

一种基于激光位移传感器的机器人工具校准方法

陈巍^{1,2}, 叶松涛^{1,2}, 张海洋^{1,2}, 倪华康²

(1. 华中科技大学 无锡研究院, 江苏 无锡 214000; 2. 无锡中车时代智能装备有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 在工业机器人加工系统作业过程中, 工业机器人末端工具的频繁更换及加工时出现的各类振动及碰撞会使工具位置发生偏移, 因此在加工系统运行前需对机器人末端工具的真实位置实施合理标定, 以确保加工系统具备必要的定位精度。针对常用的多点标定法难以实现自主标定问题, 设计了一种利用激光位移传感器自主标定机器人工具坐标系的方式, 其原理简单、可靠性强、自动化程度高且易于实现。实验结果证明了该标定方式的有效性, 其可完全代替人工标定过程。

关键词: 工业机器人; 工具坐标系标定; 激光位移传感器; 自动化

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)03-0029-04

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.03.006

A Robot Tool Calibration Method Based on Laser Displacement Sensor

CHEN Wei^{1,2}, YE Songtao^{1,2}, ZHANG Haiyang^{1,2}, NI Huakang²

(1. HUST-Wuxi Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214000, China;

2. Wuxi CRRC Times Intelligent Equipment Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: During the working process of industrial robots, vibrations and collisions during continuous replacement of end tools of device and their processing will inevitably make the tools deviating from the predetermined position. Therefore, the actual position of the tool needs to be recalibrated before work to ensure the accuracy of the robot processing system. Since the commonly used multi-point calibration method is not easy to achieve automatic calibration, this paper proposed an automatic calibration method based on laser displacement sensor for tool coordinate system. The method has the advantages of simple principle, high reliability, high degree of automation and easy implementation. In the self-calibration system of the framework, the calibration test of the tool coordinate system is carried out reasonably, and the feasibility of the automatic calibration strategy designed in the paper is verified by the experiment. It is shown that the proposed method can replace the manual operations.

Keywords: industrial robot; tool coordinate system calibration; laser displacement sensor; automation

0 引言

随着制造行业自动化程度的不断提升, 工业机器人的普及程度也在不断提高。在实际应用过程中, 工业机器人主要借助末端法兰盘中装配的各类工具来完成相应的加工目标任务^[1-2]; 当选工具一旦被装配好后, 其相对于机器人末端坐标系的位置转换关系即被确定。然而实际应用时, 工具装配位置的偏差、机器人系统作业碰

撞及其加工振动会造成工具实际位置与预定位置间出现偏差, 这会导致标定的工具坐标系精度降低, 致使机器人系统的加工精度无法达到工艺要求, 甚至可能影响生产线的正常运转, 造成时间、资金以及原材料的浪费^[3]。为此, 应采用高效、稳定的工具坐标系标定方式以提升机器人系统加工精度, 确保生产能够稳步开展。近年来, 国内外不少学者针对机器人末端工具的位置标定问题开展了研究。文献[4]通过平面镜辅助机器人末端工具的位置标定, 使机器人末端工具的标定精度提高到 1.5 mm。文献[5]借助机器人标定设备 Dynacal,

收稿日期: 2019-05-27

作者简介: 陈巍(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事机器人检测技术研究。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB130372)

使 FANUC 机器人的定位误差小于 0.5 mm。文献 [6] 提出七点法来重新标定处理机器人工具坐标系,其首先操控机器人由 4 个方向移动至同一位置,接着利用超定函数关系通过运算获得工具中心点 (tool center point, TCP) 位置相应的数值解,最后通过后三点标定获得工具坐标系的实际形态,其本质属于多点标定方式。文献 [7] 引入接触传感器及跟踪靶球改良了多点标定法。文献 [8] 利用激光位移传感器改良了多点标定法。文献 [9] 提出的三点五步法大大简化了传统标定法的流程。文献 [10] 首先通过操控机器人运动,使安装在机器人末端的固定尖端和坐标系标定板之中的某特定点相接,构建 1 类临时坐标系,同时求得此坐标系实际的位姿;接着通过工具替换固件,操控机器人运作使工具坐标姿态 (tool control frame, TCF) 原点之前的特定点相接,构建临时坐标系且能标定工具坐标系之中的各个参数。

多点标定法操作简单、可靠性高,是目前被改良与实际使用最多的工具坐标系标定方法之一;但其在标定过程中需确认工具是否到达指定点,因此实现标定自动化的难度大。为此,本文提出一种基于激光位移传感器的机器人工具自主校准方法,并通过实验验证其效果。在开始标定之前,机器人已进行了本体标定,因此可以忽略机器人本体误差。

1 机器人工具坐标系标定方法

目前,对工具坐标系方面的研究大多采用多点标定法^[11]。工具坐标系自动化标定的特点之一是在标定过程中基本无须机器人操控;然而实际标定时,若不进行操控与校准,则无法保证标定精度。为此,本文提出一种外部基准法,其基于激光位移传感器,可对工具进行自动标定。

1.1 多点标定法

多点标定法 (图 1) 包括 TCP 多点标定 (3~6 点) 和 TCF 多点标定^[12]两部分。

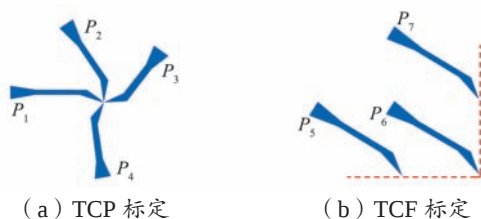


图 1 多点标定法示意

Fig. 1 Multi-point calibration method

TCP 多点标定法是机器人从多方向使 TCP 移动至相同点后通过运算获得 TCP 位置,也就是机器人工具坐标系原点相对于机器人末端坐标系的位置。这种方式能够让若干标定间存在一类方位关联,然后通过运算

获得工具坐标系和末端坐标系间的相互位置。

TCF 多点标定是通过控制机器人工具末端到达空间中具有特定关系的几个标定点,根据标定点的位姿关系,计算得到机器人工具的姿态。

理论上,多点标定法可靠性及标定精度高、操作简便、算法易实现且无须外部辅助测量设备;但实际操作时,受各种因素影响,难以保证标定的准确度。为此,研究人员尝试利用相机^[4-10]、激光位移传感器^[13-15]及激光跟踪仪^[16-18]等外部测量设备来确保在 TCP 点位置标定过程中工具末端可移至某个定点;只是这些装置要么售价昂贵,要么操控流程烦琐,使其应用停滞在实验室阶段。

1.2 基于激光位移传感器的工具自动标定法

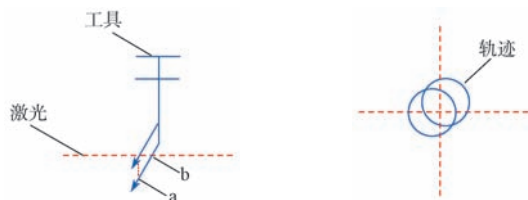
采用多点标定法进行 TCP 点位置标定时,需将工具末端移动至一个固定位置;然而实际标定时,若不进行操控与校准,未标定工具 TCP 点则无法被移至机器人空间中的定点位置,可见六点标定法无法满足自主标定需求。为此,本文提出一种基于激光位移传感器的工具自动标定方法,实际应用时,其在机器人空间尺寸链中置入相应的传感元件坐标系,将工具在此坐标系中测得的位姿关联转换为在末端坐标系下的位姿关联,从而实现标定目标。

该检测系统硬件包括 2 个激光位移传感元件及相应固定装置。传感器坐标系与机器人基坐标系之间的相对位置关系需预先标定。安装时,2 个激光位移传感器的光路需在同一水平面内并分别作为传感器坐标系的 x 轴与 y 轴,其交汇位置为坐标系的原点。

本文提出的工具坐标系自动标定方法具体如下:

(1) 标定工具坐标系实际姿态

操控机器人,首先使其末端坐标系的 z 轴平行于传感器坐标系的 z 轴,且末端工具的第一部分在坐标系中平移 (锁定末端姿态),轨迹为圆形;接着使机器人沿末端坐标系的 z 轴移动并控制其移动,使末端工具的第二部分进行与第一部分相同的运动 (图 2)。



(a) 末端工具与激光相交 (b) 末端工具的移动轨迹 (俯视)

图 2 TCF 多点标定示意

Fig. 2 Schematic diagram of TCF multi-point calibration method

2 个圆轨迹与传感器坐标系坐标轴相交,可得 4 个交汇位置的坐标;利用两圆心坐标差值及机器人末端执

行器 z 方向的位移, 可计算出工具坐标系 z 轴在传感器坐标系下的实际姿态。根据机器人空间尺寸链 (图 3), 相对于机器人末端坐标系, 工具坐标系的位姿可由式 (1) 表示, 式 (2) 为其展开式, 二者可表征出工具坐标系相较机器人末端坐标系的一种转变。

$$\boldsymbol{T}_{E,T}=\boldsymbol{T}_{E,B}\boldsymbol{T}_{B,S}\boldsymbol{T}_{S,T} \tag{1}$$
$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{E,T} & \boldsymbol{T}_{E,T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{E,B} & \boldsymbol{T}_{E,B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{B,S} & \boldsymbol{T}_{B,S} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{S,T} & \boldsymbol{T}_{S,T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: E ——机器人末端坐标系; T ——工具坐标系; B ——机器人基坐标系; S ——传感器坐标系; $\boldsymbol{T}_{E,T}$ ——工具坐标系相对于机器人末端坐标系的坐标变换; $\boldsymbol{R}_{E,T}$ ——工具坐标系相对于机器人末端坐标系的姿态变换; $\boldsymbol{T}_{E,B}$ ——机器人基坐标系相对于机器人末端坐标系的坐标变换; $\boldsymbol{R}_{E,B}$ ——机器人基坐标系相对于机器人末端坐标系的姿态变换; $\boldsymbol{T}_{B,S}$ ——传感器坐标系相对于机器人基坐标系的坐标变换; $\boldsymbol{R}_{B,S}$ ——传感器坐标系相对于机器人基坐标系的姿态变换; $\boldsymbol{T}_{S,T}$ ——工具坐标系相对于传感器坐标系的坐标变换; $\boldsymbol{R}_{S,T}$ ——工具坐标系相对于传感器坐标系的姿态变换。

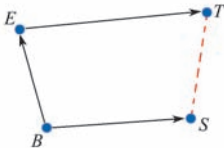


图 3 机器人空间尺寸链
Fig. 3 Robot space dimension chain

由式 (2) 可得两个坐标系的姿态变换方程:

$$\boldsymbol{R}_{E,T}=\boldsymbol{R}_{E,B}\boldsymbol{R}_{B,S}\boldsymbol{R}_{S,T} \tag{3}$$

本方案仅用于针尖型工具的合理标定, 故仅需标定出工具坐标系 z 轴实际形式, 则式 (3) 可被简化为式 (4), 由其即可标定出工具坐标系 z 轴相对于机器人末端坐标系的实际方向向量:

$$\boldsymbol{Z}_E=\boldsymbol{R}_{E,B}\boldsymbol{R}_{B,S}\boldsymbol{Z}_S \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{Z}_E$ ——工具坐标系 z 轴相对于机器人末端坐标系的实际方向向量; $\boldsymbol{Z}_S$ ——工具坐标系 z 轴相对于传感器坐标系的实际方向向量。

(2) 标定工具实际位置

在标定处理工具坐标系实际姿态后, 为确保其实际

姿态和工具坐标系的姿态相一致, 在机器人末端坐标系的原点位置构建临时坐标系并使其 z 轴和传感元件坐标系的 z 轴平行, 操控机器人使其末端工具在传感元件坐标系内平移, 一旦工具和传感元件光路交汇, 机器人则停运; 接着操控机器人使其末端工具顺着临时坐标系 z 轴反向移动而远离传感元件光路交汇位置, 使工具沿该坐标系 z 轴以 0.1 mm 步进移动, 直至传感元件读数有效, 此时工具和传感元件光路交汇, 交汇位置就是工具 TCP 位置。记下这个时刻机器人末端位置关节的实际姿态和传感元件的读数, 根据式 (5) 标定出工具相较机器人末端关节的实际所处位置。

$$\boldsymbol{T}_{E,T}=\boldsymbol{R}_{E,B}\boldsymbol{R}_{B,S}\boldsymbol{T}_{S,T}+\boldsymbol{R}_{E,B}\boldsymbol{T}_{B,S}+\boldsymbol{T}_{E,B} \tag{5}$$

综上所述, 在工具真实信息不确知的前提下采用此标定方式, 在标定过程中无须让工具精准地到达机器人空间中的一个固定位置, 即不存在人眼校准的过程, 所以该方法能很好地用于机器人工具坐标系自主标定。

2 标定对比实验

在实际加工过程中, 目前只对工具采用手动多点标定法来确定工具 TCP 的位置参数。为了验证所提出的工具坐标系自动标定方法的有效性, 本文利用 ABB 公司的 4400/60 型机器人与 Sick 公司的 OD2-N120W60I2 型位移测量传感器搭建了相应的机器人工具自动标定系统, 并进行了对照实验。

通常, 机器人末端工具装配时, 要让工具位于不同位置以实施多点标定。以手动标定的 TCP 位置数据为基准, 通过自动标定数据和基准数据的比较来评估此自动标定方案的实际效果。本实验中, 操控机器人使末端工具移动至 5 个位置, 所获得的 TCP 位置标定结果如表 1 所示。可以看出, 自动标定结果与手动标定的结果基本一致, 平均偏差为 1.55 mm, 可用于一般精度要求的机器人应用中; 同时该自动标定方案完成标定过程耗时约 1 min, 而手动标定方法一般耗时在 10 min 左右, 标定效率得以大幅提升, 从而证明该工具坐标系自动标定方案的有效性。

表 1 工具坐标系 TCP 点位置标定结果
Tab. 1 Calibration results of the tool coordinate system with TCP multi-point calibration method

编号	自动标定结果/mm	手动标定结果/mm	标定结果差距/mm
1	[18.988, 0.106, 338.323]	[16.715, 0.295, 339.243]	2.459
2	[6.784, -14.690, 331.896]	[7.373, -14.138, 332.125]	0.839
3	[0.416, -24.970, 330.482]	[0.776, -26.016, 329.546]	1.449
4	[12.219, -21.952, 333.208]	[12.597, -20.229, 332.875]	1.795
5	[2.111, -29.025, 330.214]	[2.572, -28.028, 329.726]	1.201

3 结语

对于目前机器人加工应用中普遍采用的 TCP 多点标定法,本文分析了其存在的难以满足自动化操作的缺点,针对工业机器人的 TCP 标定,提出一种利用激光位移传感器来实现机器人工具自主校准的策略,并通过手动和自动标定对比实验验证了该方法的有效性。本文提出的机器人工具自主校准方法目前仅适用于对精度要求不是很高的加工应用中;对于精度要求较高的加工应用,如机器人铣削加工,还需要进一步提升该方法的标定精度。

参考文献:

- [1] 孙英飞,罗爱华.我国工业机器人发展研究[J].科学技术与工程,2012,12(12):2912-2918.
- [2] 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.
- [3] 张云殊.工业机器人手眼标定技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [4] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [5] SHIBUYA Y, MARU N. Control of 6 dof arm of the humanoid robot by linear visual servoing[C]//2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2009.
- [6] 许海霞,王耀南,万琴,等.一种机器人手眼关系自标定方法[J].机器人,2008(4):373-378.
- [7] VEITSCHEGGER W K, WU C. Robot calibration and compensation[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(6): 643-656.
- [8] 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.
- [9] 刘常杰,班荣兴,郭寅,等.基于双目视觉机器人 TCP 校准方法研究[J].红外与激光工程,2015,44(6):1912-1917.

- [10] 杜姗姗,周祥.基于相机空间点约束的机器人工具标定方法[J].计算机应用,2015,35(9):2678-2681.
- [11] 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.
- [12] 宋月娥,吴林,田劲松,等.弧焊机器人工具参数标定[J].焊接学报,2001(5):1-4.
- [13] NUBIOLA A. Calibration of a serial robot using a laser tracker[D]. Montreal: École de technologie supérieure, 2011.
- [14] 郭青阳.基于 KUKA 工业机器人的定位误差补偿方法的研究[D].长春:长春工业大学,2016.
- [15] 王英男,戴曙光.线激光器的手眼标定方法[J].电子科技,2015,28(7):183-185.
- [16] 罗润馨.工业机器人末端精确定位技术[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [17] 朱剑芳.基于激光测量的工业机器人定位研究[J].激光杂志,2018,39(10):143-146.
- [18] 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.
- [19] HAYATI S A. Robot arm geometric link parameter estimation[C]//The 22nd IEEE Conference on Decision and Control. San Antonio, USA: IEEE, 1983.
- [20] STONE H W, SANDERSON A C. Statistical performance evaluation of the S-model arm signature identification technique[C]//Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Philadelphia, USA:IEEE, 1988.
- [21] ZHUANG H, ROTH Z S, HAMANO F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(4): 451-463.
- [22] CHEN I, YANG G, TAN C T, et al. Local POE model for robot kinematic calibration[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(11/12): 1215-1239.
- [23] ROTH Z, MOORING B, RAVANI B. An overview of robot calibration[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(5): 377-385.
- [24] WANG X, RED E. Robotic TCF and rigid-body calibration methods[J]. Robotica, 1997, 15(6): 633-644.
- [25] 熊烁,叶伯生,蒋明.机器人工具坐标系标定算法研究[J].机械与电子,2012(6):60-63.

(上接第17页)

5 结语

为解决传统负载敏感液压系统因负载油路长而产生沿程压力损失导致控制不精确、响应速度慢的问题,本文设计了一种深海作业级 ROV 用电控负载敏感液压系统。该系统同时具备负载敏感模式和电控恒压模式,满足深海作业级 ROV 对液压系统控制方式多样性的要求。仿真结果表明,该系统压力控制精确;流量从 0 至目标值的响应时间仅 0.17 s;在负载波动 $\pm 30\%$ 的情况下,系统输出流量波动仅 1.51%,完全能够满足深海作业级 ROV 正常的工程应用需求。

参考文献:

- [1] 汪小芳,张军,迪茹侠.基于 AMEsim 的负载敏感液压系统防冲击特性的研究[J].液压与气动,2018(11):55-60.
- [2] 柳玉龙.负载敏感变量泵动态性能分析[J].机床与液压,

2017(11):93-96.

- [3] 王佃武.负载敏感控制系统设计中应注意的问题及措施[J].液压与气动,2012(10):115-116.
- [4] 张春辉,赵静一,布丹,等.基于 AMEsim 的负载敏感充液系统研究[J].液压与气动,2014(11):6-9.
- [5] 张立杰,王力航,李德新,等.负载敏感阀前补偿系统原理分析[J].液压与气动,2015(7):63-67.
- [6] 葛磊,赵虎,权龙.基于 SimulationX 的多路阀负载补偿阀建模分析[J].液压与气动,2013(10):1-14.
- [7] 李振冬.电控负载敏感控制方案[J].液压气动与密封,2012(11):68-69.
- [8] 景俊华.负载敏感系统的原理及应用[J].流体传动与控制,2010(6):21-24.
- [9] 徐志刚.负载敏感泵控系统流量控制方法研究[J].液压与气动,2014(12):51-54.
- [10] 王维东,陈忠强,黄新年.压力补偿器在液压调速系统中的应[J].流体传动与控制,2005(9):18-20.
- [11] 梁全,谢基晨,聂利卫.液压系统 Amesim 计算机仿真进阶教程[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [12] 梁全,苏齐莹.液压系统 Amesim 计算机仿真指南[M].北京:机械工业出版社,2014.