

文章编号: 1001-0920(2012)02-0243-04

一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法

陈天飞, 马 孜, 李 鹏, 聂建辉

(大连海事大学 自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 设计一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法. 该方法利用单参数除式模型校正镜头畸变, 根据直线透视投影保留同素性, 通过拉凡格氏法(LM)优化标定出畸变模型系数和摄像机主点坐标, 然后校正成像点, 使其满足针孔模型映射关系. 根据内参数的两个基本方程, 线性求解剩余参数. 实验表明, 该方法在非量测标定过程具有较好的鲁棒性, 且对比张正友标定方法, 可在单幅标靶图像下进行标定, 避免了模型内外参数耦合在一起, 提高了标定效率.

关键词: 摄像机标定; 除式模型; 畸变校正; 非量测; 单应矩阵

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

A camera calibration method based on non-metric distortion correction

CHEN Tian-fei, MA Zi, LI Peng, NIE Jian-hui

(Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: CHEN Tian-fei, E-mail: chen.tianfei@163.com)

Abstract: A camera calibration method based on non-metric distortion correction is proposed. In this method, single parameter division model is used to correct lens distortion, and based on the same geometric type between straight line and its projection image, the LM(Levenberg Marquardt) scheme is applied to obtain the distortion parameter and the principal point by optimization. Then, the actual image point is corrected in order to satisfy the pinhole camera model. Based on the two basic constraint equations about camera intrinsic parameters, the remaining camera parameters can be solved linearly. Experimental results show that this method has better robustness in the non-metric distortion correction process. And by the comparison with Zhang's method, camera can be calibrated by using only single image, which avoids the coupling between intrinsic and extrinsic camera parameters, and the efficiency of calibration is improved.

Key words: camera calibration; division model; distortion correction; non-metric; homography matrix

1 引 言

摄像机标定是三维视觉检测领域中的基本问题. 作为检测系统中信息获取单元的摄像机, 其参数标定的精度将直接影响到测量结果, 因而是视觉测量中的关键和前提. 对高精度视觉检测系统而言, 采用针孔摄像机模型描述是不充分的, 通常还需考虑镜头的畸变模型.

传统摄像机标定方法^[1-3]是将镜头畸变参量与摄像机模型的其他参量一起估计, 其具代表性的方法包括 Tsai 的两步法^[2]以及张正友基于平面标靶的标定方法^[3]. Tsai 等人首先利用径向约束求解出摄像机外部参数, 然后基于针孔模型的假设获取算法迭代初值, 经非线性优化搜索得到摄像机参数的解. 该方法操作

繁琐并且无法精确得到摄像机主点坐标. 张正友的方法介于 Tsai 方法和自标定方法^[4]之间, 同样先基于针孔模型的假设, 由采集到的多幅标靶图像求出模型参数的迭代初值, 最后采用非线性优化搜索的方法使得重投影误差最小, 进而精确得到摄像机参数的解.

相比较而言, 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法则充分利用了射影几何不变性或不变量, 避免了在优化搜索过程中畸变系数与摄像机的内外参数耦合在一起的可能^[5]. 在镜头非量测标定方面, 张广军等人^[6]提出了基于交比不变原理的畸变系数标定方法. 陈茹雯等人^[7]采用自回归序列进行校正. 周富强等人^[8]提出了共线点的畸变校正方法, 并在文献 [9] 中, 建立了摄像机的畸变分离模型, 利用非量测的

收稿日期: 2010-09-21; 修回日期: 2010-11-29.

基金项目: 国家科技重大专项基金项目(2009ZX04001-021).

作者简介: 陈天飞(1986-), 男, 博士生, 从事计算机视觉、视觉检测等研究; 马孜(1955-), 女, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制等研究.

方法完成摄像机标定. 但以上方法在非量测标定过程中并未考虑主点坐标, 直接将像平面的几何中心作为主点处理. 然而由于装配等原因, 主点坐标和像平面的几何中心往往存在差异, 而畸变主要成分的径向畸变往往是以主点坐标呈中心对称的, 像点越远离主点坐标, 畸变程度越大, 所以在非量测校正过程中不能忽略主点的影响. 张靖等人^[10]考虑了主点的影响, 通过遗传算法得到畸变参量和主点坐标, 但算法实现繁琐, 计算量较大.

本文采用单参数除式模型^[11]校正镜头畸变, 通过 LM 非线性优化方法对平面靶标上共线特征点的实际成像点拟合圆, 标定出畸变系数以及主点坐标; 然后对实际像点进行畸变校正, 根据内参数基本约束方程完成余下摄像机参数的标定工作.

2 摄像机模型

摄像机模型决定了场景点与图像像点位置之间的映射关系, 通常以线性针孔模型为基础.

2.1 针孔模型

针孔模型如图 1 所描述, 图中 $O_w-x_wy_wz_w$ 为世界坐标系, $O_c-x_cy_cz_c$ 为摄像机坐标系, O_f-uv 为像平面坐标系, P 为空间中的一点. O_cZ_c 为摄像机光轴, 与像平面垂直相交于点 O , O 即为摄像机的主点坐标. 设点 P 的世界坐标为 $(x_w, y_w, z_w)^T$, 其像点 m 在像平面坐标为 $(u, v)^T$, 所对应的齐次坐标分别为 $\tilde{P} = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$, $\tilde{m} = (u, v, 1)^T$, 则针孔模型可表示为如下一般形式:

$$\tilde{m} = K \cdot (R \ T) \cdot \tilde{P}, \quad (1)$$

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中: K 为摄像机内参数矩阵, f_x 和 f_y 分别为摄像机在 u 轴和 v 轴方向上的尺度因子, (u_0, v_0) 为主点在像平面坐标系下的坐标. 点 P 通过旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 从世界坐标系转换到摄像机坐标系下.

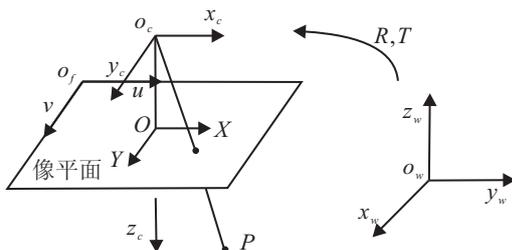


图 1 针孔摄像机模型

2.2 畸变模型

因镜头存在光学畸变, 针孔模型不能准确描述实际映射关系, 需在其基础上加以考虑畸变模型, 通常

只考虑一阶径向畸变即可满足系统测量精度要求^[11]. 相对于多项式校正模型^[12], Fitzgibbon^[11]提出的除式模型能够使用较少参数校正较大镜头的畸变, 其形式如下:

$$r_u = \frac{r_d}{1 + \lambda_1 r_d^2 + \lambda_2 r_d^4 + \dots}. \quad (2)$$

使用单参数除式模型, 可得具体校正模型如下:

$$\begin{cases} x'_u = \frac{x'_d}{1 + \lambda r_d^2}, \\ y'_u = \frac{y'_d}{1 + \lambda r_d^2}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_d^2 = x'_d{}^2 + y'_d{}^2$, (x'_u, y'_u) 和 (x'_d, y'_d) 分别为经过主点中心平移后的无畸变像点和实际像点, λ 为畸变模型系数.

3 非量测摄像机标定

非量测摄像机标定方法可分两个步骤进行, 首先, 利用非量测的手段对畸变模型进行标定; 然后对实际成像点校正, 使得校正后的像点与物点间满足针孔模型的映射关系, 便可线性求解出余下摄像机参数.

3.1 畸变模型参数标定

根据透视投影变换保持几何元素的同素性, 空间直线在像平面成像也应为直线. $y = kx + b$ 定义为像平面内的直线方程, 将式 (3) 代入直线方程, 可得

$$\frac{y'_d}{1 + \lambda r_d^2} = k \frac{x'_d}{1 + \lambda r_d^2} + b. \quad (4)$$

一般选定像平面的左上角为像平面坐标原点, (x'_d, y'_d) 为经主点平移后的坐标. 设 (x_d, y_d) 为实际成像点的像素坐标, 则有如下变换:

$$\begin{cases} x'_d = x_d - u_0, \\ y'_d = y_d - v_0. \end{cases} \quad (5)$$

将式 (5) 代入 (4), 整理可得

$$x_d^2 + y_d^2 + \left(\frac{k}{b\lambda} - 2u_0\right)x_d + \left(-\frac{1}{b\lambda} - 2v_0\right)y_d + u_0^2 + v_0^2 - \frac{k}{b\lambda}u_0 + \frac{1}{b\lambda}v_0 + \frac{1}{\lambda} = 0. \quad (6)$$

对式 (6) 中参数作如下定义:

$$\begin{cases} A = \frac{k}{b\lambda} - 2u_0, \\ B = -\frac{1}{b\lambda} - 2v_0, \\ C = u_0^2 + v_0^2 - \frac{k}{b\lambda}u_0 + \frac{1}{b\lambda}v_0 + \frac{1}{\lambda}, \end{cases} \quad (7)$$

则可认为式 (6) 为圆的一般表达式, 即

$$x_d^2 + y_d^2 + Ax_d + By_d + C = 0, \quad (8)$$

并根据式 (7), 参数 A, B, C 还满足如下等式关系:

$$u_0^2 + v_0^2 + Au_0 + Bv_0 + C - 1/\lambda = 0. \quad (9)$$

整理式 (8), 圆参数 A, B, C 可利用最小二乘法 (LS) 求解. 而在实际像点提取过程中难免会有噪声影响, 为此 Chernov^[13] 定义了一种新的圆弧拟合方法, 利用 LM 进行非线性优化求解.

至少提取3组参数 $(A_i, B_i, C_i), i = 1, 2, 3$, 根据式(9)关于主点的等式约束, 便可得到以下方程:

$$\begin{cases} (A_1 - A_2)u_0 + (B_1 - B_2)v_0 + (C_1 - C_2) = 0, \\ (A_1 - A_3)u_0 + (B_1 - B_3)v_0 + (C_1 - C_3) = 0, \\ (A_2 - A_3)u_0 + (B_2 - B_3)v_0 + (C_2 - C_3) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

对式(10)求解得到摄像机主点坐标, 代入式(9), 得到畸变模型的系数 λ , 即

$$\frac{1}{\lambda} = u_0^2 + v_0^2 + Au_0 + Bv_0 + C. \quad (11)$$

3.2 针孔模型参数标定

采用2D平面标靶, 平面标靶上特征点和校正后像点间的单应矩阵为 H , 其详细求解过程可参照文献[3]. 定义 $H = [h_1, h_2, h_3]$, 则有

$$\begin{cases} h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0, \\ h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2. \end{cases} \quad (12)$$

式(12)即为关于摄像机内参数的两个基本约束方程^[3]. 因 (u_0, v_0) 在上一小节中已求出, 对式(12)整理便可确定余下摄像机内参数 f_x, f_y , 进而可完成所有摄像机参数的标定.

令 $h_1 = [h_{11}, h_{12}, h_{13}]^T, h_2 = [h_{21}, h_{22}, h_{23}]^T$, 定义如下变量:

$$\begin{cases} M = h_{21}h_{11} - h_{21}h_{13}u_0 - h_{23}h_{11}u_0 + h_{23}h_{13}u_0^2, \\ M = h_{22}h_{12} - h_{22}h_{13}v_0 - h_{23}h_{12}v_0 + h_{23}h_{13}v_0^2, \\ T = h_{13}h_{23}, \\ P = h_{23}h_{21}u_0 - h_{23}^2u_0^2 - h_{13}h_{11}u_0 + h_{13}^2u_0^2 - \\ \quad h_{11}h_{13}u_0 - h_{21}^2 + h_{21}h_{23}u_0 + h_{11}^2, \\ Q = h_{12}^2 - h_{12}h_{13}v_0 - h_{22}^2 + h_{22}h_{23}v_0 - \\ \quad h_{12}h_{13}v_0 + h_{13}^2v_0^2 + h_{23}h_{22}v_0 - h_{23}^2v_0^2, \\ S = -h_{23}^2 + h_{13}^2. \end{cases}$$

则有

$$\begin{cases} f_x = \sqrt{\frac{MQ - NP}{NS - TQ}}, \\ f_y = \sqrt{\frac{NP - MQ}{MS - TP}}. \end{cases}$$

至此, 摄像机模型中所有参数标定完毕.

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验

为验证最小二乘(LS)方法和LM非线性优化方法在圆弧拟合时的噪声抑制能力, 在像面内随机生成任意方向和位置的8条直线, 然后对直线上的特征点加以不同程度的高斯噪声, 随机运行100次, 得其仿真结果如图2所示. 其中已知模型的畸变系数 $\lambda = -1.0 \times 10^{-6}$, 主点坐标为 $(320, 240)$.

从图2中可看出, 在固定畸变系数下, 采用最小

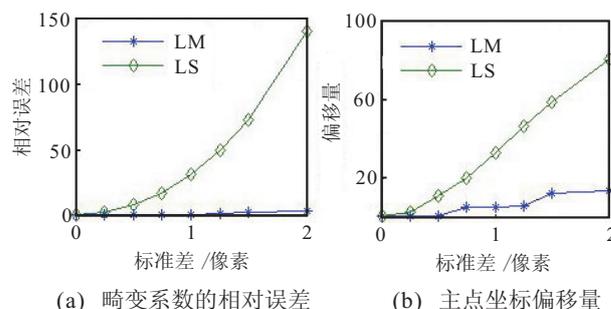


图2 畸变系数和主点坐标在不同程度噪声下鲁棒性估计

二乘方法得到畸变系数相对误差和主点坐标的偏移量将随噪声水平的增大显著增大, 而非线性优化方法得到的结果随噪声的增大而略有增加.

在固定噪声水平、不同畸变系数下, 运行100次, 得到仿真结果如图3所示. 从图3中可以看出, 在最小二乘方法下, 当畸变系数越靠近零, 相对误差增幅越大. 相比之下, 非线性优化方法的效果显著优于最小二乘方法.

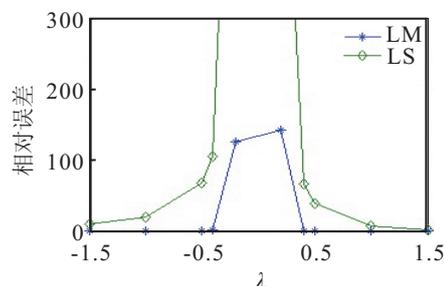


图3 相同噪声下不同畸变系数的鲁棒性估计

4.2 真实实验

采用定焦距摄像机分别在两不同角度真实拍摄同一棋盘标靶, 得到的图像定义为标靶图像1和标靶图像2. 图像像素大小为 640×480 . 采用本文非量测摄像机标定方法和张正友方法分别进行标定, 标定过程使用 Matlab 编程实现.

图4和图5为利用本文非量测方法对标靶图像1和标靶图像2进行非量测校正的结果. 图中圆点为实际成像点, 十字为校正后的图像点. 表1为张正友标定方法的标定结果, 从结果中可看出, 张正友标定方法至少需要2幅标靶图像, 重投影误差RMS可达到0.08个像素, 但该算法最后不可避免地将畸变参数

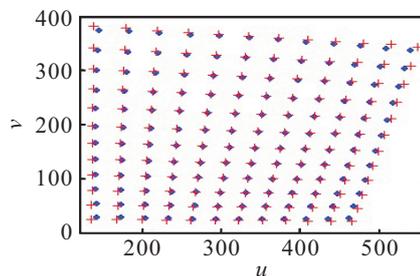


图4 标靶图像1的实际采样点和校正点

表1 张正友方法摄像机标定结果

标靶图像	尺度因子 (f_x, f_y)	主点坐标 (u_0, v_0)	畸变系数	RMS (pixels)	运行时间/s
1 & 2	(653.208 0, 654.078 8)	(303.489 8, 240.500 1)	-0.230 4	0.084 2	9.504 442

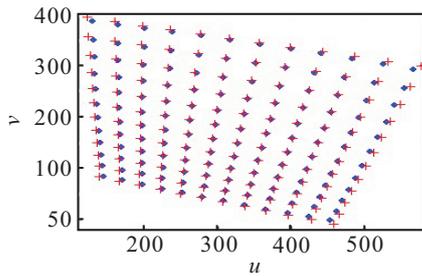


图5 标靶图像2的实际采样点和校正点

和摄像机其余参数一起进行多维参数的非线性优化搜索, 易使得畸变参数和摄像机参数耦合在一起, 导致畸变参数估计错误, 并且耗费时间, 降低了标定效率。

表2为采用本文非量测摄像机标定方法的实验结果。通过对比可以看出, 基于非量测校正的摄像机标定方法可在单幅图像下完成所有摄像机参数的标定工作, 且标定精度和张正友方法的结果相当, 重投影误差RMS均达到了0.08个像素。除此之外, 该方法避免了畸变参数和摄像机内外参数耦合在一起的可能, 只是在畸变参数标定时利用LM方法进行了三维参数的非线性优化求解, 标定效率显著提高。

表2 非量测摄像机标定结果

摄像机参数	标靶图像1	标靶图像2	标靶图像1&2
f_x	653.475 0	653.268 0	655.744 9
f_y	653.826 3	653.768 4	656.819 2
u_0	303.286 1	307.750 2	305.467 7
v_0	240.944 6	239.912 4	240.100 3
$\lambda \times 10^{-7}$	-5.974 3	-6.009 7	-5.935 9
RMS(pixels)	0.087 8	0.087 2	0.087 5
运行时间/s	1.239 94	1.177 35	1.828 69

5 结 论

本文根据直线经透视投影变换保持同素性原理, 设计出了一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法。该方法利用单参数除式模型校正镜头畸变, 通过LM非线性优化的方法完成对小段圆弧的拟合, 能够较准确估计出畸变模型系数和主点坐标; 然后对实际像点进行校正, 线性求解出其余摄像机模型参数。该方法避免了畸变参数和摄像机内外参数耦合在一起的可能, 且仅需单幅标靶图像便可完成摄像机标定工作, 标定精度与张正友方法相当, 简化了标定过程, 执行效率显著提高。

参考文献(References)

[1] Weng J, Cohen, Herniou M. Camera calibration with

distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.

[2] 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 J of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.

[3] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 11(22): 1330-1334.

[4] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 110-124.

(Meng X Q, Hu Z Y. Recent progress in camera self-calibration[J]. Acta Automation Sinica, 2003, 29(1): 110-124.)

[5] Ahmed M T, Farag A. Nonmetric calibration of camera lens distortion: different methods and robust estimation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(8): 1215-1230.

[6] Zhang G J, He J, Yang X. Calibrating camera radial distortion with cross-ratio invariability[J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35(6): 457-461.

[7] 陈茹雯, 黄仁, 张志胜, 等. 基于数学模型的视觉测量系统图像畸变校正方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 243-248.

(Chen R W, Huang R. Distortion correction method based on mathematic model in machine vision measurement system[J]. Chinese J of mechanical Engineering, 2009, 45(7): 243-248.)

[8] 周富强, 胡坤, 张广军. 基于共线特征点的摄像机镜头畸变校正[J]. 机械工程学报, 2006, 9(42): 174-177.

(Zhou F Q, Hu K, Zhang G J. Correction distortion of camera lens with collinear points[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2006, 9(42): 174-177.)

[9] 周富强, 蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 228-232.

(Zhou F Q, Cai F H. Camera calibration method based on non-metric distortion correction[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 228-232.)

[10] 张靖, 朱大勇, 张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. 光学学报, 2008, 8(28): 1552-1557.

(Zhang J, Zhu D Y, Zhang Z Y. Non-metric calibration of camera lens distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 8(28): 1552-1557.)

(下转第251页)