

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.037

基于 BP-PID 的工业机器人视觉伺服控制方法

李佳林, 叶昶君, 张奇, 田威, 李鹏程

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对工业机器人在铣削加工场景下,由于受切削力和振动的影响,传统的 PID 控制难以保证机器人的抗干扰和自适应性能,从而无法保证加工精度的问题,提出一种工业机器人视觉伺服控制方法。基于 BP 神经网络优化经典增量式数字 PID,对 PID 参数进行自适应调整;并采用双目视觉设备实时获取机器人末端位姿数据作为反馈,实现闭环控制。通过仿真和铣削实验验证了所提方法的有效性。实验结果表明:最大直线轨迹位置误差降低约 83%,最大圆度误差、最大拟合圆半径误差降低约 73%和 75%。

关键词:工业机器人;视觉伺服;BP 神经网络;PID 控制器

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0190-05

Visual Servo Control Method for Industrial Robots Based on BP-PID

LI Jialin, YE Changjun, ZHANG Qi, TIAN Wei, LI Pengcheng

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

Abstract: In milling scenarios, industrial robots are subject to cutting forces and vibrations, making it difficult for traditional PID control to ensure robustness and adaptability, thereby compromising machining accuracy. To address this issue, a visual servo control method for industrial robots is proposed. The method optimizes the classical incremental digital PID using a BP neural network to adaptively adjust PID parameters, and employs a binocular vision system to acquire real-time pose data of the robot end-effector as feedback for closed-loop control. The effectiveness of the proposed method is verified through simulations and milling experiments. Results show that the maximum linear trajectory position error is reduced by approximately 83%, while the maximum roundness error and the maximum fitted circle radius error are reduced by about 73% and 75%, respectively.

Keywords: industrial robots; visual servo; BP neural network; PID controller

0 引言

随着工业机器人技术的不断进步,工业机器人的应用正逐渐从传统的搬运、焊接向加工、装配等领域发展。其中,在铣削加工场景下,机器人末端会受到切削力以及振动的影响,而在实际工程应用中,机器人大多仍采用抗干扰能力较弱的传统 PID 控制器,这难以保证机器人的铣削加工精度。因此提高机器人控制的抗干扰和自适应性能、保证机器人末端的运动精度是亟需解决的关键问题。

目前针对机器人的高精度自适应轨迹跟踪控制已经出现了多种类型的轨迹跟踪控制器结构,如 PID 控制、模糊控制、模型预测控制、神经网络控制等^[1-3]。CHAUDHARY 等^[4]将自适应神经模糊推理系统和 PID 控制策略相结合,提出了一种混合力加位置控制器,并实现了机器人的精确轨迹跟踪。杨真真等^[5]提出了一种基于模型预测控

制的工业机器人曲面跟踪方法,根据实时力信号的反馈对末端法向速度进行修正,得到了较好的力跟踪效果。秦霞等^[6]提出一种基于机器人内置控制器的模糊 PD 型输入迭代学习轨迹跟踪控制方法,该方法采用模糊增益调整型进行控制参数自整定,并将迭代学习量叠加到轨迹输入中,实现了机器人高精度轨迹跟踪。WANG 等^[7]提出了一种简单无约束变误差动态自适应神经网络控制方案,保证了闭环系统中所有信号的有界性。卢兴国^[8]提出了一种基于自学习区间二型模糊神经网络的智能控制器,提高了机器人轨迹跟踪控制的精度和稳定性。

综上所述可知,实际工程应用大多还是采用 PID 控制,但传统 PID 控制对于机器人的轨迹精度提升空间有限,需引入更加智能的控制方式。模型预测控制能处理多输入输出的问题,同时可以考虑多种情况下的约束^[9],但六轴工业机器人

第一作者简介:李佳林(1998—),男,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为工业机器人视觉伺服控制,1157903118@qq.com。

具有高度非线性,建模困难。为避免机器人建模过程,可采用模糊控制和神经网络控制等方式。

考虑到神经网络具有较强的非线性映射能力,为提高机器人抗干扰和自适应性能,本文提出一种工业机器人的伺服控制方法,采用BP神经网络对传统PID控制器进行优化,自适应调整PID参数,并利用双目视觉设备采集机器人末端位姿数据作为反馈,实现机器人的视觉伺服控制,最后通过仿真和铣削实验验证所提控制方法的有效性。

1 基于BP网络的PID控制器

基于BP网络的PID控制器,其控制模型如图1所示。经典PID部分对整个控制器形成闭环反馈回路;BP网络部分主要接收PID闭环回路中各个环节的参数,用于训练网络模型,最终得到最优的 k_p, k_i, k_d 参数。具体设计步骤如下。

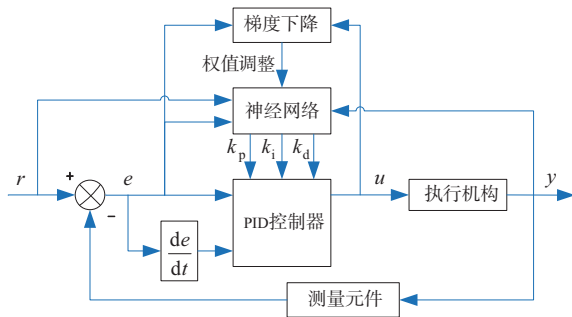


图1 BP-PID控制模型

1) 首先需确定网络结构。输入层和输出层的节点数通常与具体问题有关,对于隐含层节点个数,若节点数过少会导致欠拟合;相反,则会由于训练数据不足导致过拟合,根据经验公式有

$$N_h = \frac{N_i}{\alpha(N_i + N_o)} \quad (1)$$

式中: N_i 表示输入层神经元的个数; N_o 表示输出层神经元个数; N_i 表示训练集样本数; α 表示调整系数,通常取值范围为2~10。

2) 设置输入层到隐含层以及隐含层到输出层的连接权初始值。对于Sigmoid激活函数来说,神经元在Sigmoid曲线的两端时趋于稳定,梯度几乎为零,使得网络的学习速度变得非常慢,因此连接权的初始值通常选取较小的随机数。

3) 选择激活函数。隐含层的激活函数选择双曲正切函数

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (2)$$

对式(2)进行求导得

$$f'(x) = 1 - \tanh^2(x) = 1 - f^2(x) \quad (3)$$

对于输出层激活函数,由于输出节点为PID的3个参数,为非负数,因此选择非负型的双曲正切函数

$$g(x) = \frac{1}{2} [1 + \tanh(x)] = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (4)$$

对式(4)进行求导得

$$g'(x) = 2g(x) [1 - g(x)] \quad (5)$$

4) 设当前控制周期内的期望输出值和实际输出值为 $r(k)$ 和 $y(k)$,两者间的误差为 $e(k)$,则

输入层的输入为

$$O_j^{(1)} = x(j) \quad (j=1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

隐含层的输入为

$$n_{et,i}^{(2)} = \sum_{j=0}^M w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \quad (7)$$

隐含层的输出为

$$O_i^{(2)}(k) = f(n_{et,i}^{(2)}(k)) \quad (i=1, 2, \dots, Q) \quad (8)$$

输出层的输入为

$$n_{et,l}^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^Q w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (9)$$

输出层的输出为

$$O_l^{(3)}(k) = g(n_{et,l}^{(3)}(k)) \quad (l=1, 2, 3) \quad (10)$$

式中: $w_{ij}^{(2)}$ 表示输入层到隐含层的连接权值; $w_{li}^{(3)}$ 表示隐含层到输出层的连接权值。

5) 由式(6)一式(10)可计算得到当前控制周期内的PID参数(k_p, k_i, k_d),分别对应于 $O_1^{(3)}(k)$ 、 $O_2^{(3)}(k)$ 、 $O_3^{(3)}(k)$,根据经典增量式数字PID公式可计算出当前控制量为

$$u(k) = u(k-1) + k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (11)$$

同时选取性能指标函数为

$$E(k) = 0.5(r(k) - y(k))^2 \quad (12)$$

6) 调整隐含层和输出层的连接权值。设学习率为 η ,惯性系数为 α ,将 $E(k)$ 向负梯度方向搜索可得输出层连接权值的修正量为

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (13)$$

将式(13)偏导项进行拆分可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} &= \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \times \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \times \frac{\partial u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} \times \\ &\frac{\partial O_l^{(3)}(k)}{\partial net_l^{(3)}(k)} \times \frac{\partial net_l^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$\frac{\partial net_l^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} = O_i^{(2)}(k) \quad (15)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_i^{(3)}(k)} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial u(k)}{\partial O_1^{(3)}(k)} = e(k) - e(k-1) \\ \frac{\partial u(k)}{\partial O_2^{(3)}(k)} = e(k) \\ \frac{\partial u(k)}{\partial O_3^{(3)}(k)} = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (16)$$

由于 $y(k)$ 对 $u(k)$ 求偏导未知,可采用 sgn 函数近似代替,通过调整学习率来补偿近似替代所造成的不准确性。最终得到输出层连接权值的修正公式为

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_i^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (17)$$

$$\delta_i^{(3)} = e(k) \times \text{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right) \times \frac{\partial u(k)}{\partial O_i^{(3)}(k)} \times g'(net_l^{(3)}(k)) \quad (18)$$

同理得到隐含层连接权值的修正公式为

$$\Delta w_{ij}^{(2)}(k) = \alpha \Delta w_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) \quad (19)$$

$$\delta_i^{(2)} = f'(net_i^{(2)}(k)) \times \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} w_{li}^{(3)}(k) \quad (20)$$

式(18)和式(20)的 $g'(\cdot)$ 和 $f'(\cdot)$ 为

$$g'(\cdot) = g(x)(1-g(x)) \quad (21)$$

$$f'(\cdot) = 0.5(1-f^2(x)) \quad (22)$$

7) 若 $E(k)$ 小于期望阈值,则 k_p, k_i, k_d 值稳定,网络学习停止;当受到外界干扰时, $E(k)$ 超过期望阈值,则重新执行步骤 1)~步骤 6),实现动态调整。

2 机器人视觉伺服控制器设计及仿真

2.1 视觉伺服控制器设计

根据图 1 中 BP-PID 控制器模型,设计如图 2 所示的机器人视觉伺服控制器。

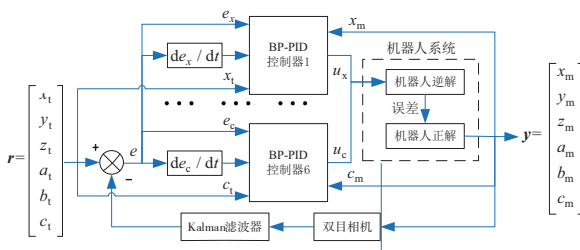


图 2 工业机器人视觉伺服控制器

控制系统利用双目相机获取当前时刻的位姿状态信息,与输入的期望位姿对比得到误差,并将误差通过 BP-PID 控制器处理得到位姿控制量,

机器人系统将位姿控制量逆解得到关节角度,并根据关节值控制电机转动到相应位置,从而实现机器人的闭环控制。实际测量时,双目获取的数据波动较大,无法直接用于反馈控制,为此在系统中加入 Kalman 滤波器对相机位姿数据进行去噪。由于六轴的工业机器人为高度耦合的非线性系统,同一组 PID 参数不一定适用于所有位姿的控制,因此针对位置和姿态共 6 个值,分别建立独立的 BP 神经网络用于训练其各自的 PID 参数。

考虑到机器人在不同位置和姿态下其误差值会有所差异,需要将机器人所处位姿以及当前误差值联系起来对模型进行训练;同时为增强整个伺服控制器各模块间的联系,需要将相机测量状态也加入模型中。此外,为增强网络的拟合能力,提升拟合精度,在网络输入中加入偏置项。因此最终 BP 网络的输入层节点数为 4,包含机器人期望位姿、双目相机的测量位姿、期望位姿与测量位姿之间的误差以及偏置项。对于隐含层节点数,数量过多过拟合风险越大,单个控制周期内模型计算时间也越长,数量过少可能导致控制器无法收敛,通过经验规则最终取 BP 网络的隐含层节点数为 5。BP 网络的训练目的是为得到最优的 PID 参数,因此输出层节点数为 3。

2.2 视觉伺服控制器仿真

利用 MATLAB 搭建仿真模型,为使仿真结果更接近实际控制情况,在模型中需对机器人结构误差进行模拟,使机器人系统输出的实际位姿与期望位姿之间存在偏差。通过封装机器人的正逆运动学算法,并使用带误差的 DH 参数来模拟机器人的几何误差,具体 DH 参数误差如表 1 所示。

表 1 DH 参数误差表

参数	误差/mm	参数	误差/°
d_1	0.547 9	θ_1	0.012 8
d_2	$1.611 1 \times 10^{-5}$	θ_2	-0.016 7
d_3	$1.436 7 \times 10^{-5}$	θ_3	-0.013 7
d_4	0.014 9	θ_4	0.063 0
d_5	$2.464 4 \times 10^{-5}$	θ_5	-0.120 3
d_6	1.061 7	θ_6	-0.201 9
a_1	-0.454 6	α_1	0.063 0
a_2	0.006 6	α_2	0.008 2
a_3	0.002 6	α_3	0.120 3
a_4	0.005 9	α_4	0.166 1
a_5	-0.036 1	α_5	0.097 4
a_6	0.293 7	α_6	0.240 6

仿真模型搭建完成后,为验证其静态响应性能,以坐标为 $[900 \ -300 \ 1000 \ 0 \ 0 \ 0]$ 的位姿阶跃信号作为控制系统的输入,并以 y 轴的静态响应为例,输出其位置曲线,如图3所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

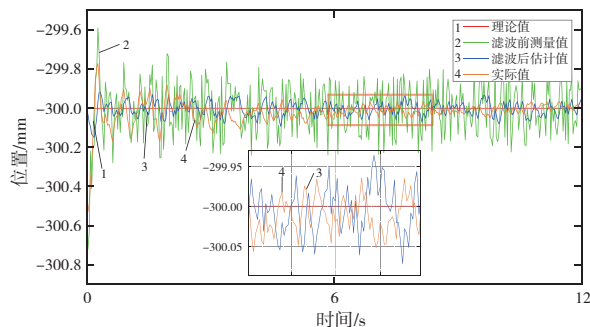
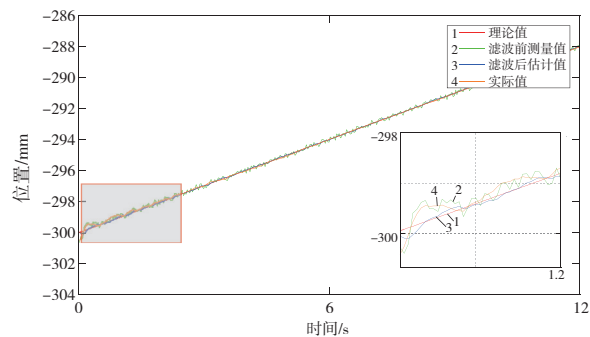


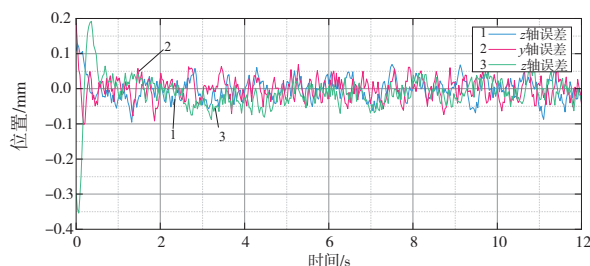
图3 y 轴静态响应位置曲线

从图3中可看出,在控制系统的调节作用下, y 轴坐标在2 s左右基本稳定在理论值附近,最大超调量为0.2 mm,稳定后的实际值在大概 ± 0.07 mm范围内波动,具有较好的静态响应效果。

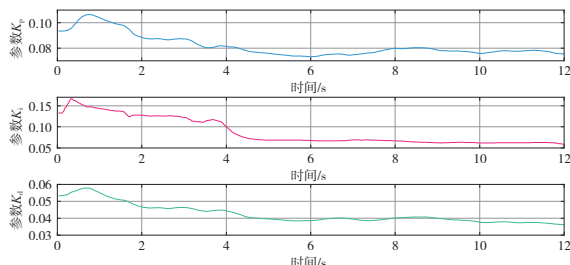
为验证控制系统动态响应性能,仿真以直线轨迹的离散点位姿数据作为系统输入信号,以位姿坐标 $[900 \ -300 \ 1000 \ 0 \ 0 \ 0]$ 作为机器人末端的运动起点,单轴方向1 mm/s的速度,让机器人朝着终点坐标 $[900 \ -282 \ 1018 \ 0 \ 0 \ 0]$ 运动,并同样以 y 轴动态响应为例,输出其运动过程,如图4所示。



(a) y 轴动态响应位置曲线图



(b) y 轴动态响应误差曲线图



(c) y 轴动态响应PID参数曲线图

图4 y 轴动态响应曲线

由图4(a)可知, y 轴位置坐标在整个运动过程中都位于期望值附近。由图4(b)可知,误差在1.5 s左右基本收敛并稳定,稳定后的误差都位于 ± 0.1 mm以内,表明控制器具有较快的动态响应速度,控制效果良好。观察图4(c)可知,PID参数值经过一段时间的自适应调整后均趋于稳定,并在某一数值附近小范围波动,表明控制器可根据机器人具体的运动情况找到最合适的PID参数。

3 机器人铣削加工验证

为进一步验证视觉伺服控制器性能,搭建如图所示的铣削加工实验平台,如图5所示。

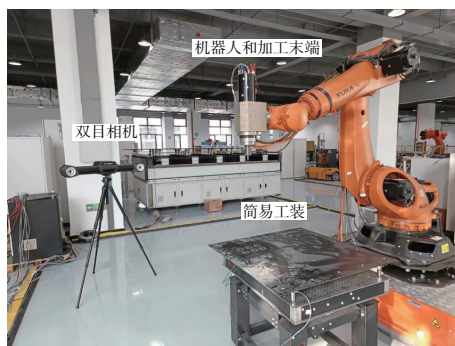


图5 铣削加工实验平台

3.1 直线轨迹铣削

按照如图6(a)所示的加工对象数模,在复合材料板上规划出6条直线轨迹。加工刀具为PCD立铣刀,直径8 mm,铣削长度为100 mm,切削深度为1.5 mm,主轴转速4 000 r/min,机器人运动速度为3 mm/s,最终加工后的复材板如图6(b)所示。

通过对比观察铣削痕迹可看出,未补偿轨迹底面有明显刀纹,而补偿后轨迹底面较为光滑,表明控制器抑制了末端在铣削过程中的振动,对直线铣削轨迹有较好的控制效果。采用蓝光扫描仪

对铣削轨迹进行测量,得到最大误差和平均误差 统计结果如表 2 所示。

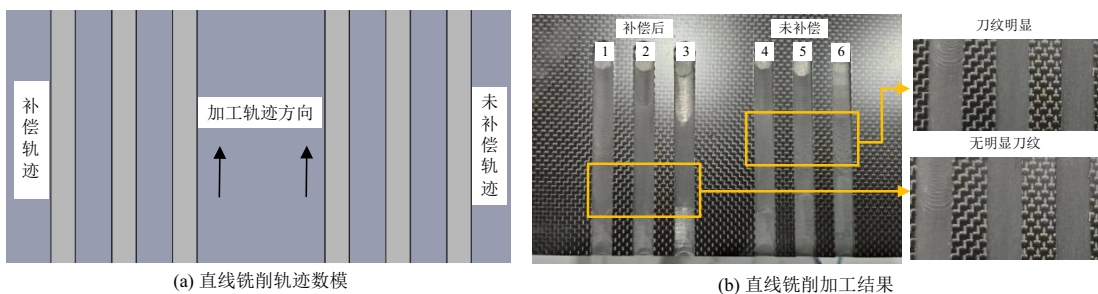


图 6 直线铣削轨迹数模与加工结果

表 2 直线轨迹位置误差统计结果 单位:mm

轨迹编号	平均误差	最大误差
1	0.08	0.09
2	0.07	0.13
3	0.07	0.14
4	0.51	0.64
5	0.59	0.81
6	0.57	0.73

由统计数据可知,补偿后最大直线轨迹位置误差由补偿前的 0.81 mm 下降到了 0.14 mm,降低了 83%,对直线轨迹的补偿效果显著。

3.2 圆弧轨迹铣削

按照如图 7(a)所示的加工对象数模,在复合材料板上规划出 6 条圆弧轨迹。为保证控制器有足够时间收敛,每条轨迹均从圆弧中心点进刀,按逆时针方向铣削,铣削完成后依旧从进刀点退刀。刀具和加工参数与直线轨迹铣削实验相同,最终加工后的复材板如图 7(b)所示。

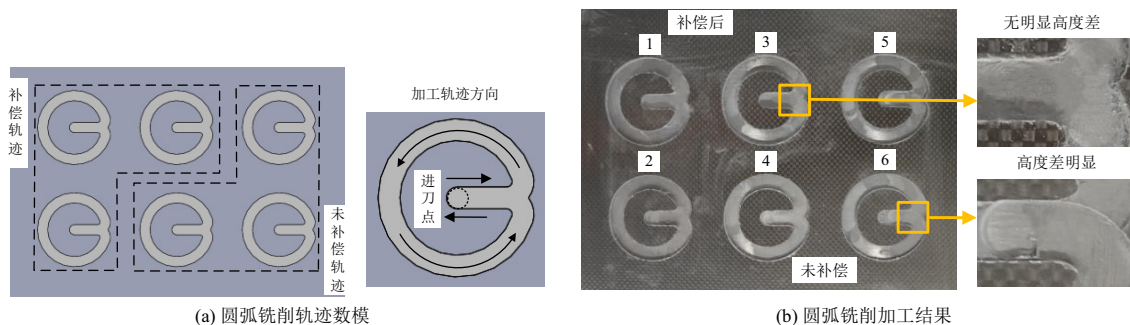


图 7 圆弧铣削轨迹数模与加工结果

观察加工轨迹可发现,未补偿状态下加工的圆弧轨迹在圆弧首尾衔接处有明显高度差,表明机器人在无补偿的情况下进行铣削加工具有较大的重复定位误差,而经过视觉伺服控制器补偿后的铣削轨迹通过肉眼观察无明显高度差,圆弧首尾衔接平滑。经过测量得到拟合圆度误差和拟合圆半径误差统计结果如表 3 所示。

由统计数据可知,补偿后最大圆度误差、最大拟合圆半径误差由补偿前的 0.41 mm、0.24 mm 分别下降到了 0.11 mm、0.06 mm,分别降低了 73% 和 75%,圆弧加工精度提升显著。

表 3 直线轨迹位置误差统计结果 单位:mm

轨迹编号	最大圆度误差	拟合圆半径误差
1	0.08	0.05
2	0.11	0.06
3	0.10	0.05
4	0.32	0.16
5	0.41	0.24
6	0.30	-0.16

4 结语

本文针对传统 PID 控制在工业机器人铣削加
(下转第 236 页)

4 结语

本研究展示了采用直接墨水打印技术和直书写丝线打印技术,在平面上打印出由电阻器、电感器和电容器等基本电子元件组成的功能电路。实验结果显示:制造的电子元件具有良好的稳定性和潜在的适用性,尤其在特定功能电路中的使用其效果显著。本研究的创新点在于采用直书写打印技术节约材料,并引入直书写丝线技术可进一步提高了平面电路的功能稳定性和材料利用效率。因此,采用混合直书写打印技术直接在平面上打印功能电路是一种具有参考价值的方法。

参考文献:

- [1] 郭文霞,吴永军,刘海亮. FDM 工艺精度影响因素的实验分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):100-103.
- [2] 黄笔武,谢王付,杨志宏. 一种 3D 打印立体光刻快速成型光敏树脂的制备及性能研究[J]. 功能材料,2014,45(24):24100-24104.
- [3] 董琪婧,陈晓东,郑 骧,等. 基于丝网印刷柔性电路的制备及研究[J]. 丝网印刷,2023(6):6-12.
- [4] GUO Z Y, YU P S, LIU Y, et al. High - precision resistance strain sensors of multilayer composite structure via direct ink writing: optimized layer flatness and

interfacial strength [J]. Composites Science and Technology,2021,201:108530.

- [5] GUO Z Y, XU J W, CHEN Y Q, et al. High - sensitive and stretchable resistive strain gauges: parametric design and DIW fabrication [J]. Composite Structures, 2019, 223:110955.
- [6] GUO Z Y, YU P S, LIU Y, et al. Pre-fatigue enhancing both long-term stability and sensitivity of direct-ink-writing printed sensors [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 166:107237.
- [7] YANG G S, WU H, LI Y J, et al. Direct ink writing of fluoropolymer/CNT - based superhydrophobic and corrosion - resistant electrodes for droplet energy harvesters and self-powered electronic skins [J]. Nano Energy, 2021, 86:106095.
- [8] GUO Z Y, YU P S, LI B, et al. Direct wire writing technique benefitting the flexible electronics [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2024, 19:e2286514.
- [9] GAO Y X, LI H Y, LIU J. Directly writing resistor, inductor and capacitor to composite functional circuits: a super-simple way for alternative electronics [J]. PLoS One, 2013, 8(8):e69761.

收稿日期:2024-03-04

(上接第 194 页)

工过程中抗干扰和自适应效果较差的问题,提出了一种视觉伺服控制方法。利用 BP 神经网络自适应调整 PID 参数,并采用双目视觉设备获取机器人末端位姿信息作为反馈,实现机器人轨迹精度的实时补偿。通过仿真从静态和动态响应分别验证了控制器的收敛性,并进一步通过铣削实验证明了该控制方法在实际加工过程中的有效性。实验结果表明:最大直线轨迹位置误差降低约 83%,最大圆度误差、最大拟合圆半径误差降低约 73%和 75%。

参考文献:

- [1] CORAPSIZ M F, ERENTURK K. Trajectory tracking control and contouring performance of three-dimensional CNC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4):2212-2220.
- [2] KODITSCHKEK D. Natural motion for robot arms [C]//The 23rd IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 1984:733-735.
- [3] WEN J T. A unified perspective on robot control: the energy Lyapunov function approach [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1990, 4(6):487-500.
- [4] CHAUDHARY H, PARASHAR A, PRASAD R, et al.

Velocity observer based fuzzy PD+I based hybrid force/position control of an industrial robot [C]//2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS). Chandigarh, India: IEEE, 2014:1-6.

- [5] 杨真真,李明富,张黎明,等. 基于模型预测控制的工业机器人曲面跟踪方法研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19):24-33.
- [6] 秦霞,李德钊,邓华. 基于模糊 PD 型输入迭代的工业机器人轨迹跟踪控制[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(4):66-68, 72.
- [7] WANG M, ZHANG Y W, YE H P. Dynamic learning from adaptive neural control of uncertain robots with guaranteed full-state tracking precision [J]. Complexity, 2017, 2017:5860649.
- [8] 卢兴国. 工业机器人模糊神经网络控制及最优运动规划方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] WANG Y, LANG H X, DE SILVA CLARENCE W. An autonomous mobile grasping system using visual servoing and nonlinear model predictive control [C]//IEEE ICCA 2010. Xiamen, China: IEEE, 2010:86-91.

收稿日期:2024-03-04