

基于超声波测距的 TCP 标定方法研究

吴乐平¹, 顾晟吉², 程伟国¹

(1. 南京旭上数控技术有限公司, 江苏 南京 211167; 2. 南京机电职业技术学院, 江苏 南京 211135)

摘要: 在使用机器人的过程中, TCP 标定是不可避免的环节之一, 而且标定精度直接影响机器人的定位精度。传统的标定方法需要人工多次校准, 效率低, 精度差。针对此情况, 提出一种基于超声波测距的 TCP 标定方法, 利用超声波测距技术和坐标变换方法进行快速、准确地 TCP 值标定。该方法有效避免了人工校准带来的误差, 通过实验证明该方法有效可行。

关键词: 机器人; TCP 标定; 超声波; 精度

中图分类号: TP242 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)01-0209-02

Research on TCP Calibration Method Based on Ultrasonic Ranging

WU Leping¹, GU Shengji², CHENG Weiguo¹

(1. Nanjing Xushang CNC Technology Co., Ltd., Nanjing 211167, China; 2. Nanjing Vocational Institute of Mechatronic Technology, Nanjing 211135, China)

Abstract: In the process of manipulating robot, TCP calibration is one of the inevitable processes, whose accuracy directly affects the positioning accuracy of robot. The traditional calibration method requires manual calibrations for many times, which is low in efficiency and poor in accuracy. In this paper, a TCP calibration method based on ultrasonic ranging is proposed with proved experiments that show the new method can effectively eliminate the errors caused by manual calibration and greatly improve calibration efficiency and accuracy.

Keywords: robot; TCP calibration; ultrasound; accuracy

0 引言

随着机器人在各行各业应用的逐渐深入, 对机器人性能的要求也在逐渐提高^[1]。工具中心点(tool center point, TCP)标定是机器人应用中不可避免的重要环节之一, 而且 TCP 标定精度直接影响机器人的定位精度^[2]。因此, 就必须研究一种快速、高精度的 TCP 标定方法。

机器人 TCP 标定是计算工具末端点相对于机器人末端坐标系的位置辨识过程, 该位置是一个未知的确定位置。文献[3-4]分别采取 SVD 分解和投影约束的方法求解 TCP 参数, 但都需要人工校准, 而且人工校准带来的误差无法消除。文献[5]提出一种基于双目视觉的 TCP 标定方法, 不需要手动校准, 标定精度高, 但是双目视觉系统的价格昂贵, 不适合推广。

本文提出一种基于超声波测距的 TCP 标定方法, 只需要将机器人任意移动到 3 个不同位置, 不需要操作人员人工校准, 实施简单, 标定速度快, 精度高, 通用性强。

1 TCP 标定方法分析

为了方便操作人员使用, 在机器人系统中定义了多种坐标系, 如图 1 所示的坐标系 $\{B\}$ 为基坐标系; 坐标系 $\{R\}$ 为腕部坐标系; 坐标系 $\{T\}$ 为工具坐标系。TCP 标定过程即获得坐标系 $\{T\}$ 的原点在坐标系 $\{R\}$ 下坐标值 (x_r, y_r, z_r) 的过程。本文所述方法的标定流程共分为以

下 5 个步骤:

1) 如图 2 所示, 首先需要在需要标定的工具坐标系原点安装超声波发送探头 S_1 , 在矩形底座的 3 个顶点处安装 3 个超声波接收探头 R_1, R_2, R_3 , 则 $R_{13} \perp R_{12}$ (R_{ij} 表示由 R_i 指向 R_j 的向量), 并且已知 $|R_{12}| = d_1, |R_{13}| = d_2, R_{12}, R_{13}$ 分别平行于基坐标 x, y 轴。以 R_1 为坐标原点, R_{12}, R_{13} 所在方向分别为 x, y 轴, 建立如图 1 所示的标定坐标系 $\{C\}$; 并设定采样次数 n, n 为 ≥ 3 的自然数。

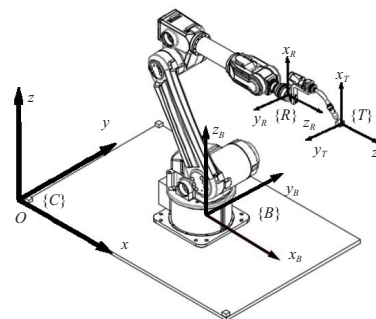


图 1 机器人坐标系示意图

2) 将机器人移动到任意位置, 探头 S_1 发送超声波信号, 同时开始计时。每个接收探头接收到信号后, 立即记录从 S_1 发送信号到接收所用时间, 记 t_i 为探头 R_i 接收到 S_1 信号所用的时间 ($i = 1, 2, 3$), 即传输时间, 并记录当前周围的环境温度 k 和机器人当前各关节角度值。

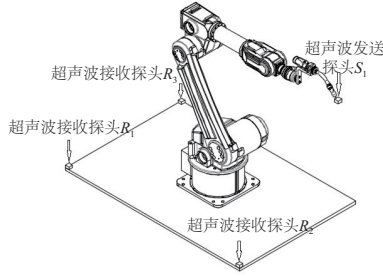


图2 超声波传感器安装示意图

3) 计算TCP点在坐标系下{C}的坐标值(x,y,z)。记li为探头Si到探头Ri之间的距离。则li = ti × (331.5 + 0.607k), 其中i = 1, 2, 3, 并且满足条件:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = l_1^2 \\ (x - d_1)^2 + y^2 + z^2 = l_2^2 \\ x^2 + (y - d_2)^2 + z^2 = l_3^2 \\ z > 0 \end{cases}$$

$$\text{解得: } \begin{cases} x = (l_1^2 - l_2^2 + d_1^2) / 2d_1 \\ y = (l_1^2 - l_3^2 + d_2^2) / 2d_2 \\ z = \sqrt{l_1^2 - x^2 - y^2} \end{cases}$$

4) 重复步骤2)和步骤3)共n次,得到n组(x,y,z)(记为(xi,yi,zi), i = 1, 2, ..., n)和与之相对应的n组机器人各关节角度。

5) 根据正运动学方程计算每一组关节角度值对应的机器人腕部的位置和姿态,即从坐标系{B}到坐标系{R}的齐次变换矩阵,记Ti^R(i = 1, 2, ..., n)为根据第i组关节角度获得的齐次变换矩阵,TR^T为坐标系{R}到坐标系{T}的齐次变换矩阵,则

$$T_i^T = T_i^R T_R^T \quad (1)$$

式中:

$$T_i^T = \begin{bmatrix} R_i^T & P_i^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_R^T = \begin{bmatrix} R_R^T & P_R^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_i^R = \begin{bmatrix} R_i^R & P_i^R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则PR^T = (x_T, y_T, z_T)^T。

将式(2)代入式(1),得

$$\begin{cases} R_1^R P_R^T + P_1^R = P_1^T \\ R_2^R P_R^T + P_2^R = P_2^T \\ \vdots \\ R_n^R P_R^T + P_n^R = P_n^T \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)中从第2行开始,每行减去第1行,整理得

$$\begin{cases} (R_2^R - R_1^R) P_R^T = (P_2^T - P_1^T) - (P_2^R - P_1^R) \\ (R_3^R - R_1^R) P_R^T = (P_3^T - P_1^T) - (P_3^R - P_1^R) \\ \vdots \\ (R_n^R - R_1^R) P_R^T = (P_n^T - P_1^T) - (P_n^R - P_1^R) \end{cases} \quad (4)$$

其中:Pi^T - P1^T = (xi - x1, yi - y1, zi - z1)^T。

记:

$$A = \begin{bmatrix} (R_2^R - R_1^R) \\ (R_3^R - R_1^R) \\ \vdots \\ (R_n^R - R_1^R) \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} (P_2^T - P_1^T) - (P_2^R - P_1^R) \\ (P_3^T - P_1^T) - (P_3^R - P_1^R) \\ \vdots \\ (P_n^T - P_1^T) - (P_n^R - P_1^R) \end{bmatrix}$$

则式(4)可以表示为

$$A P_R^T = A (x_T, y_T, z_T)^T = B$$

解之得:

$$(x_T, y_T, z_T)^T = A^+ B$$

其中A⁺ = (A^TA)⁻¹A^T。

2 实验分析

采用上述办法,对NJ-XSM6机器人进行安装测试,取n = 3,获得3组数据如表1所示。jm为第m个关节的角度,单位为(°)。并且已知机器人D-H参数表如表2所示,由D-H参数表可获得机器人正运动学方程。

表1 3次测量结果记录表

| 参数 | i=1 | i=2 | i=3 |
|--------|---------|---------|---------|
| k/(°C) | 25.6 | 25.6 | 25.6 |
| t/ms | 5.489 3 | 5.059 9 | 6.094 4 |
| j1(°) | -58.252 | -3.574 | -33.836 |
| j2(°) | -30.355 | 1.451 | -17.18 |
| j3(°) | 12.445 | 44.252 | 6.187 |
| j4(°) | 26.139 | -17.211 | 11.989 |
| j5(°) | -23.918 | -50.732 | -62.473 |
| j6(°) | 39.419 | 39.419 | -6.289 |

表2 机器人D-H参数表

| 项目 | θ | d | a | x |
|----|----|-----|-----|-----|
| 1 | θ1 | 0 | 410 | 0 |
| 2 | θ2 | 0 | 170 | -90 |
| 3 | θ3 | 0 | 650 | 0 |
| 4 | θ4 | 156 | 156 | -90 |
| 5 | θ5 | 620 | 0 | 90 |
| 6 | θ6 | 0 | 0 | 90 |

将上述数值代入计算得:

$$(x_T, y_T, z_T) = (50.03, 0.03, 199.98)$$

从设计图样中获得x,y,z的尺寸分别为50,0,200。由此可见,本文所述标定方法能够满足实际的工业需求。

3 结语

本文方法首先采用超声波传感器和温度传感器获得距离数据,机器人关节角度可以直接从机器人系统中读出。再经过坐标变换便可以直接获得TCP参数。经过验证表明:该方法有效可行,有效避免人工校准带来的误差,标定精度高。

参考文献:

- [1] 李亮玉,李香,岳建锋,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): 69-72.
- [2] 刘成业,李文广,马世国,等. 一种机器人工具坐标系标定方法[J]. 山东科学, 2012, 25(1): 69-74.
- [3] 李宏胜,汪允鹤. 六关节工业机器人工具坐标系的标定[J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(8): 101-104.
- [4] 洪磊,嵇保健,沈健,等. 一种工业机器人TCP位置标定算法研究[J]. 机械设计, 2017, 34(3): 81-85.
- [5] 王才东,李志航,王新杰,等. 机器人平面工具TCP的双目视觉标定方法[J]. 机械设计与制造, 2019(1): 239-244.

收稿日期:2020-06-23