

移动机器人重复入位误差在线补偿方法

石瀚斌,李波,田威

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为解决移动机器人由于移动平台多次重复入位导致机器人基坐标系发生偏移从而产生入位误差问题,提出一种离线标定与在线补偿相结合的移动机器人重复入位误差补偿方法。使用激光跟踪仪初始标定移动机器人基坐标系与产品坐标系,获得两者之间的转换关系;建立移动机器人重复入位误差模型,利用末端执行器携带的测量设备进行入位误差在线补偿;针对移动制孔机器人进行重复入位误差在线补偿试验。试验结果表明:入位误差补偿可大幅提高机器人末端的定位精度,验证了补偿方法的可行性与有效性。

关键词:移动机器人;在线标定;重复入位误差;点集匹配

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0164-04

On-line Compensation Method for Repeated Positioning Error of Mobile Robot

SHI Hanbin, LI Bo, TIAN Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To solve the positioning error of mobile robot caused by the deviations of robot base coordinate system due to the repeated positioning of mobile platform, a new method combining off-line calibration with on-line compensation for mobile robot's repeated positioning error is proposed. The laser tracker is used to calibrate the base coordinate system and the product coordinate system of the mobile robot initially to obtain their conversion relationship. The repeated positioning error model of the mobile robot is established, and the online compensation of the positioning error is carried out by using the measuring equipment affiliated to the end effector. The online compensation experiment of the repeated positioning error is conducted for the mobile drilling robot. The experimental results show that the positioning accuracy of the robot is improved by the positioning error compensation, which verifies the feasibility and effectiveness of the compensation method.

Keywords: mobile robot; on-line calibration; repeated positioning error; point set matching

0 引言

随着我国四代机服役以及探月工程的全面实施,大型复杂构件的高质量加工成为航空航天制造领域的关键技术。因此,近几年移动机器人原位作业模式逐渐兴起,在大型结构件的制孔、磨抛等作业中开始得到应用^[1]。在实际加工前,移动机器人系统需提前标定机器人基坐标系与产品坐标系之间的转换关系,从而通过离线编程实现自动化加工^[2]。而由于移动平台,如导轨、全向移动小车等,重复定位精度较差,通常会存在1~5 mm的偏差,导致机器人基坐标系发生偏移,在加工中引入重复入位误差。因此,建立移动机器人重复入位误差模型,并提出一种入位误差补偿方法对保证其加工精度具有重要意义。

移动机器人入位误差补偿可看做机器人基坐标系与产品坐标系之间的二次标定,根据标定方式的不同,可将其分为离线补偿与在线补偿。离线补偿通常为在实际加工之前,通过激光跟踪仪、大视场双目测量仪等外部测量设备对机器人基坐标系与产品坐标系进行重新标定,将标

定结果替换初始结果,从而完成补偿。如DORNAIKA F等在ZHUANG H Q的基础上,基于正二次误差函数表达的四元数法建立误差方程,并将非线性约束极小化,可同时求解旋转和平移参数^[3-4]。该方法虽然在理论上可达到很高的标定精度,但需获得机器人末端的姿态信息,测量过程中存在较大的噪声干扰,从而影响标定结果。因此WU L等建立了基于 $Ax=By$ 的解耦齐次矩阵,只需机器人末端的位置信息,通过多次迭代提高旋转矩阵的正交性,标定精度高且可行性更强^[5]。上述方法往往可获得较高的标定精度,但需人工的参与,标定过程复杂繁琐,较难融入自动化加工流程。

在线补偿通常直接在机器人末端搭载测量设备,如工业相机、激光线扫描仪等,在加工过程中对定位参考点实时测量,从而实现在线补偿^[6-8]。韦溟等通过机器人末端携带的单个工业相机实现机器人基坐标系与工件坐标转换关系的现场快速标定,方法便捷、高效^[9]。在线补偿无需外部测量设备,可实现自动化标定,但补偿精度受限。

本文采取离线标定与在线补偿相结合的方式,提出了一种移动机器人重复入位误差在线补偿方法。初始标定

基金项目:国家自然科学基金项目(52005254);国家重点研发计划项目(2018YFB1306800);江苏省自然科学基金项目(BK20190417)

第一作者简介:石瀚斌(1996—),男,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为机器人精确控制技术。

移动机器人基坐标系与产品坐标系转换关系后,建立移动机器人重复入位误差模型,在线补偿入位误差;并最终通过仿真试验验证了本文方法的可行性与有效性。

1 移动机器人入位误差补偿

1.1 初始坐标系标定

移动平台在初始位置下,需要标定移动机器人基坐标系与产品坐标系的相对转换关系,这是移动机器人进行加工的前提^[10]。为保证标定精度,本文采用激光跟踪仪参与标定。移动机器人初始坐标系标定示意图如图1所示。

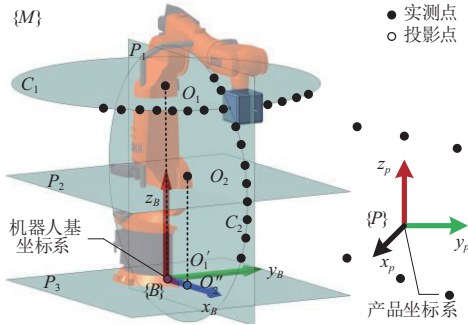


图1 移动机器人初始坐标系标定示意图

将机器人运动至初始位姿处,即机器人的各关节角分别为 $(0^\circ, -90^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ 。根据机器人结构特性可知,机器人基坐标系的原点位于A1轴转动轴线与基坐标系平面相交处,同时基坐标系的 z 轴垂直于当前位姿下A1轴转动平面, y 轴垂直于当前位姿下A2轴转动平面。因此在其他关节轴不动的情况下,分别缓慢转动机器人A1轴与A2轴,同时使用激光跟踪仪测量运动过程中机器人末端的位置坐标,并将这一系列测量点通过圆拟合得到圆 C_1 与 C_2 及其圆心 O_1 与 O_2 的位置。

经过圆心 O_2 且垂直 C_1 的法向,建立一个平面 P_2 ,根据机器人D-H参数模型,将 P_2 沿着该平面的法向向地面方向平移距离 d ,即可得到基坐标系平面,记做平面 P_3 。将 O_1 投影至平面 P_3 上,得到投影点 O_1' ,则 O_1' 即为机器人基坐标系的原点。而 z 轴的单位方向向量 n_z 与圆 C_1 的单位法向量相等, y 轴的单位方向向量 n_y 与圆 C_2 的单位法向量相等,即

$$n_z = n_{C_1}, n_y = n_{C_2} \quad (1)$$

x 轴单位方向向量 n_x 可由 n_z 与 n_y 叉乘获得,基于原点位置坐标以及各轴单位方向向量即可获得机器人基坐标系 $\{B\}$ 与测量坐标系 $\{M\}$ 之间的转换关系 ${}^M T_B$ 。

测量工装上提前布置多个特征点,并与理论数模中产品坐标系下的值进行对应,即可获得产品坐标系 $\{P\}$ 与测量坐标系 $\{M\}$ 之间的转换关系 ${}^M T_P$ 。根据 ${}^M T_B$ 与 ${}^M T_P$ 即可求得机器人基坐标系 $\{B\}$ 与产品坐标系 $\{P\}$ 之间的转换关系 ${}^B T_P$:

$${}^B T_P = ({}^M T_B)^{-1} \times {}^M T_P \quad (2)$$

1.2 入位误差在线补偿

由于移动平台重复定位精度较差,移动机器人在多次进入同一工位时基坐标系会发生轻微的平移旋转,从而无法精

确加工。所以重复入位误差可等效为当前位置与初始位置基坐标系之间的偏差。实际加工中,离线编程对于孔位的规划是在产品坐标系下,而机器人运动指令则是末端在机器人基坐标系下的位姿,因此加工时需做如下转换:

$${}^B P = {}^B T_P \times {}^P P \quad (3)$$

式中: ${}^B P$ 为待加工点在机器人基坐标系的坐标表达; ${}^P P$ 为待加工点在产品坐标系下的坐标表达; ${}^B T_P$ 为机器人基坐标系 $\{B\}$ 与产品坐标系 $\{P\}$ 之间的转换关系^[11]。

当移动机器人重复入位后,将机器人基坐标系定义为 $\{B'\}$,则式(3)变为

$${}^{B'} P = \Delta {}^{B'} T_B \times {}^B T_P \times {}^P P \quad (4)$$

式中: ${}^{B'} P$ 为待加工点在当前位置机器人基坐标系的坐标表达; $\Delta {}^{B'} T_B$ 为重复入位后当前位置与初始标定位置机器人基坐标系偏差关系的齐次矩阵,即重复入位误差。

将 $\Delta {}^{B'} T_B$ 写成 $\Delta {}^{B'} T_B = (R, t)$ 的表达形式^[12],其中, R 为重复入位误差的旋转部分, t 为重复入位误差的平移部分。选定产品上一组 n 个基准孔作为重复入位误差补偿的参考采样点,其在初始机器人基坐标系下的坐标值记做 $P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$,由采样点在产品坐标系下的理论坐标值通过式(3)计算而来。其在当前位置机器人基坐标系下的坐标值记做 $Q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$,由机器人末端执行器上携带的测量设备依次实时测量所得。则两者的关系即可表达为典型的 $Ax = By$ 的方程:

$$Q = RP + t \quad (5)$$

若已知两组对应点集 P 与 Q ,求解旋转矩阵 R 与平移矩阵 t ,即可将其看做最小二乘求最优解的问题,可转换为以下数学描述:

$$(R, t) = \operatorname{argmin}_{R, t} \sum_{i=1}^n \omega_i \| (Rp_i + t) - q_i \|^2 \quad (6)$$

式中: argmin 表示使其后式子值达到最小时变量的取值; ω_i 表示每个采样点对应的权重。

将式(6)对 t 求导可得

$$0 = \frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{i=1}^n 2\omega_i (Rp_i + t - q_i) = 2t \sum_{i=1}^n \omega_i + 2R \sum_{i=1}^n \omega_i p_i - 2 \sum_{i=1}^n \omega_i q_i \quad (7)$$

将式(7)两端同时除以 $\sum_{i=1}^n \omega_i$ 可得

$$0 = 2t + \frac{2R(\sum_{i=1}^n \omega_i p_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} - \frac{2 \sum_{i=1}^n \omega_i q_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (8)$$

引入点集 P 与 Q 的中心点 \hat{p} 与 \hat{q}

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i p_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \hat{q} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i q_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中可得

$$0 = 2t + 2R\hat{p} - 2\hat{q} \quad (10)$$

$$t = \hat{q} - R\hat{p}$$

将式(10)代入公式(6)中,式(6)可写作

$$(R, t) = \operatorname{argmin}_{R, t} \sum_{i=1}^n \omega_i \|R(p_i - \hat{p}) - (q_i - \hat{q})\|^2 \quad (11)$$

令 $x_i = p_i - \hat{p}$, $y_i = q_i - \hat{q}$, 则将式(11)中旋转矩阵 R 解耦, 转换为求解

$$R = \operatorname{argmin}_R \sum_{i=1}^n \omega_i \|R x_i - y_i\|^2 \quad (12)$$

将式(12)中后半部分 $\|R x_i - y_i\|^2$ 展开, 得

$$\begin{aligned} \|R x_i - y_i\|^2 &= (R x_i - y_i)^T (R x_i - y_i) = \\ (x_i^T R^T - y_i^T) (R x_i - y_i) &= x_i^T R^T R x_i - x_i^T R^T y_i - y_i^T R x_i + y_i^T y_i \end{aligned} \quad (13)$$

由于旋转矩阵 R 为正交矩阵, $R^T R = 1$, 而且 $x_i^T R^T y_i$ 为标量, 标量的转置仍是其本身

$$x_i^T R^T y_i = (x_i^T R^T y_i)^T = y_i^T R x_i \quad (14)$$

将 $R^T R = 1$ 与式(14)代入式(13)中, 可得

$$\|R x_i - y_i\|^2 = x_i^T x_i - 2 y_i^T R x_i + y_i^T y_i \quad (15)$$

因此式(12)可展开为

$$R = \operatorname{argmin}_R \sum_{i=1}^n \omega_i (x_i^T x_i - 2 y_i^T R x_i + y_i^T y_i) \quad (16)$$

由式(16)可得, 式中 $x_i^T x_i$ 和 $y_i^T y_i$ 项与旋转矩阵 R 无关, 所以式(16)可写作

$$R = \operatorname{argmax}_R \sum_{i=1}^n \omega_i y_i^T R x_i \quad (17)$$

则式(17)可写作

$$R = \operatorname{argmax}_R \operatorname{tr}(W Y^T R X) \quad (18)$$

式中: tr 表示矩阵的迹; $W = \operatorname{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$; $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$, $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$, 则旋转矩阵 R 的求解即可等效为求解矩阵最大迹的问题。

根据矩阵迹的相关特性可得^[13], 式(18)中 $\operatorname{tr}(W Y^T R X) = \operatorname{tr}(R X W Y^T)$, 令 $S = X W Y^T$, 并将 S 进行奇异值分解^[14-15], $S = U \sum V^T$, 其中 U 和 V 均为酉矩阵, \sum 为半正定对角矩阵, 其对角线上的元素为 S 的奇异值。则

$$\operatorname{tr}(R X W Y^T) = \operatorname{tr}(R U \sum V^T) = \operatorname{tr}(\sum V^T R U) \quad (19)$$

令 $M = V^T R U$, 代入式(19)。由于 V , R 和 U 均为正交矩阵, 则 M 也为正交矩阵, 即 $M^T M = E$, 同时满足

$$1 = m_j^T m_j = \sum_{i=1}^n m_{ij}^2 \quad (20)$$

式中 m_j 为 M 中每一列的列向量, 由上式可得 $m_{ij} \leq 1$ 。因此当且仅当 $m_{ij} = 1$ 时, $\sum M$ 的迹最大, 即 M 为单位矩阵, 可得

$$\begin{aligned} V^T R U &= E \\ R &= V U^T \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)得旋转矩阵 R , 代入式(10)中得平移矩阵 t , 从而得到重复入位误差 $\Delta^B T_B$ 。

2 试验验证

2.1 试验平台

为验证本文所提出的移动机器人重复入位误差补偿方法的有效性, 以移动制孔机器人作为试验对象, 进行试验。

试验平台主要由 KUKA KR500 R2830 工业机器人、移

动平台、末端执行器、产品工装和 API T3 激光跟踪仪组成。激光跟踪仪用于初始位置机器人基坐标系与产品坐标系之间转换关系的标定以及精度验证, 制孔末端执行器上搭载有激光 2D 线扫描仪, 与高精度电机相结合可获取定位孔在机器人基坐标系下的三维坐标, 用于入位误差在线补偿。试验平台如图 2 所示。



图 2 试验平台

2.2 初始离线标定试验

控制移动平台进入加工站位, 完成停车, 根据上文中初始位置下移动机器人基坐标系与产品坐标系之间转换关系的标定方法, 进行初始离线标定。标定结果 ${}^B T_p$ 如下:

$${}^B T_p = \begin{bmatrix} -0.157112 & 0.075545 & 0.984687 & 3973.66 \\ -0.447617 & -0.894220 & -0.002814 & 6629.97 \\ 0.880315 & -0.441205 & 0.174308 & -7022.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于基坐标系与产品坐标系之间转换关系的理论值无法获取, 因此采用定位误差的方法进行标定精度验证。通过激光跟踪仪测量产品坐标系下多组机器人末端位置 ${}^P P$, 将其经标定所得的转换矩阵 ${}^B T_p$ 变换至机器人基坐标系, 与机器人示教器中对应位置 ${}^B P$ 计算误差。则标定误差定义为

$$e = \|{}^B P - {}^B T_p \times {}^P P\| \quad (22)$$

本文在机器人工作空间内选取 50 个机器人末端位置进行验证, 初始位置的标定误差如图 3 所示。

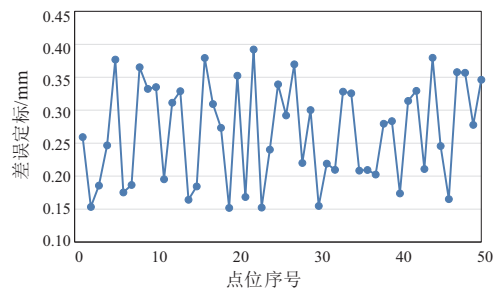


图 3 初始标定误差

由图3可得,初始位置下移动机器人基坐标系与产品坐标系标定误差的平均值 \bar{e} 为0.277 9 mm,最大值 e_{\max} 为0.390 5 mm,基本满足加工需求。

2.3 入位误差在线补偿试验

在初始位置标定结束后,控制全向移动平台重新进入加工站位,本文直接采用产品本身已有的加工基准孔作为重复入位误差补偿参考采样点,无需额外增加定位孔。参考定位孔的分布如图4所示。

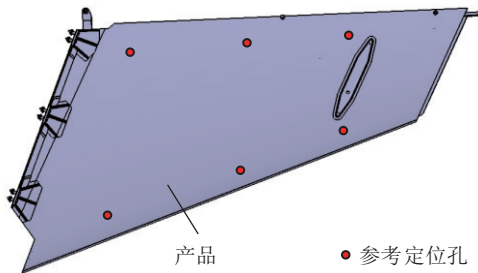


图4 参考定位孔分布

在产品的合适位置选取6个基准孔作为参考定位孔,控制机器人依次移动至定位孔位置,采用激光线扫描仪测量定位孔,从而获得定位孔在当前机器人基坐标系下的三维坐标 Q ;同时根据初始标定中得到的转换矩阵 ${}^B T_P$,将定位孔在产品坐标系下的值转换为初始位置下机器人基坐标系下的三维坐标 P ,即可根据上文方法完成重复入位误差在线补偿。补偿结果 $\Delta{}^B T_B$ 如下:

$$\Delta{}^B T_B = \begin{bmatrix} -0.989 9 & -0.133 3 & 0.048 8 & 1.450 7 \\ 0.135 6 & 0.989 6 & -0.047 9 & 1.086 1 \\ -0.041 9 & 0.054 0 & 0.997 7 & 0.842 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

重复入位误差也采用定位误差方法进行补偿精度验证,并与未进行重复入位误差补偿做对比。与上节中方法相同,未进行重复入位误差补偿的定位误差由式(22)计算可得,补偿后的定位误差定义为

$$e' = \| {}^B P - \Delta{}^B T_B \times {}^B T_P \times {}^P P \| \quad (23)$$

同样选取机器人工作空间内选取50个机器人末端位点进行验证,补偿前后的定位误差对比如图5所示。

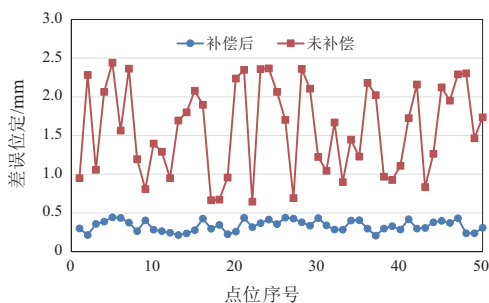


图5 补偿前后的定位误差对比

由图5可得,在移动机器人重复入位以后,未进行入位误差补偿的情况下,机器人基坐标系与产品坐标系之间的标定关系出现较大偏差,最大偏差为2.415 4 mm,若此时直接加工则会产生较大的加工误差。重复入位误差在

线补偿后,定位误差的平均值 \bar{e} 为0.332 6 mm,最大值 e_{\max} 为0.436 6 mm,与初始离线标定时的标定误差相近,表明本文方法可有效地补偿由于重复入位引起的入位误差。

3 结语

本文提出了一种离线标定与在线补偿相结合的移动机器人重复入位误差补偿方法,建立了入位误差模型,在初始标定机器人基坐标系与产品坐标系之间转换关系后,利用该方法可有效补偿因重复入位引入的误差,并通过移动制孔机器人进行试验验证。试验表明,经过本方法补偿后,移动机器人综合定位误差为0.332 6 mm,验证了该方法的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] CHENG G J, LIU L T, QIANG X J, et al. Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing [C]// 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI). Hong Kong, China: IEEE, 2016: 407-410.
- [2] 曲巍威,董辉跃,柯映林. 机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1951-1960.
- [3] ZHUANG H Q, ROTH Z S, SUDHAKAR R. Simultaneous robot/world and tool/flange calibration by solving homogeneous transformation equations of the form $AX = YB$ [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(4): 549-554.
- [4] DORNAIKA F, HORAUD R. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(4): 617-622.
- [5] WU L, REN H L. Finding the kinematic base frame of a robot by hand-eye calibration using 3D position data [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 314-324.
- [6] JOUBAIR A, NUBIOLA A, BONEV I. Calibration efficiency analysis based on five observability indices and two calibration models for a six-axis industrial robot [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2013, 6(1): 161-168.
- [7] 许占清,彭景福,张刚,等. 基于位形优化的机器人基坐标系标定与跟踪[J]. 机械与电子, 2019, 37(5): 63-70.
- [8] 王龙飞,张丽艳,叶南. 一种适用于曲面结构的机器人制孔误差在线补偿技术[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 422871.
- [9] 韦溟,张丽艳. 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 66-75.
- [10] 史晓佳,张福民,曲兴华,等. 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.
- [11] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [12] 叶程霖,彭景福,张刚,等. 一种移动机器人基坐标系在线标定方法[J]. 机电一体化, 2018, 24(3): 3-11, 40.
- [13] TIAN Y. Equalities and inequalities for traces of quaternionic matrices[J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2002, 19(2): 841.
- [14] SORKINE O, RABINOVICH M. Least-squares rigid motion using svd[J]. Technical Notes, 2009(1): 1-6.
- [15] 赵辉. 基于点特征的图像配准算法研究[D]. 济南:山东大学, 2006.

收稿日期: 2021-02-22