

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.025

基于固定视点的视觉标定算法研究

王宪伦, 薛 潭

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要:针对在固定视点中机器视觉标定过程复杂、效率低、标定精度不高的问题,对目前普遍应用的摄像机标定和手眼标定算法进行了研究,提出了可一次性完成固定视点的视觉标定算法。利用实验室的 MOTOMAN-UP6 工业机器人对该标定算法进行了验证,首先由机器人末端夹持一个棋盘格完成一系列的运动,每次运动结束时摄像机拍摄一幅棋盘格图像,并记录下机器人末端的位姿,等所有运动完成后,采用张正友标定算法对摄像机进行标定,接着采用基于最小二乘法的标定算法对摄像机与基座关系进行简便高效的标定。研究结果表明:该算法标定过程简单、求解速度快并且结果精度高,具有很强的实用性。

关键词:固定视点;标定算法;最小二乘法

中图分类号:TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0943-05

Camera calibration algorithm based on stationary view

WANG Xian-lun, XUE Tan

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Aiming at the problem of complex process, low efficiency and low accuracy in camera calibration, the widely used camera calibration and hand-eye calibration algorithm was studied, and a new camera calibration algorithm based on stationary view that can be completed only once was proposed. This calibration algorithm was tested by MOTOMAN-UP6 industrial robots in laboratory. Firstly, a chess board was held by robot manipulator and a series of movements was completed, and in the end of each movement, one chess board picture was grabbed by the camera and the pose of the manipulator was recorded. After all movements were completed, the camera calibration was done by Zhang's algorithm and the relationship calibration between the camera and the robot base was done by the calibration algorithm base on least square method. The procedure is simple and efficient. The results indicate that this algorithm operates simply, solves quickly and precisely, and has strong practicability.

Key words: stationary view; calibration algorithm; least square method

0 引 言

在机器视觉应用中,摄像机和机械手主要有两种位置关系,第一种是摄像机和机械手关系固定(也称非固定视点的机器视觉);第二种是摄像机和机械手分离,眼与基座的关系固定(也称固定视点的机器视觉)^[1]。目前机器视觉的应用中大多数都是采用非固定视点^[2-6]。但有些情况下,比如服务类的机器人,机械手上不方便安装摄像头,必须采用固定视点的机器视觉方案。固定视点与非固定视点相比,相机位置标定过程类似,核心问题都是解决手眼矩阵基本方程式

$AX = XD$ 。满足该方程式的解有无穷多个,一般的方法无法给出该方程的解。国内外学者对该问题也做了大量的研究, Li^[7]采用经典 Tsai^[8]标定方法,将手眼矩阵分成旋转和平移两个部分,先求旋转部分,然后对旋转部分正交化再求平移部分,但平移解不再满足手眼矩阵。Nicolas^[9]采用直积将手眼矩阵转换成线性方程组的形式,但在求解中舍去一个方程,使得算法在测量噪声明显的情况下不稳定。

固定视点的相机标定主要包含两个方面:(1)摄像机标定;(2)摄像机与基座关系的标定。

本研究采用张正友标定算法对摄像机进行标

定^[10],提出一种基于最小二乘法的摄像机与基座关系的标定算法。

1 摄像机与基座关系的标定

笔者研究的系统中,摄像机固定在一侧,与机器人基座的位姿关系是固定的,研究目的是计算机器人基座和摄像机的位置关系,即计算两个坐标系的旋转和平移矩阵(也称做齐次变换矩阵),一个坐标系的原点位于机器人基座,另一个坐标系的原点位于摄像机中心。示意图如图 1 所示。

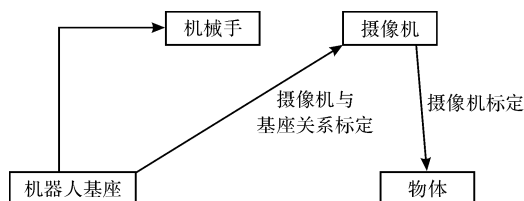


图 1 摄像机标定以及摄像机与基座的关系标定

思路是让机械手夹持一个棋盘格,在摄像机视野范围内,到达 n 个位置,在每个位置处,拍摄一幅棋盘格图像并记录机械手的位姿信息。标定过程中各坐标系的变化如图 2 所示。

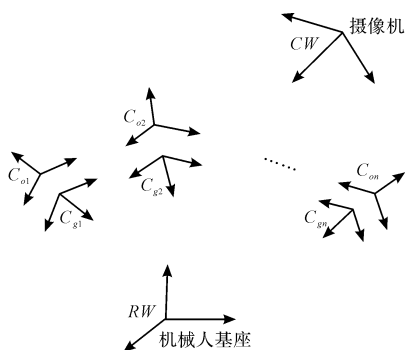


图 2 标定过程中各坐标系的变化

注: C_{gi} —机械手坐标系,固定在机械手末端夹持器上,机械手运动时,该坐标系随之改变; C_{oi} —标定物坐标系,本研究中使用的标定物为 9×6 的棋盘格,原点位于第一个角点,标定过程中,可通过求取相机外参的方式求得该坐标系相对于摄像机坐标系 CW 的位置关系; CW —摄像机坐标系, Z 轴与摄像机光轴重合, X, Y 轴平行于图像的 X, Y 方向(理论情况下如此,但实际情况中由于摄像机存在畸变,会有部分误差存在); RW —机器人基座坐标系,固定在机器人工作平台,当机器人各关节运动时,可以知道机械手坐标系 C_{gi} 相对于机器人基座坐标系的位置关系;上述所有的坐标系均为笛卡尔坐标系

各坐标系之间的齐次变换矩阵定义如图 3 所示。

从图中可以看出:

$$H_{oij} = H_{oi}^{-1} H_{oj} \quad (1)$$

$$H_{gij} = H_{gi}^{-1} H_{gj} \quad (2)$$

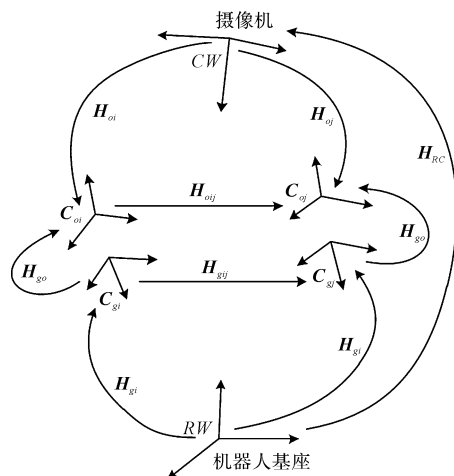


图 3 各坐标系之间的齐次变换矩阵

注: H_{oi}, H_{oj} —标定物在 i, j 位置相对于摄像机的齐次变换矩阵; H_{gi}, H_{gj} —机械手在 i, j 位置相对于基座的齐次变换矩阵; H_{oij} —标定物从 i 位置到 j 位置的齐次变换矩阵; H_{gij} —机械手从 i 位置到 j 位置的齐次变换矩阵; H_{go} —机械手到标定物的齐次变换矩阵; H_{rc} —基座到摄像头的齐次变换矩阵; R —旋转矩阵; t —平移向量

那么未知量只剩下 H_{go} 和 H_{rc} ,接下来详细讲解如何依次求出这两个未知量:

$$H = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

式中: H_{rc} —最终要求解的关系矩阵;通过求取摄像机外参可以得到 H_{oi} 和 H_{oj} , H_{gi} 和 H_{gj} 可通过求解机器人正运动学得到。

1.1 标定的基本方程

参照图 3,设空间某点 P 在以上 4 个坐标系 $C_{oi}, C_{oj}, C_{gi}, C_{gj}$ 的坐标分别是 $P_{oi}, P_{oj}, P_{gi}, P_{gj}$,则有以下关系^[11]:

$$P_{oi} = H_{oij} P_{oj} \quad (3)$$

$$P_{oi} = H_{go}^{-1} P_{gi} \quad (4)$$

$$P_{gi} = H_{gij} P_{gj} \quad (5)$$

$$P_{oj} = H_{go}^{-1} P_{gj} \quad (6)$$

由式(3)和式(6)得:

$$P_{oi} = H_{oij} H_{go}^{-1} P_{gj} \quad (7)$$

由式(4)和式(5)得:

$$P_{oi} = H_{go}^{-1} H_{gij} P_{gj} \quad (8)$$

比较式(7)和式(8)得:

$$H_{oij} H_{go}^{-1} = H_{go}^{-1} H_{gij} \quad (9)$$

变形得:

$$H_{go} H_{oij} = H_{gij} H_{go} \quad (10)$$

式中: H_{oij} —通过式(1)求解, H_{gij} —通过式(2)求解出。

式(10)为摄像机位置标定的基本方程式,其物理依据就是机械手移动前后,机械手和标定物的相对位

置不变。如果式(10)中的齐次变换矩阵都用相应的旋转矩阵和平移向量写出,那么式(10)可写为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_o & \mathbf{t}_o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_g & \mathbf{t}_g \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)展开得:

$$\mathbf{R}_g \mathbf{R} = \mathbf{R} \mathbf{R}_o \quad (12)$$

$$\mathbf{R} \mathbf{t}_o + \mathbf{t} = \mathbf{R}_g \mathbf{t} + \mathbf{t}_g \quad (13)$$

式(12)和式(13)中已知的是 $\mathbf{R}_o, \mathbf{R}_g, \mathbf{t}_o, \mathbf{t}_g$,且 $\mathbf{R}, \mathbf{R}_g, \mathbf{R}_o$ 都是正交单位矩阵,需要求解的是 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{t}$ 。

1.2 基于最小二乘法的标定方法

当处理三维空间的时候,常常用 3×3 的矩阵 $\mathbf{R}$ 定义空间任意点的运动,同时该运动可看作围绕某 k 轴旋转 θ 角, k 轴与 θ 角由 $\mathbf{R}$ 矩阵唯一确定。此时将 $\mathbf{R}$ 矩阵写成 $\mathbf{R}(k, \theta)$, k —单位向量,表示旋转轴的方向, θ 角的正、负按右手法则。若 $\mathbf{R} = \mathbf{R}(k, \theta)$,则:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\theta} \end{bmatrix} \mathbf{U}^{-1} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{R}$ 的3个特征值分别为 $1, e^{-j\theta}, e^{j\theta}$; $\mathbf{U}$ — $\mathbf{R}$ 的特征矩阵,其中对应于特征值1的特征向量为 $\mathbf{k}$ (即 $\mathbf{U}$ 的第一列为 $\mathbf{k}$)。

由式(12)得 $\mathbf{R}_g = \mathbf{R} \mathbf{R}_o \mathbf{R}^{-1}$,即 $\mathbf{R}_g$ 与 $\mathbf{R}_o$ 为相似矩阵,有相同的特征值。由于旋转矩阵的特征值由旋转角唯一确定,所以 $\mathbf{R}_g$ 与 $\mathbf{R}_o$ 的旋转角必然相等,将该旋转角记作 θ ,式(12)写成:

$$\mathbf{R}_g(\mathbf{k}_g, \theta) \mathbf{R} = \mathbf{R} \mathbf{R}_o(\mathbf{k}_o, \theta) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{k}_g, \mathbf{k}_o$ — $\mathbf{R}_g$ 与 $\mathbf{R}_o$ 的旋转轴。

由于 $\mathbf{R}_g = \mathbf{R} \mathbf{R}_o \mathbf{R}^{-1}$,可知 $\mathbf{R}_g$ 的特征矩阵为 $\mathbf{R} \mathbf{U}$,其中: $\mathbf{U}$ — $\mathbf{R}_o$ 的特征矩阵。 $\mathbf{U}$ 的第一列向量为 $\mathbf{k}_o$,所以 $\mathbf{R}_g$ 的特征矩阵的第一列为 $\mathbf{R} \mathbf{k}_o$,那么就得到:

$$\mathbf{k}_g = \mathbf{R} \mathbf{k}_o \quad (16)$$

注意: $\mathbf{R}_g$ 与 $\mathbf{R}_o$ 是已知数,分别是由机器人控制器和摄像机外参数得到,通过罗德里格斯变换可以求得其旋转轴 $\mathbf{k}_g$ 和 $\mathbf{k}_o$ 。

最小二乘法是一种比较精确和常用的参数估计的方法。它的判据是:在忽略自变量 x_i 测量误差的前提下,对等精度测量得到的相应的因变量 y_i ,拟合曲线 $y = f(x)$ 使得与 x_i 相应的测量值 y_i 与曲线上 $x = x_i$ 对应的点 $f(x_i)$ 的残差的平方和 $[y_i - f(x_i)]^2$ 取得最小值。对于式(16)记:

$$\mathbf{k}_{g,i} = (g_{1,i} \ g_{2,i} \ g_{3,i})^T \quad (17)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{k}_{o,i} = (o_{1,i} \ o_{2,i} \ o_{3,i})^T \quad (19)$$

其中: i —第几次旋转平移运动, $1 \leq i \leq n$ 。那么可知:

$$g_{j,i} = a_{j,1} o_{1,i} + a_{j,2} o_{2,i} + a_{j,3} o_{3,i} \quad (20)$$

式中: j —矩阵的列数, $j = 1, 2, 3$ 。

可使:

$$\sum_{i=1}^N \delta_i^2 = \sum_{i=1}^N [g_{j,i} - (a_{j,1} o_{1,i} + a_{j,2} o_{2,i} + a_{j,3} o_{3,i})]^2 \quad (21)$$

最小,从而得到 $a_{j,1}, a_{j,2}, a_{j,3}$ 最佳的参数估计。令:

$$\begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\partial a_{j,1}} = -2 \sum_{i=1}^N (g_{j,i} o_{1,i} - a_{j,1} o_{1,i}^2 - a_{j,2} o_{2,i} o_{1,i} - a_{j,3} o_{3,i} o_{1,i}) = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\partial a_{j,2}} = -2 \sum_{i=1}^N (g_{j,i} o_{2,i} - a_{j,1} o_{1,i} o_{2,i} - a_{j,2} o_{2,i}^2 - a_{j,3} o_{3,i} o_{2,i}) = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\partial a_{j,3}} = -2 \sum_{i=1}^N (g_{j,i} o_{3,i} - a_{j,1} o_{1,i} o_{3,i} - a_{j,2} o_{2,i} o_{3,i} - a_{j,3} o_{3,i}^2) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

求解上述方程组可解出 $a_{j,1}, a_{j,2}, a_{j,3}$,即求出旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 。

同样,使用最小二乘法求平移矩阵 $\mathbf{t}$,式(13)可写成:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{o1,i} \\ t_{o2,i} \\ t_{o3,i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11,i} & g_{12,i} & g_{13,i} \\ g_{21,i} & g_{22,i} & g_{23,i} \\ g_{31,i} & g_{32,i} & g_{33,i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{g1,i} \\ t_{g2,i} \\ t_{g3,i} \end{pmatrix} \quad (23)$$

使下式最小,得到 t_1, t_2, t_3 最佳的参数估计:

$$\sum_{i=1}^N \delta_i^2 = \sum_{i=1}^N [w_i - (x_i t_1 + y_i t_2 + z_i t_3)]^2 \quad (24)$$

式中: $x_i = g_{11,i} + g_{21,i} + g_{31,i} - 1, y_i = g_{12,i} + g_{22,i} + g_{32,i} - 1, z_i = g_{13,i} + g_{23,i} + g_{33,i} - 1, w_i = (a_{11} + a_{21} + a_{31}) t_{o1,i} + (a_{12} + a_{22} + a_{32}) t_{o2,i} + (a_{13} + a_{23} + a_{33}) t_{o3,i} - (t_{g1,i} + t_{g2,i} + t_{g3,i})$ 。令:

$$\begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\partial t_1} = -2 \sum_{i=1}^N (w_i x_i - t_1 x_i^2 - t_2 x_i y_i - t_3 x_i z_i) = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\partial t_2} = -2 \sum_{i=1}^N (w_i y_i - t_1 x_i y_i - t_2 y_i^2 - t_3 y_i z_i) = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{\partial t_3} = -2 \sum_{i=1}^N (w_i z_i - t_1 x_i z_i - t_2 y_i z_i - t_3 z_i^2) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

求解上述方程组可解出 t_1, t_2, t_3 , 即求出平移矩阵 t 。至此已经求出了机械手到标定物的齐次变换矩阵 H_{go} , 那么基座到摄像头的齐次变换矩阵:

$$H_{RC} = H_{gi} H_{go} H_{oi}^{-1}$$

(26)

综上, 在固定视点的机器视觉中, 可通过以下步骤求解摄像头与基座的关系:

- (1) 机械手夹持棋盘格, 在摄像机视野范围内, 到达 n 个位置(由于需要这 n 幅图像对摄像机进行标定, 所以 $n > 8$), 在每个位置处, 摄像机拍摄一幅棋盘格图像并记录机械手的位姿矩阵 H_{gi} ;
- (2) 输入上一步得到的 n 幅图像, 对摄像机标定, 并计算每幅图像摄像机的外参矩阵 H_{oi} ;
- (3) 通过式(1) 和式(2) 求解 H_{oij} 和 H_{gij} ;
- (4) 通过罗德里格斯变换求出 H_{oij} 和 H_{gij} 的旋转

- 轴 $k_{o,i}$ 和 $k_{g,i}$;
- (5) 通过式(22) 求机械手到棋盘格的齐次变换矩阵 H_{go} 的旋转矩阵 R , 并通过式(25) 求出 H_{go} 的平移矩阵 t ;
- (6) 利用式(26) 最终求出摄像机和机器人基座的关系。

2 实 验

实验采用 MOTOMAN-UP6 工业机器人以及环宇飞扬 3 920 摄像头, 分辨率为 640×480 。棋盘格规格为 8×5 , 方格大小为 15 mm。实验中左侧机器人夹持摄像头固定不动(固定视点), 右侧机器人夹持棋盘格。

右侧机器人夹持棋盘格运动到 12 个位置, 机器人姿态坐标如表 1 所示。拍摄的图片如图 4 所示。

表 1 12 个位置的机器人姿态参数

	<i>X</i> /mm	<i>Y</i> /mm	<i>Z</i> /mm	<i>TX</i> /deg	<i>TY</i> /deg	<i>TZ</i> /deg
Positon1	1 287.892	128.164	221.787	−150.94	16.21	−111.92
Positon2	1 303.438	96.891	232.930	−147.67	6.58	−95.31
Positon3	1 309.563	163.251	240.585	−159.06	26	−133.93
Positon4	1 214.394	154.119	178.676	−156.37	23.62	−127.52
Positon5	1 323.519	120.399	247.219	−147.15	2.35	−88.69
Positon6	1 335.177	143.540	255.971	−157.94	25.08	−131.33
Positon7	1 322.214	117.06	190.163	−153.30	20.01	−119.27
Positon8	1 290.813	114.333	238.806	−147.34	4.37	−91.82
Positon9	1 387.211	157.75	275.756	−139.49	19.29	−91.12
Positon10	1 342.048	162.399	266.979	−144.53	24.86	−85.32
Positon11	1 376.456	133.216	268.906	−135.03	5.17	−82.66
Positon12	1 386.678	156.199	252.744	−149.65	35.27	−122.11

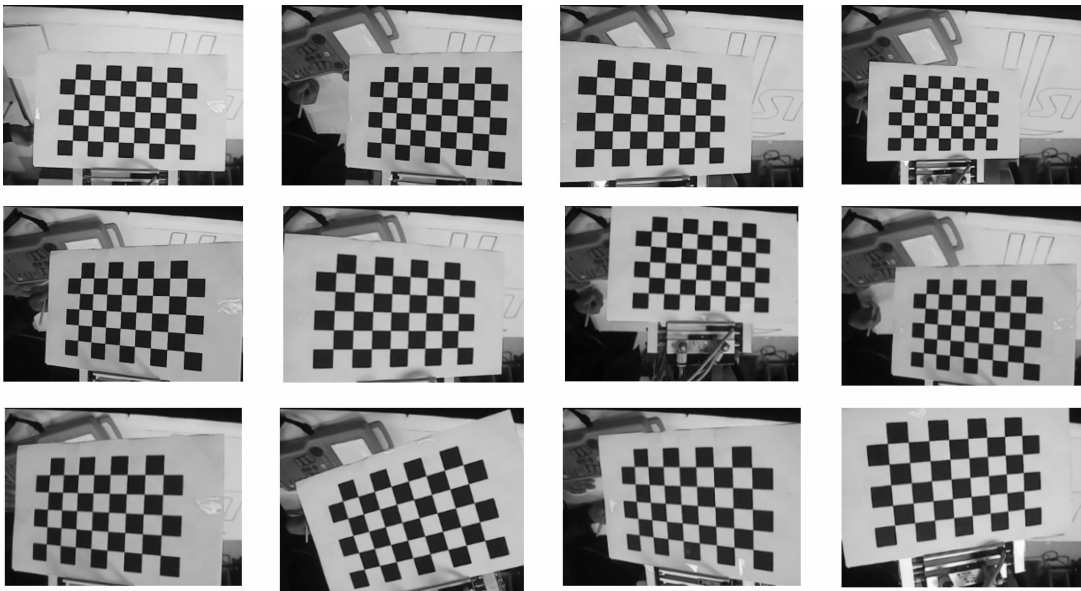


图 4 12 幅标定图片

本研究完成对相机的标定, 并且得到 12 幅图像相对于摄像机的姿态矩阵, 利用本研究的标定算法求解出摄像机和机器人基座关系的旋转矩阵和平移量, 结果如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.144\ 1 & -0.561\ 2 & -0.809\ 8 \\ -0.923\ 3 & -0.112\ 0 & -0.095\ 0 \\ 0.014\ 5 & 0.819\ 4 & -0.590\ 2 \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} 1\ 542.422\ 5 \\ 138.208\ 7 \\ 518.536\ 8 \end{bmatrix}$$

算法精度验证实验如图 5 所示。本研究把棋盘格放到工作台上固定。首先笔者以棋盘格的原点标定用户坐标系,得到工具坐标系相对于棋盘格的位姿 H_{og} ;从机器人控制读出工具坐标系相对于基座的位姿 H_{bg} ;用摄像头拍摄棋盘格,得到棋盘格相对于摄像机的位姿 H_{co} ,结合本研究算法求解出摄像机和基座的关系 H_{rc} 。比较 $H_{rc}H_{co}$ 和 $H_{bg}H_{og}^{-1}$ 的结果即可以得到算法的误差值。

5 组与经典 Tsai 算法的对比实验,其试验结果如表 2 所示。

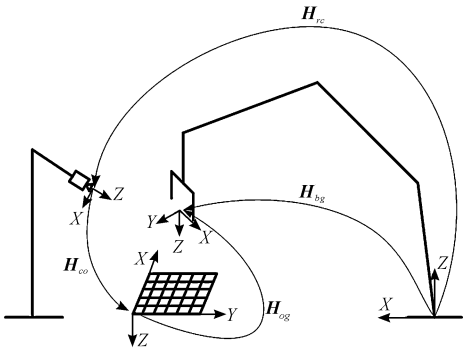


图 5 验证实验

表 2 5 组与 Tsai 算法的对比实验结果

组别	Tsai 算法			本研究算法		
	位移误差/mm	旋转误差/deg	运行时间/ms	位移误差/mm	旋转误差/deg	运行时间/ms
第一组	±0.71	±0.14	6	±0.56	±0.16	3
第二组	±0.63	±0.19	10	±0.60	±0.17	6
第三组	±0.68	±0.17	9	±0.53	±0.12	4
第四组	±0.55	±0.08	8	±0.52	±0.07	5
第五组	±0.75	±0.19	8	±0.42	±0.08	4

可以看出,本研究算法在标定精度上较 Tsai 算法求解速度提高了近一倍,提高了机器人的标定效率。

3 结束语

本研究通过研究现有的手眼标定系统,提出了固定视点的视觉标定算法。本研究算法通过机器人的 9 个位姿参数以及各个位姿对应的棋盘格图像,可一次性完成摄像机的标定和摄像机-机器人基座关系的标定,操作简单。算法在参数估计中采用最小二乘法,使误差的平方和最小,可得到最佳的参数估计,位移的标定误差在 0.6 mm 内,旋转角度的标定误差在 0.2°内,保证了精度的同时,标定的速度较经典 Tsai 算法也提高了近一倍。

参考文献(References):

[1] 马颂德,张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998.

[2] MALM H, HEYDEN A. A new approach to hand-eye calibration[J]. **International Conference on Pattern Recognition**,2000,1(1):525-529.

[3] HIRSH R L, DESOUZA G N, KAK A C. An iterative approach to the hand-eye and base-world calibration problem [J]. **IEEE International Conference on Robotics and**

Automation,2001(3):2171-2176.

[4] HUANG C, CHEN D, TANG X. Robotic hand-eye calibration based on active vision[C]. **International Symposium on Computational Intelligence and Design**, Hangzhou:[IEEE], 2015.

[5] MA Qian-li, LI Hai-yuan, CHIRIKJIAN G S. New probabilistic approaches to the AX = XB hand-eye calibration without correspondence[C]. **2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, Stockholm: IEEE,2016.

[6] XIE Y, YANG X, LIU Z. Hand-eye calibration method based on auxiliary target[C]//**2016 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems**, Chengdu: IEEE,2016.

[7] 李明超. 基于 OpenCV 的机器人双目手眼标定系统的研究与实现[D]. 青岛:山东科技大学机械电子工程学院, 2012.

[8] TSAI R Y, LENZ R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration [J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**,1989, 5(3):345-358.

[9] ANDREFF N, HORAUD R, ESPIAN B. Robot hand-eye calibration using structure-from-motion[J]. **International Journal of Robotics and Research**,2001,20(3):228-248P

[10] 于仕琪,刘瑞祯. 学习 OpenCV[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[11] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: