

双目视觉立体标定方法的改进

刘 军^{1,2}, 李 娜^{1*}, 刘 鹏¹

(1. 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉工程大学智能机器人湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205)

摘 要:为了提高双目立体视觉系统中立体标定的精度,提出了一种利用正方形标定域中相互正交方向的消失点进行立体标定的新方法.首先摄像机从不同的方向拍摄平面标定板,在图像平面上确定一个正方形投影区域,再根据射影几何模型中的交比性质,计算出正方形中相互正交方向上的两对消失点;然后利用消失点与光心连线的射影几何性质,线性求解摄像机的全部内外参数;最后利用全局优化方法进行参数的优化.这一方法继承了张正友标定方法畸变模型的使用,实验利用 MATLAB 通过左右摄像机拍摄的两组图像对方法进行验证,实验结果表明,该方法的立体标定精度较高,且旋转矩阵 R 和平移向量 T 均符合实际要求;由于实验中正方形投影区域的大小及具体的位置关系是随机的,使其具有较好的实用性.

关键词:双目视觉;立体标定;消失点;内外参数

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.10.014

0 引 言

摄像机标定是指建立摄像机几何成像模型,描述空间坐标系中的景物点同它在图像平面上的像点之间的对应关系,并求取该模型的各项参数的过程^[1].在双目立体视觉系统中,要精确地从二维图像中获取三维信息,准确地得到三维图像点与相应的图像像素点之间的对应关系,摄像机标定是至关重要的,同时精确求取摄像机的内外参数以及畸变系数不仅可以在三维恢复系统中提高精度,而且可以为后续的校正和特征匹配奠定良好的基础.

随着计算机视觉的发展,国内外学者进行了大量的研究,也相应的提出了不同的摄像机标定方法,摄像机标定方法大体可以分为传统的摄像机标定方法和摄像机自标定方法.传统的摄像机标定方法需要精度很高的标定参照物,即在确定的摄像机模型下,通过拍摄已知尺寸、形状的标定物来进行标定,再经过一系列的数学变换和计算方法来计算其内外参数,典型的张正友平面标定法^[2];而自标定方法是利用摄像机在拍摄过程中周围环境约束与图像位置约束之间的对应关系来求取摄像机模型的内参数,自 1992 年 Hartley^[3]

和 Faugeras^[4]首次提出自标定思想以来,其已经成为了计算机视觉研究的热点问题.

以射影几何为基础,根据其消失点的重要性质,大量学者提出了一系列的摄像机标定方法,如 Liu Ying 等人提出了基于共面消失点的摄像机标定方法^[5-6],该方法要求制作精确定位的点阵模板;吴刚等人也根据射影几何模型的相关性质提出了不同的摄像机标定方法,射影几何中的调和共轭理论高精度的求出消失点,并结合消失点对摄像机内参数的约束,给出了一种基于正方形模板的摄像机内参数求取方法^[7],但该方法并未考虑镜头的畸变以及系数的全局优化问题,影响实际的实验精度.此外,以上方法大都进行的单目标定,而本文在研究了这一系列方法的基础上,提出了一种改进的双目视觉摄像机立体标定方法,根据射影几何模型为基础来建立摄像机的标定模型,利用消失点的重要性质,以正方形投影区域进行角点提取,确定角点坐标,结合张正友标定方法,初步求解出摄像机内参数,通过计算空间中的景物点在左右摄像机成像平面上的位置关系,计算出双目视觉系统中两个摄像机之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T ,从而实现了立体标定,并利用非

收稿日期:2013-08-29

基金项目:湖北省教育厅青年人才项目(Q20111504);武汉工程大学科学研究基金项目(12116021);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX201274)

作者简介:刘 军(1975-),男,湖北武汉人,副教授,博士.研究方向:图像处理、嵌入式系统、信息存储和多媒体加密.

* 通信联系人

线性优化方法对参数进行全局优化。

1 摄像机成像模型

在立体标定时,多采用针孔摄像机模型,根据射影几何中 B 双空间几何模型的相关性质定义了相应的摄像机标定模型,假设在三维欧氏空间中定义坐标系 $F(O_c, X_c, Y_c, Z_c)$ 为摄像机参考坐标系,其中点 O_c 为摄像机的光心,轴 X 与轴 Y 分别与图像平面的横纵轴平行. 用 F 系下的一个齐次向量 $\pi(\pi_x, \pi_y, \pi_z)$ 表示一个平面,对平面有如下定:如果平面没有穿过摄像机光心 O_c ,那么可以用一个三维向量 $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 来表示该平面,并且满足关系 $\langle \omega, X \rangle = 1$, 其中 $X = [X, Y, Z]$, 对平面满足解析表达式:

$$\pi_x X + \pi_y Y + \pi_z Z + \pi_t = 0 \quad (1)$$

$$\text{即 } -\frac{\pi_x}{\pi_t} X - \frac{\pi_y}{\pi_t} Y - \frac{\pi_z}{\pi_t} Z = 1 \quad (\pi_t \neq 0) \quad (2)$$

由此可进一步推导出 ω 与 π 的关系式:

$$\omega = \frac{-1}{\pi_t} [\pi_x, \pi_y, \pi_z] \quad (\pi_t \neq 0) \quad (3)$$

由式(3)知可将欧氏空间中的平面 π 映射到空间中的一个点 ω 与之相对应. 如果记 Ω 为三维欧氏空间,则在欧氏空间中的一个平面必存在任一点 $\omega \in \Omega$, 此时将 Ω 称为 B 双空间. B 双空间几何的定义说明了图像中点、线、面固有的性质,因此,本文以此性质为基础定义了相应的摄像机标定模型.

在图像平面中构造二维坐标系 (O_u, X_u, Y_u) 为图像坐标系,则直线 $O_u O_c$ 为光轴, O_u 即为光轴 $O_u O_c$ 与图像平面的交点,也称之为灭点,其中 (O_u, X_u) 平行于 (O_c, X_c) , (O_u, Y_u) 与 (O_c, Y_c) 平行,根据以上定义则有如图 1 所示的双目视觉成像原理图,在此空间中任取一点 M 的坐标为 $[x_c, y_c, z_c]^T$, 它在图像平面中的投影为 m , 记其坐标 $x = [x_u, y_u]^T$, 则必满足 $x = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix}$, 若又记 $[x_c, y_c, z_c, 1]^T$ 和 $[x_u, y_u, 1]^T$ 分别为三维空间点 M 及其投影点 m 的齐次坐标,则它们之间的投影关系又可表示为

$$\beta \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 [R \quad T] \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中 β 为任意常数, $M_1 = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 即为

摄像机的内参数矩阵,其中 f_u, f_v 分别表示图像平

面 x_u, y_u 方向上的焦距, (u_0, v_0) 是主点坐标, R 和 T 分别表示左右摄像机的旋转矩阵和平移矩阵,本文方法就是求取摄像机的内外参数矩阵.

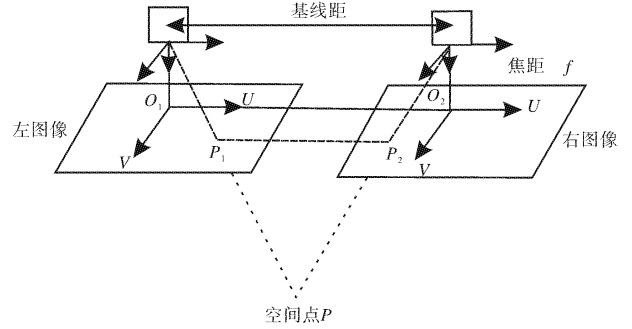


图 1 标定模型图

Fig. 1 Calibration model diagram

根据射影几何的性质^[7-8]:两条平行直线在无穷远处有一个交点,且一条直线上只有一个无穷远点,所有的一组平行线共有一个无穷远点,在本文中称该无穷点在图像平面上的投影点为消失点,并且消失点与摄像机光心的连线与此消失点所在的空间平面平行. 根据此性质与射影几何的交比性质结合,提出一种计算摄像机内参数矩阵的改进方法.

2 改进的摄像机内参数求解算法

由于本文中提出的标定方法是基于正方形区域的参数计算^[7],因此在利用该方法计算摄像机内参数时,需要在图像平面上找到一个正方形投影区域,投影后会相应的更新摄像机图像坐标系和空间坐标系下的角点坐标值. 如图 2 所示,记一个平面上正方形区域的 4 个顶点分别为 A, B, C, D , 各自的投影点分别为: A_1, B_1, C_1, D_1 , 记 $A_1 B_1$ 所在的直线为 α_1 , $B_1 C_1$ 所在的直线为 α_2 , $A_1 D_1$ 所在的直线为 α_3 , $C_1 D_1$ 所在的直线为 α_4 , 对应向量分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$; v_1, v_2, v_3, v_4 分别为直线 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 的消失点.

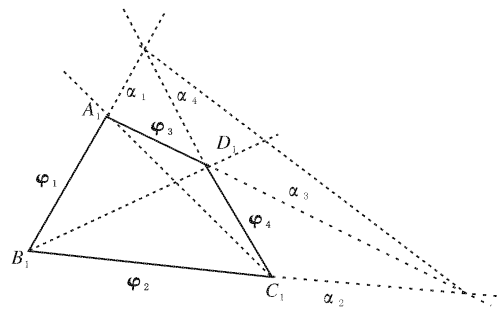


图 2 正方形投影区域中点线的关系

Fig. 2 Square projection

area between the midpoint of the line

由此假设空间中一对正交的平行线, P_1, P_2 为

各自的无穷点, p_1, p_2 为相应的消失点, 则由正方形投影中点线的关系有:

$$\begin{cases} \beta_1 p_1 = N[R \ T]P_1 \\ \beta_2 p_2 = N[R \ T]P_2 \end{cases} \quad (5)$$

又由于光心与 P_1 的连线垂直于光心与 P_2 的连线, 即: $P_1^T P_2 = 0$ 且 $P_1^T P_1 = P_2^T P_2$, 因此结合式(5)有:

$$P_1^T N^{-T} N^{-1} P_2 = 0 \quad (6)$$

且 $P_1^T N^{-T} N^{-1} P_1 = P_2^T N^{-T} N^{-1} P_2$, 由此对本文中的正方形模板区域可得到满足的关系式:

$$\begin{cases} v_1^T N^{-T} N^{-1} v_3 = 0 \\ v_2^T N^{-T} N^{-1} v_4 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

令 $Q = N^{-T} N^{-1}$, 结合式(4) 将其展开后有:

$$Q = N^{-T} N^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{fu^2} & 0 & -\frac{u_0}{f_u^2} \\ 0 & \frac{1}{f_v^2} & -\frac{v_0}{f_v^2} \\ -\frac{u_0}{f_u^2} & -\frac{v_0}{f_v^2} & \frac{v_0^2}{f_v^2} + \frac{u_0^2}{f_u^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由分析可知 Q 是一个包含未知变量的对称矩阵, 因此可以定义向量 $Q = [Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4 \ Q_5 \ Q_6]^T$, 同时设 v_1, v_2, v_3, v_4 的坐标分别为 $(u_{v1}, v_{v1}), (u_{v2}, v_{v2}), (u_{v3}, v_{v3}), (u_{v4}, v_{v4})$, 则联合式(7)、(8)有:

$$\begin{cases} u_{v1} u_{v3} 3Q_1 + (v_{v3} u_{v1} + u_{v3} v_{v1})Q_2 + v_{v1} v_{v3} Q_3 + \\ (u_{v1} + u_{v3})Q_4 + (v_{v3} + v_{v1})Q_5 + Q_6 = 0 \\ u_{v2} u_{v4} Q_1 + (v_{v4} u_{v2} + u_{v2} v_{v4})Q_2 + v_{v2} v_{v4} Q_3 + \\ (u_{v2} + u_{v4})Q_4 + (v_{v2} + v_{v4})Q_5 + Q_6 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

在实验中同时获得了两幅以上的图像, 假设从不同的位置拍摄了 N 幅图像, 则需要建立 N 组类似式(9)的方程: $XQ = 0$, 其中 X 是 $2N \times 6$ 的矩阵, 且由于每一个消失点的坐标可以利用相应的射影几何关系进行计算, 则可以很容易计算出矩阵 X ; 当 $N \geq 3$ 时, 利用最小二乘法可求解向量 Q , 从而得到摄像机的内参数如下:

$$\begin{cases} \lambda = Q_6 - \frac{Q_3^2 + f_u(Q_2 Q_3 - Q_1 Q_5)}{Q_1} = 0 \\ fu = \sqrt{\frac{\lambda}{Q_1}} \\ f_v = \sqrt{\lambda \frac{Q_1}{Q_1 Q_4 - Q_2^2}} \\ v_0 = \frac{Q_2 Q_3 - Q_1 Q_5}{Q_1 Q_4 - Q_2^2} \\ u_0 = \frac{v_0}{f_u} - \frac{Q_3 f_u^2}{\lambda} \end{cases}$$

3 算法的实现

先利用射影几何消失点与交比的性质求出摄像机的内参数, 然后结合张正友标定法与 Brown 方法求解出其他参数, 并利用非线性优化方法对参数进行全局优化计算, 从而得到最终精确的标定参数, 具体完整的标定实现过程如下.

3.1 图像采集及角点提取

采用黑白棋盘格图像为 9×7 的方格图作为标定板, 每个方格的大小为 $27 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$, 固定并在不同的角度拍摄一系列图片, 一般而言, 拍摄的图片数量越多, 其精度就相对较高, 但所需时间也较长, 就此本文中分别对左右摄像机采集了 10 幅图像. 在进行角点提取时, 由于使用传统的角点检测算法在全部图像范围内进行检测, 会存在较大的误差, 降低检测精度; 因此, 本文为了避免这个问题, 选取图像区域为 7×5 的方格作为角点的检测区域, 再在这个区域内采用 harris 算法进行角点检测. 符合本文改进的计算摄像机内参数的求解方法中以正方形投影区域进行计算, 因此在实验中以选取的 7×5 方格区域左上角作为原点, 对每一幅棋盘格图建立角点的空间坐标系, 同时确定每一个提取出的角点图像坐标值.

3.2 计算摄像机内参数及畸变系数

提取出角点后, 利用前面所述的摄像机内参数求解方法进行相应的求解. 由于在标定过程中, 镜头存在畸变等因素会影响标定的精度^[9], 因此在本文中考虑了横向畸变和径向畸变, 利用文献[10]的畸变模型, 将提取出的角点空间坐标和相应的图像坐标进行运算, 利用最小二乘法优化, 从而得到畸变系数. 最后利用 Levenberg-Marquardt 算法对所求解的内外参数进行全局非线性优化, 得到最终的内外参数.

3.3 求解旋转矩阵 R 和平移矩阵 T

对双目摄像头标定不仅要得出每个摄像机的内部参数, 还需要通过标定来测量两个摄像机之间的相对位置(即右摄像头相对于左摄像头的三维平移向量 T 和旋转矩阵 R). 在空间中给定任一点 P , 假设点 P 在世界坐标系、左摄像机 C_1 坐标系和右摄像机 C_2 坐标系下的非齐次坐标分别为 X_w, X_{c1}, X_{c2} , 则三者满足以下关系式:

$$\begin{cases} X_{c1} = R_1 X_w + T_1 \\ X_{c2} = R_2 X_w + T_2 \end{cases} \quad (10)$$

其中 R_1, R_2 分别为左右摄像机与世界坐标系的旋转矩阵, R, T_2 分别为左右摄像机与世界坐标系的平移向量, 这 4 个变量可以通过前述方法进行计

算出来.又由于在左右摄像机坐标系中 X_{c1}, X_{c2} 都表示点 P 的坐标,因此由式(10)可得 X_{c1}, X_{c2} 满足:

$$X_{c1} = R_1 R_2^{-1} X_{c2} + T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2 \quad (11)$$

若令 $R = R_1 R_2^{-1}, T = T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2$, 则左右摄像机之间的旋转矩阵 R 和平移向量 T 就可以通过这样的方式计算出来.

4 实验结果及分析

为了验证算法的有效性,实验中将左右摄像

机各采集的 10 幅图像,分别采用上述标定方法进行立体标定,标定结果如式(11)及表 1 所示.

$$\begin{cases} R = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0.00543 & -0.01631 \\ -0.00543 & 1.0000 & 0.04763 \\ 0.01631 & -0.01954 & 0.9999 \end{bmatrix} \\ T = \begin{bmatrix} -201.30855 \\ 0.06755 \\ -6.42098 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

表 1 本文实验标定结果

Table 1 The calibration results of this experiment

左摄像机标定结果						右摄像机标定结果						
摄像机	$M=\begin{bmatrix} 1754.50776 & 0 & 449.58233 \\ 0 & 1754.35017 & 345.47277 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$						$M=\begin{bmatrix} 1735.91596 & 0 & 563.42735 \\ 0 & 1745.94808 & 376.54735 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$					
内参数												
畸变系数	$K=[-0.06537 \quad 0.22581 \quad 0.00199 \quad -0.00055 \quad 0.00000]$					$K=[-0.21649 \quad 0.61854 \quad 0.00964 \quad -0.00823 \quad 0.00000]$						

结果分析:图 3 是采用本文改进的角点检测方法进行检测的结果,图 4 显示了具体检测到的每个角点,从图 3 及图 4 中可以看出检测出的角点就是在实验所需要全部角点信息,运用本文提供的内参数求解算法可以得到相关参数.由实验结果可以看出,旋转矩阵 R 基本接近单位矩阵,同时结合图 5 显示的左右摄像机与棋盘格标定板的位置关系可以得出左右摄像机的位置基本是前向平行的,另实验中左右摄像机的实际距离是 205 mm,而由实验所得的平移向量 T 中两相机的距离为 201.308 55 mm,两者比较接近;实验结果总体符合实验要求,标定结果达到了一定的精度,但在标定的过程中畸变仍然对结果有些影响,在后续的实验中还需进一步优化,提高实验的精确度.

The red crosses should be close to the image corners

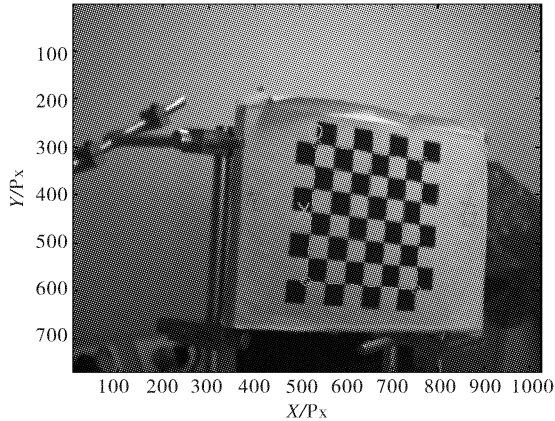


图 3 角点检测结果

Fig. 3 Corner detection results

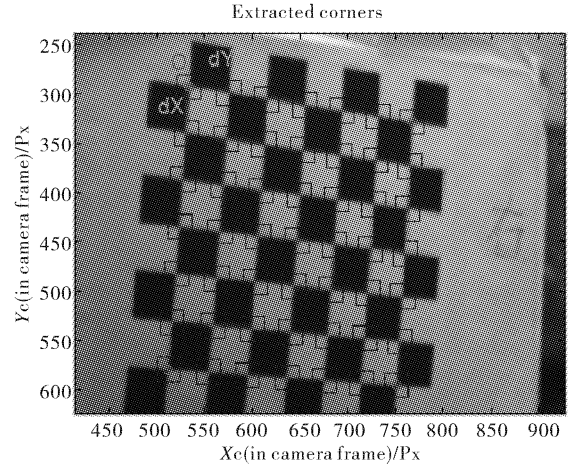


图 4 具体的角点检测细节

Fig. 4 Specific details of corner detection

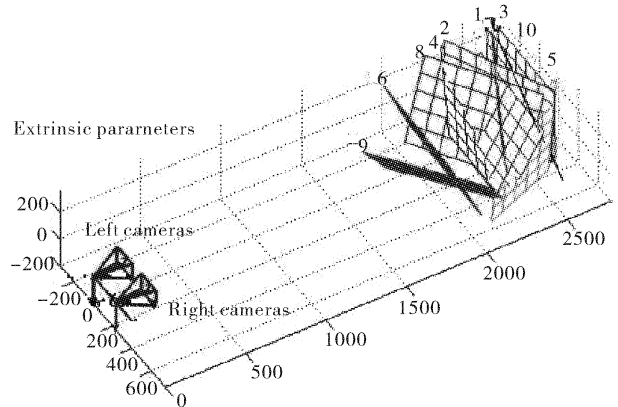


图 5 双摄像头与标定棋盘间的位置关系

Fig. 5 Dual cameras and calibration positional relationship between the board

5 结 语

以射影几何模型为基础,结合消失点的一些重要性质,在进行单目标定的基础上,提出了上述双目摄像机内参数求取新方法,同时在该方法中对角点的提取也做了相应的改进,充分利用了图像的点、线、面固有的性质,结合张正友标定方法的灵活性,使该方法在实验中实现起来简单方便,并能取得较高的精度,为后续进行立体校正与匹配奠定了基础。

致 谢

本研究工作得到了湖北省教育厅青年人才项目、武汉工程大学科学研究基金项目及武汉工程大学研究生教育创新基金项目的资助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 刘俸材,谢明红,王伟. 双目视觉的立体标定方法[J]. 计算机工程与设计,2011,32(4):1508-1522.
LIU Feng-cai, XIE Ming-hong, WANG Wei. Stereo calibration method of binocular vision[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(4): 1508-1522. (in Chinese)
- [2] ZHANG Zheng-you. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[J]. IEEE International Conference on Computer Vision, 1999 (1): 666-673.
- [3] Hartley R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras[C]//Proceedings of the ECCV. NLCS 588, Springer-Verlag, 1992: 579-387.
- [4] Maybank SJ, Faugeras OD. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [5] 张维勇,王 征,翟鸣,等. 基于射影不变量的摄像机自标定方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(11): 1432-1435.
ZHANG Wei-yong, WANG Zheng, ZHAI Ming. A Method of Camera Self-calibration Based on the Projective Invariant [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(11): 1432-1435. (in Chinese)
- [6] LIU Ying. Planar Vanishing Points Based Camera Calibration. Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics [C]//Los Alamitos. IEEE Computer Society, 2004: 460-463.
- [7] 吴刚,唐振民. B 双空间几何中基于消隐点的摄像机标定[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(24): 4-6.
WU Gang, TANG Zhen-min. Camera calibration based on vanishing points in B-dual-space geometry [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(24): 4-6. (in Chinese)
- [8] 雷成,吴福朝,胡占义. Kruppa 方程与摄像机自标定[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 621-630.
LEI Cheng, WU Fu-chao, HU Zhan-yi. Krupp A Equations and Camera Self-calibration [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27 (5): 621-630. (in Chinese)
- [9] 杨明,王海晖,万妮,等. 双目标定系统精度提高的方法[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 29(1): 69-73.
YANG Ming, WANG Hai-hui, WAN Ni, et al. Methods of Accuracy inocular Calibration System [J]. Wuhan Institute of Technology, 2012, 29(1): 69-73. (in Chinese)
- [10] 王建华,冯 帆. 非线性模型下的摄像机标定[J]. 光电子技术, 2012, 32(1): 33-38.
WANG Jin-hua, FENG Fan. Non-linear Model Based Camera Calibration [J]. Optoelectronic Optoelectronic Technology, 2012, 32(1): 33-38. (in Chinese)

Improvement of stereo calibration of binocular vision method

LIU Jun^{1,2}, LI Na¹, LIU Peng¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Hubei Provincial key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: To enhance the precision of stereo calibration, a new method for camera calibration using two pairs of vanishing points of orthogonal directions on testing square was proposed. First, a camera captured the template of the square from different directions; two vanishing points on parallel and diagonal directions on testing square were then determined by using the concept of cross ratio and harmonic conjugate in projective geometry. Second, all the intrinsic and external parameters were calculated linearly based on parallel property of a line of vanishing point connecting optical center. Finally, all the parameters were optimized by using global optimization method. The proposed method inherits the distortion model of Zhang Zhengyou calibration method, and is verified using two groups of images from left and right camera in MATLAB. Experiment results show that the method has high precision, and the rotation matrix R and the translation vector T conform to the actual requirements. Because the size of square projection area and the specific location are random, the method has good practicality.

Key words: binocular vision; stereo calibration; vanishing point; intrinsic and external parameters

本文编辑:陈小平