

一种机器人工具坐标系标定方法

刘成业, 李文广, 马世国, 邴健斌, 刘广亮, 吴昊

(山东省科学院自动化研究所, 山东省机器人与制造自动化技术重点实验室, 山东 济南 250014)

摘要:提出了一种算法简便、切实有效的机器人工具坐标系标定方法。该方法基于机器人的运动学推导过程, 在没有借助额外的测量工具的条件下, 对工具坐标系相对于机器人末端坐标系的位置进行辨识, 在得到工具坐标系相对位置的基础上, 对机器人的工具端的姿态进行辨识。本方法仅采用了线性最小二乘算法, 算法简便容易实现。最后使用 MATLAB 和 Virtual Robot Simulator 对本文所提算法进行了仿真实验, 结果证明该方法切实可行, 完全可以应用到实际的工作环境中, 缩减离线工作时间, 提高自动化水平。

关键词:机器人运动学; 机器人建模; 工具坐标系标定; 运动学分析

中图分类号:TP241 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-4026(2012)01-0069-06

A robot tool frame calibration method

LIU Cheng-ye, LI Wen-guang, MA Shi-guo, ZHI Jian-bin, LIU Guang-liang, WU Hao

(Shandong Provincial Key Laboratory of Robot and Manufacturing Automation Technology, Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: We present a simple and effective calibration method for robot tool frame calibration. This method is based on the kinematic computation of a stacking robot, and recognizes the relative position of the tool frame to the end of the robot without the aid of extra measurement equipment. The method then recognizes the orientation of the robot tool frame based on the derived relative position. This method only employs the linear least square algorithm, so it is easy to be realized. We employ MATLAB and Virtual Robot Simulator to simulate the proposed method. Results show that the method is feasible and can be applied to practical environments to reduce the off-line time and improve the level of automation.

Key words: robot kinematics; robot modeling; tool frame calibration; kinematical analysis

机器人工具坐标系标定是计算工具端相对于机器人末端坐标系的位置和姿态的辨识过程, 该位姿是一个未知的确定位姿。其中, 机器人末端坐标系, 是涉及到机器人控制器软件的坐标系, 可以通过控制器读取各关节编码器值, 并经正向运动学求得机器人末端坐标系的位置和姿态。工具坐标系是定义在工具末端的坐标系, 本文在不借助外部测量工具的条件下, 对工具坐标系相对于末端坐标系的位姿进行辨识。

在工业机器人的应用中, 机器人工具坐标系 (Tool Control Frame, TCF) 中的位姿是一个十分重要的因素, 它们其测量精度依赖于实际机器人单元的几何尺寸和位置。机器人单元, 诸如末端执行器、夹具的微小变化都会导致机器人 TCF 不准确。本文引入一种机器人 TCF 标定的方法, 并用理论推算的形式表明它的合

理性。

一个基本的机器人单元包括机器人本体和两个基本的外围设备:末端执行器和夹具。末端执行器是连接在机器人腕关节法兰盘位置处的机械设备,可以辅助机器人完成象焊接、装配、喷涂和搬运等的任务。夹具是用于机器人执行特殊工件加工任务时的刚体实体,可以是一个简单的桌子或是装有特殊设计的用于固定、夹紧工件装置的台子。有了机器人单元的这三个组成部分,再加上被操作的实际工件,使用者就可以通过使用机器人示教盒来定位 TCF 的位置,用于执行各种指定的机器人任务。

Ruther 等人^[1]提出了一种使用镜子作为辅助设备,而不采用任何其他的精确参考物来完成机器人本体的标定,并将机器人的平移误差由 3.88 mm 减小到了 1.54 mm。赵娇娇等人^[2]采用了七点法对机器人工具端进行了标定,使得机器人的定位精度达到了 ± 0.5 mm。在该方法中首先由前 4 个点对机器人工具端位置进行辨识,其次由 3 个点完成姿态的辨识。朴永杰等人^[3]利用机器人正运动学方程和空间坐标变换关系求解了机器人的末端执行器参数,在该方法中,利用标准固件,在不安装工具情形下确定一参考坐标系,并求解出该坐标系的位姿,然后,用带工具的机器人去拟合参考坐标系,同时完成工具坐标系参数的辨识。李亮玉等人^[4]提出了六点标定法,使用 VB6.0 开发了弧焊机器人离线标定系统,并在 FANUC 机器人平台上进行了实验,将机器人的定位精度提高到了 ± 0.5 mm。Frank^[5]使用 DynaCal 系统,对 FANUC M6i 机器人进行了标定,在 20 min 内,将机器人的末端定位精度提高到至少 0.5 mm。

文中介绍了一种用于机器人工具坐标系标定的方法,并给出了具体的理论推算过程。在开始标定之前,首先假定机器人本体已经标定过,即可以忽略本体所带来的误差。本文将在不借助外部测量设备的情形下,对机器人工具端坐标系进行辨识,最终辨识出工具坐标系相对于机器人末端坐标系的位姿,见图 1。

1 工具坐标系标定

1.1 位置标定

由图 1 可以看出, T_2 矩阵将机器人和末端工具连接在了一起,并且有如下的关系成立:

$$T_1 \cdot T_2 = T_3 \tag{1}$$

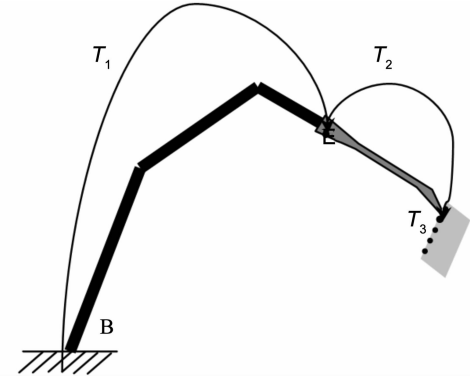
对于机器人工作空间的某个确定位置的测量是比较困难的,因此在确定工具坐标系的过程中最好不要借助额外的测量设备。在确定工具坐标系相对于机器人末端的位置时,此处采用四点法,但是要求 4 个点的工具端位置是同一个位置,只是工具端的姿态改变了,如图 2 所示。

对于位姿 p_1, p_2, p_3, p_4 :由公式(1)可以得出

$$T_{1i} \cdot T_{2i} = T_{3i} \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{2}$$

无论是对应哪个机器人位姿,公式左边矩阵中的位置分量是相同的。也就是满足:

$$\begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} & e_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} & e_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} & e_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$



T_1 : 机器人本体的齐次变换矩阵; T_2 : 工具端在机器人末端坐标系下的位姿矩阵; T_3 : 工具端在机器人坐标系下的位姿关系矩阵

图 1 机器人系统各单元间的传递关系
Fig. 1 Transitive relationship between the units of the robot

$$\begin{bmatrix} n_{x2} & o_{x2} & a_{x2} & e_{x2} \\ n_{y2} & o_{y2} & a_{y2} & e_{y2} \\ n_{z2} & o_{z2} & a_{z2} & e_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} n_{x3} & o_{x3} & a_{x3} & e_{x3} \\ n_{y3} & o_{y3} & a_{y3} & e_{y3} \\ n_{z3} & o_{z3} & a_{z3} & e_{z3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} n_{x4} & o_{x4} & a_{x4} & e_{x4} \\ n_{y4} & o_{y4} & a_{y4} & e_{y4} \\ n_{z4} & o_{z4} & a_{z4} & e_{z4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

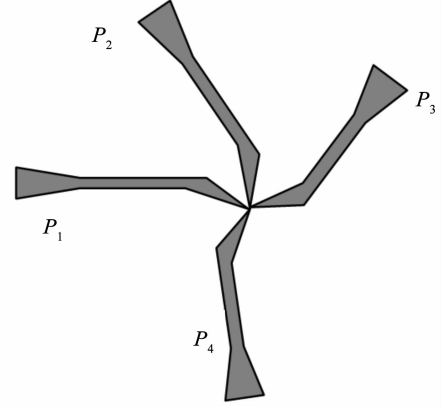


图2 用于确定工具端位置的
4个限位位姿

Fig. 2 The 4 limit poses to determine the
tool position

$[p_x, p_y, p_z]^T$ 表示的是工具坐标系在机器人末端坐标系下的位置偏移量。

(4)式减(3)式,也就是对应位姿 p_2 和 p_1 的两位置相减:

$$\mathbf{R}_2 \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{x2} \\ e_{y2} \\ e_{z2} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{x1} \\ e_{y1} \\ e_{z1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

即:

$$(\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1) \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x1} - e_{x2} \\ e_{y1} - e_{y2} \\ e_{z1} - e_{z2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 R_2 和 R_1 分别表示对应位姿 p_2 和 p_1 的旋转矩阵。

同理对应位姿 p_3, p_4 , 有:

$$(\mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1) \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x1} - e_{x3} \\ e_{y1} - e_{y3} \\ e_{z1} - e_{z3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$(\mathbf{R}_4 - \mathbf{R}_1) \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x1} - e_{x4} \\ e_{y1} - e_{y4} \\ e_{z1} - e_{z4} \end{bmatrix} \quad (10)$$

联立(8),(9),(10)式可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_3 - \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_4 - \mathbf{R}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x1} - e_{x2} \\ \vdots \\ e_{z1} - e_{z4} \end{bmatrix} \quad (11)$$

采用线性最小二乘的算法来对 $[p_x, p_y, p_z]^T$ 进行计算得:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} R_2 - R_1 \\ R_3 - R_1 \\ R_4 - R_1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} e_{x1} - e_{x2} \\ \vdots \\ e_{z1} - e_{z4} \end{bmatrix}}{\left(\begin{bmatrix} R_2 - R_1 \\ R_3 - R_1 \\ R_4 - R_1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} R_2 - R_1 \\ R_3 - R_1 \\ R_4 - R_1 \end{bmatrix} \right)} \quad (12)$$

至此,便完成了机器人工具坐标系位置的标定。

1.2 姿态标定

工具坐标系姿态的标定需要借助工具坐标系位置标定的结果,同时还需要将机器人工具坐标系姿态调整至与机器人基座坐标系一致(不一定完全一致)。然后,需要将机器人控制方式切换到机器人坐标系进行控制,控制机器人移动沿 x 轴运动再沿 z 轴运动,在此过程中机器人工具端姿态是不变的,如图 3 所示。

由于工具端姿态与机器人姿态是一致的,沿机器人坐标系运动就相当于沿工具坐标系的运动。位置 p_6 减去位置 p_5 得到工具坐标系 x 轴轴向向量。位置 p_7 减去位置 p_6 得到工具坐标系 z 轴轴向向量。两者叉乘得到工具坐标系 y 轴轴向向量,最后统一单位化得到工具坐标系相对于机器人坐标系的姿态。由公式(3)得:

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{15} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理,计算 p_6 和 p_7 的位置向量,即:

$$\begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{16} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_7 \\ y_7 \\ z_7 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{17} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

那么 x 轴轴向向量为:

$$X = [x_6 - x_5 \quad y_6 - y_5 \quad z_6 - z_5]^T \quad (15)$$

同理 z 轴轴向向量为:

$$Z = [x_7 - x_6 \quad y_7 - y_6 \quad z_7 - z_6]^T \quad (16)$$

$$Y = Z \times X \quad (17)$$

在得到工具坐标系各轴轴向向量后,对其进行单位化操作,到此得到的是工具坐标系相对于机器人坐标系的姿态,而我们需要工具坐标系相对于机器人末端坐标系的姿态,因此需要将得到的旋转矩阵左乘 $T_{ii}(i=5,6,7)$ 中的旋转矩阵的逆。

2 仿真实验

VirtualRobot Simulator 是免费的机器人仿真平台,可以用于构建指定的机器人仿真模型。这里建立的是 Staubli 机器人模型,如图 4 所示。结合 MATLAB 下的机器人工具箱,建立相应的机器人模型,如图 5 所示。对文中所提算法进行仿真实验。

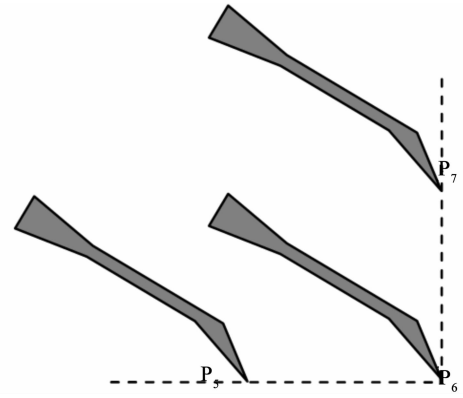


图 3 用于确定工具姿态的 3 个限位位姿

Fig. 3 The 3 limit poses to determine the tool pose

该 Staubli 机器人的 DH 参数见表 1。

用于标定的 7 组数据也就是测量得到的 7 组机器人关节角度值,见表 2。

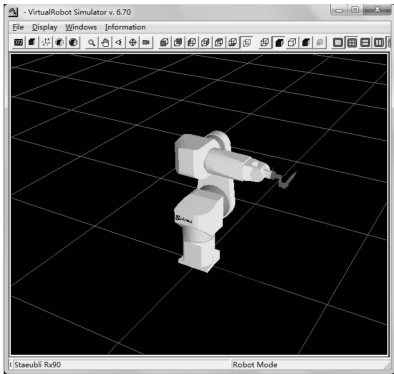


图 4 Staubli 机器人

Fig. 4 A Staubli robot

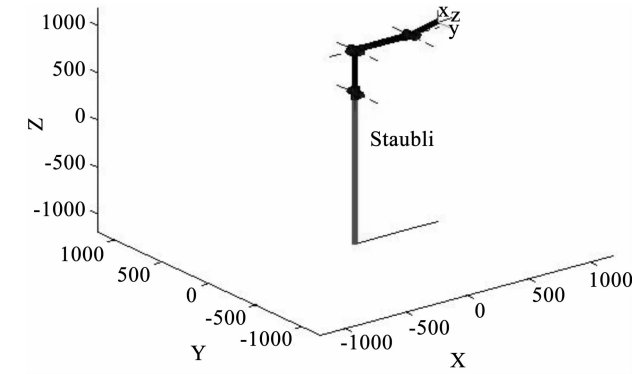


图 5 Staubli 机器人模型

Fig. 5 Staubli robot model

表 1 Staubli 机器人 DH 参数

Table 1 DH parameters of a Staubli robot				
关节	α	a	θ	d
1	$\pi/2$	0	0	0
2	0	450	0	0
3	$\pi/2$	0	$\pi/2$	0
4	$-\pi/2$	0	0	450
5	$\pi/2$	0	0	0
6	0	0	0	87

表 2 机器人关节角度值

Table 2 The angular values of robot joint						
索引	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	-0.160°	1.709°	-0.295°	-0.856°	0.213°	-0.726°
2	-0.081°	1.709°	-0.399°	-0.304°	0.273°	-0.231°
3	3.061°	1.398°	-2.947°	1.833°	0.083°	-1.310°
4	-0.399°	-0.110°	2.942°	-1.689°	1.534°	1.268°
5	-0.160°	1.725°	-0.295°	-0.856°	0.213°	-0.726°
6	-0.152°	-0.147°	-2.887°	-2.989°	1.679°	1.587°
7	2.981°	1.409°	-2.907°	-1.150°	-0.176°	2.715°

利用表 2 中的数据,采用文中所推导的公式进行计算,最终得到工具端相对于机器人末端的位姿变换矩阵如下,与本文所建立的仿真模型完全匹配,证明本算法有效。

$$\begin{bmatrix} 0.866 & 0 & 0.5 & 60 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0.866 & 140 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由表 3 可以看出经过两次迭代修正,机器人末端定位精度从较大的实际偏离值经标定后得到较小修正的末端定位值。这表明了经过辨识补偿,机器人的定位精度提高了至少 90%,足以满足工业应用的要求。与目前国内常用的手眼标定方法相比较,本方法的优势在于无需借助外部测量和其他的辅助设备,可以更简便的对机器人工具坐标系进行标定,实现同样的精度。

表 3 标定前后机器人末端定位
Table 3 The locations of the robot end before and after calibration

	一次迭代 $C(d_2)$	二次迭代 $C(d_3)$
理论值	[0,0,0]	[0,0,0]
实际值	[7.48e-3,8.54e-4,3.33e-3]	[4.87e-3,3.66e-4,7.43e-3]
修正值	[7.75e-5,4.46e-6,6.53e-7]	[1.12e-6,5.53e-9,8.94e-8]

3 结论

为了提高加工、装配、打磨等工业机器人的标定精度,充分实现离线编程的实用化,本文提出了一种 TCF 的标定方法,主要用于机器人的工具坐标系标定过程。该算法推算过程简单有效,且充分考虑到了作业环境,有利于普及应用。标定过程所采用的最小二乘算法,也是工业应用常见的算法,简便易行。从标定算法原理可看出,该方法隶属离线编程范畴,对于工业机器人离线编程有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] RUTHER M, LENZ M, BISCHOF H. The narcissistic robot: robot calibration using a mirror[C] //11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision. Singapore,2010:169-174.

[2] 赵娇娇,朱伟. 弧焊机器人系统标定[J]. 福州大学学报(自然科学版),2008,36(1):31-35.

[3] 朴永杰,邱涛,陈善本. 弧焊机器人 TCF 参数的标定[J]. 机器人,2001,23(2):109-113.

[4] 李亮玉,李香,岳建峰,等. FANUC 弧焊机器人系统标定研究与实现[J]. 天津工业大学学报,2007,26(2):69-73.

[5] CHENG F S. The method of recovering robot TCP positions in industrial robot application programs[C] //International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin,China,2007:805-811.

[6] 夏天,孙翰英,范嘉桢,等. 虚拟封闭运动链法提高机器人运动学标定精度[J]. 机械设计与研究,2009,25(2):57-61.

[7] SHIBUYA Y, MARU N. Control of 6 DOF arm of the humanoid robot by linear visual servoing[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Seoul,Korea,2009:1791-1797.

[8] 魏振忠,张博,张广军. 双机器人系统的快速手眼标定方法[J]. 光学精密工程,2011,19(8):1895-1902.

[9] CAOY, LU K, XIE Q, et al. Shape and area computation of cooperative workspace of dual-arm robot[C] // International Conference on Information and Automation. Zhuhai,Macau,China,2009:627-632.

[10] 解则晓,辛少辉,李绪勇,等. 基于单目视觉的机器人标定方法[J]. 机械工程学报,2011,47(5):35-39.