DOI: 10.3901/JME.2020.14.001

串联机器人标定系统的坐标系快速转换方法*

乔贵方^{1,2} 孙大林^{1,3} 宋光明^{1,3} 温秀兰² 韦中^{1,3} 宋爱国^{1,3}

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096;

2. 南京工程学院自动化学院 南京 211167;

3. 东南大学生物电子学国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 针对串联机器人标定系统中的工业机器人基座坐标系{B}与激光跟踪仪测量坐标系{T}的转换问题, 提出一种融合多点拟合法和轴线矢量测量法的坐标系快速转换方法。该融合坐标系快速转换方法首先利用轴线矢量测量法获得旋转矩阵 $\mathbf{R}$, 然后利用多点拟合法获得位移矢量 $\mathbf{T}$, 进而得到坐标系转换矩阵 ${}^T_B\mathbf{R}$ 。试验结果表明该融合坐标系快速转换方法的测量时间比多点拟合法减少了184.68 s, 但综合RMSE(Root mean squared error, RMSE)增加了0.215 mm; 相比于基于关节圆交点的坐标系转换方法, 该方法的综合RMSE降低了0.626 mm, 测量时间仅增加了51.26 s; 相比于基于平面拟合转换法, 该方法的综合RMSE与测量时间分别降低了2.790 mm和120.0 s。因此, 该融合坐标系快速转换方法的转换精度远优于基于轴线测量的坐标系转换方法, 相比于多点拟合法具有相近的转换精度和更好的测量效率。

关键词: 机器人标定; 轴线矢量测量; 基坐标系; 测量坐标系; 激光跟踪仪

中图分类号: TP391

A Rapid Coordinate Transformation Method for Serial Robot Calibration System

QIAO Guifang^{1,2} SUN Dalin^{1,3} SONG Guangming^{1,3} WEN Xiulan²
WEI Zhong^{1,3} SONG Aiguo^{1,3}

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096;

2. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167;

3. State Key Laboratory of Bioelectronics, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: To solve the problem of coordinate transformation between the industrial robot base coordinate {B} and the laser tracker measurement coordinate {T} in the serial robot calibration system, a rapid coordinate transformation method combining multi-point fitting method and screw axis measurement method is proposed. Firstly, the rotation matrix $\mathbf{R}$ is obtained by screw axis measurement method, and the displacement vector $\mathbf{T}$ is obtained by multi-point fitting method. The transformation matrix ${}^T_B\mathbf{R}$ is calculated based on the rotation matrix $\mathbf{R}$ and the displacement vector $\mathbf{T}$. The experimental results show that the measurement time of this method is 184.68 s less than that of the multi-point fitting method. The comprehensive (Root mean squared error, RMSE) is increased by 0.215 mm. Compared with the joint circle intersection based method, the comprehensive RMSE of this method is reduced by 0.626 mm. However, the measurement time is just increased by 51.26 s. Compared with the base plane fitting method, the comprehensive RMSE and the measurement time of this method are reduced by 2.790 mm and 120.0 s, respectively. Therefore, the accuracy of the proposed rapid coordinate transformation method is much better than that of the screw axis measurement method. Compared with the multi-point fitting method, the proposed method has similar accuracy and better measurement efficiency.

Key words: robot calibration; screw axis measurement; base coordinate; measurement coordinate; laser tracker

* 国家自然科学基金(51905258)、江苏省自然科学基金(BK20170763)、江苏省高校自然科学研究面上(16KJB460013)和中国博士后科学基金(2019M650095)资助项目。20190918收到初稿, 20200326收到修改稿

0 前言

工业机器人作为智能装备的代表,其研发、制造与应用是衡量一个国家科技和高端制造水平的重要标志。随着机器人技术的快速发展,工业机器人的应用领域也在不断拓展^[1]。但因工业机器人的绝对定位精度较差(仅为毫米级),从而导致其无法应用于高端制造业。欧盟于2010—2013年资助COMET项目用于研究工业机器人在机械加工方面的关键技术,项目指出工业机器人的绝对定位精度需优于0.05 mm才能满足机械加工的精度要求^[2]。2017、2018年度中国“智能机器人”重点专项中亦指出工业机器人的绝对定位精度在磨抛、机械加工等作业中应优于0.05 mm。

通过机器人标定技术能够有效地提高工业机器人的绝对定位精度^[3-5]。常用于机器人标定的测量设备有立体视觉测量、激光干涉仪、球杆仪、激光跟踪仪等^[6-9],能够实现机器人末端位姿数据的测量。其中激光跟踪仪是最为常用。为获得工业机器人末端的定位误差,首先要实现激光跟踪仪测量坐标系与工业机器人基坐标系之间的转换。

目前实现激光跟踪仪测量坐标系与工业机器人基坐标系的转换方法主要分为两大类:一类是基于多点拟合的坐标系转换方法,利用相同点在不同坐标系下约束关系建立方程,求解坐标系转换矩阵。解算坐标系转换矩阵的算法主要有Rodrigues矩阵法、四元数法、奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)法和最小二乘法^[10-13]。广东工业大学的刘湛基等^[14]提出了结合最小二乘法的RANSAC快速转换法,该方法有效地提高了坐标系转换精度。另一类是基于轴线矢量测量的坐标系转换方法,通过测量工业机器人两个关节的轴线方向作为基坐标系坐标轴的方向矢量,再通过几何约束计算基坐标系的坐标原点,从而得到基坐标系与测量坐标系的转换矩阵。根据基坐标系坐标原点的确定方法不同,此类方法又衍生出多种坐标系转换方法。南昌航空航空大学的贺红林等^[15-16]通过单独转动工业机器人关节1和2获得轴线方向矢量,基坐标系的坐标原点为两个轴线的交点。加拿大魁北克大学的NUBIOLA等^[17-18]通过将关节1轨迹圆的圆心平移称值的方式计算基坐标系的坐标原点。北京航空航天大学张博等^[19]利用机器人控制器的数据与测量数据,通过几何约束计算出基坐标系原点坐标。李睿等^[20-22]通过测量基平面的方法获得基坐标系的

坐标原点。基于多点拟合的坐标系转换方法虽转换精度较高,但测量效率低,不适合坐标系快速转换。基于轴线矢量测量的坐标系转换方法的效率相对较高,但转换精度较差,且一定程度地受现场安装环境限制。因此,如何在保证转换精度的情况下尽可能提高效率是目前亟需解决的问题之一。

本文提出了一种融合多点拟合与轴线矢量测量的坐标系快速转换方法,该方法能够实现高精度、高效率的坐标系转换。首先介绍了工业机器人标定试验系统及相关参数;其次介绍了基于多点拟合与基于轴线矢量测量的坐标系转换方法的基本原理;然后阐述了基于多点拟合与轴向矢量测量的融合转换方法,该方法融合了两种方法的技术优势;最后基于已搭建的工业机器人标定试验系统,通过试验验证本文所提出的坐标系转换方法,并通过结果对比了四种坐标系转换方法的精度。

1 工业机器人参数标定系统概述

图1为工业机器人标定试验系统,左侧为埃夫特ER10L-C10六自由度串联工业机器人,各关节均处于零位状态。末端负载最大为10 kg,重复定位精度为 ± 0.05 mm,关节1至关节6的最大旋转速度分别为 $170^\circ/\text{s}$, $165^\circ/\text{s}$, $170^\circ/\text{s}$, $360^\circ/\text{s}$, $360^\circ/\text{s}$ 和 $600^\circ/\text{s}$ 。关节1至关节6的运动范围分别为 $\pm 175^\circ$, $+64^\circ/-162^\circ$, $+165^\circ/-81^\circ$, $\pm 178^\circ$, $\pm 132^\circ$, $\pm 180^\circ$,工业机器人各轴旋转方向如图2所示。图1右侧为激光跟踪仪Leica AT930,该设备在半径60 m范围内的测量不确定度为 $\pm(15\text{ }\mu\text{m}+6\text{ }\mu\text{m}/\text{m})$ 。在机器人标定试验中激光跟踪仪与靶球间的直线距离在5 m以内,激光跟踪仪的测量精度远高于工业机器人的绝对定位精度。利用激光跟踪仪能够获取靶球在测量坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 的坐标 $P_T=(x_T, y_T, z_T)^T$ 。本文中使用Spatial Analyzer测量软件。

图1 工业机器人参数标定系统

图 2 埃夫特机器人各轴旋转方向

图 1 中坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$ 定义为工业机器人的基坐标系 $\{B\}$, 坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 定义为激光跟踪仪的测量坐标系 $\{T\}$, 坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 定义为标定系统的世界坐标系 $\{W\}$ 。

2 基坐标系与测量坐标系转换分析

2.1 基于多点拟合的坐标系转换方法

天津大学史晓佳等^[3]提出了采用基于多点拟合的坐标系转换方法, 即根据相同点在不同坐标系下的约束关系建立式(1), 如图 3 所示, 利用最小二乘法等计算坐标系变换矩阵 ${}^T_B R$ 。基于多点拟合的坐标系转换方法通常选取 50 个测量点计算得到 ${}^T_B R$ 。理论上测量点越多, 转换精度越高, 但转换精度也受工业机器人绝对定位精度的影响, 基于多点拟合的坐标系转换方法。

$${}^T P = {}^T_B R \cdot {}^B P = {}^T_B R \cdot {}^B_C R \cdot {}^C P \quad (1)$$

式中, ${}^T_B R$ 为工业机器人基坐标系到激光跟踪仪测量坐标系的转换矩阵, ${}^T P$ 为靶球在测量坐标系中的坐标矢量, ${}^B P$ 为靶球在基坐标系下的坐标矢量, ${}^C P$ 为靶球在机器人默认工具坐标系下的坐标矢量, ${}^B_C R$ 为机器人默认工具坐标系到基坐标系的转换矩阵。

图 3 工业机器人基坐标系与激光跟踪仪测量坐标系间的坐标系转换

式(1)中坐标矢量 ${}^C P$ 可通过常规的 TCP 标定方法直接获取。首先控制机器人分别沿默认工具坐标系的 X 与 Y 轴正方向移动, 可得工具坐标系方向矢量; 其次控制机器人分别绕默认工具坐标系的 X 与 Y 轴正方向旋转, 利用最小二乘法拟合球, 该球的球心即是工具坐标系原点, 如图 4 所示。最终可在测量坐标系中建立工业机器人的工具坐标系, 计算得到靶球在工具坐标系中的坐标矢量 ${}^C P$ 。

图 4 工业机器人 TCP 标定方法示意图

2.2 基于轴线矢量测量的坐标系转换方法

基于轴线矢量测量的坐标系转换方法是利用单轴旋转获得机器人基坐标系的坐标轴线矢量, 从而计算旋转矩阵 R , 然后利用几何约束计算位移矢量 T , 最后根据式(2)计算坐标系转换矩阵 ${}^T_B R$ 。目前常用的转换方法主要有基于关节圆交点和基于基平面拟合的坐标系转换方法。

$${}^T_B R = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2.1 基于关节圆交点的坐标系转换方法

北京航空航天大学张博等^[19]提出了基于关节圆交点的坐标系转换方法。首先单独旋转工业机器人的关节 1 与关节 6, 测量关节 1 与关节 6 的轨迹圆 C_1 与 C_6 , 计算轨迹圆的圆心 O_1/O_6 , 半径 r_1/r_6 及关节轴线方向矢量 n_{C1}/n_{C6} , 如图 5 所示。根据关节轴线方向矢量及式(3)计算旋转矩阵 R 。

$$R = (n_{C6}, n_{C1} \times n_{C6}, n_{C1}) \quad (3)$$

图 5 基于关节圆交点的坐标系转换方法

轨迹圆 C_1 与轨迹圆 C_6 相交于 G 点, 即机器人零位状态时的靶球位置。由控制器可得机器人末端法兰盘的中心点在基坐标系下的坐标矢量 ${}^B P = (t_x, t_y, t_z)^T$, 定义 G 点相对于 P 点的偏移矢量 ${}^B PG = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$, 则矢量 $O_6 O_B$ 在基坐标系下可表示为式(4)。轨迹圆 C_6 的圆心 O_6 在测量坐标系下的坐标矢量为 O_6^T , 则由式(5)可得平移矢量 T 。根据式(2)可得转换矩阵 ${}^T_B R$ 。

$$O_6 O_B = (-\sqrt{r_1^2 - \Delta Y^2}, -t_y, -t_z)^T \quad (4)$$

式中, 参数 $\Delta Y = O_6 G \cdot (n_{C1} \times n_{C6})$ 。

$$T = O_B^T = O_6^T + R \times O_6 O_B \quad (5)$$

2.2.2 基于基平面拟合的坐标系转换方法

天津大学任永杰等^[21]提出了基于基平面拟合的坐标系转换方法, 该方法仅在测量坐标系中进行计算, 首先将工业机器人恢复零位状态, 分别测量关节 1 与关节 2 的轨迹圆 C_1 与 C_2 , 及工业机器人安装平面 P_M 。轨迹圆 C_1 的轴线与工业机器人的安装平面 P_M 的交点为基坐标系的坐标原点 O_B , 从而得到平移矢量 T 。得到关节 1 的轴线方向矢量 n_{C1} , 关节 2 的轴线方向矢量 n_{C2} , 如图 6 所示。根据两个关节轴线矢量可以计算得到旋转矩阵 R 如式(6)所示。根据式(2)可得旋转矩阵 ${}^T_B R$ 。

$$R = (n_{C2}, n_{C1} \times n_{C2}, n_{C1}) \quad (6)$$

图6 基于基平面拟合的坐标系转换方法

2.3 坐标系转换方法分析

以上三种方法均能够实现工业机器人基坐标系与激光跟踪仪测量坐标系之间的转换, 但转换精度和效率各有不同。基于多点拟合的基坐标系转换方法依据控制器中的末端坐标及激光跟踪仪测量的末端坐标, 因工业机器人的绝对定位精度一般为毫米

级, 因此控制器中读取的坐标误差会影响坐标系转换精度。为分析工业机器人绝对定位精度对坐标系转换的影响, 本文利用数值仿真计算了不同绝对定位精度对多点拟合法的坐标系转换精度的影响, 仿真结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 多点拟合法计算得到的坐标系误差随着绝对定位误差的增加而增加, 且位移矢量 T 的误差远高于旋转矩阵 R 的误差。因此, 提升位移矢量 T 的计算精度能够有效地提高坐标系转换精度。为了验证这一假设, 将旋转矩阵 R 设为常量, 然后对位移矢量 T 进行拟合并计算综合误差, 当工业机器人绝对定位误差为 ± 2 mm 时, 拟合 ${}^T_B R$ 所有参数的方法的平移矢量 T 的综合误差为 0.141 6 mm, 而仅拟合位移矢量 T 时的平移矢量 T 的综合误差为 0.137 mm。因此单独计算平移矢量 T 可以一定程度地提高坐标系转换精度。

图7 工业机器人定位精度对坐标转换的影响

轴线矢量测量法是利用机器人的关节单独旋转得到的旋转矩阵 R , 更符合机器人的实际几何构型, 即与机器人基坐标系方向矢量一致, 但位移矢量 T 求解误差较大。关节圆交点法因使用控制器数值导致控制器模型误差被完全引入且无法修正。而基平面拟合法在拟合平面和求空间交点时也会引入测量误差, 尤其是安装平面平面度并不好的情况。因此, 两种方法的位移矢量 T 会引入较大误差。

基于多点拟合的坐标系转换方法需要逐点测量, 虽转换精度较高但测量效率较低, 不适合坐标系快速转换。基于轴线矢量测量的两种坐标系转换方法可连续测量, 测量效率相对前者较高, 但工业机器人自身精度性能及安装条件都会引入较大的误差。针对以上问题, 本文提出一种坐标系快速转换方法, 在保证转换精度的同时, 提高效率。

3 基于多点拟合与轴线矢量测量的融合坐标系转换方法

基于以上分析结论, 本文提出的坐标系快速转换方法有效地结合了多点拟合法与轴线矢量测量法的优势, 即采用多点拟合法计算位移矢量 T 精度, 保证位移矢量 T 计算精度; 采用轴线矢量测量法计算旋转矩阵 R , 保证其计算精度的同时, 提高坐标系转换的测量效率。

3.1 融合坐标系转换方法的实施方案

本文所提出的坐标系快速转换方法步骤如下。首先将工业机器人恢复零位状态, 利用激光跟踪仪测量关节 1 和 2 的轨迹圆, 进而求出基坐标系 Z 轴与 X 轴的轴向单位矢量 n_{C1} 与 n_{C2} , 并根据式(6)计算得到旋转矩阵 R 。其次将 R 作为已知参数代入转换矩阵 B_R , 此时转换矩阵中仅平移矢量 T 为未知量, 再利用基于多点拟合的坐标系转换方法, 依据式(1)可得平移矢量 T , 方法流程如图 8 所示。

图 8 基于多点拟合与轴线矢量测量的融合坐标系转换方法流程图

因待辨识的参数较少, 同时为提高测量效率, 可以减少多点拟合法所需测量点数。如表 1 所示, 任意选取 50 点、40 点、30 点、20 点、10 点, 求解不同点数下的平移矢量 T , 并计算测量点的转换精度。验证各点的误差公式参考文献[19], 如式(7)所示。从表 1 可以看出当选择 10 个点拟合平移矢量 T 时测量点转换后的综合 RMSE(Root mean squared error, RMSE)最小, 因此, 本文所提出的融合坐标系转换方法仅需测量 10 个点。

$$\Delta E = {}^T P - {}^T_B R \cdot {}^B P \quad (7)$$

表 1 点的数量对平移矢量计算值的影响

点数	位移向量计算值	RMSE/mm
50 点	$T=(4\ 787.053\ 6-160.737\ 2-1\ 229.663\ 1)^T$	0.531\ 913\ 16
40 点	$T=(4\ 787.041\ 1-160.740\ 1-1\ 229.632\ 7)^T$	0.531\ 512\ 51
30 点	$T=(4\ 787.045\ 6-160.772\ 8-1\ 229.642\ 4)^T$	0.539\ 784\ 04
20 点	$T=(4\ 787.043\ 2-160.775\ 8-1\ 229.650\ 9)^T$	0.536\ 214\ 62
10 点	$T=(4\ 787.022\ 7-160.590\ 6-1\ 229.651\ 6)^T$	0.520\ 361\ 97

3.2 融合坐标系转换方法应用边界条件分析

本文提出的融合坐标系转换方法与其他坐标系转换方法一样, 受测量点的坐标误差影响较大。因此, 本文利用仿真试验分析机器人末端定位误差对融合坐标系转换方法的影响, 最终确定融合坐标系转换方法的应用边界条件。

由于多点拟合法是目前最为普遍使用的坐标系转换方法, 因此以该方法作为比较基准, 仿真试验结果如图 9 所示, 当机器人绝对定位精度较好时, 本文提出的融合坐标系转换方法与多点拟合法的转换精度基本一致。而当工业机器人的绝对定位误差增加到 1.2 mm 时, 融合坐标系转换法的转换误差将超过 1 mm。本文提出的融合坐标系转换方法主要是应用于机器人参数标定, 也可以拓展应用于多机器人协作等方面, 转换精度能够满足此方面应用。

图 9 机器人绝对定位误差对两种转换方法的影响

4 坐标转换方法验证与对比

为验证本文所提出的坐标系转换方法的转换精度和测量效率, 在图 1 中搭建的平台实施试验测试, 所涉及的测量过程均符合 GB/T 12642—2013 标准要求[23]。

4.1 融合坐标系转换方法的转换精度测试

首先, 为验证融合坐标系转换方法的转换精度, 在工业机器人的工作空间内随机选取了 30 个验证点, 分别记录靶球在基坐标系下的坐标矢量 ${}^B P$ 与测量坐标系下的坐标矢量 ${}^T P$ 。将得到的转换矩阵 ${}^T_B R$ 及测量点坐标矢量 ${}^B P$ 与 ${}^T P$ 代入式(7), 转换结果

及转换误差如图 10 与表 2 所示。依据公式(8)计算 30 个验证点的轴向平均误差值,其中 X 轴的平均误差值与最大误差值分别为 0.207 mm 与 0.478 mm, Y 轴的平均误差值与最大误差值分别为 0.231 mm 与 0.558 mm, Z 轴的平均误差值与最大误差值分别为 0.319 mm 与 0.646 mm。从图 11 中可以看出 30 个验证点的误差矢量方向具有一定的规律性,该现象应是工业机器人本体及其控制系统的性能所导致。

图 10 基于多点拟合与轴线矢量测量的坐标系转换误差

表 2 基于多点拟合与轴线矢量测量的坐标系转换结果

测量坐标系			基坐标系		
P_{TX}	P_{TY}	P_{TZ}	P_{BX}	P_{BY}	P_{BZ}
3 394.137	-202.198	236.937	1 393.390	71.000	1 464.980
3 341.383	40.539	-22.445	1 451.380	-170.360	1 205.730
3 379.797	-293.57	225.960	1 405.750	162.720	1 454.100
3 267.314	47.385 2	164.029	1 525.570	-175.610	1 392.340
转换结果			转换误差 ΔE		
T_X	T_Y	T_Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1 393.516	71.047 75	1 464.854	-0.126	-0.048	0.126
1 450.973	-170.646	1 205.516	0.407	0.286	0.214
1 405.945	162.694	1 453.818	-0.195	0.026	0.282
1 525.396	-175.882	1 391.901	0.174	0.272	0.439
…省略其他 26 个点

图 11 基于多点拟合与轴线矢量测量的融合坐标系转换方法的误差矢量

其次,为与其他坐标系转换方法的转换精度进行对比,本文依据文献[5]中所提出的轴向 RMSE,综合 RMSE 以及单点 RMSE,相关计算公式如式(9)~(11)所示。计算结果如图 12 与表 3 所示,基于多点拟合的坐标系转换方法的转换精度及稳定性较好。基于关节圆交点的坐标系转换方法的转换精度及稳定性相对较差,误差主要体现在 X 轴与 Y 轴。基于基平面拟合的坐标系转换方法的精度和稳定性最差,误差集中在 X 轴与 Z 轴。本文所提出的基于多点拟合与轴线矢量测量融合的坐标系转换方法在各个轴向上 RMSE 与综合 RMSE 均远优于基于关节圆交点的坐标转换方法和基于基平面拟合的转换方法,但 X 轴和 Z 轴的 RMSE 相比与基于多点拟合的坐标系转换方法较差,但转换精度及单点 RMSE 方差均接近于多点拟合法。

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{\sum (\Delta k_i - \Delta \bar{k})^2}{n-1}} \quad k = x, y, z \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad (10)$$

$$RMSE_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2} \quad (11)$$

图 12 四种坐标系转换方法的单点综合 RMSE

表 3 四种坐标系转换方法的精度验证与对比

RMSE/mm	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
X 轴 RMSE	0.086 2	0.522 8	2.825 6	0.246 5
Y 轴 RMSE	0.227 8	0.973 9	0.337 3	0.276 9
Z 轴 RMSE	0.184 2	0.302 3	1.692 2	0.365 2
综合 RMSE	0.305 4	1.145 9	3.310 8	0.520 4
单点 RMSE 方差	0.022 9	1.240 0	0.649 9	0.027 5

注:方法 1 为基于多点拟合的坐标系转换方法;方法 2 为基于关节圆交点的坐标系转换方法;方法 3 为基于基平面拟合的坐标系转换方法;方法 4 为基于轴线矢量测量与多点拟合的融合坐标系转换方法。

4.2 融合坐标系转换方法的测量效率测试

为验证上述四种坐标系转换方法的测量效率,

本文将试验过程中的工业机器人的运行速度都设置为 10% 档位, 末端负载相同, 激光跟踪仪测量频率设置为 100 Hz。由于计算过程中所涉及的数据相对较少, 相比与测量时间, 不同转换方法的计算时间可忽略不计。因此, 仅讨论分析不同坐标系转换方法的测量时间。多点拟合法需测量机器人运动空间点数为 50 个; 基于关节圆交点的转换法中关节 1 的测量范围为 137° , 关节 6 的测量范围为 360° ; 基于基平面拟合的转换法中关节 1 的测量范围为 142° , 关节 2 的测量范围为 115° , 基平面的测量点数为 34; 融合坐标系转换方法中关节 1 的测量范围为 142° , 关节 2 的测量范围为 115° , 空间测量点数为 10 个。

工业机器人的运动到空间任一点需一定稳定时间, 为保证机器人末端位置测量的精度, 激光跟踪仪测量一个单点的空间位置的时间为 5 s。而机器人各个关节旋转运动的测量时间为其运动时间, 根据以上四种坐标系转换方法的测量步骤, 各方法的测量时间如表 4 所示。本文所提出的融合坐标系转换方法的测量时间仅次于基于关节圆交点的转换方法。

表 4 四种坐标系转换方法的测量时间

测量方法	测量时间/s
基于多点拟合的转换法	250.00
基于基平面拟合的转换法	185.32
基于关节圆交点的转换法	14.06
基于多点拟合与轴线矢量测量的融合转换法	65.32

综上所述, 通过权衡测量效率和转换精度两方面指标, 本文所提出的基于多点拟合与轴线矢量测量融合方法的转换精度接近于基于多点拟合的坐标系转换方法, 但测量效率得到了较大的提升, 同时转换精度远优于基于轴线矢量测量的转换方法, 能够实现高精度、高效率的工业机器人基坐标系与激光跟踪仪测量坐标系之间的转换。

5 结论

本文针对串联机器人标定系统中的机器人基坐标系与激光跟踪仪测量坐标系的转换方法展开研究, 提出了一种基于多点拟合与轴线矢量测量的融合坐标系快速转换方法。该方法利用轴线矢量测量法获得旋转矩阵 $\mathbf{R}$, 并基于多点拟合法获取位移矢量 $\mathbf{T}$, 进而得到转换矩阵 ${}^T_B \mathbf{R}$ 。本文在同一平台上通过试验对比了几种常用的坐标系转换方法的转换精度与测量效率。其中基于多点拟合法坐标系转换方法的综合 RMSE 为 0.305 4 mm, 基于轴线矢量测量的坐标系转换方法的综合 RMSE 最小为 1.145 9 mm, 本文所

提出的坐标系转换方法的综合 RMSE 为 0.520 4 mm, 该误差接近于基于多点拟合法坐标系转换方法, 远小于基于基平面拟合的坐标系转换方法与基于关节圆交点的坐标系转换方法。与此同时, 本文所提出的坐标系转换方法的测量效率仅次于基于关节测量圆交点的转换方法。因此, 试验结果表明本文所提出的基于多点拟合与轴线矢量测量的融合坐标系转换方法能够实现高精度、高效率的工业机器人基坐标系与激光跟踪仪测量坐标系的快速转换。

参 考 文 献

- [1] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
WANG Tianmiao, TAO Yong. Research status and Industrialization development strategy of Chinese industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [2] LEHMANN C, PELLICCIARI M, DRUST M, et al. Machining with industrial robots: The COMET project approach[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [3] 史晓佳, 张福民, 曲兴华. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 1-7.
SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua. Position and attitude measurement and online errors compensation for kuka industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 1-7.
- [4] 陆艺, 于丽梅, 郭斌. 基于封闭尺寸链的工业机器人结构参数标定[J]. 仪器仪表学报, 2018 (2): 38-46.
LU Yi, YU Limei, GUO Bin. Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018 (2): 38-46.
- [5] SANTOLARIA J, CONTE J, GINÉS M. Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved CPA method and active retroreflector[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 2087-2106.
- [6] 周炜, 廖文和, 田威. 基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 42-48.
ZHOU Wei, LIAO Wenhe, TIAN Wei. Theory and experiment of industrial robot accuracy compensation method based on spatial interpolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 42-48.
- [7] CHEN Gang, LI Tong, CHU Ming, et al. Review on kinematics calibration technology of serial robots[J].

- International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1759-1774.
- [8] 齐立哲, 汤青, 负超, 等. 机器人三维激光扫描视觉系统标定误差[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 9-15.
 QI Lizhe, TANG Qing, YUN Chao, et al. Calibration error of robotic vision system of 3D laser scanner[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 9-15.
- [9] 刘常杰, 段宇, 王一, 等. 机器人柔性坐标测量系统现场校准技术研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 1-6.
 LIU Changjie, DUAN Yu, WANG Yi, et al. Study on the field calibration technology of robot flexible coordinate measurement system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 1-6.
- [10] LIU Bailing, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. A rapid coordinate transformation method applied in industrial robot calibration based on characteristic line coincidence[J]. Sensors, 2016, 16(2): 1-16.
- [11] SANTOLARIA J, GINÉS M. Uncertainty estimation in robot kinematic calibration[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2013, 29(2): 370-384.
- [12] LIU W L, LI Y W. A novel method for improving the accuracy of coordinate transformation in multiple measurement systems[J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(9): 1-10.
- [13] SHI X, ZHANG F, QU X, et al. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(5): 1-14.
- [14] 刘湛基, 王晗, 陈杼, 等. 机器人与激光跟踪仪的坐标系转换方法研究[J]. 中国测试, 2017, 43(11): 102-107.
 LIU Zhanji, WANG Han, CHEN Xun, et al. Study on the method of coordinate transformation between robot and laser tracker[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(11): 102-107.
- [15] 贺红林, 凌普, 吴少兴, 等. 喷涂机器人的激光跟踪测量法运动参数标定[J]. 控制工程, 2016, 23(8): 1149-1155.
 HE Honglin, LING Pu, WU Shaoxing, et al. Spraying robot kinematical parameter calibration based on laser tracker[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(8): 1149-1155.
- [16] MA N, SU C, ZHANG X. Research on fast field calibration method of industrial robot[C]// 2015 Chinese Automation Congress (CAC), November 11-29, 2015, Wuhan, China. IEEE, 2015: 443-447.
- [17] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 236-245.
- [18] WANG X, LI D, WANG M. Complete calibration of industrial robot with limited parameters and neural network[C]// IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, October 05-07, 2017, Ottawa, Canada. IEEE, 2016: 103-108.
- [19] 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 Bo, WEI Zhenzhong, ZHANG Guangjun. Rapid coordinate transformation between a robot and a laser tracker[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1986-1990.
- [20] 李睿, 曲兴华. 工业机器人运动学参数标定误差不确定性研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2192-2199.
 LI Rui, QU Xinghua. Study on calibration uncertainty of industrial robot kinematic parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2192-2199.
- [21] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 195-200.
 REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. Method of robot calibration based on laser tracker[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195-300.
- [22] 叶声华, 王一, 任永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 202-205.
 YE Shenghua, WANG Yi, REN Yongjie, et al. Calibration of robot kinematic parameters based on laser tracker[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 202-205.
- [23] 中华人民共和国国家标准, GB/T 12642—2013, 工业机器人—性能规范及其试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
 National Standards of People's Republic of China, GB/T 12642—2013, Industrial robot performance criteria and related test methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

作者简介: 乔贵方, 男, 1987 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机器人标定与机器人仿生控制。

E-mail: qiaoguifang@126.com

孙大林, 男, 1995 年出生。主要研究方向为工业机器人标定。

E-mail: 220173217@seu.edu.cn

宋光明(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为分布式机器人与人机交互。

E-mail: mikesong@seu.edu.cn