

文章编号 1004-924X(2011)08-1895-08

双机器人系统的快速手眼标定方法

魏振忠, 张博, 张广军*

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要:针对双机器人仿真测量系统的手眼标定问题,提出一种由机器视觉求解法兰盘位姿得出手眼关系的方法。将目标机器人运动到合适的位姿,由视觉机器人拍摄其法兰盘图像,提取图像中法兰盘的椭圆轮廓,解算摄像机坐标系下的法兰盘姿态和圆心坐标,并由销孔位置约束得出摄像机与目标法兰盘坐标系的转换关系 H_1 。然后由控制器读数得出两台机器人各自法兰盘坐标系与基坐标系间的转换关系 H_2, H_4 ,并由机器人单轴旋转运动得出双机器人基坐标系转换关系 H_3 ,由此形成闭环得出机器人手眼关系 H_{CG} 。将法兰盘运动到共面的多个不同位置分别拍摄图像,通过图像融合来提高标定精度。实验结果表明,单位置标定和多位置图像融合标定的精度分别为 0.345° 和 0.187° ,满足双机器人视觉仿真测量系统的精度要求。

关键词:机器人;手眼标定;坐标转换;图像融合;圆姿态

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1895

Rapid hand-eye calibration of dual robot system

WEI Zhen-zhong, ZHANG Bo, ZHANG Guang-jun*

(Key Laboratory of Precision Opto-mechanics

Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

Abstract: For the hand-eye calibration of a dual robot measurement system, a method based on machine vision to calculate the target robot flange pose and center coordinate was presented. By moving the target robot flange to a proper pose to take an image by the camera and extract the ellipse contour of the flange in the image to calculate the flange pose and its circle center data, the coordinate transform H_1 between camera coordinate system and flange coordinate system was obtained by using the location of pinhole on the flange. Then, the coordinate transforms between flange coordinate system and robot base coordinate systems, namely, H_2 and H_4 , are gotten, respectively, from the robot controllers. Furthermore, the coordinate system transform H_3 between two robots were derived from single axis movements of robots, so that a hand-eye expression H_{CG} was obtained to calculate the hand-eye coordinate transform. Finally, by moving the target flange to some coplanar poses to take their images, the calibration accuracy was improved by image fusion. Experimental results indicate that the calibration precisions of single image and coplanar poses using image fusion are 0.345° and 0.187° , re-

收稿日期:2010-12-27;修订日期:2011-01-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50875014);北京市自然科学基金资助项目(No. 3092014)

spectively. It can satisfy the the requirements of dual robot systems for vision guiding measurement.

Key words: robot; hand-eye calibration; coordinate transform; image fusion; circle pose

1 引言

在机器人视觉测量中,必须对摄像机与机器人末端执行器之间的相对安装位置进行标定,也就是手眼标定^[1-4]。最常用的手眼标定方法是 Tsai 提出的转站法^[1],该方法控制机器人末端执行器运动到至少 3 个不同的空间位置,利用摄像机拍摄尺寸已知的标定参照物,由转站间的变换矩阵推导出摄像机坐标系与机器人工具坐标系之间的关系。该方法需要使用外部靶标,且解算步骤相对复杂。也有报道^[3]通过机器人自定义工具多姿态触碰获取标志点在机器人坐标系下的坐标,进而求得手眼关系,但该触碰方法主观性较强,且有两次误差累积,精度难以保证。文献^[4]给出一种利用机器人的相对运动,带动空间特征标记点产生相对的立体标定靶标来实现手眼标定的方法,其本质上与 Tsai^[1]的方法相同。国外的研究则集中在 Tsai^[1]的方法中 $Ax = xB$ 方程求解的讨论^[5]。文献^[6]提出利用平面镜辅助的标定方法,本质上是利用平面镜形成双目立体视觉和立体靶标,从而实现标定。

目前,国内外未见讨论双机器人手眼标定问题的公开报道。本文针对双机器人仿真测量系统,提出了一种快速完成手眼标定的方法,该方法不需要外部靶标,通过求取法兰盘圆轮廓的空间位姿,利用销孔位置消除旋转不确定度进而解算手眼关系,具有操作简单,适用范围广等优点。

2 标定方法

2.1 系统模型

双机器人仿真测量系统如图 1 所示,摄像机固定在右机器人末端执行器上。

各坐标系分别简述如下:

C_{R_1} :左机器人基坐标系; C_{R_2} :右机器人基坐标系; C_{G_1} :左机器人默认工具坐标系; C_{G_2} :右机器人默认工具坐标系; C_C :摄像机坐标系。

手眼标定便是要求解 C_C 和 C_{G_2} 之间的转换关系 H_{CG} 。

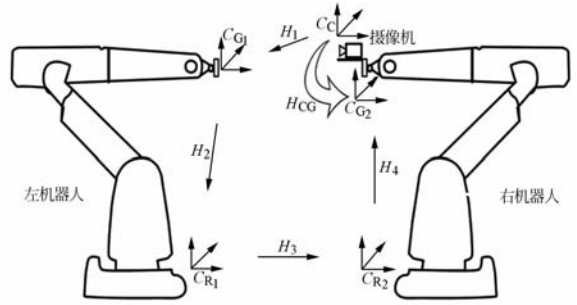


图 1 双机器人系统

Fig. 1 Dual robot system

各坐标系间转换关系分别定义如下:

H_1 : C_C 到 C_{G_1} 的坐标转换关系;

H_2 : C_{G_1} 到 C_{R_1} 的坐标转换关系;

H_3 : C_{R_1} 到 C_{R_2} 的坐标转换关系;

H_4 : C_{R_2} 到 C_{G_2} 的坐标转换关系。

其中 H_2, H_4 可由机器人控制器直接读出。通过视觉方法求解 H_1 ,由双机器人基坐标系转换得出 H_3 ,便可得出手眼关系:

$$H_{CG} = H_4 H_3 H_2 H_1. \quad (1)$$

2.2 求取 H_1

由右机器人末端摄像机拍摄一幅左机器人法兰盘的图像,提取图像中法兰盘的椭圆轮廓。不失一般性,可以令法兰盘坐标系与左机器人默认工具坐标系重合,其坐标原点位于法兰盘外平面的中心, X, Y 轴位于法兰盘平面上,如图 2 所示。

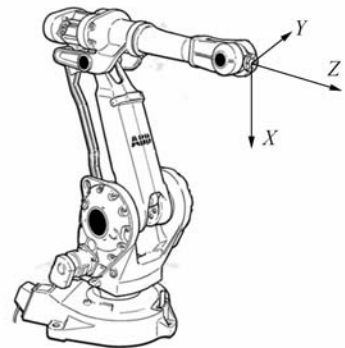


图 2 机器人默认工具坐标系

Fig. 2 Robot default tool coordinate system

机器人法兰盘的外观如图 3 所示。

法兰盘具有圆形轮廓,直径为 50 mm,极限

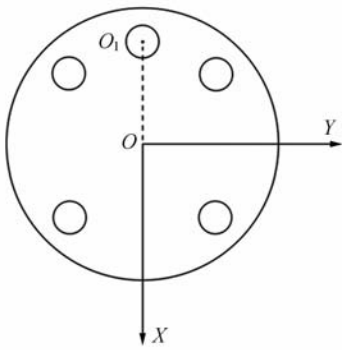


图 3 法兰盘示意图
Fig. 3 Flange illustration

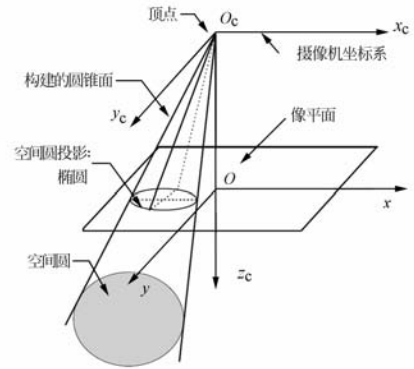


图 4 由图像椭圆构建的圆锥面
Fig. 4 Cone derived from image ellipse

偏差为 $[-0.039\text{ mm}, 0]$,直径长度的不确定度为 $0.05\text{ mm}^{[7]}$ 。法兰盘上有一个销孔 O_1 和四个均匀分布的螺孔,各孔直径均为 6 mm ,圆心位置的不确定度为 0.05 mm ,其中销孔圆心 O_1 可以用于消除法兰盘圆姿态的冗余解。 O_1 位于 X 轴上,其到法兰盘圆心的距离 OO_1 为 20 mm 。

将 H_1 的旋转矩阵和平移矢量分别记作 $R_1 = [r_1\ r_2\ r_3]$ 和 t_1 ,首先由单幅图像获取法兰盘的空间位姿,便得到平移矢量 t_1 以及旋转矩阵 R_1 的第三个列向量 r_3 ;然后用销孔圆心位置 O_1 消除绕法兰盘圆平面法向量的旋转自由度,求得完整的旋转矩阵 R_1 。

2.2.1 单幅图像求解法兰盘空间位姿

对拍摄的法兰盘图像进行边缘提取和椭圆拟合,获得其在图像坐标系中的椭圆方程,便可解算法兰盘圆平面的空间位姿^[8]。在摄像机内部参数已知的情况下,给定投影椭圆,可由摄像机光心和该椭圆构建一个圆锥面,如图 4 所示。法兰盘所在的平面与该圆锥面相交,得到的点集是一个标准的圆,即法兰盘圆轮廓。求解法兰盘圆姿态,即求解该平面在摄像机坐标系下的法向量坐标。

(1)求解圆锥一般方程

椭圆方程的形式为:

$$\begin{cases} a'x^2 + 2h'xy + b'y^2 + 2g'x + 2f'y + d' = 0 \\ z = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

则由该椭圆和摄像机光心构建的圆锥曲面表达式如下:

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gzx + 2hxy + 2ux + 2vy + 2wz + d = 0, \quad (3)$$

$a, b, c, f, g, h, u, v, w, d$ 均为 a', b', d', g', f', h' 的函数。

(2)求解法兰盘所在平面的参数

求解法兰盘圆姿态可转化为求解与其平行的任一截面的姿态,设某截面方程为:

$$lx + my + nz = 0. \quad (4)$$

截面方程(4)的参数 l, m, n 即为法兰盘的圆姿态,可通过坐标转换将圆锥方程(3)化简为更简洁的形式:

$$\lambda_1 X^2 + \lambda_2 Y^2 + \lambda_3 Z^2 = 0. \quad (5)$$

记该变换中的旋转矩阵为 R_{10} 。其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是以下方程的根:

$$\lambda^3 - \lambda^2(a+b+c) + \lambda(bc+ca+ab-f^2-g^2-h^2) - (abc+2fgh-af^2-bg^2-ch^2) = 0, \quad (6)$$

且 $\lambda_1 > \lambda_2 > 0 > \lambda_3$,有:

$$l = \pm \sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}}, m = 0, n = \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}}. \quad (7)$$

由旋转变换 R_{10} 将 (l, m, n) 转化为摄像机坐标系下的法向量坐标 (l', m', n') :

$$\begin{bmatrix} l' \\ m' \\ n' \end{bmatrix} = R_{10} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

便得到法兰盘法向量坐标的两组解,同时可解得圆心坐标 t_1 。

(3)消除圆姿态的冗余解

上一节求得的两组法向量坐标中只有一组是正确的,利用法兰盘上位置已知的销孔圆心 O_1 可消除冗余解^[9]。由两组姿态分别反解销孔圆心到法兰盘圆心的距离 OO_1 ,结果等于真实距离的一组姿态即为真实解。

2.2.2 求解空间圆心的图像投影坐标

法兰盘、销孔、螺孔的圆轮廓在图像平面上的投影均为椭圆,然而其空间圆心的投影并非投

影椭圆的中心。真实圆心投影坐标可由空间共面阵列圆的方法^[10]求出。

空间圆 C 可描述为:

$$\mathbf{X}_W \mathbf{C} \mathbf{X}_W^T = 0, \quad (9)$$

其在图像平面上的投影椭圆可描述为:

$$\mathbf{x}_p \mathbf{E} \mathbf{x}_p^T = 0. \quad (10)$$

3 个空间共面圆 C_1, C_2, C_3 如图 5 所示, 其在图像平面上的投影分别记作 e_1, e_2, e_3 。空间圆心 C_1 在图像平面上的投影可由 e_1, e_2, e_3 得出:

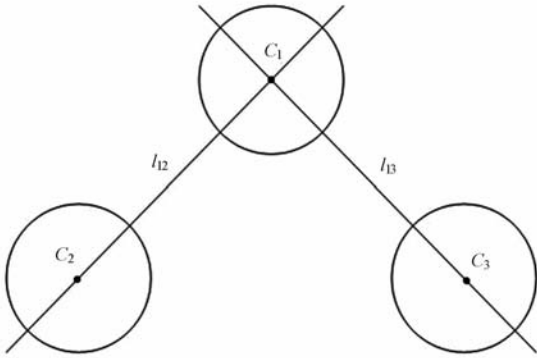


图 5 3 个空间共面圆

Fig. 5 Three coplanar circles

(a) 记 $\mathbf{q}_{12} = \mathbf{e}_1^{-1} \mathbf{e}_2$, 计算 \mathbf{q}_{12} 的特征向量, 记作 $\mathbf{p}v_k^{12} (k=1, 2, 3)$;

(b) 计算两个特征向量之间的欧氏距离, $d_m = \text{norm}(\mathbf{p}v_a^{12}, \mathbf{p}v_b^{12}) (a \neq b) (m=1, 2, 3)$, 共得到 3 个距离, 最短距离值 d_m 对应要求的一对特征向量, 记作 $\mathbf{p}v_a^{12}, \mathbf{p}v_b^{12}$;

(c) 求出图像平面上过 $\mathbf{p}v_a^{12}, \mathbf{p}v_b^{12}$ 的直线 l_{12}' , 即 l_{12} 在图像平面上的投影;

(d) 用同样的方法求得 l_{13} 在图像平面上的投影 l_{13}' ;

(e) l_{12}' 与 l_{13}' 的交点 pC_1 便为圆心 C_1 在图像平面上的投影。

2.2.3 由销孔位置确定旋转矩阵 \mathbf{R}

2.2.1 中的方法仅得到 \mathbf{H}_1 旋转矩阵 \mathbf{R}_1 的第三个列向量 \mathbf{r}_3 。用销孔位置 O_1 约束可以消除绕法兰盘圆平面法向量的旋转自由度, 进而求得完整的旋转矩阵 \mathbf{R}_1 。记 $\mathbf{R}_1 = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3]$, 其中 \mathbf{r}_3 为摄像机坐标系下的法兰盘圆平面法向量, \mathbf{t}_1 为摄像机坐标系下的法兰盘圆心坐标, 均由 2.2.1 节方法求出。不失一般性, 可以假设法兰盘平面位于世界坐标系的 xy 平面上, 即 $z=0$, 且法兰盘坐标系和世界坐标系的各轴分别重合。记图 3 中销

孔中心 O_1 到法兰盘圆心 O 的距离为 d , 则有^[11]:

$$s \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}_1] \begin{bmatrix} -d \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

其中 \mathbf{A} 为摄像机内部参数矩阵, $[u_0 \ v_0]^T$ 为销孔圆心在图像上的投影点坐标。

依据 2.2.2 节的方法, u_0, v_0 可通过求取消孔中心与任意两个螺纹孔中心连线的投影交点得到, 如图 6 所示。

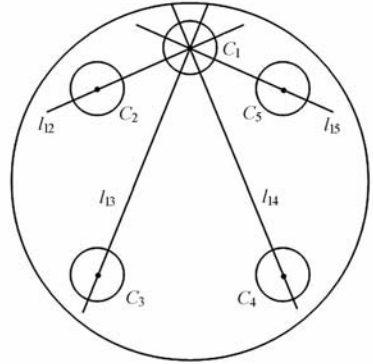


图 6 求取法兰盘销孔中心投影

Fig. 6 Calculating pinhole center projection

法兰盘上共有 4 个螺纹孔, 可以由最小二乘法求取到 $l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{15}$ 距离的平方和最小的点作为投影点 $[u_0, v_0]^T$ 的优化解。

$$\text{记 } \mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \end{bmatrix}, \mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_1 = \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ 则有:}$$

$$s \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & t_{11} \\ r_{12} & r_{22} & t_{12} \\ r_{13} & r_{23} & t_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -d \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

\mathbf{A} 由摄像机标定得到, u_0, v_0 已由前述方法获得, 因此 a, b, c 均可求出。

由(12)有方程组:

$$t_{11} - r_{11} \cdot d = s \cdot a, \quad (13)$$

$$t_{12} - r_{12} \cdot d = s \cdot b, \quad (14)$$

$$t_{13} - r_{13} \cdot d = s \cdot c. \quad (15)$$

\mathbf{r}_1 是单位向量, 有:

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1, \quad (16)$$

联立(13)(14)(15)(16)便可求出 r_{11}, r_{12} ,

r_{13} , 即得 r_1 。

由右手坐标系准则可得:

$$r_2 = r_3 \times r_1, \quad (17)$$

便得旋转变换矩阵:

$$R_1 = [r_1 \ r_2 \ r_3]. \quad (18)$$

至此左机器人默认工具坐标系与摄像机坐标系间的变换关系 R_1, t_1 均已求出, 即得 H_1 。

2.2.4 共面多位置图像融合提高标定精度

将法兰盘移动到五个共面的不同位置, 相对位置及编号如图 7 所示:

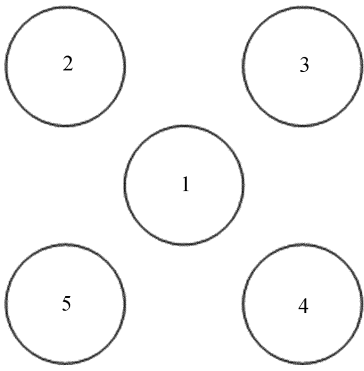


图 7 法兰盘的五个共面位置

Fig. 7 Five coplanar poses of the flange

五个位置处分别拍摄图像, 提取法兰盘的椭圆轮廓, 并将各法兰盘轮廓拼接到同一幅图像上。五个位置处解算得到的法兰盘圆平面法向量分别记为: $r_{P1}, r_{P2}, r_{P3}, r_{P4}, r_{P5}$, 五个椭圆中心点分别记为 $e_{P1}, e_{P2}, e_{P3}, e_{P4}, e_{P5}$ 。由于畸变随到图像中心距离的增大而非线性增大, 越远离图像中心的椭圆轮廓所提供信息的可信度也越差, 根据经验, 该可信度近似服从二维高斯分布。以图像中心作为原点, 构建图像点的二维高斯函数 $F(e)$, 设定 F 的参数使图像坐标系长轴与边界交点处的函数值等于原点处函数值的 $1/25$:

$$F(384, 0) = 0.04F(0, 0). \quad (19)$$

以各椭圆轮廓中心点处高斯函数的取值作为系数:

$$k_i = F(e_{Pi}). \quad (20)$$

加权得到融合后的法兰盘圆平面法向量坐标

$$r_P: \begin{cases} r_P' = k_1 F(e_{P1}) + k_2 F(e_{P2}) + k_3 F(e_{P3}) + \\ k_4 F(e_{P4}) + k_5 F(e_{P5}) \\ r_P = r_P' / \| r_P' \|_2 \end{cases} \quad (21)$$

2.3 求取 H_3

由一台激光跟踪仪作为中转工具, 利用机器人三次单轴旋转的方法分别求解跟踪仪与两台单机器人的坐标系转换关系^[12], 便可实现双机器人坐标系统一。

在机器人末端法兰盘上固定一个刚性良好的工件, 将跟踪仪的靶标球安装在该工件上面, 分别控制机器人 1 轴、3 轴、4 轴做单轴旋转运动, 并对靶标球心的轨迹进行空间圆拟合, 由各法向量坐标获取机器人坐标系与跟踪仪坐标系间的旋转矩阵, 并由各圆半径配合机器人读数得出平移矢量, 便可得单台机器人和跟踪仪的坐标转换关系。

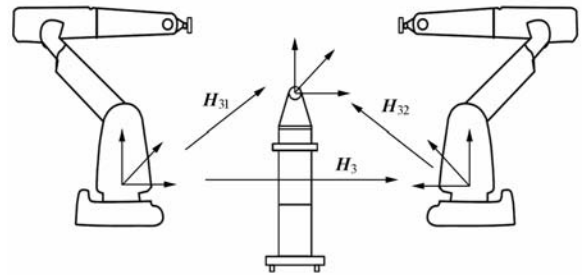


图 8 双机器人坐标系转换

Fig. 8 Coordinate transformation between two robots

如图 8 所示, 设左机器人到跟踪仪的坐标转换关系为 H_{31} , 右机器人到跟踪仪的坐标转换关系为 H_{32} , 则左机器人到右机器人的坐标转换关系 H_3 为:

$$H_3 = H_{31}^{-1} H_{32}, \quad (22)$$

值得一提的是, 在双机器人仿真测量系统中 H_3 的求取即基坐标系统是必要前提, 并不是为手眼标定而专门进行。

通过机器人控制器读数得到 H_2 和 H_4 , 结合求得的 H_1 和 H_3 , 由(1)便可得出手眼关系 H_{CG} 。

3 实验与结果

3.1 单幅图像标定

控制两台机器人运动到适当的相对位置, 在暗背景下拍摄法兰盘图像如图 9 所示。

提取椭圆轮廓, 按 2.2 节方法解算法兰盘空间位姿, 利用销孔圆心投影消除旋转不确定度, 得出 H_1 。由机器人读数和双机器人坐标系统一结



(a) 法兰盘图像 (b) 椭圆轮廓
 (a) Flange image (b) Ellipse contour of flange

图 9 法兰盘图像和椭圆轮廓

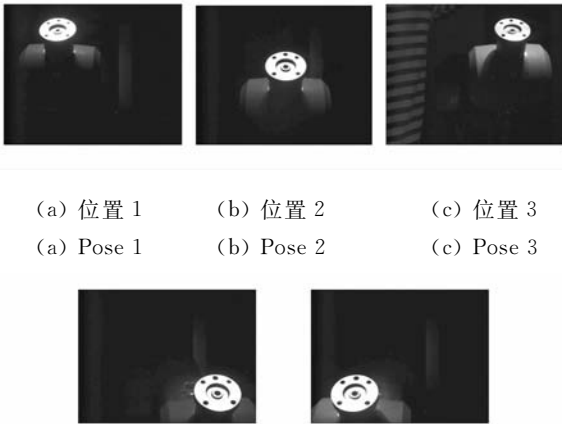
Fig. 9 Flange image and its ellipse contour

果可得 H_2, H_3, H_4 , 由式(1)得手眼关系:

$$H_{CG} = \begin{bmatrix} -0.011 & -1.000 & -0.004 & 59.838 \\ 1.000 & 0.001 & 0.010 & 1.173 \\ -0.005 & -0.004 & 1.000 & 104.261 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 共面多位置图像融合标定

将法兰盘运动到如图 7 所示的五个共面不同位置, 分别拍摄图像, 如图 10 所示。



(a) 位置 1 (b) 位置 2 (c) 位置 3
 (a) Pose 1 (b) Pose 2 (c) Pose 3

(d) 位置 4 (e) 位置 5
 (d) Pose 4 (e) Pose 5

图 10 法兰盘共面位置图像

Fig. 10 Images of coplanar flange poses

提取五个位置处的椭圆轮廓, 将其拼接在一幅图像上, 如图 11 所示。

分别求解五个位置处的法兰盘圆平面法向量 $r_{P1}, r_{P2}, r_{P3}, r_{P4}, r_{P5}$, 并且按 2.2.4 节所述方法求出融合系数为: $k_1 = 0.968 6, k_2 = 0.284 6, k_3 = 0.274 5, k_4 = 0.213 1, k_5 = 0.247 5$, 得到融合后的法向量坐标:

$$r_P = [0.012 2; -0.700 5; -0.713 6]^T$$

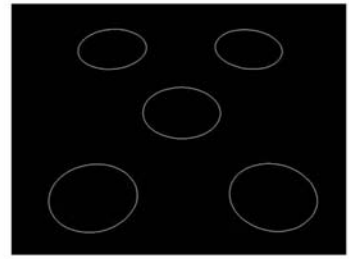


图 11 拼接的法兰盘轮廓

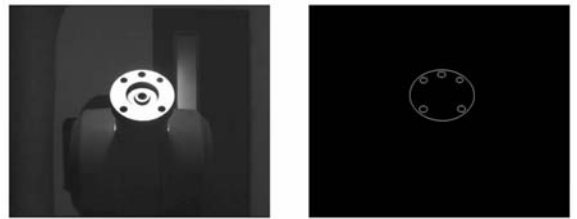
Fig. 11 Fused flange image from 5 poses

按前述步骤, 得到手眼关系为:

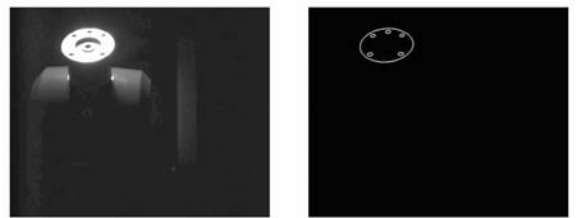
$$H_{CG} = \begin{bmatrix} -0.011 & -1.000 & -0.010 & 61.930 \\ 1.000 & 0.001 & 0.010 & 0.995 \\ -0.005 & -0.010 & 1.000 & 104.174 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 精度验证

将法兰盘运动到另外两个不同姿态, 记录机器人读数作为当前姿态的真值, 并由求得的手眼关系进行反解, 与机器人读数对比, 验证姿态误差。拍摄得到的图像和自动提取的椭圆轮廓如图 12 所示。



(a) 法兰盘图像 1 (b) 椭圆轮廓 1
 (a) Flange image 1 (b) Ellipse contour of flange 1



(c) 法兰盘图像 2 (d) 椭圆轮廓 2
 (c) Flange image 2 (d) Ellipse contour of flange 2

图 12 法兰盘验证姿态图像和椭圆轮廓

Fig. 12 Flange images at testing poses and their ellipse contours

3.3.1 单幅图像标定

分别求得两个位置处摄像机坐标系下的法兰

盘圆平面法向量坐标,由手眼标定结果 \mathbf{H}_{CG} 和 \mathbf{H}_3 、 \mathbf{H}_4 转换到左机器人基坐标系下得:

$$\mathbf{r}_{L01} = [0.769\ 4; -0.002\ 9; 0.638\ 7]^T,$$

$$\mathbf{r}_{L02} = [0.711\ 5; -0.003\ 5; 0.702\ 7]^T.$$

左机器人的法兰盘法向量坐标读数为:

$$\mathbf{r}_{L1} = [0.7660; 0; 0.6387]^T,$$

$$\mathbf{r}_{L2} = [0.7071; 0; 0.7071]^T.$$

可知法向量误差为:

$$\Delta_{\theta 01} = 0.006\ 0\ \text{rad} = 0.345^\circ,$$

$$\Delta_{\theta 02} = 0.007\ 1\ \text{rad} = 0.410^\circ.$$

3.3.2 共面多位置图像融合标定

分别求得两个位置处摄像机坐标系下的法兰盘圆平面法向量坐标,由手眼标定结果 \mathbf{H}_{CG} 和 \mathbf{H}_3 、 \mathbf{H}_4 转换到左机器人基坐标系下得:

$$\mathbf{r}_{L11} = [0.765\ 6; -0.003\ 2; 0.643\ 2]^T,$$

$$\mathbf{r}_{L12} = [0.707\ 4; -0.003\ 8; 0.706\ 8]^T.$$

\mathbf{r}_{L11} 、 \mathbf{r}_{L12} 与机器人读数 \mathbf{r}_{L1} 、 \mathbf{r}_{L2} 间的误差为:

$$\Delta_{\theta 11} = 0.003\ 3\ \text{rad} = 0.187^\circ,$$

$$\Delta_{\theta 12} = 0.004\ 0\ \text{rad} = 0.229^\circ.$$

3.3.3 精度对比

对比 $\Delta_{\theta 11}$ 、 $\Delta_{\theta 12}$ 与 $\Delta_{\theta 01}$ 、 $\Delta_{\theta 02}$ 可知,共面多位置融合标定精度比单幅图像标定精度分别提高了46%和44%。

4 结 论

利用法兰盘圆形几何特征约束的机器人手眼标定方法,不需要借助外部靶标等辅助设备,利用一幅图像即可完成标定,并且无需限制目标机器人特定的姿态,可以确保选取最佳拍摄位置而获得质量高的图像,有利于提高标定精度。若采用共面多位置图像融合,则可进一步提高标定精度。该方法避免了传统方法普遍存在的遮挡和转站幅度小造成的精度低等问题,操作简便,易于实现。但该方法的标定精度取决于法兰盘的几何特征精度,因此当法兰盘加工精度不够时,该方法的实用性受到限制。一般地,机器人的法兰盘的加工精度可以满足手眼标定的精度要求。

参考文献:

- [1] ROGER Y T, REIMAR K L. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-357.
- [2] 毛剑飞. 机器人视觉标定及离线编程技术研究 [D]. 杭州:浙江大学,2004.
MAO J F. *Research on computer vision calibration and off-line programming* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [3] 朱振友,徐爱杰,林涛,等. 机器人视觉的“手-眼”关系快速标定算法 [J]. *光学技术*, 2004, 30(2): 150-152.
ZHU ZH Y, XU A J, LIN T, et al.. High-speed calibration method for the relationship of the eye2in2hand of robot vision [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 150-152. (in Chinese)
- [4] 王一,刘常杰,任永杰,等. 通用机器人视觉检测系统的全局校准技术 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 3028-3033.
WANG Y, LIU CH J, REN Y J, et al.. Global calibration of visual inspection system based on universal robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 3028-3033. (in Chinese)
- [5] KLAUS H S, GERD H. Optimal hand-eye calibration[C]. *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, P. R. China*, 2006: 4647-4653.
- [6] GIAN L M, STEFANO S, FABIO M, et al.. Planar catadioptric stereo: single and multi-view geometry for calibration and localization[C]. 2009 *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan*, 2009: 1510-1515.
- [7] Product manuals. *ABB Robot Documentation-IRB1400 M2004* [M]. Robotics, Sweden: ABB Automation Technologies AB, 2005.
- [8] REZA S R, IVO T, KENNETH C S, et al.. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(5): 624-638.
- [9] 魏振忠,赵征,张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 685-691.

- WEI ZH ZH, ZHAO ZH, ZHANG G J. Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(3):685-691. (in Chinese)
- [10] ZHAO ZH, WEI ZH ZH, ZHANG G J. Estimation of projected circle centers from array circles and its application in camera calibration [C]. 2009 *Second Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications, Wuhan, P.R. China; PACIIA*, 2009: 182-185.
- [11] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005. ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press,2005. (in Chinese)
- [12] 张博, 魏振忠, 张广军. 机器人坐标系与激光跟踪仪坐标系的快速转换方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2010,31(9):1986-1990.
- ZHANG B, WEI ZH ZH, ZHANG G J. Rapid coordinate transformation between a robot and a laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010,31(9):1986-1990. (in Chinese)

作者简介:



魏振忠(1972—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,1997年于北京石油化学工程学院获得学士学位,1999年、2003年于北京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,现为精密光机电一体化技术教育部重点实验室副主任,主要研究方向为机器视觉、光电测试等。E-mail: zhenzhongwei@buaa.edu.cn



张博(1987—),男,山东聊城人,硕士研究生,2008年于北京航空航天大学获得学士学位,主要研究方向为计算机视觉、图像处理等。E-mail: zaibao@gmail.com



张广军(1965—),男,天津人,教授,博士生导师,1986年、1989年、1991年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为北京航空航天大学副校长,精密光机电一体化技术教育部重点实验室主任,主要研究方向为机器视觉、光电精密测量等。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn