

DOI: 10.3901/JME.2022.14.181

工业机器人轨迹精度力-位置复合补偿方法^{*}

卢远^{1,2,3} 国凯^{1,2,3} 孙杰^{1,2,3}

- (1. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室 济南 250061;
2. 山东大学航空构件制造技术及装备研究中心 济南 250061;
3. 山东大学机械工程学院 济南 250061)

摘要: 工业机器人关节刚度较低, 在外负载干扰下加工精度较低, 阻碍机器人在加工系统中的进一步推广和应用。为解决该问题, 提出一种力前馈控制-位置反馈控制复合补偿方法, 其中力前馈控制可超前补偿由外部负载力引起的位置偏差, 位置反馈部分用于补偿机器人内部因素导致的位置偏差。利用六维力传感器和激光跟踪仪构建了轨迹误差在线补偿闭环控制系统, 进行轨迹精度在线补偿试验, 验证该方法的轨迹误差补偿效果。综合考虑机器人因内部参数和外部环境因素引起的误差, 提高机器人的轨迹精度, 能够实现机器人的精准控制。试验结果表明, 该方法具有较强的鲁棒性, 在外负载下依然可保持较高的轨迹跟踪精度, 200 N 冲击载荷下路径轨迹误差峰值为 0.082 mm, 稳态误差为 0.047 mm, 为复杂工况下高精度机器人加工奠定了基础。

关键词: 工业机器人; 轨迹精度; 复合控制; 负载干扰

中图分类号: TP242

Force-Position Composite Control Method for Trajectory Accuracy Compensation of Industrial Robots

LU Yuan^{1,2,3} GUO Kai^{1,2,3} SUN Jie^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061;
2. Research Center for Aeronautical Component Manufacturing Technology and Equipment, Shandong University, Jinan 250061;
3. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: The low joint stiffness of industrial robots and the low machining accuracy under the interference of external load have become the main obstacles to further promotion and application of robots in machining systems. A compound compensation method of force feedforward control and position feedback control is proposed to solve this problem. The force feedforward control part can compensate for the position deviation caused by external load force in advance, and the position feedback part is used to compensate for the position deviation caused by internal factors. A closed-loop control system for online compensation of trajectory error is constructed using a six-dimensional force sensor and a laser tracker. An online compensation experiment is carried out to verify the compensation effect of the proposed method. The errors caused by internal parameters and external environmental factors are considered comprehensively in the method, which improves the tracking accuracy of the robot and can realize the precise control of the robot. The experimental results show that the proposed method is robust and can maintain high trajectory tracking accuracy under large external loads. Under 200 N impact load, the peak error of path trajectory is 0.082 mm, and the stability error is 0.047 mm, which lays a foundation for high precision robot machining under complex working conditions.

Key words: industrial robot; trajectory accuracy; compound control; load disturbance

^{*} 国家自然科学基金(51975335)和山东省重点研发计划(2019GGX104008, 2019JZZY020318)资助项目。20210630 收到初稿, 20210930 收到修改稿

0 前言

工业机器人具有较大的工作空间和自由度,可在末端扩展不同的执行器实现不同的生产任务^[1-3]。目前,机器人大多应用于搬运、焊接、码垛和装配等生产任务中。随着高精度制造领域生产需求的提升^[4],近年来机器人也逐渐应用于加工过程。然而,工业机器人为串联多链式结构,关节刚度较低,作用在机器人末端的力或扭矩会导致较大的位置误差,导致外负载下加工精度较低^[5-6],已成为机器人在加工系统中进一步推广和应用的主要障碍。因此,国内外学者针对机器人加工精度开展了大量的研究,以提高机器人加工系统的性能。

机器人的定位误差主要包括几何误差和非几何误差^[7],其中几何误差是机器人零部件在制造、装配等过程中引起的尺寸误差,非几何误差则主要由机器人自身刚度、控制器带宽、环境温度、外部负载等因素引起^[8-9]。为提高机器人轨迹跟踪精度,国内外学者提出了多种方法,包括运动学参数辨识和校准、基于刚度模型的精度补偿、外部测量系统校正等^[10-13]。

不准确的运动学参数会降低机器人的位姿定位精度,而运动学标定可对运动学参数进行识别和建模^[14],修正连杆长度、装配误差等,提高机器人的精度。NGUYEN 等^[15]将机器人模型辨识方法与人工神经网络结合,提出了一种位置精度标定方法,将重复定位精度从标定前的 4.065 4 mm 提高到 0.326 4 mm。YANG 等^[16]提出了最小指数乘积(Product of exponentials, POE)运动学误差模型,每个轴仅需 4 个运动学参数,与传统标定模型相比所需参数较少,因此计算时间减少,所提模型的平均重复定位误差为 0.663 mm,而传统模型的平均重复定位误差为 0.876 mm。JANG 等^[17]提出了一种同时标定运动学和非运动学误差的方法,建立了基于 D-H(Denavit-hartenberg)参数的误差模型,使用径向基函数网络评估参数,绝对定位精度由原来 0.92% 提高到 0.154%。

机器人关节刚度较小,在负载力作用下易发生变形,进而影响加工精度,在加工钛合金等难加工材料时^[18],机器人会承受更大的反作用力,因此机器人在外负载下的变形量是影响加工精度的关键参数之一。基于机器人刚度模型的补偿方法可有效补偿负载力引起的位置误差,典型方法包括 SLAVKOVIC 等^[19]提出的离线轨迹修正法,通过刚

度模型和切削力模型对关节误差进行预测和补偿,补偿后的加工表面误差约为 0.1 mm。GUO 等^[20]则提出了机器人定位精度补偿模型,补偿后机器人末端重复定位精度约 0.05 mm,姿态重复定位精度约 0.05°。ZAEH 等^[21]则提出了一种模糊控制器,使用较少数据即可识别刚度参数,根据加工状态采用不同控制策略,切削力引起的位置误差降低了 70%。

外部位姿测量设备,如激光跟踪仪、立体相机、关节附加编码器等,可用于机器人加工精度在线补偿^[1, 22-24]。MOELLER 等^[25]通过激光跟踪仪对机器人末端位置进行了闭环控制,并比较了开环控制和闭环控制下的位置精度,开环控制下轨迹跟踪误差在 0.5~1.0 mm,而闭环控制下机器人的轨迹误差则小于 0.5 mm。DROLL 等^[26]使用激光跟踪器对机器人进行轨迹修正,绝对定位精度可以达到 0.1 mm。王志江等^[27]则提出一种基于相机的机器人轨迹纠偏方法,轨迹跟踪精度约 0.1 mm。WANG 等^[28]提出了一种通过激光跟踪仪补偿机器人钻孔点位误差,孔位误差由 0.45~0.83 mm 减小到 0.10~0.17 mm。文科等^[29]则提出一种机器人铣削精度提升方法,通过光栅补偿及运动学参数标定,机器人重复定位精度提高至 0.11 mm。

虽然以上大量研究均可有效提高机器人轨迹跟踪精度,但是基于运动学参数标定的方法难以补偿外部负载力引起的变形;而基于外部位姿测量设备的补偿方法虽然能较好地补偿机器人内部因素导致的误差,但是受机器人控制带宽的限制,在负载扰动下闭环控制对误差补偿具有滞后性;基于刚度模型的补偿虽然能够补偿外部扰动,但是难以实时补偿机器人内部因素导致的误差,如齿轮齿隙等。

针对上述研究的不足之处,本文提出了一种基于力传感器和激光跟踪仪的力前馈控制-位置反馈控制复合补偿方法,并构建了机器人轨迹误差在线补偿系统。该方法中,力前馈控制部分可对外部负载扰动导致的位置误差进行在线超前补偿,弥补反馈控制系统对外部负载扰动的滞后性。系统中的位置反馈补偿部分利用激光跟踪仪测量机器人末端实际位置,获得与期望轨迹之间的误差,作为比例、积分和微分(Proportional integral differential, PID)控制系统的反馈量,搭建位置反馈闭环控制系统。该方法可以在线补偿机器人内部因素和外部扰动产生的偏差,有效提高机器人的轨迹精度。

本文其余部分安排如下,第一部分介绍了机器人的空间坐标和测量方式;第二部分阐述了力前馈的补偿原理与力前馈控制补偿量计算过程;第三部

分介绍了机器人位置反馈控制并将力前馈控制与位置反馈控制结合, 提出力前馈-位置反馈轨迹误差补偿策略; 第四部分根据所提出的误差补偿策略, 进行机器人轨迹误差补偿试验, 验证本文提出补偿方法的有效性; 第五部分给出了本文的结论。

1 机器人空间坐标描述

本文以 COMAU 六自由度工业机器人为例进行研究。系统中坐标系主要包括基座坐标系 $T_b(O_b x_b y_b z_b)$ 、工具坐标系 $T_t(O_t x_t y_t z_t)$ 和激光跟踪仪坐标系 $T_l(O_l x_l y_l z_l)$ 。激光跟踪仪坐标系如图 1 所示, O_l 为激光跟踪仪坐标系原点, 激光跟踪仪测量点位坐标如式(1)所示

$$\begin{cases} x_l = O_l P_1 \sin \beta \cos \alpha \\ y_l = O_l P_1 \sin \beta \sin \alpha \\ z_l = O_l P_1 \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

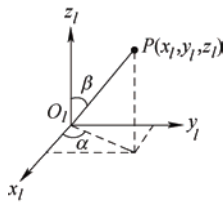


图 1 激光跟踪仪测量坐标系示意图

激光跟踪仪测量数据需要转换为机器人基座坐标系下的坐标表示, 本文采用 Rodrigues Matrix 三维空间坐标转换方法进行坐标转换, 如图 2 所示, 同一个点在激光跟踪仪坐标系 T_l 下表示为 $(x_l, y_l, z_l)^T$, 在机器人基座坐标系 T_b 下表示为 $(x_b, y_b, z_b)^T$, 转换关系如式(2)所示, 转换参数为采用 Rodrigues Matrix 构建旋转矩阵 R 如式(3)所示。

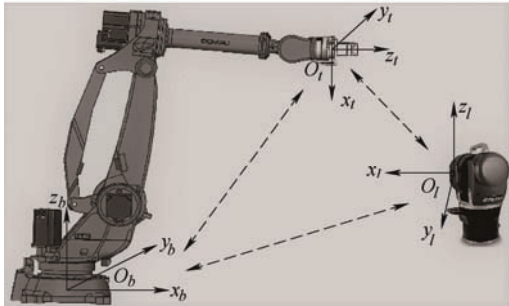


图 2 坐标系转换示意图

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{1+a^2+b^2+c^2} \times \begin{pmatrix} 1+a^2-b^2-c^2 & -2c-2ab & -2b+2ac \\ 2c-2ab & 1-a^2+b^2-c^2 & -2a-2bc \\ 2b+2ac & 2a-2bc & 1-a^2-b^2+c^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 分别为轴 x_b 与轴 x_l 、 y_l 、 z_l 间夹角的余弦, b_1 、 b_2 、 b_3 分别为轴 y_b 与轴 x_l 、 y_l 、 z_l 间夹角的余弦, c_1 、 c_2 、 c_3 分别为轴 z_b 与轴 x_l 、 y_l 、 z_l 间夹角的余弦, 方向余弦矩阵通常由绕 3 个坐标轴顺次旋转的欧拉角 a 、 b 、 c 表示, 用 Rodrigues Matrix 表示方向余弦矩阵时, 需要求取的转换参数为 λ 、 a 、 b 、 c 、 Δx 、 Δy 、 Δz , λ 为尺度参数, Δx 、 Δy 、 Δz 为平移参数, 尺度参数 λ 可由 2 个公共点在不同坐标系下的距离之比计算, 如式(4)所示

$$\lambda = \frac{\sqrt{(x_{b2}-x_{b1})^2 + (y_{b2}-y_{b1})^2 + (z_{b2}-z_{b1})^2}}{\sqrt{(x_{l2}-x_{l1})^2 + (y_{l2}-y_{l1})^2 + (z_{l2}-z_{l1})^2}} \quad (4)$$

将式(4)计算得到的尺度参数与式(3)得到旋转参数代入原空间坐标转换数学模型进行平移参数 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 求解, 如式(5)所示

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \end{pmatrix} - \lambda R \begin{pmatrix} x_{li} \\ y_{li} \\ z_{li} \end{pmatrix} \quad i=1,2,\dots,8 \quad (5)$$

式中, $(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})^T$ 为基座标下的点阵坐标, $(x_{li}, y_{li}, z_{li})^T$ 为激光跟踪仪坐标系下的点阵坐标, 通过测量得到空间六面体顶点的激光跟踪仪坐标点阵 P_1 和机器人末端在基座坐标系下的坐标点阵 P_2 来求解旋转矩阵 R 和偏移参数 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$, 点阵 P_1 和点阵 P_2 的坐标参数如表 1 和表 2 所示, 计算出的转换矩阵 R 和偏移参数如式(6)和(7)所示。

表 1 P_1 点阵坐标表

点位	坐标		
	x_l/mm	y_l/mm	z_l/mm
1	-306.926	1 831.476	792.783
2	-455.997	1 697.250	792.400
2	-322.016	1 548.313	790.797
3	-173.062	1 682.469	791.196
4	-172.713	1 680.999	991.373
5	-306.559	1 829.906	992.966
6	-455.616	1 695.813	992.528
7	-321.628	1 546.816	991.020
8	-306.926	1 831.476	792.783

表 2 P_2 点阵坐标表

点位	坐标		
	x_b/mm	y_b/mm	z_b/mm
1	1 754.994	5.000 0	2 217.027
2	1 955.014	5.010 1	2 217.008
2	1 955.012	205.056	2 216.998
3	1 755.033	205.078	2 217.006
4	1 755.032	205.067	2 417.000
5	1 755.014	4.967	2 416.999
6	1 955.010	5.001	2 416.987
7	1 955.004	205.011	2 417.006
8	1 754.994	5.000 0	2 217.027

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} -0.752\ 6 & -0.658\ 4 & -0.000\ 8 \\ 0.658\ 4 & -0.752\ 6 & -0.000\ 8 \\ -0.001\ 1 & -0.000\ 1 & 0.999\ 9 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\ 847.704\ 2 \\ 1\ 414.298\ 9 \\ 1\ 412.769\ 7 \end{pmatrix} \quad (7)$$

2 机器人力前馈控制策略

2.1 机器人刚度矩阵

当机器人受到外力 \mathbf{F} 作用时, 机器人会产生变形 \mathbf{A} , 在一定范围内, 机器人变形量与机器人受到的外力近似满足线性关系如式(8)所示

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{A} \quad (8)$$

式中, \mathbf{K} 为机器人笛卡儿坐标系刚度。机器人受到的外力 \mathbf{F} 可以分解为 x_b 、 y_b 、 z_b 三个方向上的力以及三个方向上的力矩, 如式(9)所示, 相对应的, 机器人末端的形变 \mathbf{A} 可以分为偏移与偏转, 如式(10)所示

$$\mathbf{F} = (f_x, f_y, f_z, m_a, m_b, m_c)^T \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = (d_x, d_y, d_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z)^T \quad (10)$$

机器人笛卡儿坐标系刚度 \mathbf{K} 可由关节刚度矩阵 \mathbf{K}_θ 求得, \mathbf{K}_θ 描述了机器人各个关节在关节力矩作用下抵抗变形的能力, 如式(11)、(12)所示

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_\theta \mathbf{d}_q \quad (11)$$

$$\mathbf{d}_q = (d_{q_1}, d_{q_2}, d_{q_3}, d_{q_4}, d_{q_5}, d_{q_6})^T \quad (12)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}$ 为机器人关节所受力矩, \mathbf{d}_q 为外部负载作

用下每个关节的变形量, 上式由矩阵表示为^[30-31]

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{\theta_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta_1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d_{q_1} \\ d_{q_2} \\ d_{q_3} \\ d_{q_4} \\ d_{q_5} \\ d_{q_6} \end{pmatrix} \quad (13)$$

机器人末端观测点在承受外部力矩时对应的变形矢量理论值如式(14)所示

$$\mathbf{A} = \mathbf{J}_m \mathbf{d}_q \quad (14)$$

式中, \mathbf{J}_m 为观测点的雅可比矩阵, 观测点为机器人末端在受力后, 变形量测量的参考点, 机器人的雅可比矩阵定义为机器人的操作速度与关节速度的线性变换, 力雅可比矩阵为机器人关节力矩与机器人末端受到的力的线性变化, 如式(15)所示

$$\mathbf{J}_f = \boldsymbol{\tau} \mathbf{F}^{-1} \quad (15)$$

式中, \mathbf{J}_f 为机器人的载荷施加点的雅可比矩阵, 加载点为外部载荷在机器人末端的作用点, 结合机器人雅可比矩阵定义^[32], 机器人笛卡儿坐标系刚度 \mathbf{K} 可由关节刚度 \mathbf{K}_θ 和雅可比矩阵 \mathbf{J}_f 、 \mathbf{J}_m 计算而得, 如式(16)所示

$$\mathbf{K} = \mathbf{J}_f^{-T} \mathbf{K}_\theta \mathbf{J}_m^{-1} \quad (16)$$

2.2 力前馈控制

力前馈补偿量计算过程如图 3 所示, 根据机器人负载力及关节刚度对机器人运动误差进行补偿量的计算。在负载力 \mathbf{F} 作用下, 结合式(11)~(15), 机器人末端变形量可以表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{J}_m \mathbf{K}_\theta^{-1} \mathbf{J}_f^T \mathbf{F} \quad (17)$$

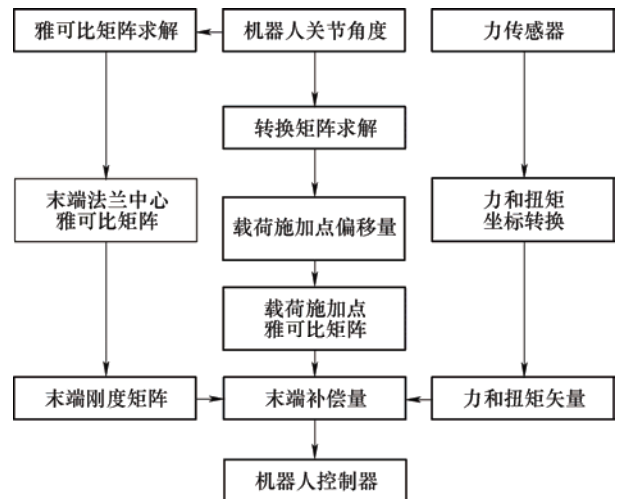


图 3 力前馈补偿示意图

将该末端变形量 Δ 作为力补偿控制的前馈量对机器人末端轨迹进行补偿, 控制器将根据实时的机器人关节角度计算当前机器人末端雅可比矩阵, 结合式(16)获得笛卡尔坐标系刚度 \mathbf{K} , 从力传感器接收力信息和扭矩信息并由式(17)计算获得轨迹补偿量, 送入机器人控制器进行超前补偿。

3 机器人位置反馈控制策略

3.1 位置反馈补偿

机器人运动学参数误差会导致机器人运动时产生较大的轨迹误差, 因此, 本文在力前馈控制的基础上, 通过机器人末端位置反馈闭环控制进一步补偿由机器人内部因素如关节滞环等导致的轨迹偏差, 控制框图如图 4 所示。首先将机器人设定的末端理论轨迹作为指令输入, 然后通过激光跟踪仪测得机器人末端实际位置, 通过 PID 控制器计算轨迹修正量, 最终实现机器人末端轨迹偏差的反馈控制。

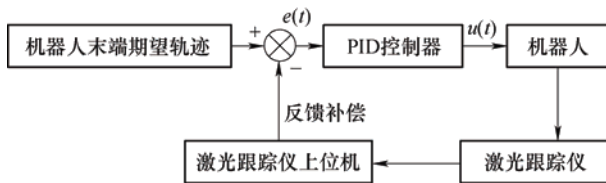


图 4 位置反馈补偿示意图

定义机器人 x_b 、 y_b 、 z_b 方向的偏差为 $e_x(t)$ 、 $e_y(t)$ 、 $e_z(t)$ 则 x_b 、 y_b 、 z_b 方向的位置控制系统的 PID 算法输出分别表示为 $u_x(t)$ 、 $u_y(t)$ 、 $u_z(t)$, 如式(18)~(20)所示

$$u_x(t) = K_{P_x} e_x(t) + K_{I_x} \int_0^t e_x(t) dt + K_{D_x} \frac{d(e_x(t))}{dt} \quad (18)$$

$$u_y(t) = K_{P_y} e_y(t) + K_{I_y} \int_0^t e_y(t) dt + K_{D_y} \frac{d(e_y(t))}{dt} \quad (19)$$

$$u_z(t) = K_{P_z} e_z(t) + K_{I_z} \int_0^t e_z(t) dt + K_{D_z} \frac{d(e_z(t))}{dt} \quad (20)$$

式中, K_{P_x} 、 K_{P_y} 、 K_{P_z} 表示比例增益, K_{I_x} 、 K_{I_y} 、 K_{I_z} 表示积分系数, K_{D_x} 、 K_{D_y} 、 K_{D_z} 表示微分系数。

3.2 力前馈-位置反馈控制复合补偿

将力前馈补偿与位置反馈控制相结合, 提出力前馈-位置反馈轨迹补偿策略, 补偿方案的示意图如图 5 所示, 在力前馈控制的基础上加入位置反馈补偿, 当机器人受到外力时, 通过安装于机器人末端的力传感器采集到外部力信息, 利用机器人关节刚度矩阵和机器人实时关节角度矩阵, 计算出机器人

受力变形量作为力前馈控制补偿量, 并通过位置闭环控制补偿机器人内部因素导致的跟踪误差, 实现轨迹精确跟踪。

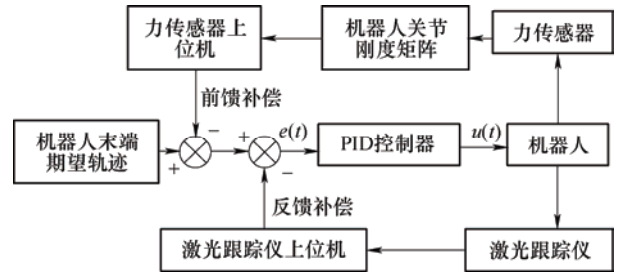


图 5 力前馈-位置反馈轨迹误差补偿示意图

4 机器人轨迹误差补偿试验

4.1 控制系统介绍

本文算法基于 C5G Open 控制平台实现。该系统是 COMAU 公司推出的基于 Linux 系统的开放式机器人控制系统。用户可基于该系统自主开发应用程序, 可与多种传感器、机器人进行信息交互, 规划机器人轨迹并编写控制程序, 整体试验装置系统如图 6 所示。包括 COMAU NJ 165 机器人、ATI 六维力传感器及其上位机、API 激光跟踪仪及其上位机、机器人控制柜、APC910 工控机。力传感器测量数据通过上位机发送至 C5G Open 系统。此外, 在机器人运动时, 激光跟踪仪实时跟踪并测量机器人末端靶球位置并将位置信息实时发送给 C5G Open 系统。力前馈补偿及位置闭环控制算法均在 C5G Open 系统中编程实现, 控制频率为 2 500 Hz。

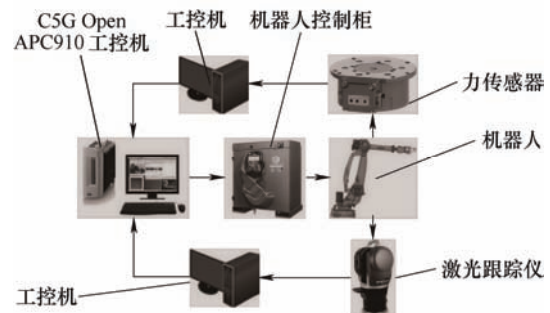


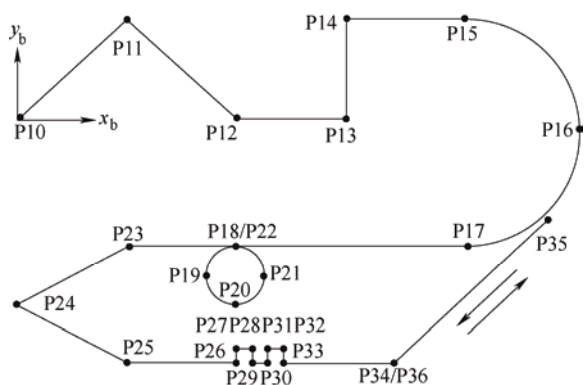
图 6 试验装置系统示意图

4.2 开环控制误差

为了验证所提出的轨迹偏差补偿策略的有效性, 首先需对 COMAU NJ 165 机器人自身的轨迹精度进行研究与分析, 本文选择的测试轨迹如图 7 所示, 对应点位的坐标值如表 3 所示。其中, 起点为 P10, 终点为 P36。

表 3 试验轨迹对应坐标值表

点位	坐标	
	x_b/mm	y_b/mm
P10	0	0
P11	35	35
P12	70	0
P13	105	0
P14	105	35
P15	140	35
P16	180	-5
P17	140	-45
P18	70	-45
P19	60	-55
P20	70	-65
P21	80	-55
P22	70	-45
P23	35	-45
P24	0	-65
P25	35	-85
P26	70	-85
P27	70	-80
P28	75	-80
P29	75	-85
P30	80	-85
P31	80	-80
P32	85	-80
P33	85	-85
P34	130	-85
P35	180	-35
P36	130	-85

图 7 x_b - y_b 试验轨迹平面示意图

将规划的机器人末端轨迹在 C5G Open 系统内编写相应程序, 控制机器人运动并使用激光跟踪仪实时跟踪测量机器人末端位置, 与理论轨迹比较, 可以得到机器人的轨迹误差。

在机器人按照测试路径运行至 25 s 时, 此时机器人运动到达位置为 P12, 此时在机器人末端施加

200 N 的突变负载, 负载方向沿机器人基座坐标系下的 z_b 轴方向。因本试验主要为 z_b 向负载, 故选取 z_b 方向的跟踪精度进行验证。试验装置如图 8 所示, 试验结果如图 9 和图 10 所示。



图 8 试验装置图

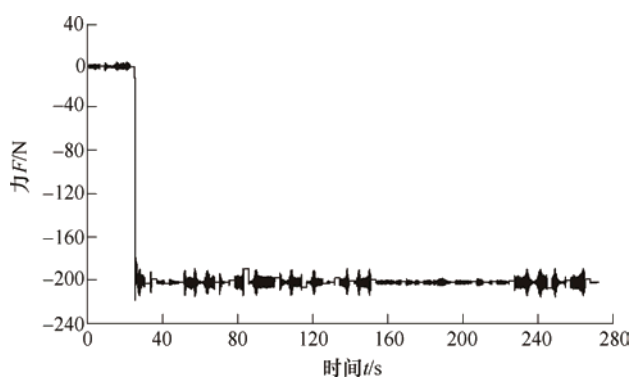


图 9 机器人末端实时受力

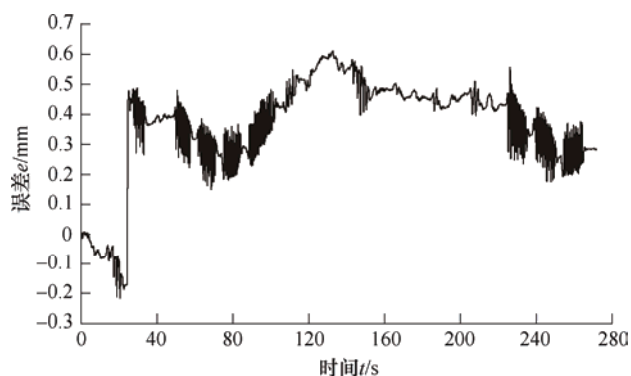


图 10 未补偿轨迹误差试验结果

图 9 为机器人末端实时受力情况, 图 10 为测试轨迹中的 z_b 向误差。在 25 s 时刻, 突变负载造成了机器人末端 z_b 轴方向约 0.6 mm 的瞬时变化, 由试验结果可知, 机器人自身开环控制无法补偿由外部扰动带来的误差, 此外, 轨迹跟踪误差较大。

4.3 基于位置反馈的精度补偿

将相同的轨迹指令程序写入位置反馈控制程序, 进行位置反馈补偿试验。补偿试验过程需要加入激光跟踪仪作为位置反馈传感器。图 11 为位置反馈系统补偿后的轨迹误差曲线图。可以看出, 在加

入外部突变负载前, 位置闭环控制系统可以对误差进行有效的补偿, 但在加入负载后, 由于位置闭环控制的滞后性, 出现了较大瞬态误差, 随后该误差在闭环控制作用下逐渐收敛至 0 附近。经过位置反馈补偿后的 z_b 方向轨迹误差最大值为 0.369 mm, 与开环控制相比精度得到了较大的提升。

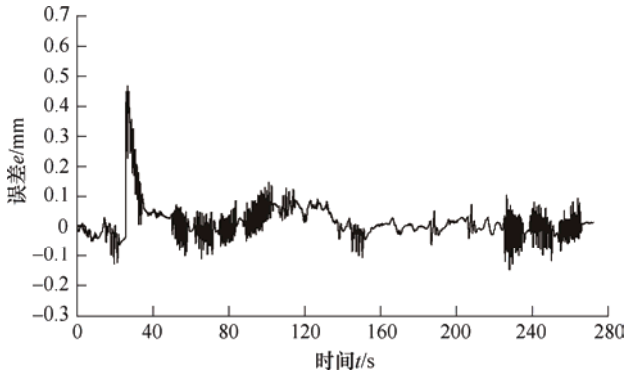


图 11 位置反馈系统补偿试验结果

4.4 基于力前馈-位置反馈的精度补偿

为了补偿位置闭环控制的滞后性, 在位置反馈系统中加入力前馈控制, 使用相同的测试轨迹, 力前馈-位置反馈系统补偿后的轨迹误差曲线试验结果如图 12 所示, 图 13 为 25 s 施加突变载荷时, 不同补偿策略的误差曲线对比图。

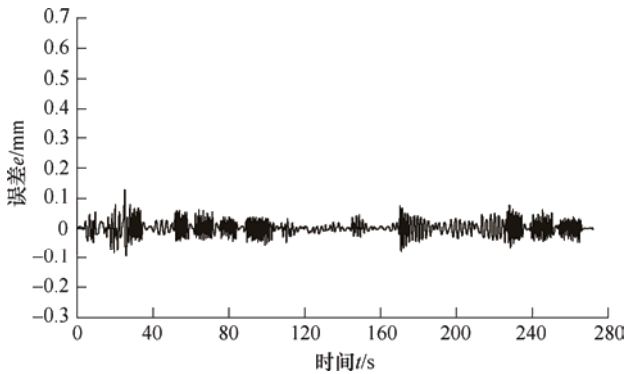


图 12 力前馈-位置反馈系统补偿试验结果

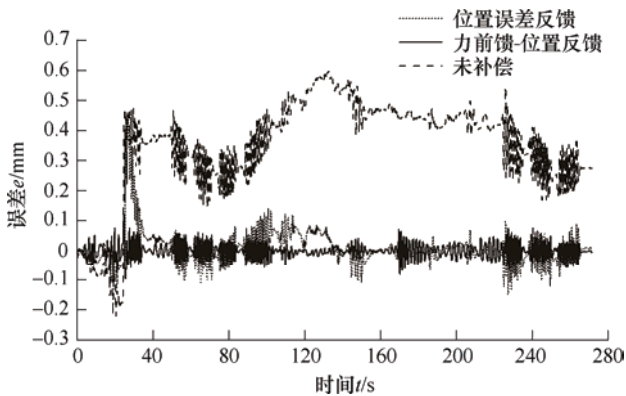


图 13 误差响应曲线对比

由试验结果可以看出, 在开环控制和位置反馈控制下, 机器人无法对外部冲击进行有效的补偿, 受到冲击的瞬间, 造成了较大的瞬时偏差。加入力前馈补偿的系统在应对外部突变冲击时, 补偿效果良好, 受到冲击载荷时, 最大误差降低至 0.082 mm(表 4), 稳定轨迹偏差在 ± 0.05 mm 之间, 轨迹精度具有较大的提升。此外, 加入力前馈补偿后, 误差补偿速度更快, 有效弥补了位置反馈补偿系统的滞后性, 由图 13 可以看出, 在受到冲击后, 力前馈-位置反馈控制系统的误差收敛速度明显快于仅位置反馈控制, 证明了本文提出力前馈-位置反馈轨迹偏差补偿策略的有效性。

表 4 误差对比表

控制方式	误差/mm	
	误差峰值	稳态误差
开环	0.599	0.143~0.599
位置反馈	0.369	-0.118~0.114
力前馈-位置反馈	0.082	-0.047~0.047

5 结论

(1) 为提高工业机器人的轨迹精度, 本文结合机器人刚度模型, 计算机器人末端轨迹误差并进行力前馈补偿, 同时通过激光跟踪仪在线测量机器人末端位置并进行位置反馈控制。

(2) 对机器人的轨迹误差进行研究, 基于力前馈-位置反馈补偿策略, 搭建了机器人在线补偿的系统, 补偿后机器人末端轨迹精度得到了较大的提高, 误差波动幅度较小, 在负载力干扰情况下响应滞后性明显降低, 为复杂工况下高精度机器人加工奠定了基础。

(3) 鉴于使用激光跟踪仪测量位置成本过高, 目前正在积极探索使用其他方式代替激光跟踪仪测量位置, 例如外部相机等测量方式, 从而降低成本。

参 考 文 献

- [1] KIM S H, NAME E, HAT I, et al. Robotic machining: A review of recent progress[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(9): 1629-1642.
- [2] CHEN Yonghua, DONG Fenghua. Robot machining: Recent development and future research issues[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9): 1489-1497.

- [3] ZHANG Yiran, GUO Kai, SUN Jie. Investigation on the milling performance of amputating clamping supports for machining with industrial robot[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9-12): 3573-3586.
- [4] 郝大贤, 王伟, 王琦珑. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 14-30.
- HAO Daxian, WANG Wei, WANG Qilong. Applications and development trend of robotics in composite material process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 14-30.
- [5] ROTH Z, MOORING B, RAVANI B. An overview of robot calibration[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(5): 377-385.
- [6] ZHANG Yiran, GUO Kai, SUN Jie, et al. Method of postures selection for industrial robot joint stiffness identification[J]. IEEE Access, 2021, 9: 62583-62592.
- [7] PHAM A, AHN H. High precision reducers for industrial robots driving 4th industrial revolution: State of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018, 5(4): 519-533.
- [8] MEGGIOLARO M A, DUBOWSKY S, MAVROIDIS C. Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(4): 415-427.
- [9] GONG Chunhe, YUAN Jingxia, NI Jun. Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(14): 2119-2137.
- [10] GUO Kai, PAN Yongping, ZHENG Dongdong, et al. Composite learning control of robotic systems: a least squares modulated approach[J]. Automatica, 2020, 111: 1-13.
- [11] GUO Kai, PAN Yongping, YU Haoyong. Composite learning robot control with friction compensation: a neural network-based approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7841-7851.
- [12] WANG Gang, LI Wenlong, JIANG Cheng, et al. Simultaneous calibration of multicoordinates for a dual-robot system by solving the $axb = ycz$ problem[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(4): 1172-1185.
- [13] ALICI G, SHIRINZADEH B. Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(4): 554-564.
- [14] LIBERA A D, CASTAMAN N, GHIDONI S, et al. Autonomous learning of the robot kinematic model[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 37(3): 877-892.
- [15] NGUYEN H N, LE P N, KANG H J. A new calibration method for enhancing robot position accuracy by combining a robot model-based identification approach and an artificial neural network-based error compensation technique[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(1): 1-11.
- [16] YANG Xiangdong, WU Liao, LI Jinquan, et al. A minimal kinematic model for serial robot calibration using poe formula[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3): 326-334.
- [17] JANG J H, KIM S H, KWAK Y K. Calibration of geometric and non-geometric errors of an industrial robot[J]. Robotica, 2001, 19(3): 311-321.
- [18] ZHU Zhaoju, GUO Kai, SUN Jie, et al. Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-t351/titanium ti6al4v stack[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 270-281.
- [19] 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.
- [20] GUO Yingjie, DONG Huiyue, WANG Guifeng, et al. A robotic boring system for intersection holes in aircraft assembly[J]. Industrial Robot, 2018, 45(3): 328-336.
- [21] ZAEH M F, ROESCH O. Improvement of the machining accuracy of milling robots[J]. Production Engineering, 2014, 8(6): 737-744.
- [22] SUPOD K, MONGKOL E, UKRIT T. High-accuracy position-aware robot for agricultural automation using low-cost imu-coupled triple-laser-guided (TLG) system[J]. IEEE Access, 2021, 99: 54325-54337.
- [23] WANG Wei, TIAN Wei, LIAO Wenhe, et al. Pose accuracy compensation of mobile industry robot with binocular vision measurement and deep belief network[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2021, 238(8): 166716.
- [24] IZAGIRRE U, ANDONEGUI I, ECIOLAZA L, et al. Towards manufacturing robotics accuracy degradation assessment: a vision-based data-driven implementation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 1-7.
- [25] MOELLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(2): 100-108.
- [26] DROLL S. Real time path correction of industrial robots

- with direct end-effector feedback from a laser tracker[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 222-228.
- [27] 王志江, 薛坤喜, 吴定勇, 等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统[J]. 机械工程学报. 2019, 55(17): 48-55.
- WANG Zhijiang, XUE Kunxi, WU Dingyong, et al. Robotic Weld seam correction control system based on visual sensing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 48-55.
- [28] WANG Zheng, ZHANG Runan, KEOGH P. Real-time laser tracker compensation of robotic drilling and machining[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2020, 4(3): 79.
- [29] 文科, 张加波, 乐毅, 等. 数控驱动的移动铣削机器人精度提升方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 72-80.
- WEN Ke, ZHANG Jiabo, LE Yi, et al. method for improving accuracy of nc-driven mobile milling robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(5): 72-80.
- [30] CVITANIC T, NGUYEN V, MELKOTE S N. Pose optimization in robotic machining using static and dynamic stiffness models[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 66(4): 101992.
- [31] DUMAS C, CARO S, GARNIER S, et al. Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(4): 881-888.
- [32] ABELE E, WEIGOLD M, ROTHENBÜCHER S. Modeling and identification of an industrial robot for machining applications[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 387-390.
-
- 作者简介: 卢远, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人智能制造。
- E-mail: luyuan2019@mail.sdu.edu.cn
- 国凯(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造、机器人动力学和非线性控制。
- E-mail: kaiguo@sdu.edu.cn
- 孙杰, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为大型结构件加工变形控制和校正、智能制造、激光加工和再制造。
- E-mail: sunjie@sdu.edu.cn