本文引用格式:潘田华,廖昭洋,王清辉.机器人铣削加工误差在线补偿方法研究[J].自动化与信息工程,2022,43(1):1-6,14.

PAN Tianhua, LIAO Zhaoyang, WANG Qinghui. Research on online compensation method for robot milling errors[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(1):1-6,14.

机器人铣削加工误差在线补偿方法研究

潘田华1 廖昭洋2 王清辉1

(1.华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

2.广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070)

摘要:针对机器人在铣削加工过程中由于精度低和刚度弱导致加工误差大的问题,提出一种可以同时考虑定 位误差与变形误差的加工误差在线补偿方法。首先,基于几何参数标定法进行机器人定位误差建模,并基于机器人 刚度矩阵模型进行变形误差建模;然后,基于上述模型和在线测量的切削力,建立加工误差在线预测模型;接着, 提出基于自校正增量式 PID 控制的误差补偿方法,对铣削加工误差进行在线闭环补偿;最后,经铣削加工实验验证 补偿方法的有效性。

关键词:机器人铣削;定位误差;变形误差;在线补偿 中图分类号:TP242 文献标识码:A DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.01.001

0 引言

随着智能制造在我国的进一步推广和深入,高质量的制造技术及其数字化得到国内制造业以及市场 的重视,并被视为推动经济增长的重中之重^[1]。工业 机器人相较于传统的数控机床,在机械加工领域具有 成本低、加工范围广、柔性高、并行协调作业能力强 等特点,是智能制造的重要载体,尤其在大型复杂零 件加工中展现出较大的发展潜力^[2-3]。但机器人在铣削 加工过程中绝对定位精度低、刚度弱等缺点导致加工 误差大、误差产生机制复杂,限制了其在机械加工领 域的应用与推广。通常,机器人的绝对定位精度低于 ±1 mm^[4],刚度低于1 N/µm^[5]。定位误差与变形误差 会同时作用,影响机器人的加工精度,尤其在切削力 较大的铣削加工工艺,变形误差的影响尤为严重。因 此,研究机器人铣削加工过程中加工误差的建模以及 误差补偿方法具有重要意义。

在机器人定位误差的建模及优化方面: 文献[6]通 过建立运动学参数误差与末端位置误差的映射关系 对机器人定位误差进行修正; 文献[7]基于扩展卡尔曼 滤波算法和人工神经网络算法对机器人定位误差进 行补偿; 文献[8]提出一种基于空间插值的机器人定位 精度补偿方法,提高机器人的定位精度。然而,上述 方法仅对机器人空载情况下的定位误差进行补偿,没 有考虑机器人在加工过程中用于抵御铣削力而产生 的变形误差。

文章编号: 1674-2605(2022)01-0001-07

NG

相关研究表明,如果不进行优化,机器人由于变 形引起的加工误差可达毫米级^[9],因此对机器人变形 误差进行补偿十分必要。文献[10]通过有限元法预测 机器人的铣削力,再基于弹性变形模型对变形误差进 行补偿。文献[11]通过建立柔度模型对机器人的刀尖 点进行离线修正,降低了变形误差导致的加工误差。 文献[12]研究平均铣削力与机器人形变之间的关系, 通过离线补偿方法提高机器人面铣时的加工精度。上 述研究通过预测铣削力,对机器人加工的变形误差进 行离线补偿。然而,由于铣削加工过程切削力不稳定, 很难对其进行准确预测,导致离线补偿方法难以保证 精度。

综上所述,现有的机器人加工误差研究大多单独 考虑定位误差或者变形误差。但在实际铣削加工过程 中,定位误差与变形误差同时作用、相互影响,导致 加工误差的产生机制异常复杂。为此,本文提出一种 同时考虑定位误差和变形误差的机器人铣削加工误 差在线补偿方法。该方法基于力传感器构建闭环反馈 系统,对机器人几何参数引起的定位误差和关节柔度 引起的变形误差进行建模,并通过自校正算法对加工 误差进行补偿,提高机器人的铣削精度。

1 机器人加工误差建模

在机器人铣削加工过程中,加工误差的建模及预 测是评价和优化机器人加工精度的基础。首先,通过 几何参数标定法进行机器人定位误差建模;然后,基 于机器人笛卡尔刚度矩阵模型进行变形误差建模;最 后通过同时考虑定位误差和变形误差,建立机器人加 工误差预测模型,作为后续加工误差补偿的理论基础。

1.1 机器人定位误差

采用激光跟踪仪对机器人关节和连杆的几何参数进行辨识,从而获取准确的运动学模型。本文采用 文献[13]所述的几何参数标定方法,对机器人定位误 差进行修正。一般来说,离线补偿方法是根据标定后 的几何参数对机器人路径进行提前修正,从而补偿误 差;在线补偿方法需要根据实时数据进行路径修正。 本文以机器人铣削加工时的实时关节角度作为输入, 对机器人定位误差进行在线预测,定位误差的计算公 式为

$$\boldsymbol{\delta}_1 = f(q) - f(q) \tag{1}$$

式中:

q

j1——三维空间的定位误差;

f(q)——几何参数标定后的机器人正向运动学 方程;

f(q)——几何参数未标定的机器人正向运动学 方程。

1.2 机器人变形误差

机器人变形误差主要由机器人刚度不足引起的,

可根据刚度矩阵与铣削力预测得到^[14]。因此,基于机器人柔度矩阵,机器人末端变形 δ_F 的计算公式为

$$\boldsymbol{\delta}_F = \boldsymbol{C} \boldsymbol{F} \tag{2}$$

式中:

 δ_F ——机器人末端六维变形;

F——六维铣削力;

C——6×6的机器人柔度矩阵,等于机器人末端 刚度矩阵的逆,计算公式为

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{K}^{-1} = \boldsymbol{J} \boldsymbol{K}_{\theta}^{-1} \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$$
(3)

式中:

 K_{θ} ——机器人关节刚度矩阵;

J——机器人速度雅可比矩阵。

柔度矩阵C可以拆分为4个3×3的子矩阵,则公式(2)可以改写为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta}_{\text{tran}} \\ \boldsymbol{\delta}_{\text{rot}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{\text{tran}} & \boldsymbol{C}_{\text{cou}} \\ \boldsymbol{C}_{\text{cou}} & \boldsymbol{C}_{\text{rot}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\text{f}} \\ \boldsymbol{F}_{\text{m}} \end{bmatrix}$$
(4)

式中:

 δ_{tran} ——末端平移变形误差;

 δ_{rot} ——扭转变形误差;

F_f——末端受到的三维线性力;

F_m——末端受到的扭矩;

Ctran——线性力-平移变形柔度子矩阵;

Crot——力矩-扭转变形柔度子矩阵;

Ccou——耦合子矩阵。

相关研究表明,力矩对机器人末端平移变形的影响相对于线性力十分微小^[15]。为了简化问题,本文忽略力矩的影响,只关注由关节柔度引起的平移变形误差,则变形误差**δ**2可表示为

$$\boldsymbol{\delta}_2 = \boldsymbol{\delta}_{\text{tran}} = \boldsymbol{C}_{\text{tran}} \boldsymbol{F}_{\text{f}}$$
(5)

1.3 机器人加工误差模型

同时考虑定位误差与变形误差,则机器人末端总 误差*δ*为

$$\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}_1 + \boldsymbol{\delta}_2 \tag{6}$$

假设刀具发生的变形相对于机器人的误差可以 忽略,则刀位点误差Δ*CL*与机器人末端总误差**δ**相等。

$$\Delta CL = \delta \tag{7}$$

在曲面铣削中,一般通过轮廓误差衡量加工精度, 而轮廓误差由曲面法向方向的误差来决定。因此,本 文针对球头端铣刀加工曲面的机器人末端总误差与 曲面法向误差之间的关系进行研究。

由于机器人末端总误差的影响,铣削加工时产生 刀位点误差。假设某刀位点的误差为Δ*CL*,工件在理 论刀触点曲面法向的加工误差为*e*_n,如图1所示。



图 1 铣削加工误差与刀位点误差关系示意图

由于刀位点误差ΔCL的存在,工件在理论刀触点 产生法向加工误差e_n。e_n是刀位点在3个不同方向的 偏移造成的。因此,仅对刀位点法向误差ΔCL_n进行补 偿无法完全修正加工误差,需对刀位点的总误差进行 修正。当刀位点误差ΔCL得到完全补偿之后,曲面法 向加工误差e_n即可得到完全补偿。基于以上分析,曲 面的加工误差e可用机器人末端总误差矢量δ来表示:

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}_1 + \boldsymbol{\delta}_2 \tag{8}$$

加工误差在线补偿方法

基于机器人加工误差模型,通过在线获取机器人的关节角度与铣削力,计算加工误差,并通过增量式 PID 进行误差补偿,进而构建闭环补偿系统,实现加 工精度提升。

补偿系统包括数据获取、误差计算、反馈控制3

个环节。其中,铣削力取平均值进行计算。铣削力采 集频率为3kHz,取500个采样点计算平均铣削力, 则铣削力采集时间约为167ms。经测试,整个补偿动 作完成时间在200ms以内。时间延迟对补偿效果存 在影响,如图2所示。





当刀具处于 P_1 点时,上位机采集 P_1 点的数据并计 算对应的补偿值,再将补偿值反馈给机器人;由于存 在时延,此时刀具已经运动到 P_2 点,因此 P_1 点的补偿 值补偿至 P_2 点。依次类推,误差总是在采样点的下一 个点位进行补偿,影响补偿效果。为减少时间延迟对 补偿的影响,提出基于自校正 PID 算法的误差补偿方 法,在线误差补偿算法流程图如图 3 所示。



图 3 在线误差补偿算法流程图

首先,在线获取机器人关节角度q与三维铣削力F 作为输入; 然后,分别计算定位误差与变形误差,两 者叠加得到加工误差e; 接着,基于自校正增量式 PID 算法对误差值进行调控,得到补偿值u;最后,对机器 人位置p进行修正。根据增量式 PID 控制原理,可得

$$u^{k} = K_{P}^{k} (e^{k} - e^{k-1}) + K_{I}^{k} e^{k} + K_{D}^{k} (e^{k} - 2e^{k-1} + e^{k-2})$$
(9)

式中:

u^k——第k个采样时刻的控制量;

 e^k ——第k个采样时刻的误差值;

 K_P^k ——第k个采样时刻的比例系数;

 K_l^k ——第k个采样时刻的积分系数;

2022年第43卷第1期自动化与信息工程3

K_D^k——第k个采样时刻的微分系数。

公式(9)对k >2 时适用,对于前两个采样时刻,不加入 PID 调节,直接将计算得到的加工误差e作为控制量反馈给机器人。

将公式(9)改写为

$$\boldsymbol{u}^{k} = \left(\boldsymbol{X}^{k}\right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\gamma}^{k} \tag{10}$$

式中:

$$\boldsymbol{X}^{k} = \left(\boldsymbol{e}^{k}, \boldsymbol{e}^{k-1}, \boldsymbol{e}^{k-2}\right)^{\mathrm{T}}$$
(11)

$$\gamma^{k} = (K_{P}^{\ k} + K_{I}^{\ k} + K_{D}^{\ k}, -K_{P}^{\ k} - 2K_{D}^{\ k}, K_{P}^{\ k})^{\mathrm{T}}$$
(12)

进行n组观测实验,有

$$\boldsymbol{u}_n = \boldsymbol{X}_n \boldsymbol{\gamma}_n \tag{13}$$

式中:

 u_n ——*n*组观测实验的输出, $u_n = (u^1, u^2 - u^n)^T$; X_n ——*n*组观测实验的输入, $X_n = (X^1, X^2 - X^n)^T$; γ_n ——*n*组观测实验辨识得到的 PID 系数矢量。 根据最小二乘原理, γ_n 的最佳估计值为

$$\boldsymbol{\gamma}_n = (\boldsymbol{X}_n^{\mathrm{T}} \boldsymbol{X}_n)^{-1} \boldsymbol{X}_n^{\mathrm{T}} \boldsymbol{u}_n \tag{14}$$

写成递推形式:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\gamma}_{n+1} = \boldsymbol{\gamma}_n + \boldsymbol{H}^{n+1} \boldsymbol{u}^{n+1} - \boldsymbol{H}^{n+1} (\boldsymbol{X}^{n+1})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\gamma}_n \\ \boldsymbol{H}^{n+1} = \boldsymbol{P}_n \boldsymbol{X}^{n+1} [\boldsymbol{I} + (\boldsymbol{X}^{n+1})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_n \boldsymbol{X}^{n+1}]^{-1} \\ \boldsymbol{P}_{n+1} = \boldsymbol{P}_n - \boldsymbol{H}^{n+1} (\boldsymbol{X}^{n+1})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_n \end{cases}$$
(15)

式中:

$$\boldsymbol{P}_n - \boldsymbol{P}_n = (\boldsymbol{X}_n^{\mathrm{T}} \boldsymbol{X}_n)^{-1}$$

I——单位矩阵。

根据递推关系, PID 参数矢量y可以在线更新。

本文补偿系统包含的微分环节可以在误差信号 出现之前发出有效的修正信号,提高控制速度;比例 环节起到减少稳态误差的作用;积分环节增加系统型 别,提高系统的控制精度。由于 PID 系数 γ_{n+1} 在前一 次系数 γ_n 基础上修正得到,因此,该补偿系统具有一 定预见性与提前性。系统的控制量可以根据工件的形 状进行一定程度的自适应调整,适用于曲面加工。

3 案例分析

3.1 机器人参数辨识

本文以 KR210 R2700 工业机器人为研究对象, 运用文献[6]的方法对机器人 DH 参数进行标定。首先, 基于机器人微分运动学建立几何参数误差与末端位 置误差的映射关系; 然后,通过激光跟踪仪获取多组 机器人末端位置误差; 最后,运用最小二乘法求解机 器人几何参数误差。

另外,本课题组前期¹⁶已经对机器人关节刚度进 行辨识。首先,根据传统刚度模型建立载荷与末端变 形的关系;然后,通过配重块和定滑轮给机器人末端 施加不同方向的载荷,并利用激光跟踪仪获取不同载 荷对应的末端变形;最后,根据多组载荷与变形数据 计算关节刚度。参数辨识结果如表1所示。其中, Δa_{i-1} 为连杆长度误差; Δd_i 为连杆偏置误差; k_{θ_i} 为关节刚度 矩阵 K_{θ} 主对角线元素。DH 参数初始值根据机器人产 品手册获得。

表1 参数辨识结果

连杆 <i>i</i>	$\Delta a_{i-1}/\text{mm}$	$\Delta d_i/{ m mm}$	$k_{\theta i}/(\text{Nmm/rad})$
1	1.692 0	1.114 8	1.89×10 ⁹
2	-0.566 6	0.200 3	2.89×10 ⁹
3	0.508 1	0.200 4	3.24×10 ⁹
4	0.104 9	-1.722 3	1.01×10^{8}
5	0.026 6	0.108 2	1.38×10^{8}
6	1.620 7	1.081 5	1.28×10^{8}

3.2 实验验证

为验证本文提出误差补偿方法的可行性和有效 性,进行实际铣削加工实验。以叶片型曲面零件为铣 削对象,零件模型及铣削轨迹如图4所示,铣削条件 如表2所示。



表 2 铣削条件					
主轴转速/ (r/min)	进给速度/ (mm/min)	轨迹行距/ mm	切削深度/ mm		
9 000	180	4	2.5		

实验中,力传感器安装在零件正下方,力测量坐标系与零件坐标系重合,如图5所示。在三向铣削力作用下机器人由于弱刚度产生变形,刀位点发生偏移,致使实际的铣削轨迹在设计面之上,产生加工误差。



图 5 铣削力对加工误差影响示意图

X和Y方向的定位误差与变形误差对加工面的影响一致,使得加工面高于设计面,而Z方向定位误差 对加工面的影响需进一步确定。实验中,加工轨迹确 定,可根据公式(1)计算Z方向定位误差,如图6所 示。



由图 6 可见, Z 方向定位误差的数值均为正值, 说明实际 Z 方向高度大于理想的 Z 方向高度。因此, Z 方向定位误差同样使加工面高于设计面。

实验硬件包括: KR210 R2700 机器人、C4 机器 人控制柜、高速电主轴、球头铣刀、Kistler9072 型四 分量力传感器、数据采集卡、5073 型电荷放大器、PLC 控制单元、上位机、铝合金零件。实验分别在未补偿、 不加 PID 补偿、加入 PID 控制算法补偿 3 种情况下 进行铣削加工实验,实验系统与零件铣削效果如图 7 所示。







图 7 铣削实验系统与铣削效果图

本文使用激光扫描仪对加工零件进行测量,将扫 描得到的点云数据导入逆向工程软件中进行模型的 逆向重构,并对重构模型进行剪裁、过滤以及坐标配 准,最终得到零件铣削面的数据。通过选取零件中心 处单条轨迹进行分析,沿铣削方向曲面高度相对误差 如图 8 所示。

由图 8 可知: 经过 PID 补偿后的曲面高度更接近 设计面。未补偿的机器人误差最大值为 1.169 3 mm, 平均值为 1.021 5 mm;误差值补偿后误差最大值为 0.531 9 mm,平均值为 0.383 6 mm;加入 PID 控制 算法补偿后误差最大值为 0.445 2 mm,平均值为 0.279 6 mm。根据上述数据分析,证明了本文补偿 算法的有效性。



4 结论

本文提出一种机器人铣削加工误差在线补偿方法,可以同时对加工过程中的定位误差和变形误差进行补偿。首先,基于几何参数标定进行定位误差建模,并基于机器人刚度模型进行变形误差建模;然后,通过在线测量机器人关节角和铣削力情况,结合定位误差与变形误差模型,构建机器人铣削加工误差在线计算方法;接着,通过引入自校正PID控制算法,对加工误差进行在线补偿,改善误差补偿精度;最后,搭建了机器人铣削加工补偿系统,进行铣削实验验证补偿效果。实验结果表明,经过加工误差补偿后,零件加工精度得到提升,证明了补偿方法的有效性。

参考文献

- CHEN Y B. Integrated and intelligent manufacturing: perspectives and enablers[J]. Engineering, 2017,3(5):588-595.
- [2] 谢海龙,许晨旸,王清辉,等.曲面零件机器人抛光轨迹规划与 工艺仿真[J].自动化与信息工程,2019,40(6):1-7.
- [3] 陈锐奇,谢柳杰,许晨旸,等.面向曲面的机器人摆线抛光轨迹 及速度优化[J].现代制造工程,2019(10):52-57,109.
- [4] DONG G H, YIN Y, HU X B. Research on absolute positioning error of robot based on mapping theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,494-495:1156-1160.
- [5] PAN Z, ZHANG H, ZHU Z, et al. Chatter analysis of robotic

machining process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006,173(3):301-309.

- [6] 任永杰,邾继贵,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(9):195-200.
- [7] NGUYEN H N, ZHOU J, KANG H J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network[J]. Neurocomputing, 2015,151:996-1005.
- [8] 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.
- [9] ABELE E, WEIGOLD M, ROTHENBÜCHER S. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 387-390.
- [10] BELCHIOR J, GUILLO M, COURTEILLE E, et al. Off-line compensation of the tool path deviations on robotic machining: application to incremental sheet forming[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2013,29(4):58-69.
- [11] SLAVKOVIC N R, MILUTINOVIC D S, GLAVONJIC M M. A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014,70(9):2083-2096.
- [12] TYAPIN I, HOVLAND G. Off-line path correction of robotic face milling using static tool force and robot stiffness[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2015:5506-5511.
- [13] 齐俊德,张定华,李山,等.工业机器人绝对定位误差的建模
 与补偿[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(11):
 113-118.
- [14] ALICI G, SHIRINZADEH B. Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005,21(4):554-564.
- [15] ZARGARBASHI S, KHAN W, ANGELES J. Posture optimization in robot-assisted machining operations[J]. Mechanism & Machine Theory, 2012,51:74-86.
- [16] LIAO Z Y, LI J R, XIE H L, et al. Region-based toolpath generation for robotic milling of freeform surfaces with stiffness optimization[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020,64:101953.

Research on Online Compensation Method for Robot Milling Errors PAN Tianhua¹ LIAO Zhaoyang² WANG Qinghui¹ (下转第 14 页)