

基于直线射影特征的摄像机参数标定方法

王志良 张 琼 迟健男 史雪飞

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘要 对于精度要求高、成本低或使用广角镜头的系统,在标定摄像机参数时需要校正镜头畸变。通常在摄像机标定算法中,镜头畸变参数的校正和摄像机参数求解都结合在一起,增加了算法的复杂性,并且依赖标定模板。针对以上问题,提出了一种新的标定方法,即不需要标定模板,也不需要确定空间点的精确坐标。首先通过直线的射影不变性校正镜头畸变参数,再根据直线的正交性标定摄像机内参数。仿真实验和真实图像实验结果表明,在直线特征明显的场合,该方法精度高,可靠有效。

关键词 机器视觉,摄像机标定,畸变校正,直线特征

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Camera Calibration Based on Projective Lines

WANG Zhi-liang ZHANG Qiong CHI Jian-nan SHI Xue-fei

(Information Engineering Institute, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract In low cost cameras and wide-angle cameras, lens distortion should be calibrated. In traditional methods, camera's interior parameters and lens distortion are calibrated together. In this work, we presented a method to calibrate distortion and camera's parameters, without any calibration objects and 3D coordinates. Lens distortion was corrected based on the projective invariant of straight lines, orthogonal straight lines were used to calibrate camera's interior parameters. The accuracy and availability of the method were verified on the experimental result of simulation and real data.

Keywords Machine vision, Camera calibration, Distortion calibration, Line

1 引言

在计算机视觉研究中,摄像机标定是一项极其重要的工作,标定的精确度在一定程度上决定了整个系统的精度。在大多数情况下,摄像机的成像系统可简化为理想的小孔模型,但是对于精度要求高、成本低或使用广角镜头的系统,小孔模型不能满足要求,实际成像与理想成像间会出现较大偏差,标定时需要更多地考虑镜头畸变。在摄像机标定中,畸变参数经常与摄像机模型的参数一起估计^[1-3]。在这些方法中,镜头畸变参数的校正和摄像机参数求解都结合在一起,增加了算法的复杂性,而且都需要通过标定物上空间点三维坐标和二维坐标的对应关系来求解参数。文献[2]假定标定模板图像上的直线经透视投影仍然为直线,所以在广角畸变比较大的情况下,校正效果偏差比较大。文献[7]只考虑了径向畸变。本文提出一种新的标定方法,它基于直线的射影不变性,由单幅图像来校正镜头畸变,再根据直线的正交性标定摄像机内参数,不需要精确标定物,因此易于实现且精度较高,可应用于直线特征明显的场合。

2 摄像机成像几何

由摄像机成像原理可知,图像点在图像平面上的位置仅

与摄像机与空间物体的相对方位和摄像机的内部结构有关。摄像机的内部结构是由摄像机的内部参数决定的,其中包括摄像机模型参数和畸变模型参数。可以认为,物点到像点先后经历了两次变换:与摄像机模型相关的射影变换;由镜头畸变引起的相关变换,如图 1 所示。

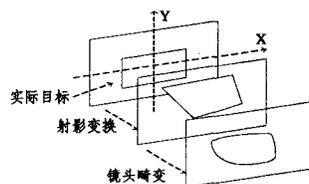


图 1 有镜头畸变的摄像机成像过程

2.1 摄像机成像模型

当不考虑镜头畸变时,摄像机成像模型都采用基本针孔

模型,我们称矩阵 $K = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像机内参数矩阵,

其所有的参数只和摄像机本身有关。其中, (u_0, v_0) 为主点坐标, f_x, f_y 为焦距在 u, v 轴的尺度因子, s 为倾斜因子。

2.2 镜头畸变模型

图像畸变通常包括径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变。

到稿日期:2010-09-03 返修日期:2011-01-05 本文受国家高技术研究发展计划 863 项目(2007AA01Z160),国家自然科学基金项目(60775042)资助。

王志良(1956—),男,教授,主要研究方向为人工心理、机器人、机器视觉, E-mail: wzl@ies.ustb.edu.cn; 张 琼(1979—),女,博士生,主要研究方向为机器视觉、图像处理。

一般来说,薄棱镜畸变影响较小,不予考虑。径向畸变和切向畸变已足够描述非线性畸变。存在径向畸变和切向畸变的畸变模型^[4]可表示为

$$\begin{cases} x = x_d + \bar{x}_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + \dots) + [p_1(r_d^2 + 2\bar{x}_d^2) + 2p_2 \bar{x}_d \bar{y}_d](1 + p_3 r_d^2 + \dots) \\ y = y_d + \bar{y}_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + \dots) + [p_2(r_d^2 + 2\bar{y}_d^2) + 2p_1 \bar{x}_d \bar{y}_d](1 + p_3 r_d^2 + \dots) \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 表示理想情况下的点的图像坐标, (x_d, y_d) 表示存在畸变的图像坐标。 $k_i, p_i (i=1, 2, \dots)$ 分别为径向畸变和切向畸变系数。 (x_c, y_c) 为光学中心的坐标。 \bar{x}_d, \bar{y}_d 和 r_d 分别为像点到畸变中心的水平距离、垂直距离和直线距离; $\bar{x}_d = x_d - x_c, \bar{y}_d = y_d - y_c, r_d^2 = \bar{x}_d^2 + \bar{y}_d^2$ 。实验证明,高次项的畸变可以由畸变中心、图像纵横比等效^[4]。据此式(1)可简化为

$$\begin{cases} x = x_d + \bar{x}_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) + [p_1(r_d^2 + 2\bar{x}_d^2) + 2p_2 \bar{x}_d \bar{y}_d] \\ y = y_d + \bar{y}_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) + [p_2(r_d^2 + 2\bar{y}_d^2) + 2p_1 \bar{x}_d \bar{y}_d] \end{cases} \quad (2)$$

采用式(2)的模型既可以简化计算复杂度,又能满足精度要求。

3 畸变校正和摄像机内参数求解

3.1 直线的不变性

根据射影几何原理可知,如果摄像机镜头无畸变,空间直线在摄像机的作用下仍然是像平面上的直线,直线在摄影变换下交比不变,直线与直线的平行性不变,平行图形的面积比、平行线段的长度比不变。实际中,受镜头畸变的影响,除通过畸变中心的直线外,其它的空间直线 l 成像后总是畸变为曲线 L 。图 2 示出直线的畸变。

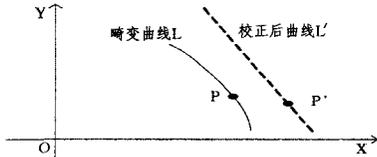


图 2 直线的畸变

设直线 l 的成像曲线为 L , 曲线 L 在畸变模型参数校正的作用下变为曲线 L' , 校正后的曲线 L' 越接近于直线, 说明畸变模型参数越接近于真实值。所以可以用曲线 L' 趋于直线的程度来测量畸变参数接近真实值的程度。设曲线 L 上有 N 个点, 第 i 个点的坐标为 (x_i, y_i) , 在畸变模型的校正下为曲线 L' , 第 i 个点的坐标为 (x'_i, y'_i) 。把 L' 的两个端点用直线相连, 与 L 形成一封闭图形, 图形面积越小, 说明 L 越接近于直线^[5]。

因此畸变的偏移量可表示为

$$\delta'(k_1, k_2, p_1, p_2, x_c, y_c) = \sum_{j=1}^{N_i} (x_j' y'_{j+1} - x'_{j+1} y'_j)^2 \quad (3)$$

式中, $x_{N+1} = x_1, y_{N+1} = y_1$ 。

当图像上有 m 条直线时, 偏移量可表示为

$$\delta(k_1, k_2, p_1, p_2, x_c, y_c) = \sum_{i=1}^m \delta'_i(k_1, k_2, p_1, p_2, x_c, y_c) \quad (4)$$

通过最小化式(4)可求畸变参数。

3.2 正交隐消点

直线上无穷远点的图像称为该直线的隐消点^[6]。两条正交直线的隐消点, 称为一对正交隐消点。对于两条直线 $L_1,$

L_2 , 方向分别为 d_1, d_2 , 由欧氏几何可知它们的夹角为

$$\cos\theta = \frac{d_1^T d_2}{\sqrt{d_1^T d_1} \cdot \sqrt{d_2^T d_2}} \quad (5)$$

令 v_1, v_2 分别为直线 L_1, L_2 的隐消点, 则有 $v_1 = H_\infty d_1, v_2 = H_\infty d_2$, 其中 $H_\infty = R^{-1} K^{-1}$ 为无远单应矩阵。则式(5)可表示为

$$\cos\theta = \frac{v_1^T \omega v_2}{\sqrt{v_1^T \omega v_1} \cdot \sqrt{v_2^T \omega v_2}} \quad (6)$$

式中, $\omega = K^{-T} K^{-1}$ 。

而对于正交隐消点, 有

$$v_2^T \omega v_1 = 0 \quad (7)$$

如已知几组正交直线, 可由式(7)计算出 ω , 通过 Cholesky 分解就可以确定摄像机的焦距。

3.3 校正和标定过程

首先我们假设图像中心为镜头畸变中心, 倾斜因子为 0; 其次选取图像上若干条畸变后的曲线以及曲线上的若干个, 以式(3)为目标函数, 采用 LM 算法优化, 计算畸变参数和图像中心 (x_c, y_c) ; 在校正后的图像上提取图像中两两正交的直线, 计算直线的隐消点, 由式(7)计算 ω , 通过 Cholesky 分解确定摄像机的焦距。

4 实验

4.1 仿真实验

设定摄像机参数 $[f_x, f_y, s, x_c, y_c, k_1, k_2, p_1, p_2]$ 分别为 $[800, 800, 0, 320, 240, 2 \times 10^{-6}, 0, 3 \times 10^{-8}, 0]$ 。绘制一平面网格的仿真图像, 如图 3(a)所示。对于图中每条直线上的点, 根据式(1)求出畸变的像点, 生成畸变图像, 如图 3(b)所示。在图像上加上方差为 σ 的高斯噪声, 得到带噪声的仿真图像, 即图 3(c)。

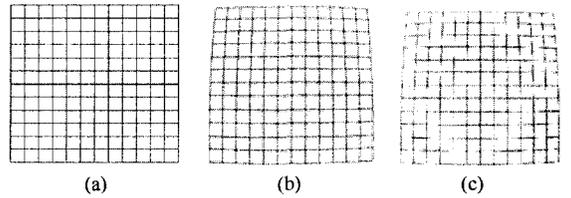


图 3 仿真图像实验

通过优化式(4), 得出校正后的畸变参数。表 1 给出了噪声方差为 0.2 时的系统标定参数以及用文献[7]的方法计算的参数。按校正后的畸变参数计算得到的点位置与理想的点位置进行对比, 可得到残余畸变, 定义为

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}}{m}$$

表 1 噪声方差为 0.2 时的系统标定参数

摄像机参数和畸变参数	设定值	文献[7]算法标定数据	本文算法标定数据
x_c	320	324.33	318.21
y_c	240	242.75	239.54
k_1	2×10^{-6}	2.263×10^{-6}	2.017×10^{-6}
k_2	0	—	0
p_1	3×10^{-8}	—	3.129×10^{-8}
p_2	0	—	0

在不同噪声下, 对比图 3 中的 50 个点, 得到残余畸变, 如图 4 所示。当噪声方差不高于 1 时, 残余畸变都小于 2.5 个像素。可以看出本文方法精确度较高, 且能够有效地校正经

向与切向畸变。

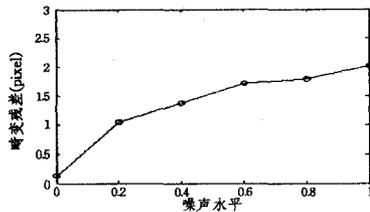


图4 不同噪声水平下畸变残差分布

4.2 实际图像实验

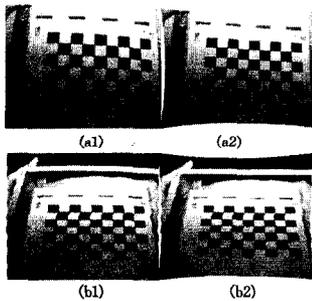


图5 真实图像实验

表2 图5中的图像计算结果

图	f_x	f_y	x_c	y_c	k_1	k_2	p_1	p_2
a	1954	1947	381.7	287.9	1.269×10^{-6}	8.722×10^{-12}	4.315×10^{-8}	8.149×10^{-8}
b	1949	1941	382.3	288.5	1.401×10^{-6}	8.150×10^{-12}	4.029×10^{-8}	8.299×10^{-8}

实际拍摄一棋盘格图像,图像大小为 764×576 ,畸变校正后的图像如图5所示,可以看出镜头畸变得到了很好的校

正。表2为校正后的结果,可以看出标定及校正结果是合理、准确的。

结束语 基于射影几何原理,针对直线的变换特点,提出一种镜头校正并标定摄像机内参数的方法。利用直线的投影不变性计算镜头畸变参数,再通过直线的正交性标定摄像机的内参数。从实验结果可以看出,本文方法精度较高,计算量小,适用于直线特征明显的场合。实际测量中,选取多幅图像的多条直线联合校正,比单幅图像精度更高。

参考文献

- [1] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off the shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987,3(4):323-344
- [2] Zhang Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22 (11):1330-1334
- [3] Weng J Y, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10):965-980
- [4] 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998:60
- [5] 张靖,朱大勇,等. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. 光学学报,2008,28(8):1552-1557
- [6] 吴朝福. 计算机视觉中的计算方法[M]. 北京:科学出版社,2008:79
- [7] 傅丹,周剑,等. 基于直线的几何不变性标定摄像机参数[J]. 中国图形图像学报,2009,14(6):1058-1063
- [4] 车万翔,等. 基于改进编辑距离的中文相似句子检索[J]. 高技术通讯,2004(7)
- [5] Ribadas F J, Ferro M V, Ferro J V. Semantic Similarity Between Sentences Through Approximate Tree Matching[C]//IbPRIA. 2005:638-646
- [6] Ilenko B, Cohenw M R, et al. Adaptive Name Matching in Information Integration [J]. IEEE Intelligent Systems, 2003,18(5):16-23
- [7] 晋耀红,等. 基于语境框架的文本相似度计算[J]. 算机工程与应用,2004(16)
- [8] 潘谦红,史忠植,等. 基于属性论的文本相似度计算[J]. 计算机学报,1999,22(6)
- [9] Chatterjee N. A statistical Approach for Similarity Measurement Between Sentences for EBMT [C]//Proceedings of Symposium on Translation Support Systems(STRANS). 2001
- [10] Polecova G. Semantic Similarity in Content-based Filtering[C]//Proceedings of the 6th East European Conference on Advances in Databases and Information Systems. London, UK: Springer-Verlag, 2002:80-85
- [11] Engquist W E B. Multiscale modeling and computation[J]. Notice Amer. Math. Soc., 2003,50:1062-1070
- [12] 余刚,裴仰军,朱征宇. 基于词汇语义计算的文本相似度研究[J]. 计算机工程与设计,2006,27(2):241-244
- [13] 王忠林,尹宝林. 基于同构的语义距离算法[J]. 山东师范大学学报:自然科学版,2008,23(3):50-53
- [14] 王忠林,赵启阳,尹宝林. 基于确定信息的直接语法分析[J]. 中北大学学报:自然科学版,2008,29(2):131-135

参考文献

- [1] 秦兵,刘挺,王洋,等. 基于常问问题集的中文问答系统的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(10):1179-1182
- [2] 穗志方,俞士汶. 基于骨架依存树的语句相似度计算模型[C]//中文信息处理国际会议(ICCI'98). 1998
- [3] 李彬,等. 基于语义依存的汉语句子相似度计算[J]. 计算机应用研究,2003(12)

(上接第241页)

注那些句子语义距离比较小的情况,而这些语义距离是通过语法语义分析的算法计算得到,其较高的计算精度保证了系统的精确率方面的性能。总体而言,基于MSA的方法的计算精度要比单纯基于词汇级的计算方法要高。但是由于有很大一部分的语义距离是基于词汇级的计算方法的,因此其总的计算精度要比完全使用基于同构的语义距离计算方法的计算精度要低。在时间效率方面,基于词汇级的语义距离算法在进行了词法分析后即计算语义距离,计算过程比较简单,效率比较高。IBSD方法要经过词法分析、语法分析、语义分析、语义距离计算等多个过程,计算最复杂,因此其实现效率最低,MSA方法会对所有的句子进行词法分析,并利用词汇级的算法计算语义距离,然后只对部分句子进行语法分析、语义分析、计算IBSD语义距离,其实现比单纯基于词汇级的算法要复杂,效率也低;但比单纯基于语义同构的方法要简单,效率也高。实验证明,本方法具有较高的计算精度和较快的时间效率,将有助于提高相关智能系统的性能,进一步的工作将沿着该方向进行。