

文章编号: 2095—0411 (2011) 04—0037—04

GRB—400 机器人摄像机内外参数的分离标定^{*}

姜小娟, 段锁林

(常州大学 机器人研究所, 江苏 常州 213164)

摘要: 以 GRB—400 四自由度工业机器人为研究对象, 利用一种介于传统标定方法和自标定方法之间的内外参数分离的标定方法, 对机器人的 CCD 摄像机进行了标定, 获得了较精确的摄像机内、外参数。该方法的特点是比传统标定方法简单快速, 同时克服了自标定方法精度不高的缺点。

关键词: 摄像机标定; 内外参数分离; 角点提取

中图分类号: TP 249

文献标识码: A

Internal and External Parameters Separated Calibration Method for Camera of GRB—400 Robot System

JIANG Xiao—juan, DUAN Suo—lin

(Institute of Robotics, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Based on the GRB—400 robot system with 4—degree freedom (DOF), the CCD camera's calibration was completed by using an internal and external parameters separated method, and got the relatively accurate camera interior and exterior parameters. The method is simpler and much faster than the traditional calibration methods, and also overcame shortcomings such as low accuracy of the self—calibration methods.

key words: camera calibration; internal and external parameters separated; comer extraction

机器人—摄像机视觉系统的标定就是基于机器人坐标系和给定的摄像机模型求取摄像机内外参数, 进而确定图像坐标与机器人基础坐标系 (可以取世界坐标系或其他相对固定的坐标系) 之间的相对关系的过程^[1]。内参数与图像坐标的选取和摄像机本身的技术参数 (有效焦距、透镜畸变等) 有关, 而外参数与摄像机在机器人基础坐标系中的相对方位有关。这种机器人—摄像机系统的标定方法根据其标定方式大致可归结为传统标定方法、摄像机自标定方法^[2]和基于主动视觉^[3]的标定方法 3

类。

传统的摄像机标定方法包括基于最优化算法的标定^[4]、基于摄像机变换矩阵的标定^[5]、Tsai 考虑畸变的两步法^[6]和 Martins 的两平面法^[7]。这些传统的摄像机标定方法都需要在摄像机前放置一个标定参照物, 然后进行图像处理, 利用一系列数学变换和计算, 求取摄像机的内外参数。因此在每次参数调节后, 需要重新对摄像机进行标定, 而自标定则不需要已知参照物, 仅通过控制摄像机的运动来获取多幅图像, 即可确定内参数, 这就使标定过

^{*} 收稿日期: 2011—05—16

基金项目: 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室开放基金重点项目支持 (SKLRS—2010—2D—09)

作者简介: 姜小娟 (1986—), 女, 江苏南通人, 硕士生, 主要从事机器人视觉技术与应用研究。

程大为简化,但同时鲁棒性和精度均不高。

鉴于传统方法和自标定方法的不足,人们提出了基于主动视觉的摄像机标定方法,即在已知摄像机某些运动信息的情况下,进行摄像机标定,这类方法的优点是可以线性求解,算法的鲁棒性比较好,但不能用于运动信息未知和无法控制的场合。

本文针对 GRB-400 四自由度机器人,利用一种介于传统标定方法和自标定方法之间的内外参数分离的方法进行标定,先采用张正友标定法^[8]求摄像机内参数,然后结合摄像机模型求解外参数。这种方法的优点在于操作简单,算法容易理解,具有较好的鲁棒性,而且不需要昂贵的精致标定板。

1 机器人—摄像机标定模型

GRB-400 机器人是深圳固高科技有限公司生产的四自由度 SCARA 型平面关节机器人。整个系统由机器人本体、计算机控制系统和图像采集处理系统、交流伺服驱动系统、SV 运动控制卡、电磁手爪、摄像机等组成^[9]。本系统采用 CCD 2/3 英寸摄像机,成像面大小为 6.8 (H) × 8.8 (V) mm。摄像机的成像以针孔模型为基础,不考虑镜头畸变,摄像机固定于机器人工作平面上方的某一高度处,建立如图 1 所示的机器人—摄像机系统模型。(X, Y, Z) 为机器人坐标系(即世界坐标系),原点在机械臂第一关节的中心。(X_c, Y_c, Z_c) 为摄像机坐标系。(u, v) 为图像坐标系。

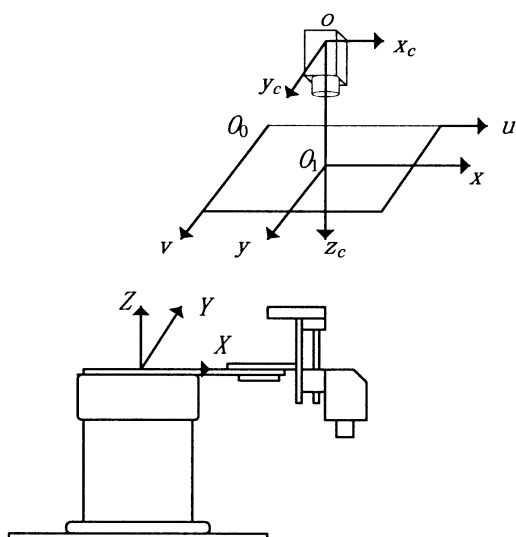


图 1 机器人—摄像机标定模型

Fig. 1 Calibration model of robot-camera system

1.1 摄像机内参数标定

采用张正友等人提出的基于平面方格点的摄像

机标定法求解摄像机的内部参数,采集 N 张图像,然后检测出每幅图像中的角点,再由检测到的角点计算出每幅图像的平面投影矩阵,最后确定出摄像机的参数。

(1) 靶标平面与其图像平面之间的映射矩阵

结合图 1 所示的机器人—摄像机系统模型,设 (u_0, v_0) 为摄像机主点, f_u 和 f_v 是摄像机的等效焦距, $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为平移向量,表示从世界坐标系的原点到光心的矢量, R 为旋转矩阵,记旋转矩阵 R 的元素为 r_{ij} 。中心投影关系表达形式为:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

该方法假设标定模板在世界坐标系中 $Z=0$,因而中心投影关系表达式 (1) 可以简化为

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = A [r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, A 为摄像机的内参数矩阵, H 为摄像机的投影矩阵,有 2 个部分组成:用于定位观察的靶标平面的物理变换和使用摄像机内参数矩阵的投影,将其展开形式记为

$$H = [h_1 \ h_2 \ h_3] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix}$$

另外,令 H 的第 i 列向量为 $h_i = [h_{1i} \ h_{2i} \ h_{3i}]^T$,约去 λ 可得

$$\begin{cases} u = \frac{h_{11}X + h_{12}Y + h_{13}}{h_{31}X + h_{32}Y + 1} \\ v = \frac{h_{21}X + h_{22}Y + h_{23}}{h_{31}X + h_{32}Y + 1} \end{cases} \quad (3)$$

将分母乘到等式左边,进一步可得

$$\begin{cases} uXh_{31} + uYh_{32} + u = h_{11}X + h_{12}Y + h_{13} \\ vXh_{31} + vYh_{32} + v = h_{21}X + h_{22}Y + h_{23} \end{cases}$$

令

$$h' = [h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ 1]^T$$

则有

$$\begin{bmatrix} X & Y & 1 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -u \\ 0 & 0 & 0 & X & Y & 1 & -vX & -vY & -v \end{bmatrix} \mathbf{h}' = 0$$

化简可得

$$\begin{bmatrix} X & Y & 1 & X & Y & 1 & (-u-v)X & (-u-v)Y & 0 \end{bmatrix} \mathbf{h}' = u+v$$

简记为

$$\mathbf{p} \mathbf{h}' = \mathbf{q} \quad (4)$$

在一幅图像中可以检测到多个特征点, 在相差一个比例因子的条件下, 对式 (4) 求最小二乘解。

假设 $f_i(x) = p_i x - q_i$, $i = 1, 2, \dots, m$, 则目标函数 $F(x)$ 可由若干 $f_i(x)$ 的平方和构成, 即:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m f_i^2(x) =$$

$$(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{bmatrix} =$$

$$(\mathbf{P}x - \mathbf{q})^T (\mathbf{P}x - \mathbf{q}) = x^T \mathbf{P}^T \mathbf{P} x - 2\mathbf{q}^T \mathbf{P} x + \mathbf{q}^T \mathbf{q}$$

令

$$\nabla F(X) = 2\mathbf{P}^T \mathbf{P} x - 2\mathbf{P}^T \mathbf{q} = 0$$

即 $F(x)$ 的平稳点满足 $\mathbf{P}^T \mathbf{P} x - \mathbf{P}^T \mathbf{q}$, \mathbf{P} 为列满秩, $\mathbf{P}^T \mathbf{P}$ 为 9 阶正定矩阵, 由此目标函数 $F(x)$ 的平稳点为

$$\bar{x} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{q} \quad (5)$$

由于 $F(x)$ 是凸函数, 因此 \bar{x} 是整体极小点, 所以 $\mathbf{h}' = \bar{x}$ 。求出 \mathbf{h}' 后, 进而可以得到 \mathbf{H} 。

(2) 求解摄像机参数矩阵

$$\text{令 } \mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于 \mathbf{B} 是对称矩阵, 可以另表示为 6 维向量:

$$\mathbf{b} = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]^T$$

当 \mathbf{H} 求解出来后, 由 (2) 和 \mathbf{R} 的正交性可得关于摄像机内参数的约束方程

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{12})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1}h_{j1} \ h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} \ h_{i2}h_{j2} \ h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \ h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \ h_{i3}h_{j3}]^T$$

如果对靶标平面拍摄 n 幅图像, 将 n 个这样的方程组叠起来, 可得

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = 0 \quad (8)$$

其中, \mathbf{V} 为 $2n \times 6$ 的矩阵。如果 $n \geq 3$, 一般的, b 可以在相差一个尺度因子的情况下唯一确定。方程 (8) 的解是矩阵 $\mathbf{V}^T \mathbf{V}$ 的最小特征值对应的特征向量, 或通过矩阵 \mathbf{V} 进行奇异值分解 (SVD) 求解出 b 。当 b 求解出来后, 就可以较容易地得到 \mathbf{B} 。

由于 $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$, 是对称正定矩阵, 所以存在一个实的非奇异下三角阵 \mathbf{L} 使得 $\mathbf{B} = \mathbf{L} \mathbf{L}^T$, 限定 \mathbf{L} 的对角元为正时, 这种分解是唯一的, 这种分解方法称作 Cholesky 矩阵分解。

令

$$\mathbf{B} = \mathbf{L} \mathbf{L}^T =$$

$$\begin{bmatrix} l_{11} & & & \\ l_{21} & l_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & l_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} & \cdots & l_{n1} \\ & l_{22} & \cdots & l_{n2} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & l_{nn} \end{bmatrix}$$

逐步确定 \mathbf{L} 的第 i 行元素 l_{ij} , $j = 1, 2, \dots, i$, 由矩阵乘法有

$$l_{ij} = (B_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$l_{ij} = (B_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} l_{jk}) / l_{jj}, \quad j = 1, 2, \dots, i-1$$

在相差一个比例因子的情况下, $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{L}$, 再求逆得到 \mathbf{A} , 至此, 摄像机的内参数就可以全部得到了。

1.2 摄像机外参数标定

结合图 1 所示的机器人—摄像机系统模型, 根据刚体变换和欧拉角公式, 可得旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

由公式 (2) 可知

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f_u r_{11} + u_0 r_{31} & f_u r_{12} + u_0 r_{32} & f_u t_x + u_0 t_z \\ f_v r_{21} + v_0 r_{31} & f_v r_{22} + v_0 r_{32} & f_v t_y + v_0 t_z \\ r_{31} & r_{32} & t_z \end{bmatrix}$$

那么式 (3) 可以改写为

$$\begin{cases} u - u_0 = \frac{f_u}{t_z} (t_x + X) \\ v - v_0 = \frac{f_v}{t_z} (t_y - Y) \end{cases} \quad (9)$$

由式 (9) 可得平移矩阵。

2 实验结果及误差分析

标定实验主要是采集标定模板的特征点图像, 并对采集的特征点图像进行处理, 以获得特征点的计算机图像坐标, 同时测量出特征点在世界坐标系下的空间坐标, 最后利用 Visual C++6.0 和 Intel 开源计算机视觉库 (Open Source Computer Vision Library, OpenCV)^[10] 编程来获取摄像机的内参数。实验步骤如下:

(1) 打印一张 8cm×6cm 的棋盘方格图, 每个方格大小为 1cm×1cm, 即内角点的个数为 7 (行)×5 (列) 个, 并将其贴在一块光滑平整的纸板上。

(2) 拍摄 20 幅图像, 采集图像分辨率为 640×480 像素。选取其中 14 幅, 如图 2 所示, 其中第一组是平面靶标离摄像机较远位置拍摄的, 第二组是平面靶标离摄像机较近时拍摄的。

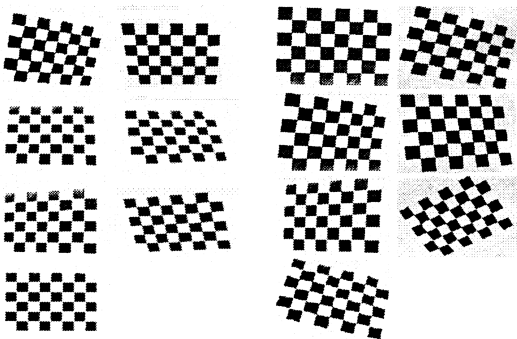


图 2 不同位置的平面靶标图像

Fig. 2 Images of planar target in different positions

(3) 对采集到的图像进行角点检测及亚像素精确化处理, 利用 OpenCV 中的 cvCalibrateCamera2 () 函数计算出摄像机的内参数, 再用 cvUndistort2 () 函数纠正图像的变形, 最终得到的摄像机内参数结果如表 1 所示, 表 1 中的误差为每组靶标图像的标定误差, 单位是像素。

表 1 摄像机内参数标定结果

Table 1 Internal parameters of the CCD camera

靶标	f_u	f_v	u_0	v_0	误差
A 组	1 448.31	1 429.67	348.52	231.45	0.558
B 组	1 424.60	1 409.83	325.95	229.09	0.839
平均	1 436.46	1 419.75	337.24	230.27	0.699

(4) 将获得的摄像机内参数结果代入式 (9), 得外参数: $t_x = -0.578\ 368\text{mm}$; $t_y = 267.898\ 647\text{mm}$; $t_z = 669.988\ 538\text{mm}$ 。

3 结 论

摄像机标定是机器人视觉控制研究的主要内容之一, 目前已有大量的研究成果。本文采用内外参数分离的标定方法对 GRB-400 四自由度机器人进行了标定, 方法简单, 精度较高。然而, 通常情况下, 摄像机镜头是有畸变的, 本文并未考虑摄像机的镜头畸变问题, 下一步打算将上述参数作为初值, 考虑畸变系数, 对内外参数进行优化, 从而计算出更准确的参数值, 以确保今后机器人多目标识别与抓取工作的准确度。

参考文献:

[1] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[2] Ma S D. A self-calibration technique for active vision system [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1996, 12 (1): 114.

[3] 杨长江, 汪威, 胡占义. 一种基于主动视觉的摄像机内参数自标定方法 [J]. 计算机学报, 1998, 21 (5): 428-435.

[4] W Faig. Calibration of close-range photogrammetric system: Mathematical formulation Photogrammetric eng [J]. Remote sensing, 1975, 41 (12): 1 479-1 486.

[5] Abdel-Aaiz Y I, Kamra H M. Direct linear transformation into object space coordinates in Close-Range Photogrammetry [C] // Proc Symposium on Close-Range Photogrammetry. Faus Church. Virginia: American Society of Photogrammetry, 1971: 1-18.

[6] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE Press, 1986: 364-374.

[7] Martins H A, Birk J R, Kelley R B. Camera models based no data form two calibration planes [J]. Computer Graphics and Imaging Processing, 1981, 17: 173-180.

[8] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[9] 杨志耀, 段锁林. 双目视觉机器人物体搬运伺服控制系统研究 [J]. 太原科技大学学报, 2008 (4): 295-301.

[10] 黎松, 平西建, 丁益洪. 开放源代码的计算机视觉类库 OpenCV 的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2005 (8): 134-136.