990.147\ 8 & 299.243\ 3 \\ 0 & 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix}$$

点击图 1 中的“加载标定结果数据”按钮,再点击“双目视觉系统标定”按钮,前面保存的左右摄像机标定结果被加载,并计算双目立体视觉系统结构参数,结果如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.930\ 3 & -0.007\ 5 & 0.366\ 6 \\ 0.022\ 0 & 0.999\ 1 & -0.035\ 5 \\ -0.366\ 0 & 0.041\ 1 & 0.929\ 7 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -159.020\ 4 \\ -4.594\ 2 \\ 26.812\ 1 \end{bmatrix}$$

其中, R 、 T 分别为右摄像机相对于左摄像机的旋转矩阵和平移向量。

点击图 1 中的“显示外部结构参数”按钮,即可以得到双目立体视觉系统的外结构参数的三维显示图形,见图 2。为方便观察,图中是以左摄像机坐标系原点(摄像机光心)为世界坐标系原点来绘制的三维图形。

3.2 几种标定方法的比较

为了说明本文所用方法的有效性,又分别采用了基于平面

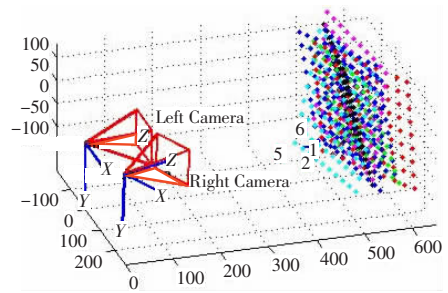


图 2 双目立体视觉系统结构参数三维显示

方格角点的标定方法(方法 1)和基于平面方格形心的标定方法(方法 2),前者能够说明本文以图像基元形心为标定点的有效性,后者能说明本文以圆代替方格进行标定的有效性。方法 1 所采用的标定板为打印有 9×10 方格阵列的标定模板,方格大小 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,间距 10 mm 。通过 MATLAB 编程提取方格的 Harris 角点作为标定点。方法 2 与方法 1 采用相同的标定模板,只是提取的是方格的形心坐标(同样采用重心法)。两种方法都获取 7 对标定图像。

下面以标定左摄像机为例对这两种方法以及本文所采用的方法进行比较。为了进行比较,在结果中加入了不确定度,以 $k_l=[k_1\ k_2]$ 表示径向畸变系数, $f_l=[\alpha_u\ \alpha_v]$ 表示左摄像机在 u 轴和 v 轴上的有效焦距, $O_l=[u_0\ v_0]$ 表示左摄像机图像坐标系原点, γ 表示 u 轴和 v 轴不垂直因子。标定结果的比较见表 1。从表 1 可以看出,本文所采用的标定方法能有效提高摄像机的标定精度。

表 1 3 种标定方法的比较

内部参数	方法 1	方法 2	本文所用方法
$k_l=[k_1\ k_2]$	$[-0.180\ 4\ 0.178\ 7]$ $\pm[0.092\ 0\ 0.715\ 0]$	$[-0.115\ 9\ 0.216\ 9]$ $\pm[0.029\ 6\ 0.249\ 9]$	$[-0.104\ 0\ 0.174\ 2]$ $\pm[0.009\ 6\ 0.050\ 1]$
$f_l=[\alpha_u\ \alpha_v]$	$[990.845\ 8\ 989.677\ 0]$ $\pm[8.844\ 6\ 9.740\ 2]$	$[989.843\ 0\ 988.183\ 6]$ $\pm[3.095\ 1\ 3.330\ 4]$	$[989.895\ 5\ 987.951\ 0]$ $\pm[1.305\ 2\ 1.382\ 5]$
$O_l=[u_0\ v_0]$	$[420.853\ 3\ 248.188\ 8]$ $\pm[9.447\ 0\ 7.749\ 8]$	$[419.106\ 7\ 249.120\ 4]$ $\pm[3.220\ 5\ 2.541\ 1]$	$[425.799\ 1\ 248.351\ 8]$ $\pm[1.744\ 9\ 1.200\ 0]$
γ	$0.000\ 0 \pm 0.000\ 0$	$0.000\ 0 \pm 0.000\ 0$	$0.000\ 0 \pm 0.000\ 0$

4 基于神经网络的双目立体视觉系统标定方法

前面所述的摄像机标定方法需要建立复杂的数学模型,而神经网络可以有效地处理非线性映射问题,避免了求解各项参数的复杂性缺陷。根据透视投影原理,左右图像中同一空间点的图像坐标与世界坐标之间是一一对应的,并存在某种非线性映射关系。由此可以确定利用神经网络进行摄像机标定的思路是:首先将已知物点在左右摄像机图像中的图像坐标作为网络输入,将其世界坐标作为网络输出,进行网络训练;训练收敛后,网络输入与输出之间的映射关系就存储在网络的连接权值和阈值中;得到了这种隐含的映射关系后,一旦知道了空间一点在左右摄像机图像中的坐标,就可以利用训练好的网络求出其三维世界坐标。

4.1 BP 网络结构设计

将物体在左右摄像机图像中的图像坐标作为网络输入,把相应物体的世界坐标作为输出,那么 BP 网络结构就基本上形成了,即网络的输入层神经元个数为 4,输出层神经元个数为 3。采用含有隐层的 3 层 BP 神经网络,通过多次试凑发现,隐层为 8 个节点时网络性能最好。隐层采用正切 S 形函数,即

tansig 函数,其输出范围为[-1, 1],输出层则采用线形函数,即 purelin 函数,使网络输出具有任意大小的值。采用贝叶斯正则化方法的训练性能函数来提高神经网络的推广能力(或称泛化能力)。

采用图 3 所示的标定板,标定板上打印有 8×8 个圆。定义世界坐标系如下:以左下角的圆的圆心为原点,向上与标定板高度方向平行为 y 轴正向,向右与标定板宽度方向平行为 x 轴正向,向后与导轨方向平行的方向为 z 轴正向。将标定板在 z 轴方向移动 10 个位置,两位置间隔为 20 mm。令最前端即与摄像机最近一处的位置 $z_1=0$,则 $z_{10}=180$ mm。这样,10 个位置共提取 640 个标定数据,将它们分为两组,一组用来训练网络,另一组用来校验网络性能。从每个标定平面的左上角第一个标定数据起,取相互间隔的标定数据作为样本数据,这样每个标定平面可取 32 个样本数据,10 个标定平面共取 320 个样本数据。将这 320 个样本数据的左右图像坐标和其对应的世界坐标作为第一组用来训练网络,将剩余的 320 个标定数据的左右图像坐标作为校验数据输入到收敛的 BP 网络里进行仿真,将仿真结果与实际三维世界坐标比较,考察此方法的训练精度。

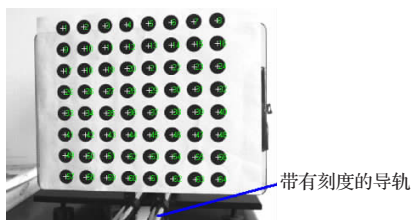


图 3 用于获取训练数据的标定板

4.2 仿真分析

用 Matlab 神经网络工具箱中提供的 newff 函数创建 BP 网络,用 train 函数进行网络训练,用 sim 函数进行仿真。仿真结果与目标结果的对比如图 4 所示,图中‘○’表示目标输出,‘*’表示仿真输出。表 2 给出了仿真出的三维坐标值在 x,y 和 z 三个坐标轴方向上的平均误差、最大误差和均方差。从表中可以看出 z 轴的误差稍大,这主要是由于标定板在 z 轴方向的位置是从导轨上面读出的,受操作者影响较大,故标定结果误差稍大。

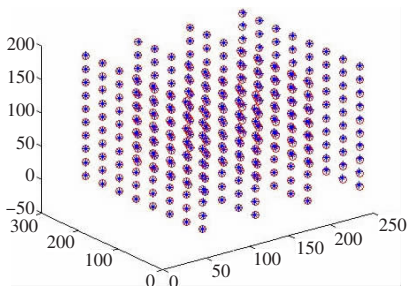


图 4 训练输出值与实际值的比较

表 2 仿真结果误差

坐标轴	平均误差	最大误差	均方差
x	-0.070 356	0.220 087	0.032 635
y	-0.027 014	0.329 667	0.021 900
z	-0.295 553	1.080 476	0.782 334

5 两类标定方法的比较

下面对前面所述的基于圆心的 2D 平面模板的标定方法

(方法 a)和基于 BP 神经网络的标定方法(方法 b)进行比较,由于两种方法计算空间点的世界坐标所设定的世界坐标系不同,故不能用点的世界坐标进行比较,而采用计算线段长度的办法。将标定板放在 $z=0$ mm 到 $z=180$ mm 之间的任一位置处(最好不要用于提取训练样本的位置),如图 5 所示。分别用两种方法来求图中标号为 1、2、3、4、5、6 的 6 个圆的圆心之间的连线 l_1 至 l_6 的长度,分别与实际值进行比较,以此来检测两种标定方法的标定效果。

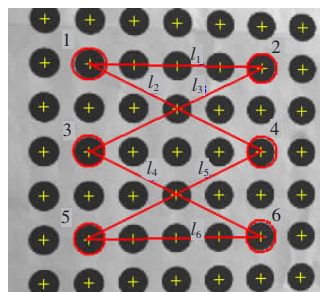


图 5 要计算的 6 条线段

表 3 为分别用两种方法计算出来的 6 条线段的长度,由此表可以看出,所论述的基于 BP 神经网络的标定方法的标定结果优于前面所述的基于圆心的 2D 平面模板的标定方法,这说明基于 BP 神经网络的标定方法可以获得较高的标定精度,而且不需要预先建立双目立体视觉的数学模型,为双目立体视觉系统标定提供了一种新的方法。但是,基于神经网络的标定方法对标定板定位比较严格,其位置测量的准确程度对标定精度的影响较大。

表 3 两类标定方法的比较

线段	实际长度/ mm	方法 a 计算 结果/mm	方法 b 计算 结果/mm	方法 a 误 差/mm	方法 b 误 差/mm
l_1	120	119.821 898	120.047 728	-0.178 102	0.047 728
l_2	134.164 079	134.030 750	134.149 116	-0.133 328	-0.014 962
l_3	134.164 079	134.001 380	134.283 180	-0.162 699	0.119 101
l_4	134.164 079	134.023 601	134.193 111	-0.140 478	0.029 032
l_5	134.164 079	134.012 150	134.260 316	-0.151 928	0.096 237
l_6	120	119.836 087	120.019 801	-0.163 913	0.019 801

6 结论

本文在实验分析基础上提出基于圆心的 2D 平面模板的双目立体视觉系统标定方法,通过与基于平面方格角点的标定方法和基于平面方格形心的标定方法进行对比实验,说明该方法能有效提高摄像机标定精度。鉴于该方法的数学模型计算的复杂性,又讨论了基于神经网络的双目立体视觉标定方法,实验证明该方法不但避过了复杂的数学计算,还能获得较高的标定精度,但样本获取的精确程度直接影响着标定结果的准确性,而且被测物体的放置范围受标定样本数据场范围约束,在实际应用中,应根据具体情况决定采用哪种标定方法。

参考文献:

[1] Zhang Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans on PAMI, 2000, 22(11): 374-376.
 [2] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.