

移动机器人立体视觉高精度标定技术

侯建¹, 鄂旭¹, 夏齐², 齐乃明²

(1. 渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州 121013;

2. 哈尔滨工业大学 航天工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 摄像机标定是移动机器人立体视觉的一个关键步骤, 标定精度直接影响到障碍检测和路径规划的精度。在前人研究的基础上, 提出了一种迭代方式的摄像机标定算法。算法将摄像机参数分为畸变参数和非畸变参数两类, 每次迭代中固定一类参数来求解另一类参数, 最终得到优化解。通过合理组织参数求解次序, 迭代的每一步都可以通过最小二乘法得到闭式解, 从而简化了计算。算法可以方便地进行扩展以包含不同类型的畸变参数, 而不会增加算法的复杂度。实验结果表明此算法可以有效提高标定精度, 可用于移动机器人的视觉系统。

关键词: 摄像机标定; 最小二乘法; 闭式解

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)02-0092-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.02.022

A High-accuracy Calibration Technique of Stereo Vision for Mobile Robot

HOU Jian¹, E Xu¹, XIA Qi², QI Nai-ming²

(1. School of Information Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Department of Astronautic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Camera calibration is a key step in stereo vision for mobile robot, the calibration accuracy affects directly the precision of barrier detection and path planning. A camera calibration technique of iterative manner is presented on the basis of previous research. The camera parameters are divided into two categories, distortion and non-distortion parameters, fixed one type parameters in each iteration to solve the other parameters, obtaining the final optimal. Through the reasonable organization of the parameters order solving, every step of the iteration can acquire closed-form solution by least square method, which simplifies the calculation. The algorithm can be easily extended to include different types of distortion parameters, without increasing the complexity of the algorithm. Experiments validate the effectiveness of this technique in improving calibration precision.

Key words: camera calibration; least square method; closed-form solution

0 引言

摄像机标定是移动机器人立体视觉系统进行障碍检测和路径规划任务的一个关键步骤。移动机器人出于视场方面的考虑, 一般采用广角镜头, 这时镜头的畸变一般是不可以忽略的。在考虑镜头畸变的标定方法中, Tsai 的两步法^[1]是一种经典标定技术, 它在考虑镜头畸变的同时简化了计算过程, 使得大部分参数的求解不需要进行非线性优化。高立志等^[2]在 Tsai 两步法的基础上通过改变镜头畸变模型, 给出了一种完全

线性的标定方法。两步法只考虑了一阶径向畸变, 但在实际移动机器人应用中被证明可以得到较为满意的结果^[3-4]。Weng^[5]进一步将切向畸变考虑进去, 将全部摄像机参数分为畸变和非畸变两类, 迭代过程中分别固定一类参数来求解另一类参数, 实验结果证明可以进一步提高标定精度。其他的基于移动机器人的摄像机标定算法研究还包括文献[6-9]。

Weng 的方法在非畸变参数求解过程中仍然用到非线性优化, 文中在前人工作的基础上, 通过合理组织

收稿日期: 2013-04-29

修回日期: 2013-08-04

网络出版时间: 2013-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61171189); 博士后基金项目(2012M520158); 辽宁省教育科学研究一般项目(L2012400, L2012396, L2012397); 辽宁省百千万人才资助项目(2012921058)

作者简介: 侯建(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为计算机视觉与模式识别。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20131129.0912.029.html>

参数求解次序,给出了一种无需非线性优化步骤的摄像机标定方法,方法可以方便地进行扩展,以便根据不同用途考虑不同数量的畸变参数,实验结果证明了文中方法的有效性。

1 摄像机模型

采用针孔模型,摄像机成像过程表示如下:

(1) 从世界坐标 (x_w, y_w, z_w) 到摄像机坐标 (x_c, y_c, z_c)

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 从摄像机坐标 (x_c, y_c, z_c) 到理想图像坐标 (x_u, y_u)

$$x_u = fx_c / z_c \quad (2)$$

$$y_u = fy_c / z_c$$

(3) 从理想图像坐标 (x_u, y_u) 到实际图像坐标 (x_d, y_d)

$$x_d = x_u - \delta_x \quad (3)$$

$$y_d = y_u - \delta_y$$

(4) 从实际图像坐标 (x_d, y_d) 到像素坐标 (u, v)

$$u = s_x d_x^{-1} x_d + u_0 \quad (4)$$

$$v = d_y^{-1} y_d + v_0$$

上面的转换过程中涉及的参数如下:

(1) r_1, r_2, \dots, r_9 和 t_x, t_y, t_z , 两组参数分别为旋转和平移矩阵元素,称为摄像机的外部参数;

(2) f, s_x, u_0, v_0 为摄像机内部参数,其中 f 为有效焦距, s_x 为 x 方向(扫描方向)尺度因子, (u_0, v_0) 为光轴与像平面交点的像素坐标,一般称为图像中心;

(3) d_x 和 d_y 分别是像素行和列方向上的相邻像素的等效间距,可以由感光阵列参数和图像行列数计算;

(4) δ_x 和 δ_y 分别为 x 和 y 方向上的畸变量。只考虑一阶径向畸变时表示如下

$$\delta_x = k_1 \cdot x_d (x_d^2 + y_d^2) \quad (5)$$

$$\delta_y = k_1 \cdot y_d (x_d^2 + y_d^2)$$

同时考虑径向畸变、薄棱镜畸变和偏心畸变时表示如下

$$\delta_x = k_1 \cdot x_d (x_d^2 + y_d^2) + k_2 \cdot x_d (x_d^2 + y_d^2)^2 + p_1 \cdot (3x_d^2 + y_d^2) + p_2 \cdot 2x_d y_d + s_1 (x_d^2 + y_d^2) \quad (6)$$

$$\delta_y = k_1 \cdot y_d (x_d^2 + y_d^2) + k_2 \cdot y_d (x_d^2 + y_d^2)^2 + p_1 \cdot 2x_d y_d + p_2 \cdot (x_d^2 + 3y_d^2) + s_2 (x_d^2 + y_d^2) \quad (7)$$

其中, k_1 和 k_2 为径向畸变因子; p_1 和 p_2 为偏心畸变因子; s_1 和 s_2 为薄棱镜畸变因子。

2 标定算法

与 Tsai 的两步法类似,在文中方法中图像中心 (u_0, v_0) 需要预先标定,这方面已有很多成熟的方法可以应用^[10-11]。

将需要标定的参数分为畸变参数和非畸变参数两类,其中畸变参数包括 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$, 非畸变参数包括 $r_1, r_2, \dots, r_9, t_x, t_y, t_z, f, s_x$ 。标定步骤如下:

1) 计算非畸变参数的初值;

2) 利用非畸变参数和图像中心计算畸变参数;

3) 利用畸变参数和图像中心计算非畸变参数;

4) 重复2), 3), 直到达到一定次数。一般迭代10次即可获得满意的效果,更多的次数对标定精度的改善很小。

下面给出各步的具体实现过程。

2.1 计算非畸变参数初值

只考虑径向畸变参数 k_1 , 利用文献[1]中的方法求解出 $r_1, r_2, \dots, r_9, t_x, t_y, t_z, s_x$ 的初值。

对于 f 和 t_z , 将畸变模型(3)、(5)修正为如下形式

$$\begin{aligned} x_d &= x_u + \delta_x, \quad \delta_x = x_u k_1' r^2 \\ y_d &= y_u + \delta_y, \quad \delta_y = y_u k_1' r^2, \quad r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \end{aligned} \quad (8)$$

则有

$$x_d f + x_c r^2 f k_1' - x_d t_z = x_d z_c - x_d t_z \quad (9)$$

$$y_d f + y_c r^2 f k_1' - y_d t_z = y_d z_c - y_d t_z$$

令

$$W = z_c - t_z = r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w \quad (10)$$

$$f_k = f k_1' \quad (11)$$

(9)式转换为

$$x_d f + x_c r^2 f_k - x_d t_z = x_d W \quad (12)$$

$$y_d f + y_c r^2 f_k - y_d t_z = y_d W$$

将 f, f_k 和 t_z 作为未知数,这是一个最小二乘问题,利用一组标定点可以方便的求解。

在上面求解 f 和 t_z 时采用的畸变模型(8)不同于(5),因而得到的畸变参数 k_1' 也不同于需要的 k_1 。这里畸变模型的改变不会对文中算法产生影响,因为 k_1' 的值并不是所需要的,它的存在只是用于求解出比采用无畸变模型要准确一些的 f 和 t_z 的初值。实际上,所有的畸变参数都将在下一步得解。

2.2 标定畸变参数

有了所有非畸变参数和图像中心的值,利用(1)和(2)可以计算出一个标定点对应的 (x_u, y_u) , 利用(4)可以计算出一个标定点对应的 (x_d, y_d) , 进而由(3)得到

$$\delta_x = x_u - x_d \quad (13)$$

$$\delta_y = y_u - y_d$$

其中 δ_x 和 δ_y 见(6)和(7)。将 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 作为未知数,对一组标定利用最小二乘法可解除6个畸变参数的值。这一步的求解思路来源于文献[5]。从(13)式可以看出,该方法可以很容易地扩展到包含更多或者更少畸变参数,以适应不同用途的精度要求,而求解的复杂程度并不会发生变化。

2.3 标定非畸变参数

这一步固定畸变参数和图像中心的值来优化求解非畸变参数。由(2)可得

$$x_u y_c - y_u x_c = 0 \quad (14)$$

令 $x_u = s_x^{-1} x'_u$, (14) 转换为

$$x_u' y_c - s_x y_u x_c = 0 \quad (15)$$

将(1)代入(15)可得

$$\begin{bmatrix} y_u x_w \\ y_u y_w \\ y_u z_w \\ y_u \\ -x_u' x_w \\ -x_u' y_w \\ -x_u' z_w \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} T_y^{-1} s_x r_1 \\ T_y^{-1} s_x r_2 \\ T_y^{-1} s_x r_3 \\ T_y^{-1} s_x T_x \\ T_y^{-1} r_4 \\ T_y^{-1} r_5 \\ T_y^{-1} r_6 \end{bmatrix} = x_u' \quad (16)$$

其中 $x_u' = s_x x_d + s_x \delta_x$, $y_u = y_d + \delta_y$, 这里 s_x 使用从上一个非畸变参数求解步骤计算出的当前值。然后可以利用与文献[1]类似的方法求解出优化后的 $r_1, r_2, \dots, r_9, t_x, t_y, s_x$ 的值。

这一步求解非畸变参数的基本思路与 Tsai 利用多平面标定点的两步法的第一步类似,不同之处在于这里的理论依据是(14)而文中是

$$x_d y_c - y_d x_c = 0 \quad (17)$$

(17)式通常被称为径向准直约束(RAC),由(2)、(3)、(5)和(6)可以看出这一约束在只考虑径向畸变才成立。而(14)式直接由(2)式推得,可以将切向畸变包含进去,这使得利用基本相同的步骤求解出更为完整的畸变模型成为可能。

剩下的 f 和 t_z 利用下面两式进行计算

$$x_d f - x_u t_z = x_u H \quad (18)$$

$$y_d f - y_u t_z = y_u H \quad (19)$$

$$H = x_w r_7 + y_w r_8 + z_w r_9 \quad (19)$$

(18)和(19)由(1)和(2)得出,与前面所有步骤一样,由一组标定利用最小二乘法可求解 f 和 t_z 。

3 在移动机器人上的应用

为了准确地标定摄像机,通常需要满足如下要求:

(1) 标定点数量要大。这样可以减小由标定点世界坐标和像素坐标误差对标定精度造成的影响。

(2) 标定点的分布在摄像机视场中占据尽可能大的面积,特别是视场的边缘部分。这是因为越靠近图像边缘的部分畸变量越大,利用靠近图像边缘部分的标定点有助于提高畸变参数的标定精度。

(3) 拍摄的标定点要清晰。这样可以获得较为准确的标定点像素坐标。

如果摄像机的工作距离较小,利用一个相对较小的标定板就可以满足上述三个要求。但是移动机器人视觉系统需要观测较大距离内(如10m)的场景,这时摄像机的有效焦距 f 需要被调整到使场景图像清晰,这样为获得清晰的标定点图像,标定板也需要被放置在距离摄像机较远的地方,这时为满足第二项要求就需要增大标定板的面积,而精度很高面积又很大的标定板存在着制作上的困难。

为解决这个问题,文中采取的方法是调整标定板的位置,使标定点在图像中处于靠近边缘的位置上(如图1)。这在第一步求解非畸变参数初值时会造成一些精度上的损失,但是会在后续的优化步骤中得到弥补。

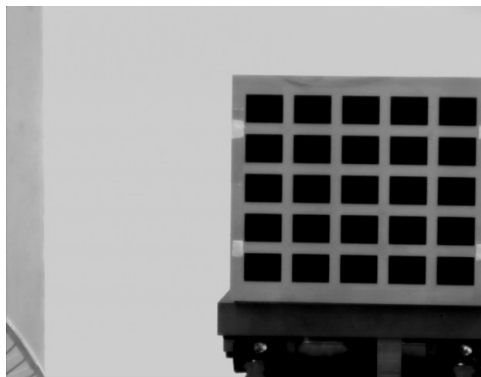


图1 标定点的分布

4 实验结果

标定精度通常可以由利用标定结果得到的三维重建精度来评估,前提是点的匹配结果正确。此外,文献[12]提供了一种立体图对校正方法,利用透视投影矩阵来计算左右图的校正矩阵。由于计算透视投影矩阵需要首先校正图像畸变,而畸变校正过程涉及到畸变参数和 u_0, v_0, s_x , 因此利用这种方法得到的图对校正精度也可以用来评估这几个参数的标定精度。

标定装置如图1所示,平板上包含25个35 mm × 25 mm 的方格,方格的顶点取为标定点,标定点坐标测量精度优于0.02 mm。通过前后移动标定板,可以得到多个平面上的标定点。采用的摄像机为 WAT902H,图像分辨率768×576,镜头焦距6 mm。

Tsai 在两步法中采用一个畸变参数 k_1 , 而 Weng 采用了 k_1, p_1, p_2, s_1, s_2 共5个畸变参数,二者都在标定

板与重建目标板相距很近的情况下验证了各自算法的有效性。考虑到移动机器人视觉系统工作距离范围较大,无论标定板如何放置,都要有一部分场景与标定板距离较大。因此在标定板与目标板距离较大的情况下进行了标定结果的评估实验。目标板是贴在一个金属平面上并且印有黑色方格的纸(如图2),方格顶点取为目标点,目标点坐标测量精度优于0.1 mm。实验中分别采用了不同畸变参数的组合,以考察畸变参数组合对标定精度的影响。表1给出了一次实验中利用标定结果对目标点进行重建的数据,实验中摄像机到标定板的距离是指到标定板未移动时位置的距离,标定板到目标板距离为592.7 mm,基线长度为500 mm。用于和文中方法进行对比的是采用完全线性方法的两步法^[2]。

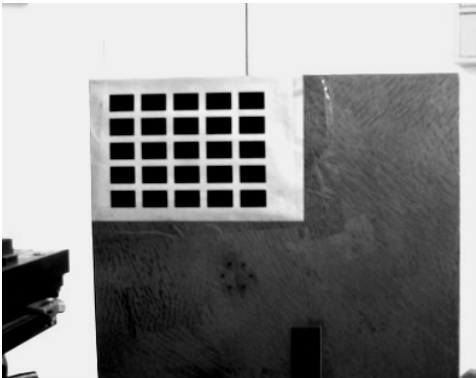


图2 重建目标模板

表1 标定精度对比结果

| 方法 | 畸变参数 | 重建误差 | 重建误差 | 校正误差 | 校正误差 |
|------|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 平均值 /mm | 标准差 /mm | 平均值 /mm | 标准差 /mm |
| 两步法 | k_1 | 5.82 | 1.58 | 0.76 | 0.69 |
| | k_1 | 4.88 | 1.43 | 0.30 | 0.24 |
| 文中方法 | k_1, k_2 | 3.66 | 1.06 | 0.28 | 0.23 |
| | k_1, p_1, p_2, s_1, s_2 | 3.33 | 1.06 | 0.34 | 0.25 |
| | $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ | 3.24 | 0.99 | 0.33 | 0.25 |

从实验结果可以看出：

(1)利用文中方法的四种参数组合得到的标定精度都比两步法的标定精度高,这证明了文中方法的有效性；

(2)同时考虑径向和切向畸变比只考虑径向畸变可以进一步提高标定精度,这和文献[5]中的结论一致；

(3)径向畸变中考虑 k_1 和 k_2 比只考虑 k_1 得到的精度高,特别是在不考虑切向畸变的情况下。

5 结束语

在前人研究的基础上,文中提出了一种可供用于

移动机器人的摄像机高精度标定方法。算法将摄像机参数分为畸变参数和非畸变参数两类,每次固定一类参数优化求解另一类参数,最终得到一组优化后的解。通过合理组织求解次序,求解的每一步都可以通过最小二乘法得到一组闭式解,从而简化了计算。算法可以将切向畸变考虑进去,也可以方便地增加或者减少畸变参数以适应不同用途的需要,而不会增加求解的复杂度。针对在移动机器人上的应用,提出了一种利用较小标定模板达到较高精度的解决方案。实验结果表明即使只考虑径向畸变,文中方法得到的标定精度也优于传统的两步标定方法,而考虑切向畸变可以进一步提高标定精度。

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 lens[J]. IEEE trans on robotics and automation, 1987, 3(4):323-344.

[2] 高立志,方勇,林志航. 立体视觉测量中摄像机标定的新技术[J]. 电子学报,1999,27(2):12-14.

[3] Singh S, Digney B. Autonomous cross-country navigation using stereo vision[R]. [s. l.]:[s. n.],1999.

[4] Murray D, Little J J. Using real-time stereo vision for mobile robot navigation[J]. Autonomous robots, 2000, 8(2):161-171.

[5] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE trans on pattern analysis and machine intelligence, 1992, 14(10):965-980.

[6] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE trans on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.

[7] 晁衍凯,徐昱琳,周勇飞,等. 基于平面模板的机器人双目标定与目标定位[J]. 计算机技术与发展,2013,23(6):27-30.

[8] 吴培良,孔令富,孔亮. 一种普适机器人系统同时定位、标定与建图方法[J]. 自动化学报,2012,38(4):618-631.

[9] 汪首坤,郭俊杰,王军政,等. 基于混合群智能优化的机器人立体视觉标定[J]. 机械工程学报,2012,48(1):57-63.

[10] Lenz R K, Tsai R Y. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine vision metrology[J]. IEEE trans on pattern analysis and machine intelligence, 1988, 10(5):713-720.

[11] 张霞,葛芦生. 图像中心点预标定方法研究与应用[J]. 计算机技术与发展,2007,17(3):44-47.

[12] Fusiello A, Trucco E, Verri A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. Machine vision and applications, 2000, 12(1):16-22.

移动机器人立体视觉高精度标定技术

作者：[侯建](#), [鄂旭](#), [夏齐](#), [齐乃明](#), [HOU Jian](#), [E Xu](#), [XIA Qi](#), [QI Nai-ming](#)

作者单位：[侯建, 鄂旭, HOU Jian, E Xu\(渤海大学 信息科学与技术学院, 辽宁 锦州, 121013\)](#), [夏齐, 齐乃明, XIA Qi, QI Nai-ming\(哈尔滨工业大学 航天工程系, 黑龙江 哈尔滨, 150001\)](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期): 2014(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201402023.aspx