

激光跟踪仪与机器人坐标系转换方法研究^{*}

向民志¹, 范百兴¹, 李祥云¹, 隆昌宇²

(1. 解放军信息工程大学, 郑州 450001;

2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

[摘要] 为了快速准确求解激光跟踪仪与机器人坐标系转换参数,提出了一种基于工具标定与公共点转换相结合的坐标转换方法。首先,将靶球固定在机器人末端工具上,控制机器人示教6个不同位置,并同时用激光跟踪仪测量球心坐标;然后,采用基于距离约束的方法计算靶球在机器人基坐标系中的位置;最后,采用基于罗德里格矩阵的最小二乘迭代法进行坐标转换。试验表明:该方法操作简单,能够避免拟合误差的影响,提高坐标转换精度。

关键词: 激光跟踪仪; 机器人坐标系; 罗德里格矩阵; 坐标转换; 定位误差

Study on Coordinate Transformation Between a Laser Tracker and a Robot

XIANG Minzhi¹, FAN Baixing¹, LI Xiangyun¹, LONG Changyu²

(1. PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] In order to solve the conversion parameters of the laser tracker and the robot coordinate system quickly and accurately, a coordinate transformation method based on tool calibration and common point conversion is proposed. Firstly, the target ball was fixed on the robot end tool, the robot was taught to teach six different positions, and the center coordinates were measured by the laser tracker. Then, the position of the target ball in the robot coordinate system was calculated based on the distance constraint method; Finally, the least squares iteration based on Rodrigue matrix was adopted to coordinate transformation. The experimental results show that this method is simple and can avoid the influence of fitting error and improve the precision of coordinate transformation.

Keywords: Laser tracker; Robot coordinate system; Rodrigue matrix; Coordinates transformation; Positioning error

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.098

一般工业机器人重复定位精度很高,但绝对定位精度较差。为了提高机器人的性能及拓展工业机器人的应用范围,需要对机器人运动学模型的参数进行标定来降低它的绝对定位误差,目前通常借助于激光跟踪仪来完成^[1-6]。获取激光跟踪仪与机器人基坐标系的转换关系是实现机器人运动学模型标定的基础。文献[2-3]是通过控制机器人抓着测量靶标,沿机器人基坐标系各个轴运动并记录测量设备的数据,通过直线拟合得到机器人基坐标系各个坐标轴在激光跟踪仪坐标系下的方向向量,再进一步求解平移参数。文献[7]中的坐标转换方法需要控制机器人做三次单轴旋转运动,对机器人单轴转动产生的圆弧轨迹进行空间圆拟合,由3个空间圆的单位法向量可得旋转矩阵,再通过几何关系反推机器

人基坐标系原点在激光跟踪仪坐标系下的坐标。

上述坐标转换方法需要控制机器人做单轴旋转运动或者是沿机器人基坐标系轴线直线运动,现场操作复杂,并且需要采集足够数量的点以提高拟合精度。为此,本文提出了一种激光跟踪仪与机器人基坐标系快速转换的方法。该方法最少只需要控制机器人采集4个点,通过工具标定和公共点转换模型即可计算出坐标系间的转换关系,操作简单,适合工业现场使用。

1 坐标系转换方法

坐标系转换试验系统由激光跟踪仪、靶标球及工业机器人组成(图1)^[3],其中靶标球安装在工业机器人末端执行器上。图1中 P 表示测量的靶标中心, $\{B\}$ 为机器人基坐标系, $\{E\}$ 为机器人末端连杆坐标系(即法兰盘坐标系), $\{M\}$ 为激光跟踪仪坐标系。

^{*} 基金项目: 河南省科技攻关项目(152102210006; 162102210029)。

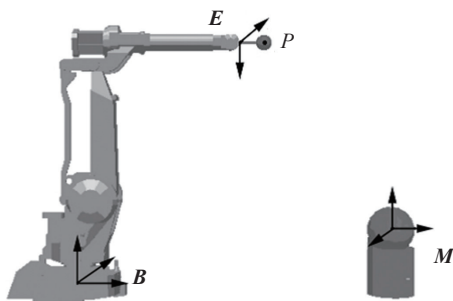


图1 试验系统组成原理图

Fig.1 Principle of experimental system

基坐标系 $\{B\}$ 和法兰盘坐标系 $\{E\}$ 是工业机器人最基本的 2 个坐标系。 $\{B\}$ 是固连在机器人基座上的坐标系,它是其他用户坐标系的参考基准; $\{E\}$ 是固连在机器人末端连杆上的坐标系,它是其他工具坐标系的参考基准;工具坐标系 $\{T\}$ 用来定义工具中心点的位置及工具的姿态,固连在机器人所持工具上,使用前需要标定。

坐标系之间的关系用齐次变换矩阵来表示。例如法兰盘坐标系 $\{E\}$ 到基坐标系 $\{B\}$ 的位姿关系可以用矩阵 ${}^B E T$ 表示:

$${}^B E T = \begin{bmatrix} {}^B E R & {}^B E p_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B E n & {}^B E o & {}^B E a & {}^B E p_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ${}^B E R$ 为法兰盘坐标系 $\{E\}$ 相对于基坐标系 $\{B\}$ 的旋转矩阵,它由 3 个方向矢量 ${}^B E n$, ${}^B E o$ 和 ${}^B E a$ 构成,分别表示 $\{E\}$ 的 3 个单位主矢量相对于 $\{B\}$ 的方向余弦。 ${}^B E p_E$ 为 $\{E\}$ 的原点相对于 $\{B\}$ 的位置矢量。 ${}^B E T$ 可由机器人运动学正解得到。

同理,可用齐次变换矩阵 ${}^B T$ 表示工具坐标系 $\{T\}$ 相对于基坐标系 $\{B\}$ 的位姿关系。用 ${}^E T$ 表示工具坐标系 $\{T\}$ 相对于法兰盘坐标系 $\{E\}$ 的位姿关系。机器人工具是固结于末端连杆上的,所以 ${}^E T$ 是固定不变的,机器人工具坐标系的标定就是确定 ${}^E T$ 的元素。

上述坐标系还满足如下转换关系:

$${}^B T \cdot {}^E T = {}^B T \quad (2)$$

在本试验系统中,根据工具坐标系标定方法标定出靶球中心 P 在法兰盘坐标系 $\{E\}$ 中的位置后,即可根据公式(2)算出靶球在机器人基坐标系 $\{B\}$ 中的位置。另外通过激光跟踪仪可以直接测量出靶球中心 P 在激光跟踪仪坐标系下的坐标,根据公共点转换即可实现两者坐标系之间的转换。

1.1 工具坐标系标定^[8]

靶球中心 P 在机器人基坐标系 $\{B\}$ 下的坐标可表示为:

$$P_B^i = {}^E T_B^i P_E \quad (i=1,2,3,\dots,N) \quad (3)$$

其中, ${}^E T_B$ 为工业机器人法兰盘坐标系 $\{E\}$ 在机器人基

坐标系 $\{B\}$ 下的转换矩阵, P_E 为 P 在法兰盘坐标系 $\{E\}$ 中的位置, N 为在机器人工作空间内的测量位置数。任取机器人两个不同测量位置 m, n , 测量坐标偏差为:

$$\Delta P_B^{mn} = {}^E T_B^m P_E - {}^E T_B^n P_E \quad (4)$$

同时,靶球中心 P 在激光跟踪仪坐标系下的坐标偏差为:

$$\Delta P_M^{mn} = P_M^m - P_M^n \quad (5)$$

空间任意两个不同位置的靶球,虽然它们在机器人基坐标系和激光跟踪仪坐标系中的坐标值不同,但是这两位置在两坐标系中的距离长度在理论上是一样的,即:

$$\|\Delta P_B^{mn}\|_2 = \|\Delta P_M^{mn}\|_2 \quad (6)$$

进一步可得:

$$\|{}^E T_B^m P_E - {}^E T_B^n P_E\|_2 = \|P_M^m - P_M^n\|_2 \quad (7)$$

其中, ${}^E T_B^m$ 、 ${}^E T_B^n$ 可以从机器人示教器中直接读取, P_M^m 、 P_M^n 可以由激光跟踪仪测量得到。根据公式(7),利用最小二乘法,可以标定靶球中心 P 在法兰盘坐标系 $\{E\}$ 中的位置 P_E 。

1.2 基于罗德里格矩阵的坐标转换

根据上文所述方法可以标定出靶球中心 P 在法兰盘坐标系 $\{E\}$ 中的坐标 P_E 。控制机器人带动靶球移动 4 个以上位置,同时记录每个位置法兰末端示教器读数和靶球中心在激光跟踪仪坐标系中的坐标值。根据公式(3)可以计算出各位置靶球中心在机器人基坐标系中的坐标。根据基于罗德里格矩阵的最小二乘迭代法即可实现两者坐标系之间的转换^[9-10]。

2 试验结果与讨论

本次试验硬件系统由工业机器人激光跟踪仪组成(图 2),试验过程中其相对位置保持不变。在机器人末端法兰盘上固定一个 L 型工件,靶球底座可粘贴在 L 型工件上的任意位置,只要固定牢固即可。试验中用到的激光跟踪仪为 Leica AT901-B 型,配合直径 38.1mm 的靶球使用,在 2.5m × 5m × 10m 的工作范围内测量精度为 $\pm (10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m})$ 。六自由度工业机器人为 KUKA KR 500 R2830 重载机器人,重复测量精度为 $\pm 0.08\text{mm}$ 。为了与文献[7]方法的坐标转换结果进行比较分析,这里控制机器人按照文献[7]所述方法做单轴旋转运动,每隔一定角度停止运动并记录激光跟踪仪的读数及相应法兰盘末端的示教器读数。

2.1 工具坐标系标定试验

根据文献[3]所述,在进行工具坐标系标定时,虽然求解的非线性方程中只有 3 个未知数,但由于机器人定位误差的存在,导致非线性方程组的系数误差较大,非

线性方程组的维数越小,求解的结果越不稳定。因此本文选择从采集到的测量点中随机选取 6 个进行工具坐标系的标定。6 个标定点的激光跟踪仪测量坐标如表 1 所示。

6 个标定点对应的由机器人示教器读取的法兰盘末端位姿数据如表 2 所示。其中 (X, Y, Z) 表示法兰盘末端坐标系相对于机器人基坐标系的平移参数, (A, B, C) 分别表示绕机器人基坐标系 Z 轴、 Y 轴和 X 轴的旋转参数。

根据上文所述工具坐标系标定方法进行标定,可得到靶球在法兰末端坐标系下的位置为 $(-45.192, 170.541, 209.844)$ 。进一步可求得 6 个标定点在机器人基坐标系中的位置如表 3 所示。

2.2 坐标转换结果对比与精度讨论



图2 硬件系统
Fig.2 Hardware system

表1 标定点激光跟踪仪测量坐标

编号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	5906.161	-2601.49	1859.313
2	5817.141	-2657.01	1271.585
3	7000.279	-3352.12	1788.04
4	5937.423	-2295.53	1793.669
5	5842.854	-2580.91	1495.027
6	6510.485	-2798.06	1791.249

表2 机器人法兰末端位姿参数

编号	X/mm	Y/mm	Z/mm	A/(°)	B/(°)	C/(°)
1	1814.97	-0.08	2289.97	90	45	90
2	1716.83	-0.08	1843.5	141.9	65.2	144.6
3	1390.28	-1166.72	2289.94	50.01	75	90.02
4	2114.91	-0.07	2289.44	90.46	75	90.48
5	1814.84	0.06	1990.17	89.96	75	89.96
6	1814.94	-699.99	2289.85	90.03	75	90.04

根据文献 [7] 所述方法,可计算得到机器人基坐标系相对于激光跟踪仪坐标系的齐次变换矩阵为:

$${}^M_B T1 = \begin{bmatrix} 0.309145 & -0.95101 & 0.003975 & 5354.509 \\ 0.951014 & 0.309136 & -0.00256 & -4549.33 \\ 0.001208 & 0.004933 & 0.999989 & -586.596 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在利用本文方法进行坐标转换时,同样选取上文工具坐标系标定用到的 6 个点,6 个标定点激光跟踪仪测量坐标以及在机器人基坐标系中的坐标分别如表 1、表 3 所示。根据上文所述,可求得机器人基坐标系相对于激光跟踪仪坐标系的齐次变换矩阵为:

$${}^M_B T2 = \begin{bmatrix} 0.309554 & -0.95087 & 0.004885 & 5351.713 \\ 0.950882 & 0.30955 & -0.00151 & -4550.322 \\ -0.000078 & 0.005112 & 0.999987 & -583.461 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在前期采集的靶球点中随机选取 13 个,根据上文标定的结果结合法兰末端坐标系的位姿数据,可以计算出靶球在机器人基坐标系中的位置。利用本文算法计算的坐标转换矩阵 ${}^M_B T2$ 将靶球坐标转到激光跟踪仪坐标系下,并与激光跟踪仪实测坐标进行比较,可得到验证点坐标转换较差如图 3 所示。同理,根据文献 [7] 算法得到的靶球工具坐标以及坐标转换矩阵 ${}^M_B T1$,可得到验证点坐标转换较差如图 4 所示。

从图 3、图 4 可知,利用本文算法计算的 X 、 Y 、 Z 方

表3 标定点在机器人基坐标系中的坐标

编号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	2024.813	88.555	2442.516
2	1944.045	152.954	1854.205
3	1649.401	-1184.42	2377.712
4	2324.953	152.951	2376.774
5	2024.671	153.088	2077.998
6	2024.823	-546.988	2377.603

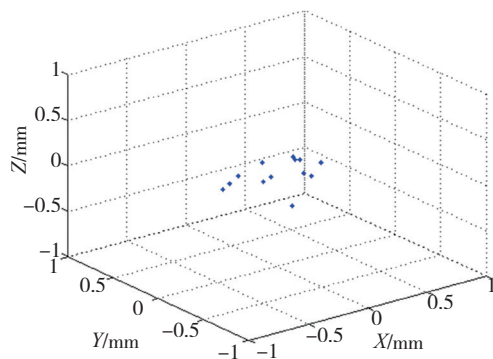


图3 新算法坐标转换较差
Fig.3 Coordinate difference of new algorithm

向的坐标转换较差与文献 [7] 中的算法计算的坐标转换较差互差绝大部分都保持在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。另外还可以看出,本文算法得到的坐标转换较差相比文献 [7] 算法得到的坐标转换较差分布更集中,进一步统计 3 个坐标分量的转换精度以及坐标转换的点位精度,得到的统计结果如表 4 所示。

利用文献 [7] 算法计算坐标转换矩阵时,首先需要采集足够多的点通过圆拟合得到机器人 3 轴在激光跟踪仪坐标系下的向量,根据 3 轴向量可得到旋转矩阵,再利用几何关系得到平移矩阵。由于机器人绝对定位精度较差,导致圆拟合精度的损失,进而影响坐标转换矩阵的精度。而本文算法不受圆拟合误差的影响,由表 4 可知,其坐标转换精度较文献 [7] 算法有了大幅度的提高。

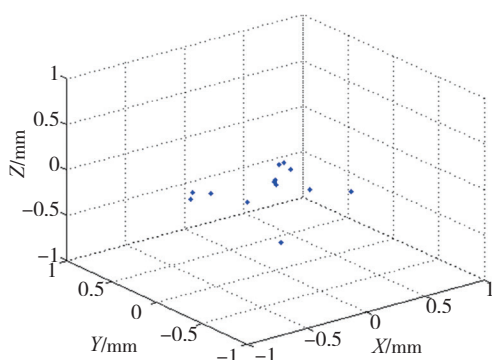


图4 文献[7]算法坐标转换较差

Fig.4 Coordinate difference of algorithm in literature [7]

表4 坐标转换精度统计

方法	转换点检核精度 /mm			
	X	Y	Z	P
文献 [7] 算法	0.31	0.23	0.32	0.51
本文算法	0.17	0.18	0.11	0.28

3 结论

本文提出了一种求解激光跟踪仪与机器人基坐标系转换参数的新方法。相比于传统基于拟合的坐标转换方法,本文方法不需要控制机器人做单轴旋转运动或者沿机器人基坐标系轴运动,只需要控制机器人移动至少 4 个不同位置,即可快速获取转换关系,简化了作业流程,有效提高了测量效率。文中对两种方法求解的坐标转换结果进行了对比,试验结果表明该方法相比传统基于机器人单轴旋转运动的方法,不需要进行拟合,能有效避免拟合误差的影响,提高了坐标转换的精度。

参考文献

[1] 李定坤,叶声华,任永杰,等. 机器人定位精度标定技术的

研究[J]. 计量学报, 2007, 28(3): 224-227.

LI Dingkun, YE Shenghua, REN Yongjie, et al. Research on robot's positioning accuracy calibration[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(3): 224-227.

[2] 冯晓波. 机器人准确制孔技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

FENG Xiaobo. Research on robot precision drilling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[3] 齐立哲,陈磊,王伟,等. 基于激光跟踪仪的机器人误差测量系统标定[J]. 制造技术与机床, 2012(10): 90-94.

QI Lizhe, CHEN Lei, WANG Wei, et al. The calibration for industrial robot's position error measuring system based on the laser tracker[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(10): 90-94.

[4] 杨丽红,秦绪祥,蔡锦达,等. 工业机器人定位精度标定技术的研究[J]. 控制工程, 2013, 24(4): 785-788.

YANG Lihong, QIN Xuxiang, CAI Jinda, et al. Research on industrial robot's positioning accuracy calibration[J]. Control Engineering of China, 2013, 24(4): 785-788.

[5] 赵伟. 基于激光跟踪测量的机器人定位精度提高技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

ZHAO Wei. Research on improvement of positioning accuracy of robot based on laser tracker measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[6] 杜亮,张铁,戴孝亮. 激光跟踪仪测量距离误差的机器人运动学参数补偿[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2351-2357.

DU Liang, ZHANG Tie, DAI Xiaoliang. Robot kinematic parameters compensation by measuring distance error using laser tracker system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2351-2357.

[7] 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, 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.

[8] 李祥云,王同合,范百兴,等. 基于激光跟踪仪的机器人工具坐标系标定[J]. 测绘科学与工程, 2017(2): 19-22.

LI Xiangyun, WANG Tonghe, FAN Baixing, et al. The calibration of robot tool coordinate frame based on the laser tracker[J]. Geomatic Science and Engineering, 2017(2): 19-22.

[9] 杨凡,李广云,王力. 三维坐标转换方法研究[J]. 测绘通报, 2010, 28(6): 5-7,15.

YANG Fan, LI Guangyun, WANG Li. Research on the methods of calculating 3D coordinate transformation parameters[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, 28(6): 5-7,15.

[10] 韩梦泽,李克昭. 基于罗德里格矩阵的空间坐标转换[J]. 测绘工程, 2016, 25(4): 25-27.

HAN Mengze, LI Kezhao. Spatial coordinate transformation based on Rodrigues matrix[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(4): 25-27.

通讯作者: 范百兴,博士、副教授,研究方向为精密工程与工业测量, E-mail: fbxhrhr@sina.com。

(责编 逸飞)