

DOI: 10.3901/JME.2022.14.062

基于扰动观测器的工业机器人高精度 闭环鲁棒控制*

张泽坤^{1,2} 国凯^{1,2} 孙杰^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院 济南 250061;

2. 教育部高效洁净机械制造重点实验室 济南 250061)

摘要: 工业机器人具有很高的重复定位精度但绝对定位精度较低,这限制了其在高精度加工中的应用。提高绝对定位精度的传统方法有几何参数标定和离线误差补偿,但它们的绝对定位误差仍有数百微米,往往不能满足要求。更有效的绝对定位精度提升手段是在线补偿,但目前相关研究大多基于简单的PID控制,难以在复杂工况下实现精确的轨迹跟踪。因此提出一种高精度鲁棒控制方法以提高工业机器人在线补偿中的位置控制精度和对于外界扰动的抵抗能力。该方法使用激光跟踪仪实时测量机器人末端位置,通过二阶扰动观测器识别外部扰动,并在扰动观测的基础上以滑模控制器完成机器人的鲁棒控制,其中扰动观测器观测误差的有界性和闭环系统的渐进稳定性均通过李雅普诺夫方法得到证明。该方法在COMAU工业机器人上得到验证,试验结果表明使用基于扰动观测器的闭环鲁棒控制进行在线补偿时,笛卡儿空间内追踪误差模值的方均根值为0.037 mm,仅为基于PID在线补偿方法的39%。

关键词: 工业机器人; 在线补偿; 扰动观测器; 滑模控制

中图分类号: TP242

High-precision Closed-loop Robust Control of Industrial Robots Based on Disturbance Observer

ZHANG Zekun^{1,2} GUO Kai^{1,2} SUN Jie^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061;

2. Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education,
Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: Industrial robots have high repeatable positioning accuracy but their absolute positioning accuracy is relatively low, which limits their application in high-precision machining. Traditional methods to improve absolute positioning accuracy include geometric parameter calibration and off-line error compensation, but their absolute positioning error is hundreds of microns and cannot meet the requirements. Online compensation is a more effective method, but most of the relevant researches are based on simple PID control, which is difficult to achieve accurate trajectory tracking in complex conditions. Thus, a high-precision robust control method is proposed to improve the control precision and robustness in online compensation. The method uses a laser tracker to measure the robot's terminal position in real time and identifies the external disturbance through a second-order disturbance observer. On this basis, a sliding mode controller is designed to complete the robot's robust control. The boundness of observation error of disturbance observer and the asymptotic stability of closed-loop system are proved by Lyapunov method. The proposed method is validated on a COMAU robot, experimental results show that the root-mean-square value of tracking error module in Cartesian space is 0.037 mm when the proposed control method is used for online compensation, which is only 39% of PID based online compensation method.

Key words: industrial robot; online compensation; disturbance observer; sliding mode control

* 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。20210606 收到初稿, 20220228 收到修改稿

0 前言

工业机器人操作空间大, 灵活性高, 在航空航天大型构件的加工上有广阔的应用前景^[1-2]。但其绝对定位精度较低, 误差甚至达到毫米级^[3-4]。传统的人工示教应用场景下, 该误差尚可被弥补, 然而在基于离线编程的机器人加工中, 较大的绝对定位误差严重限制工业机器人在高精度加工中的应用^[5]。因此, 研究机器人的位置精确控制方法, 提高绝对定位精度, 具有很强的现实意义。

工业机器人的定位误差主要有两类: 几何误差和非几何误差。几何误差包括基座不对中、部件制造误差和关节安装误差等因素引起的定位偏差, 非几何误差则主要来源于齿轮齿隙和外部负载变化^[6]。提高工业机器人绝对定位精度的一般方法是建立精确的机器人运动学模型并标定运动学参数以消除几何误差, 目前已形成了包括 Denavit-Hartenberg (D-H)、Modified Denavit-Hartenberg (MDH)、Product of Exponential (POE) 在内的一系列机器人运动学建模及相应的参数标定方法^[7-9]。NUBIOLA 等^[10]的研究是其中的代表, 他们建立了考虑所有几何误差的 29 参数校准模型并使用激光跟踪仪对机器人进行了标定, 将最大绝对定位误差由 2.158 mm 降低到 0.696 mm。另一种误差补偿的思路是基于数据进行补偿, 其核心是建立位置误差与机器人关节角度的对应关系, 通过神经网络、最小二乘法等方法拟合, 以得到绝对定位误差的预测模型^[11-14]。

尽管以上两类方法均可提高绝对定位精度, 但基于运动学模型的参数标定方法难以修正非几何误差; 基于数据的补偿方法需要大量训练数据作支撑。且上述方法均为离线补偿, 仅适用于特定工况, 任务改变时需要重新标定参数或训练预测模型^[15]。在线补偿技术不受上述问题的困扰, 它通过激光跟踪仪等视觉测量设备实时测量机器人的末端位置, 构建外部控制闭环, 可在无先验模型的情况下同时补偿几何误差和非几何误差, 实现更高的绝对定位精度^[16-17]。在史晓佳等的研究中, 经过在线补偿后机器人对离散点位的误差由 0.628 mm 降低到 0.087 mm^[18]。XIONG 等^[19]提出了一种根据加工误差生成补偿轨迹的机器人侧铣误差补偿方法, 试验验证了此方法的有效性。但是, 目前的在线补偿方法多使用简单的前馈或 PID 算法补偿误差^[16-19], 应对外部扰动的能力较弱^[20], 在负载突变等情况下容

易出现较大的误差, 难以快速修正。因此, 有必要研究适用于在线补偿的新型控制算法。

针对目前工业机器人在线补偿中存在的不足, 本文提出一种基于扰动观测器的闭环鲁棒控制方法 (Disturbance observer based control, DOBC), 以激光跟踪仪对机器人末端位置的实时测量为基础, 建立包含扰动项工业机器人的位置控制模型, 之后构造基于此模型的二阶扰动观测器和鲁棒控制器, 通过李雅普诺夫分析方法研究观测器和控制器的稳定性, 最后以 COMAU 机器人的轨迹追踪测试验证方法对扰动的抑制和绝对定位精度提升效果, 为实际工程应用提供参考。

1 工业机器人末端位置的测量

激光跟踪仪作为一种高精度的位置测量设备已大量应用于工业机器人的在线测量中, 图 1 为本文使用的测量方案示意图, 其中, 激光跟踪仪追踪安装于机械臂末端法兰的反射靶球 (Spherically mounted retroreflector, SMR), $P_{LS} = (p_{sx}, p_{sy}, p_{sz})^T$ 为激光跟踪仪测量得到的 SMR 安装点 P_S 在激光跟踪仪坐标系 $O_L - x_L y_L z_L$ 中的位置, $P_{BR} = (p_{rx}, p_{ry}, p_{rz})^T$ 为工业机器人内部传感器测得的末端法兰中心点在机器人基座坐标系 $O_B - xyz$ 中的位置。

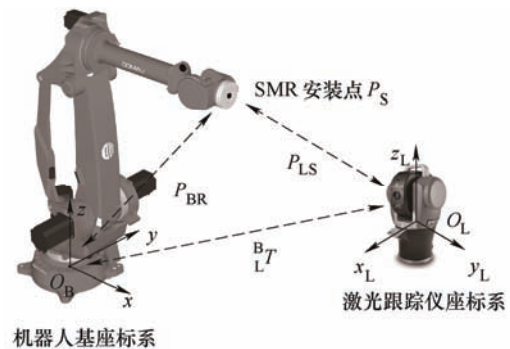


图 1 工业机器人末端位置视觉测量示意图

因 SMR 安装点与末端法兰中心点, 激光跟踪仪坐标系与机器人基座坐标系都相对固定, 故对任意机器人末端位置 P_{LS} 与 P_{BR} 都有唯一对应的值, 且可进行如下转换

$$P_{BL} = {}^B_L T P_{LS} \quad (1)$$

式中, $P_{BL} = (x_1, y_1, z_1)^T$ 为由激光跟踪仪测量结果 P_{LS} 转换得到的基座坐标系下机器人末端法兰中心点坐标, ${}^B_L T$ 为转换矩阵, 其定义为

$${}^B_L T = \begin{pmatrix} {}^B_L R & \Delta l \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}$$

式中, ${}^B_L R \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $\Delta l \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 分别为旋转矩阵和平移算子。为简化旋转矩阵 ${}^B_L R$ 的求解过程, 将其表示为如下所示的罗德里格矩阵形式

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

可见确定三个参数 a 、 b 、 c 就能得到旋转矩阵 ${}^B_L R$ 。定义 $\Theta = (a, b, c)^T$, 将 n 组机器人位姿下的 P_{LS} 和 P_{BR} 坐标代入式(2), 通过最小二乘法求得未知参数 Θ

$$\Theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T L \quad (2)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 & -\lambda p_{rz}^{21} - p_{sz}^{21} & -\lambda p_{ry}^{21} - p_{sy}^{21} \\ -\lambda p_{rz}^{21} - p_{sz}^{21} & 0 & \lambda p_{rx}^{21} + p_{sx}^{21} \\ \lambda p_{ry}^{21} + p_{sy}^{21} & \lambda p_{rx}^{21} + p_{sx}^{21} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -\lambda p_{rz}^{n1} - p_{sz}^{n1} & -\lambda p_{ry}^{n1} - p_{sy}^{n1} \\ -\lambda p_{rz}^{n1} - p_{sz}^{n1} & 0 & \lambda p_{rx}^{n1} + p_{sx}^{n1} \\ \lambda p_{ry}^{n1} + p_{sy}^{n1} & \lambda p_{rx}^{n1} + p_{sx}^{n1} & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$L = (p_{sx}^{21} - \lambda p_{rx}^{21}, p_{sy}^{21} - \lambda p_{ry}^{21}, p_{sz}^{21} - \lambda p_{rz}^{21}, \dots, p_{sx}^{n1} - \lambda p_{rx}^{n1}, p_{sy}^{n1} - \lambda p_{ry}^{n1}, p_{sz}^{n1} - \lambda p_{rz}^{n1})^T \quad (4)$$

式中, 参数 p_{rz}^{i1} 定义为 $p_{rz}^{i1} = p_{rz}^i - p_{rz}^1$, 其中 p_{rz}^i 代表第 i 组机器人位姿下 P_{BR} 的 z 轴坐标, $i = 2, 3, \dots, n$ 。其他不同下标的 p^{i1} 对应于不同的坐标点位差值, 含义类似不再赘述。参数 λ 为尺度参数, 其定义为

$$\lambda = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n \frac{\sqrt{(p_{sx}^{i1})^2 + (p_{sy}^{i1})^2 + (p_{sz}^{i1})^2}}{\sqrt{(p_{rx}^{i1})^2 + (p_{ry}^{i1})^2 + (p_{rz}^{i1})^2}} \quad (5)$$

通过式(2)~(5)获得旋转矩阵 ${}^B_L R$ 后, 可进一步计算平移算子 Δl 为

$$\Delta l = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n (P_{LS} - \lambda P_{BR}) \quad (6)$$

至此可确定转换矩阵 ${}^B_L T$, 通过式(1)即可将激光跟踪仪的测量结果转换为后续控制所需的机器人基座标系下末端精确位置 P_{BL} 。在本文中的应用中, 测量点数 n 为 8, 测量点选择为以机器人末端位置为中心, 边长 200 mm 的立方体的 8 个顶点。

2 工业机器人的位置控制模型

2.1 位置控制建模

本文以工业机器人普遍支持的位置环控制为基础进行控制器设计。在工业机器人的位置控制系统中, 机器人的真实动力学模型往往被封装, 输入运动控制参数即可指定加减速曲线、最大加速度等动力学性能指标而无需访问机器人底层控制器。建立工业机器人的位置控制模型

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_x & 0 & 0 \\ 0 & B_y & 0 \\ 0 & 0 & B_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T$, $\mathbf{y} = (y_1, y_2)^T$, $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$ 为系统的状态, 分别代表机械臂末端中心点沿 x 、 y 、 z 方向的位移和速度。 A_k 、 B_k 和 D_k 分别代表系统状态矩阵, 输入矩阵和扰动矩阵, 各自定义如下

$$A_k = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{k1} & a_{k2} \end{pmatrix} \quad B_k = \begin{pmatrix} 0 \\ b_k \end{pmatrix} \quad D_k = \begin{pmatrix} d_{k1} \\ d_{k2} \end{pmatrix}$$

式中, $k = x, y, z$ 。在位置控制模型(7)中, 系统状态矩阵和输入矩阵的参数通过系统辨识获得。扰动矩阵包括外部扰动以及系统参数变动所引起的模型不精确。本文中假设系统所受的扰动及其前两阶导数连续且有界, 即 $|d^j d_{ki} / dt^j| \leq \mu_{kij}$, 其中 μ_{kij} 为扰动界限, $i = 1, 2$, $j = 0, 1, 2$ 。

在此模型中, 机器人沿机器人基座标系中 x 、 y 、 z 坐标轴的运动简化为带扰动的二阶动态系统。这是因为在机器人加工中, 多为低速运动, 除奇点之外机器人末端各方运动的耦合性较弱, 可作为系统扰动项处理。此外, 针对奇点可以规划合理的路径使机器人远离自身奇点, 避免不同方向运动间发生较强的耦合^[21-22]。因此, 本文采用独立但结构相同的二阶系统来描述各方向的运动动态。鉴于三个方向系统结构相同, 观测器与控制器的设计将以 x 轴的运动控制为例, 其动态为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + d_1 \\ \dot{x}_2 = \mathbf{a}^T \mathbf{x} + b u + d_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{a} = (a_{x1}, a_{x2})^T \in \mathbf{R}^2$ 为机器人沿 x 轴方向运动的系统参数, $b = b_x$ 和 $u = u_x$ 分别为此方向的输入增益与输入, $d_1 = d_{x1}$ 和 $d_2 = d_{x2}$ 为此方向运动所受的扰动。为方便后文说明, 定义 $\mathbf{x}_d = (x_{1d}, x_{2d})^T \in \mathbf{R}^2$ 为系统状态 \mathbf{x} 的期望值, x_{1d} 、 x_{2d} 连续有界且 x_{1d} 始终

处于机器人系统的工作空间内。同时定义 $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)^T \in \mathbf{R}^2$ 为控制误差, 其中 $\tilde{x}_1 = x_{1d} - x_1$ 为机器人末端轨迹的跟随误差, $\tilde{x}_2 = x_{2d} - x_2$ 为机器人末端速度与理想速度的差值。

2.2 系统参数辨识

工业机器人位置控制模型中的系统参数 \mathbf{a} 和输入增益 \mathbf{b} 采用如下方式辨识: 设置运动控制参数为指定值, 在开环状态下通过位置控制系统向工业机器人输入斜坡信号, 记录其响应并使用 Matlab 系统辨识工具箱进行二阶系统辨识, 获得系统参数。本文中, 分别指定机器人沿 x 、 y 、 z 轴以 10 mm/s 的速度运行 200 mm, 得到各轴的系统参数矩阵和输入增益矩阵如下

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_x &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1172.5 \cdot s^{-2} & -46.2 \cdot s^{-1} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B}_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 1172.5 \cdot s^{-2} \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_y &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -536.8 \cdot s^{-2} & -38.9 \cdot s^{-1} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 536.8 \cdot s^{-2} \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_z &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -2285.8 \cdot s^{-2} & -133.2 \cdot s^{-1} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 2258.8 \cdot s^{-2} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

式中, 矩阵 \mathbf{A}_x 、 \mathbf{A}_y 、 \mathbf{A}_z 和 \mathbf{B}_x 、 \mathbf{B}_y 、 \mathbf{B}_z 分别代表机器人位置控制模型中沿 x 、 y 、 z 方向的系统状态矩阵以及输入矩阵, s 为时间, 单位为秒。

3 工业机器人扰动观测器设计

3.1 扰动观测器设计

本文设计了二阶观测器估计系统扰动, 其动态为

$$\dot{\hat{d}}_i = r_{i1} + s_{i1}x_i \quad (9)$$

$$\dot{\hat{d}}_i = r_{i2} + s_{i2}x_i \quad (10)$$

式中, r_{i1} 和 r_{i2} 为辅助变量。

$$\dot{r}_{i1} = -s_{i1}(x_2 + \hat{d}_1) + \hat{d}_1 \quad (11)$$

$$\dot{r}_{i1} = -s_{i1}(x_2 + \hat{d}_1) + \hat{d}_1 \quad (12)$$

$$\dot{r}_{i2} = -s_{i2}(\mathbf{a}^T \mathbf{x} + \mathbf{b}u + \hat{d}_2) + \hat{d}_2 \quad (13)$$

$$\dot{r}_{i2} = -s_{i2}(\mathbf{a}^T \mathbf{x} + \mathbf{b}u + \hat{d}_2) + \hat{d}_2 \quad (14)$$

式中, \hat{d}_i 和 $\dot{\hat{d}}_i$ 分别是扰动 d_i 和 \dot{d}_i 的估计量, s_{ij} 是观测器参数, $i=1,2, j=1,2$ 。

定义观测误差为

$$\tilde{\mathbf{e}}_i = (\tilde{d}_i, \dot{\tilde{d}}_i)^T \quad (15)$$

式中, $\tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i$, $\dot{\tilde{d}}_i = \dot{d}_i - \dot{\hat{d}}_i$ 别对应观测器对外部扰动 d_i 和 \dot{d}_i 的观测误差。

3.2 观测器稳定性

将式(9)对时间 t 求导并代入式(8)和式(11)得

$$\dot{\tilde{d}}_1 = s_{i1}\tilde{d}_1 + \dot{\hat{d}}_1 \quad (16)$$

式(16)两侧同时减去 $\dot{\hat{d}}_1$ 得到

$$\dot{\tilde{d}}_1 = -s_{i1}\tilde{d}_1 + \tilde{\dot{d}}_1 \quad (17)$$

对式(10)求导, 结合式(8)和式(12), 得

$$\dot{\tilde{d}}_1 = \ddot{d}_1 - s_{i2}\tilde{d}_1 \quad (18)$$

同理可得

$$\dot{\tilde{d}}_2 = -s_{i2}\tilde{d}_2 + \tilde{\dot{d}}_2 \quad (19)$$

$$\dot{\tilde{d}}_2 = \ddot{d}_2 - s_{i2}\tilde{d}_2 \quad (20)$$

由式(17)~(20), 观测误差 $\tilde{\mathbf{e}}_i$ 动态对于不同的下标 i 具有相同的形式, 统一表示为

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}_i = \mathbf{S}_i \tilde{\mathbf{e}}_i + \mathbf{T}_i \ddot{\mathbf{d}}_i \quad (21)$$

$$\mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} -s_{i1} & 1 \\ -s_{i2} & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

观测误差的状态空间表达式(21)中, 状态矩阵 \mathbf{S}_i 具有两个参数 s_{i1} 和 s_{i2} , 可以找到合适的参数 s_{i1} 和 s_{i2} , 使得 \mathbf{S}_i 的所有特征值都位于复平面的左半平面, 保证观测器的稳定性^[23]。在此基础上, 构造李雅普诺夫函数

$$V_i = \tilde{\mathbf{e}}_i^T \mathbf{P}_i \tilde{\mathbf{e}}_i \quad (23)$$

式中, $i=1,2$, \mathbf{P}_i 为给定的正定矩阵, 因 \mathbf{S}_i 的所有特征值都位于左半平面, 因此总是可以找到正定矩阵 \mathbf{Q}_i 使得

$$\mathbf{S}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{S}_i = -\mathbf{Q}_i \quad (24)$$

定义矩阵 \mathbf{Q}_i 的最小特征值为 $\underline{\lambda}_i$, 将 V_i 对时间 t 求导并引入式(21), 得到其动态

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \tilde{\mathbf{e}}_i^T (\mathbf{P}_i \mathbf{S}_i + \mathbf{S}_i^T \mathbf{P}_i) \tilde{\mathbf{e}}_i + 2\tilde{\mathbf{e}}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{T}_i \ddot{\mathbf{d}}_i \leq \\ &= -\|\tilde{\mathbf{e}}_i\|(\underline{\lambda}_i \|\tilde{\mathbf{e}}_i\| - 2\|\mathbf{P}_i \mathbf{T}_i\| \mu_{i2}) \end{aligned} \quad (25)$$

式中, $i=1,2$, 定义 $l_{i1} = 2\|\mathbf{P}_i \mathbf{T}_i\| \mu_{i2} / \underline{\lambda}_i$, 由式(25)可知, 当 $\|\tilde{\mathbf{e}}_i\| > l_{i1}$ 时, $\dot{V}_i < 0$ 。因此该观测器的识别误差 $\tilde{\mathbf{e}}_i$ 最终有界, 将收敛到以 0 为中心, l_{i1} 为半径的圆内, 增大 $\underline{\lambda}_i$ 可任意减小界限 l_{i1} 。再令 $l_{i\max} = \max\{l_{i1}, l_{i2}\}$ 。经过足够长的时间后, 对于任

意的 i , $\|\tilde{e}_i\| \leq l_{\max}$ 均成立。

4 工业机器人滑模控制器设计

4.1 滑模控制器设计

定义滑动曲面

$$\sigma = \rho \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2 - \hat{d}_1 \quad (26)$$

对式(26)求导并代入式(8), 得到滑模面的动态为

$$\dot{\sigma} = \rho \dot{x}_{1d} - \rho(x_2 + d_1) + \dot{x}_{2d} - a^T x - bu - d_2 - \dot{\hat{d}}_1 \quad (27)$$

定义控制律为

$$u = \frac{1}{b} k_1 \sigma + \frac{1}{b} k_2 \text{sat}(\sigma) + \frac{1}{b} \left[\rho \dot{x}_{1d} - \rho x_2 - \rho \hat{d}_1 + \dot{x}_{2d} - a^T x - \hat{d}_2 \right] \quad (28)$$

式中, $k_1 > 0, k_2 > 0$ 为控制增益, 饱和函数 $\text{sat}(\sigma)$ 定义为

$$\text{sat}(\sigma) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma) & |\sigma| > \varepsilon \\ \sigma / \varepsilon & |\sigma| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (29)$$

式中, $\varepsilon > 0$ 为控制器参数, 通过将滑模控制中 sgn 函数替换为饱和函数 sat , 可以有效的消除滑模控制器产生的颤振。

4.2 控制器稳定性

将式(28)代入式(27)并结合式(10)和式(16)得到

$$\dot{\sigma} - (s_{11} + \rho) \tilde{d}_1 + \tilde{d}_1 - \tilde{d}_2 - k_1 \sigma - k_2 \text{sat}(\sigma) \quad (30)$$

将式(30)两侧同乘 σ , 可得

$$\sigma \dot{\sigma} \leq -|\sigma| [k_1 |\sigma| - l_{\max} (s_{11} + \rho + 2) - \mu_{11} + k_2] \quad (31)$$

定义 $l_2 = [l_{\max} (s_{11} + \rho - k_2)] / k_1$, 由式(31)可知当 $|\sigma| > l_2$ 时, $\sigma \dot{\sigma} < 0$ 。因此经过足够长时间后 σ 将收敛至以 l_2 为界的 0 的邻域内, 即 σ 最终有界, $|\sigma| \leq l_2$, 此界限可通过增大 k_1 来减小。

在此基础上研究系统输出的稳定性。将式(8)代入式(26)并化简可得

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \sigma - \rho \tilde{x}_1 - \tilde{d}_1 \quad (32)$$

式(32)两侧同乘 \tilde{x}_1 , 结合 \tilde{e}_i 和 σ 最终有界可得

$$\tilde{x}_1 \dot{\tilde{x}}_1 \leq |\tilde{x}_1| (l_{\max} + l_2 - \rho |\tilde{x}_1|) \quad (33)$$

因此, 跟随误差 \tilde{x}_1 也最终有界。定义 $l_3 = (l_{\max} + l_2) / \rho$, 经足够长的时间后 $|\tilde{x}_1| \leq l_3$ 。因期望轨迹 x_{1d} 有界, 故机器人系统在 x 轴方向的输出 $y = x_1 = x_{1d} - \tilde{x}_1$ 也最终有界, 输出将收敛在期望轨迹

附近的小邻域内。可见, 通过本文提出的滑模控制器, 机器人系统的输出可实现渐进稳定性。

以上对观测器和控制器的分析是以机器人系统在笛卡尔坐标系中 x 方向的运动为例, 但其余方向的讨论完全相同。因此, 设置三个结构相同的扰动观测器和相匹配的滑模控制器分别控制机器人在 x 、 y 、 z 方向的运动即可实现工业机器人在笛卡儿空间内的闭环鲁棒控制。控制方法如图 2 所示。

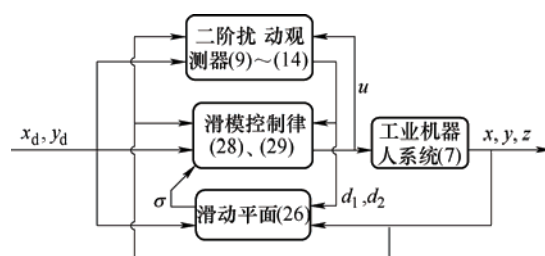


图 2 基于扰动观测器的闭环鲁棒控制策略原理图

5 试验验证

本文采用的工业机器人闭环控制系统试验装置如图 3 所示。试验中的工业机器人型号为 COMAU SMART5 NJ 165, 它具有 6 个自由度, 重复定位精度 0.085 mm, 最大负载 165 kg。外部测量设备为 API 公司的 Radian 2 型激光跟踪仪, 测量精度为 $15 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m} / \text{m}$ 。



图 3 工业机器人闭环控制系统试验装置图

1. 工业机器人 2. 重物挂载点 3. 反射靶球 4. 激光跟踪仪

本文提出的基于扰动观测器的闭环鲁棒控制方法通过 C 语言编写, 运行于 Linux 实时控制器, 根据接收到的测量数据计算目标点位, 依托 COMAU 机器人的开放控制框架 C5Gopen 将目标点位写入机器人控制器, 驱动机器人运动。系统的闭环控制频率为 2 500 Hz, 可以满足实时控制的需要。

为验证本文提出的 DOBC 控制方法(以下简称 DOBC 在线补偿)相对于现有在线补偿技术的优越性, 选择文献[17]中提出的基于 PID 控制器的在线

补偿(以下简称 PID 在线补偿)进行对比, 同时进行无在线补偿的机器人轨迹追踪测试(以下简称无在线补偿)作为两种在线补偿方法的性能参照。试验中三种控制方法的具体参数设置如下。

(1) DOBC 在线补偿: $s_{11} = s_{21} = 25$, $s_{12} = s_{22} = 10$, $\rho = 5$, $k_1 = 10$, $k_2 = 5$, $\varepsilon = 0.5$, 系统参数和输入增益采用第二节识别得到的参数。

(2) PID 在线补偿: $k_p = 2$, $k_d = 0.1$, $k_i = 5$, 上述参数分别代表追踪误差的比例、微分和积分项增益。

(3) 无在线补偿: 直接将理想轨迹写入机器人控制器, 不进行额外的控制和补偿。

本文的对比试验中, 机器人初始姿态的各关节角为 $\{0^\circ, 0^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 0^\circ\}$ 。试验的测试轨迹为 ISO9283 标准中推荐的机器人测试轨迹, 如图 4 所示。轨迹中包含不同尺度的直线运动和圆弧运动以及不同范围的往返运动, 可充分检验机器人的控制性能和定位精度。本试验中测试轨迹设置于 xy 平面, z 方向保持静止。此外, 为测试各控制方法对于外部扰动的抵抗能力, 试验在测试轨迹的加载点处(试验的第 25 s)于机器人末端重物挂载点挂载配重块, 产生约 200 N 沿 z 轴负方向的负载并一直持续到试验结束。这样的负载为本试验中 COMAU SMART5 NJ 165 机器人在实际任务中的常见载荷, 作为外部扰动可有效检验控制方法的抗扰动能力。

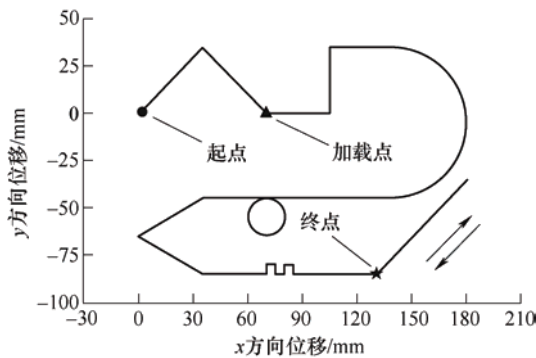


图4 试验测试轨迹示意图

定义机器人在笛卡儿空间内的追踪误差模值为 $|e| = \sqrt{\tilde{x}_1^2 + \tilde{y}_1^2 + \tilde{z}_1^2}$, 它直观地体现笛卡儿空间内机器人实际轨迹与理想轨迹的偏离程度, 试验中三种控制方法在笛卡儿空间内追踪误差的模值 $|e|$ 如图 5 所示。可见, 无在线补偿时机器人追踪误差的模值远大于 PID 在线补偿和 DOBC 在线补偿, 尤其是在第 25 s 通过挂载重物引入外部扰动后, 无在线补偿的误差模值始终在较高的水平振

荡, 且不能向 0 收敛。这说明依靠机器人自身的位置控制只能实现较低的绝对定位精度, 也缺乏修正外部扰动的能力, 不能准确跟踪笛卡儿空间内的指定轨迹。相反, PID 在线补偿和 DOBC 在线补偿都显著降低了追踪误差的模值 $|e|$, 在引入外部扰动后误差也均表现出向 0 的收敛。尤其是 DOBC 在线补偿中追踪误差模值 $|e|$ 在测试轨迹的全程都维持在很低的水平, 具有良好的轨迹追踪和抗扰动能力。

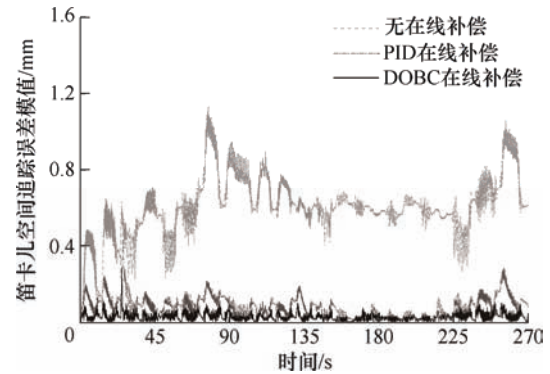
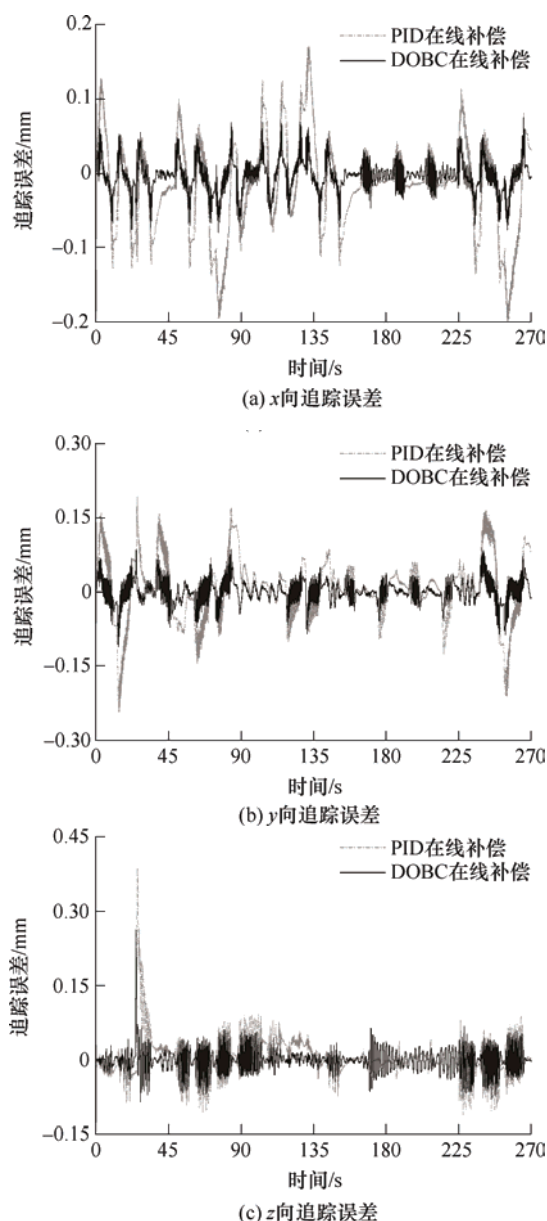


图5 笛卡儿空间内机器人追踪误差模值

为进一步比较 PID 在线补偿和 DOBC 在线补偿的性能差异, 图 6a~6c 分别展示了两控制方法在 x 、 y 、 z 三个方向的追踪误差。由图 6a、6b 可见, 在进行主要运动的 x 和 y 方向, 机器人追踪误差与运动状态紧密相关并表现出明显的分段, 最大追踪误差通常出现在对应方向运动的启停阶段。DOBC 在线补偿对这种误差表现出了相对于 PID 在线补偿更强的抑制作用, 在误差的极值和收敛速度上都有明显优势。而在理想状态为无位移的 z 方向, 主要的追踪误差来自于第 25 s 引入的外部扰动, 如图 6c 所示。图中可见 PID 在线补偿为修正此扰动引起的误差经历了较长时间的调整(过渡状态约为 10 s), 而 DOBC 在线补偿在误差出现后的响应迅速, 在极短的时间内即完成误差的修正, 有效降低了外部扰动造成的影响。

DOBC 在线补偿的良好性能很大程度上源于扰动观测器对于扰动的准确观测。一方面, 它可以准确识别外部扰动, 使控制器针对性的做出调整; 另一方面, 外部扰动不明显时, 也可以一定程度上修正识别得到的机器人位置控制模型, 使其更贴合实际。图 7 所示为 DOBC 在线补偿各方向的扰动观测值。图 7a、7b 可见, 在进行运动的 x 和 y 方向, 扰动观测值 \hat{d}_1 和 \hat{d}_2 持续小幅度调整以适应自身运动引起的模型参数变动, 此外由图 7c 可见, 在第 25 s 外部扰动被引入时, z 方向的扰动观测值快速做出

图 6 机器人在 x 、 y 、 z 方向的追踪误差

相应的变化并驱动滑模控制器改变输出。这种对于扰动的快速识别增强了机器人的鲁棒性,有利于提高位置追踪的精度。而 PID 在线补偿在实际应用中很难设置大控制增益,误差被放大后控制器才能有较强的补偿作用,因此难以实现良好的轨迹追踪。

为了保证试验结果的可靠性,在前述试验的基础上以相同的步骤额外进行两次重复试验。三次试验的统计结果如表 1 所示。其中 $|e|_{\text{rms}}$ 代表笛卡儿空间内追踪误差模值 $|e|$ 的方均根值。可见,使用基于扰动观测器的闭环鲁棒控制进行在线补偿时,三次试验中 $|e|_{\text{rms}}$ 的平均值为 0.037 mm,仅为 PID 在线补偿的 39%,无在线补偿的 6%。这有力的说明本文提出的基于扰动观测器的闭环鲁棒控制方法可有效提升机器人绝对定位精度和复杂工况下轨迹跟踪能力。

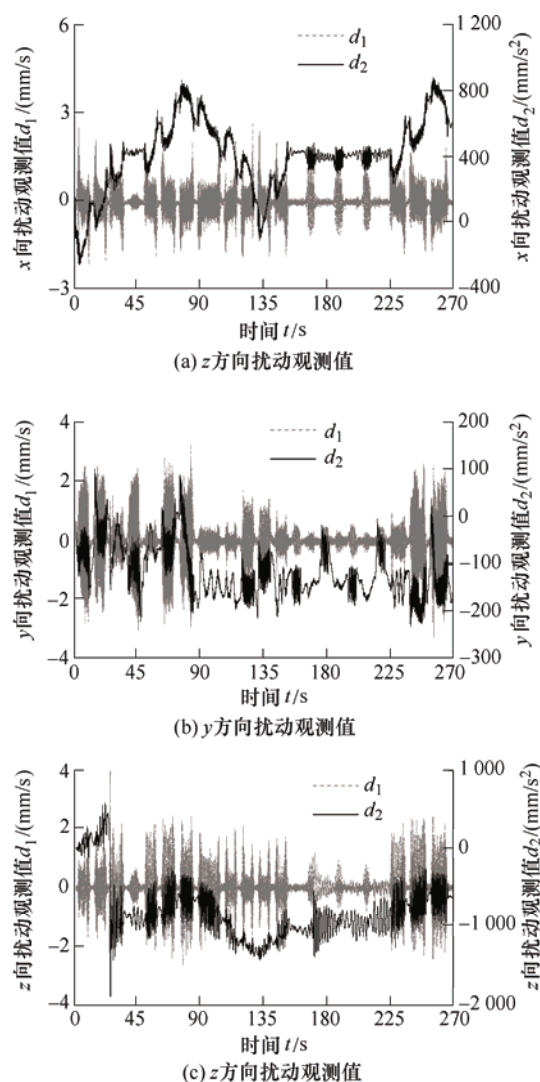


图 7 DOBC 在线补偿各方向的扰动观测值

表 1 不同控制方法的测试结果

指标	次序	无在线补偿	PID 在线补偿	DOBC 在线补偿
$ e _{\text{rms}}/\text{mm}$	1	0.624	0.098	0.038
	2	0.607	0.089	0.040
	3	0.619	0.096	0.034
	平均	0.617	0.094	0.037

6 结论

(1) 建立了包含扰动项的机器人位置控制模型,设计了基于此模型的二阶扰动观测器,使用李雅普诺夫方法证明了观测误差的有界性。

(2) 提出了一种基于机器人位置控制模型和扰动观测器的闭环鲁棒控制方法,通过李雅普诺夫方法证明其渐近稳定性,可提升工业机器人在线补偿中的绝对定位精度和对外界扰动的抵抗能力。

(3) 搭建了基于激光跟踪仪在线测量的工业机

器人在线补偿系统, 试验结果表明使用基于扰动观测器的闭环鲁棒控制进行在线补偿时, 笛卡儿空间内追踪误差模值的方均根值为 0.037 mm, 仅为基于 PID 在线补偿方法的 39%。

参 考 文 献

- [1] KIM S H, NAME, HA T I, et al. Robotic machining: A review of recent progress[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(9): 1629-1642.
- [2] 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.
- [3] FROMMKNECHT A, KUEHNLE J, EFFENBERGER I, et al. Multi-sensor measurement system for robotic drilling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 47(1): 4-10.
- [4] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 机器人加工几何误差建模研究 I: 空间运动链与误差传递[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(7): 154-168.
- [5] JANEZ G, TIMI K, KARL G, et al. Accuracy improvement of robotic machining based on robot's structural properties[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(5): 1309-1329.
- [6] ZHONG Xiaolin, LEWIS J M, FRANCIS L N N. Autonomous robot calibration using a trigger probe[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1996, 18(4): 395-410.
- [7] LARRANZI L, CRISALLI C, MASSA D, et al. Geometrical calibration of a 6-axis robotic arm for high accuracy manufacturing task[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(7): 1813-1829.
- [8] 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.
- [9] 乔贵方, 孙大林, 宋光明, 等. 串联机器人标定系统的坐标系快速转换方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(14): 1-8.
- [10] QIAO Guifang, SUN Dalin, SONG Guangming, et al. A rapid coordinate transformation method for serial robot calibration system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(14): 1-8.
- [11] NUBIOLA A, BONEY I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [12] MONICA T, GIOVANNI L, NICOLA P. Study of neural-kinematics architectures for model-less calibration of industrial robots[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2021, 33(1): 158-171.
- [13] GUO Yixuan, SONG Bao, TANG Xiaoqi, et al. A measurement method for calibrating kinematic parameters of industrial robots with point constraint by a laser displacement sensor[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(7): 1-29.
- [14] 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.
- [15] GUO Kai, PAN Yongping, YU Haoyong. Composite learning control of robotic systems: A least squares modulated approach[J]. *Automatica*, 2020, 111(10862): 1-13.
- [16] DU Guanglong, LIANG Yin hao, LI Chunquan, et al. Online robot kinematic calibration using hybrid filter with multiple sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7092-7107.
- [17] JIANG Yifan, HUANG Xiang, LI Shuanggao. An on-line compensation method of a metrology-integrated robot system for high-precision assembly[J]. *Industrial Robot*, 2016, 43(6): 647-656.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Position and attitude measurement and online errors compensation for KUKA industrial robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(8): 1-7.
- [21] XIONG Gang, LI Zhoulong, DING Ye, et al. A closed-loop error compensation method for robotic flank milling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 63(1): 1-9.
- [22] LONANNOU P A, SUN J. Robust adaptive control[M].

- NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [21] LIU Qi, HUANG Tian. Inverse kinematics of a 5-axis hybrid robot with non-singular tool path generation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56(1): 140-148.
- [22] SLAVKOVIC N, ZIVANOVIC S, KOKOTOVIC B, et al. Simulation of compensated tool path through virtual robot machining model[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(7): 374-390.
- [23] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. NJ: Prentice Hall, 2002.
-
- 作者简介:** 张泽坤, 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为鲁棒控制与自适应控制。
E-mail: zekun@mail.sdu.edu.cn
- 国凯(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能机器人系统设计与控制。
E-mail: kaiguo@sdu.edu.cn