



双目立体视觉传感器的现场标定技术

王俊修 孔 斌

(中国科学院合肥智能机械研究所,合肥 230031)

E-mail:jxwang@iim.ac.cn

摘 要 双目立体视觉传感器在机器视觉和三维测量中有着广泛的应用。其中测量精度是一个很重要的因素,尤其是在三维测量中,高测量精度的要求使得传感器的标定显得尤为重要。该文提出了一种双目立体视觉传感器的现场标定方法,不仅提高了标定精度,还避免了离线标定中大量的重复性劳动,同时也研究了摄像机镜头畸变的问题。实验结果表明,此方法能够得到满意的标定精度。

关键词 摄像机标定 双目立体视觉 镜头畸变 三维测量

文章编号 1002-8331-(2004)18-0189-03 文献标识码 A 中图分类号 TP391

On-line Calibration Technique of Binocular Stereoscopic Vision Sensor

Wang Junxiu Kong Bin

(Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: It is widely applied in robot vision and 3D measure for binocular stereoscopic vision sensor. Because measure precision is an important factor in 3d measure, the sensor calibration become very important for high measure precision. An on-line calibration method of binocular stereoscopic vision sensor is proposed in this paper, it not only improves the calibration precision, but also avoids unnecessary work. At the same time we study the lens aberration. The experimental results show that we can get the satisfactory calibration precision by using this method.

Keywords: camera calibration, binocular stereoscopic vision, lens aberration, 3D measure

1 引言

随着计算机视觉技术的不断发展,立体视觉传感器得到了越来越广泛的应用,尤其是双目视觉传感器以其机构简单、使用方便等诸多优点被成功地用于工业检测、物体识别、工件定位、机器人自引导、航天等领域。双目视觉传感器利用两台摄像机来模仿实现人眼的功能,其机理类似于人眼的视觉机制,因而在研究上有其独特的地位^[1],受到了国内外许多学者的高度重视。

作者采用两台性能相同的面阵 CCD 摄像机组成双目视觉传感器,基于立体视差的原理^[2],可以完成重叠视场内的特征点的三维测量。然而,要实现双目视觉传感器对特征点的三维测量,就必须知道传感器的内部参数、外部参数和结构参数。因此,在实际测量之前,首先要对摄像机进行参数标定。一般方法是在传感器被提供给整个系统使用前,就离线完成传感器的内部参数及结构参数的标定。这种方法有很大缺点,因为标定过程中的环境与传感器实际工作环境有一定的差异,例如光照(荧光和卤光)的不同会导致焦距的微小变化^[3],这种误差是离线标定所无法补偿的;而且传感器在安装的过程中不可避免地要引起部分参数的变化,尤其是结构参数的变化,因而需要多次的拆卸;同时摄像机还需进行外部参数的标定。由此可知标定工作非常繁重,精度也难以保证。因此,该文提出了一种双目视觉传感器的现场标定方法,即在摄像机安装到整个系统之

后,根据真实的工作环境进行标定。该方法一次即可完成所有参数的标定,避免了离线标定中许多重复性的标定工作,而且也能得到满意的标定精度。

2 双目视觉传感器的工作原理

双目视觉传感器是根据立体视差的原理进行工作的,首先需要对视觉传感器进行标定,计算摄像机的内外参数和结构参数。摄像机标定过程就是根据世界参考坐标系中已知一组控制点的坐标和图像坐标系中的相应坐标来确定的^[2,3],所以首先需要确定摄像机的模型。

2.1 摄像机模型

摄像机模型有两种,一种是线性模型,二是非线性模型。线性模型简单,但不能准确地描述成像几何关系,尤其是使用广角镜头时,远离图像中心处有较大的畸变,影响测量精度。所以作者采用非线性摄像机模型,就是针孔摄像机加上镜头畸变补偿,如图 1 所示。

设 (x, y, z) 是空间点 P 在摄像机坐标系(定义如图 1)中的三维坐标,摄像机坐标系 $oxyz$ 定义为:原点在 o 点(光心), z 轴与光轴 Z 重合。图像坐标系 OXY 定义为:原点在主点 O (光轴 Z 与图像平面的交点), X, Y 分别平行于摄像机坐标系的 x, y 轴。物空间点与 OXY 像面间构成透视对应。如果不考虑镜头畸变,以像素为单位的 CCD 像面坐标 (u, v) 与以毫米为单位的摄

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划项目(编号:2001AA422420)资助

作者简介:王俊修(1979-),男,硕士生,主要研究方向:图像处理,计算机视觉。孔斌,副研究员,主要研究方向:图像处理,计算机视觉。

像机坐标 (x, y, z) 之间的关系为:

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

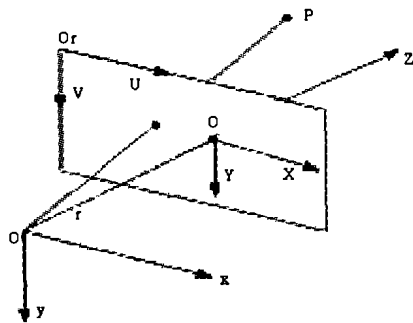


图1 摄像机模型

其中 (u_0, v_0) 为图像平面的主点坐标, s 为扭曲参数, f_x, f_y 为焦距。

由于摄像机光学系统的加工误差和装配误差, 摄像机实际成像与理想成像之间存在光学畸变误差^[4,5,6,9]。主要的畸变类型有两类: 径向畸变和切向畸变。其中径向畸变是关于摄像机镜头的主光轴对称的, 也是主要的误差来源, 它的数学模型^[9]为:

$$\begin{cases} \sigma_x = u_n (1 + k(1) \cdot r^2 + k(2) \cdot r^4 + k(3) \cdot r^6 + \dots) \\ \sigma_y = v_n (1 + k(1) \cdot r^2 + k(2) \cdot r^4 + k(3) \cdot r^6 + \dots) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $u_n = \frac{x}{z}, y_n = \frac{y}{z}, r^2 = u_n^2 + v_n^2, k(i), i=1, 2, 3, \dots$ 是径向畸变系数。

而切向畸变是不关于摄像机镜头的主光轴对称, 一般来讲此误差很小, 可以忽略^[7,8]。它的数学模型^[9]为:

$$\begin{cases} \sigma_u = 2q(1) \cdot u_n \cdot v_n + q(2) \cdot (r^2 + 2 \cdot u_n^2) \\ \sigma_v = q(1) \cdot (r^2 + 2 \cdot v_n^2) + q(2) \cdot u_n \cdot v_n \end{cases} \quad (3)$$

其中, $q(i), i=1, 2$ 是切向畸变系数。

因此, 像面上实际成像点的坐标 (u_f, v_f) 就等于理想坐标值与畸变误差的和:

$$\begin{cases} u_f = f_x (\sigma_x + \sigma_u) + s (\sigma_y + \sigma_v) + u_0 \\ v_f = f_y (\sigma_y + \sigma_v) + v_0 \end{cases} \quad (4)$$

在实际应用中, 由于摄像机坐标系较难确定, 所以一般采用世界坐标系。假如摄像机坐标与世界坐标系之间的关系为 R', T' , 则有如下关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R' \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T' \quad (5)$$

$$R' = \begin{bmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} \end{bmatrix} \quad T' = \begin{bmatrix} t'_x \\ t'_y \\ t'_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 双目立体视觉传感器深度信息获取原理

根据立体视觉原理, 可以由两台 CCD 摄像机来获取深度信息, 系统模型和相应的坐标系如图 2 所示。假设世界坐标系与 CCD1 的摄像机坐标系 $oxyz$ 重合, CCD1 像面坐标系为 $O_1X_1Y_1$, 焦距为 (f_{x1}, f_{y1}) , 主点坐标为 (u_{01}, v_{01}) ; CCD2 坐标系为 $O_2X_2Y_2Z_2$, 像面坐标系为 $O_2X_2Y_2$, 焦距为 (f_{x2}, f_{y2}) , 主点坐标为

(u_{02}, v_{02}) , 摄像机模型如前所述。

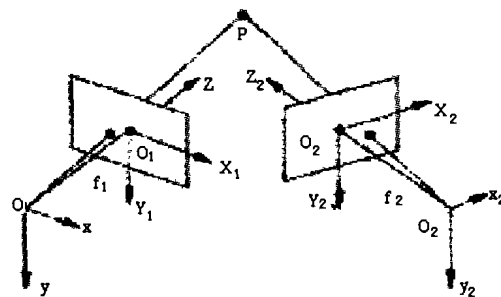


图2 双目立体视觉传感器模型

假设 P 点在左右摄像机坐标系中的坐标分别为 $(x, y, z), (x', y', z')$, 在 CCD1, CCD2 像面上的投影分别为 $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ 。那么由式子(1)可得到:

$$\begin{aligned} x_d &= \frac{(u_1 - u_{01})}{f_{x1}} - s_1 y_d & x'_d &= \frac{(u_2 - u_{02})}{f_{x2}} - s_2 y'_d \\ y_d &= \frac{(v_1 - v_{01})}{f_{y1}} & y'_d &= \frac{(v_2 - v_{02})}{f_{y2}} \end{aligned} \quad (7)$$

假如摄像机镜头失真已经矫正, 那么由(2), (3)式子可得到 $(x_n, y_n), (x'_n, y'_n)$ 。

由摄像机结构参数 (R, T) 可得下列关系:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (8)$$

$$\text{可改写为: } z' \begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \\ 1 \end{bmatrix} = z R \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} + T, \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由(9)式可以推出:

$$z = \frac{(x'_n x_i + y'_n y_i + z_i) - (x'_n t'_x + y'_n t'_y + t'_z) - (x_n^2 + y_n^2 + 1)(x_i t'_x + y_i t'_y + z_i t'_z)}{(x_n^2 + y_n^2 + 1)(x'_n^2 + y'_n^2 + 1) - (x'_n x_i + y'_n y_i + z_i)^2} \quad (10)$$

$$z' = \frac{z(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) + (x_i t'_x + y_i t'_y + z_i t'_z)}{x'_n x_i + y'_n y_i + z_i} \quad (11)$$

于是由关系 $u_n = \frac{x}{z}, y_n = \frac{y}{z}$ 可以得到摄像机坐标系下的坐标 (x, y, z) 和 (x', y', z') , 如果知道 (R', T') 则由式子(5)可得到世界坐标系下的坐标。

因此只要知道摄像机内参数 $f_1, s_1, (u_{01}, v_{01}), f_2, s_2, (u_{02}, v_{02})$; 结构参数 (R, T) , 以及外参数 (R', T') 就可以得到被测物体点的三维空间坐标。

3 摄像机参数的标定

作者采用平面标定模板, 处于世界坐标系 $z=0$ 的平面, 所以控制点的坐标为 $(x_w, y_w, 0)$, 相应的图像坐标为 (u, v) , 根据投影关系:

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[R, t] \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = K[r_1, r_2, t] \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{其中, } K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad r_1 = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix} \quad r_2 = \begin{bmatrix} r_{12} \\ r_{22} \\ r_{32} \end{bmatrix} \quad (13)$$

r_1, r_2 是旋转矩阵 R 的前两列, R 是单位正交向量, 所以有:

$$r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 0, r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 1, r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2 = 1 \quad (14)$$

设 $A=K[r_1, r_2, t], C=\begin{pmatrix} 1 & 0 & -u_0 \\ 0 & 1 & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, 则有:

$$C \cdot A = \begin{pmatrix} f_x r_{11} & f_x r_{12} & f_x t_1 \\ f_y r_{21} & f_y r_{22} & f_y t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix}, \text{于是可得下列式子:}$$

$$\begin{pmatrix} f_x^2 r_{11} r_{12} & f_y^2 r_{21} r_{22} \\ f_x^2 (r_{11}^2 - r_{12}^2) & f_y^2 (r_{21}^2 - r_{22}^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{f_x^2} \\ \frac{1}{f_y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} r_{12} + r_{21} r_{22} \\ (r_{11}^2 - r_{12}^2) + (r_{21}^2 - r_{22}^2) \end{pmatrix} \quad (15)$$

根据(14)式可以得到如下式子:

$$\begin{pmatrix} f_x^2 r_{11} r_{12} & f_y^2 r_{21} r_{22} \\ f_x^2 (r_{11}^2 - r_{12}^2) & f_y^2 (r_{21}^2 - r_{22}^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{f_x^2} \\ \frac{1}{f_y^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{31} r_{32} \\ r_{31}^2 - r_{32}^2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

一幅图像提供了两个方程, 如果有 n 幅图像就提供了 $2n$ 个方程, 这 $2n$ 个方程叠加起来记为:

$$M_{2n \times 2} f = -b_{2n \times 1} \quad (17)$$

所以根据 DLT 算法就可以解出焦距(f_x, f_y), 那么 K 矩阵就可确定, 所以由式子(12)可以得到外参数(R, t)。

摄像机标定的过程分为五步:

(1) 改变摄像机与模板的相对位姿, 至少拍摄 3 幅图像;

(2) 对每幅图像, 不考虑镜头畸变, 由图像坐标(u_i, v_i), 世界坐标($x_i, y_i, 0$)的对应, $i=1, 2, \dots, N$, 根据 DLT 算法^[7]可以直接求出矩阵 A_i 。

(3) 假设主点为图像中心, 则矩阵 C 已知, 根据式子(17)可以求出焦距(f_x, f_y), 进而求出摄像机的外参数。

(4) 由于 DLT 算法的局限性, 不能考虑非线性因素(镜头畸变)^[2,4,7], 所以得到的摄像机参数有较大的误差。而 Levenberg-Marquardt 迭代优化算法对解决非线性问题具有较快的收敛性^[6,7], 但初始值的选择非常重要, 否则会陷入局部最小值^[2,7]。所以采用(3)所得摄像机参数作为迭代初始值, 失真初始参数可选择为 0。

这里选取重投影误差作为代价函数:

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(u_{ij} - u'_{ij})^2 + (v_{ij} - v'_{ij})^2] \quad (18)$$

于是可以求得摄像机参数的优化解。

(5) 根据(1)~(4)分别标定 CCD1, CCD2; 假设得到的外参数为(R_1, T_1), (R_2, T_2), 则双目摄像机的结构参数为:

$$R = R_1 R_2^{-1}, T = T_1 - R_1 R_2^{-1} T_2 \quad (19)$$

4 实验

4.1 模拟数据实验

在模拟实验中, 摄像机的设置如下: $f_x=1000, f_y=1000, s=0, u_0=350, v_0=280$, 图像的分辨率为 640×480 , 平面模板在空间的方位用三维向量 r 表示, 位置用三维向量 t 表示。采用三幅图像, 对应的摄像机的位置和姿态参数分别为:

$r_1 = [-2.137911; -2.227993; -0.4490471], t_1 = [-82.74411; -56.68443; 182.5851]; r_2 = [1.992646; 2.081211; 0.26548890], t_2 = [-75.14787; -58.72121; 225.2652]; r_3 = [2.071805; 2.054138; 0.03601246], t_3 = [-119.6891; -69.60032; 263.6161];$

失真参数为: $k = [-0.3786; 0.2041; 0], q = [-0.000157; 0.002169];$

实验环境是 matlab6.1, 采用西洋跳棋盘作为模板, 如图 4 所示, 小格子为边长 30mm 的正方形, 根据摄像机参数可以计算这三副图像中每个角点的坐标。于是得到了图像坐标和世界坐标的对应, 根据文中的标定方法进行计算。为了测试该方法的鲁棒性, 在每副图像加上均值为 0, 均方差(噪声水平)为 σ 的高斯噪声, σ 由 0 像素~2.0 像素, 表 1 就是模拟实验求得摄像机内参数随不同噪声水平的变化情况, 所有结果都是 100 次独立实验的平均值:

表 1 不同噪声水平下的标定结果

噪声水平	初始 f_x	初始 f_y	f_x	f_y	s	u_0	v_0
0	1008.9365	1013.7715	1000.0000	1000.0000	0	350.0000	280.0000
0.4	1008.4238	1013.2539	999.3562	999.2474	0.0000165	349.7400	279.6811
0.8	1009.5714	1014.3691	998.7136	998.6349	0.0000263	349.4892	279.6337
1.2	1012.9071	1017.7309	1002.6636	1002.7999	-0.0000772	350.9572	280.3252
1.6	1012.1053	1016.5055	996.0174	995.8621	-0.0001224	350.2189	279.2827
2.0	1013.4202	1018.1215	993.7694	993.4409	0.00004191	348.1679	280.1894

从上面的结果可以看出, 此标定方法有较强的鲁棒性。

4.2 真实图像实验

实验平台如图 3 所示。作者选用两台 537 像素 \times 597 像素的 CCD 摄像机和 3.6mm 的 MINTRON 镜头组成双目立体视觉系统, 并选取西洋跳棋盘作为标定模板, 如图 4 所示。

作者选取模板上的 48 个角点作为控制点(模板上除去最外面一圈角点剩下的)来对摄像机进行标定。标定时至少将模板摆在三个不同位置处进行拍摄, 而且最好从不同的角度(摄像机像面与模板平面的夹角)来拍摄。实验表明, 拍摄方向越多标定精度越高。



图 3 实验平台

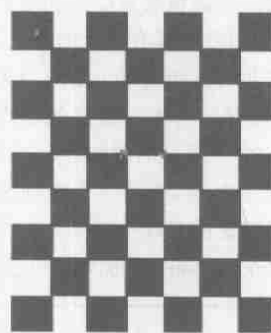


图 4 标定用的西洋跳棋盘

(下转 220 页)

发热程度=0.6;

肺部有片状、斑状浸润性阴影程度=0.8;

外周血 WBC 计数变化=0.8;

(2)SARSES 推理结论:

该患者确诊为 SARS 临床病例。

(3)SARSES 推理结果的解释(规则匹配路径):

根据给出的患者症状,推理机匹配的规则编号为 Rule2、5、8、15、17、13、18 等。根据上述规则,诊断该患者为 SARS 临床病例。

(4)诊断治疗意见:

病情初识阶段,给予镇咳、祛痰药物,抗病毒药物如三氮唑核和另一种名为 kaetra 的药物。病情第二阶段,从第 8 天至 21 天施用类固醇,以减低免疫系统的反应和降低对肺部造成的损伤。抗病毒药物应在 14 天后停止使用。

酌情使用糖皮质激素,建议应用激素的指征为:有严重中毒症状,达到重症病例标准者。应有规律使用,具体剂量根据病情来调整。

5 结束语

该文主要介绍了 SARS 医疗辅助诊断专家系统 SARSES 的体系结构,正向推理、反向推理和基于事例的推理等方法。这

几种推理方法既可以单独使用,又可以结合使用。由于不同的推理方法可能得出的结论有所偏差,为了得到正确的推理结果,使用时可以同时参考三个推理结果。在该系统中,每种推理得出的结论都带有一个权值,用来表示本次推理的可信度,将多种推理结论的权值相加,得出总的推理结论的可信度,由此判断患者是否患有 SARS。该系统经过一段时间的试用,具有较好的效果。(收稿日期:2003 年 10 月)

参考文献

- 1.陈世福,陈兆乾.人工智能和知识工程[M].南京,南京大学出版社,1997
- 2.张祥伟,丁运亮.飞机故障诊断专家系统的软件实现[J].计算机应用研究,2002;19(6):88~90
- 3.雷印胜.远程 CT 机故障诊断专家系统的研究及应用[J].计算机应用研究,2002;13:109~111
- 4.金传伟.缺陷诊断专家系统的知识表达与推理技术[J].计算机工程与应用,2002;38(13):119~121
- 5.尹旭日,周志华.AFDES 中基于 Case 推理方法的研究[J].计算机应用与软件,2002;19(1):39~41
- 6.张光前,邓贵任等.基于事例推理的技术及其应用前景[J].计算机工程与应用,2002;38(20):52~55

(上接 191 页)

作者拍摄了不同位置的 2×25 幅图像。其中的一对图像如图 5 所示。采用如前所述算法即可获得参数 R 、 T ,以及两摄像机的内参数。实验环境是 matlab 6.1。

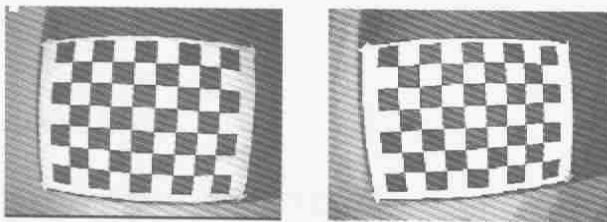


图 5 一对标定图像(left01.bmp,right01.bmp)

经过 L-M 13 次优化迭代后得到如下结果:

左摄像机:

$$(f_x, f_y)=[481.35170, 490.7324](u_0, v_0)=[327.05351, 245.45961]$$

$$k=[-0.37868, 0.20410, -0.05889] \quad q=[-0.00016, 0.00217]$$

右摄像机:

$$(f_x, f_y)=[507.96236, 518.38055](u_0, v_0)=[294.70947, 247.10403]$$

$$k=[-0.45600, 0.46110, -0.46039] \quad q=[-0.00673, 0.00093]$$

标定完成之后,让模板任意摆放在视觉系统的测量范围内的不同位置处,并测量图 4 中用圆点标注的角点的坐标,然后根据式(10)求出这两点之间的距离并与实际值相比较。计算结果如表 2 所示。实验结果表明,该文所述标定方法可以获得较高精度摄像机参数,空间三维点距离的测量误差不超过 $\pm 0.1\text{mm}$,能够满足视觉引导系统中对双目视觉传感器的精度要求。

5 结论

该文对双目立体视觉传感器的现场标定方法进行了研究。该方法在摄像机安装到整个系统后进行现场标定,一次可以标定摄像机的所有参数,减少了环境因素和安装传感器对标定参

表 2 双目立体视觉传感器测量实验结果 实际距离:30mm

序号	角点坐标 x	角点坐标 y	角点坐标 z	距离	偏差
1	-6.8485 19.8978	-23.9751 -21.1347	449.4189 462.5068	29.9119	-0.0881
2	-29.6681 -0.9359	-15.8265 -16.2166	435.0972 426.2497	30.0661	0.0661
3	20.6830 47.1751	-22.5959 -26.9100	390.1954 403.6200	30.0110	0.0110
4	-1.0373 27.3438	-59.1075 -57.9980	547.1836 537.0624	30.0522	0.0522

数的影响;同时与全局标定一起进行,减少了离线标定中许多不必要的标定工作。实验结果表明,该方法简单快捷,而且能得到满意的标定精度。(收稿日期:2003 年 10 月)

参考文献

- 1.徐光佑,钱均强.机器人[M].1988:60~65
- 2.徐光佑.计算机视觉[M].1999:11~15
- 3.J Heikkila, O Silven. Calibration procedure for short focal length off-the-shelf CCD cameras[C]. In: Proc 13th International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, 1996: 166~170
- 4.J Heikkila, O Silven. A Four-step Camera Calibration Procedure With Implicit Image Correction[C]. In: Proceeding of Int Conf, CVPR, 1997: 1106~1112
- 5.T A CLARKE, J G FRYER. The development of camera calibration methods and models. Photogrammetric Record, 1998: 51~66
- 6.Peter F Sturm, Stephen J Maybank. On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications, CVPR, 1999: 1432~1437
- 7.Hartley, Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2000
- 8.Z Zhang. A Flexible Camera Calibration By viewing a Plane From Unknown Orientations[C]. In: Proceedings of Int Conf on Computer Vision, 1999: 666~673