

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.041

基于模糊 RBF 神经网络的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统设计

李凤盼¹, 望超², 刘俊玲³

(1. 苏州高博软件技术职业学院, 江苏 苏州 215163; 2. 武汉工程科技学院, 湖北 武汉 430200;

3. 濮阳职业技术学院, 河南 濮阳 457000)

摘 要: 受外界环境的影响, 吸附爬壁机器人爬壁轨迹存在一定的偏差, 若偏差过大则有可能导致机器人错误运动至其他行为区域之内, 使得吸附爬壁机器人位置伺服控制精度较差。针对上述问题, 设计基于模糊 RBF 神经网络的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统, 将伺服电路输出的电信号参量按需分配至位置数模转换模块、伺服控制单片机、运动行为编码器三类结构部件之中, 完成吸附爬壁机器人位置伺服控制系统的硬件部分设计。软件部分分析机器人运动行为, 求解位置节点传递函数, 完善模糊 RBF 神经网络, 并按照神经元逼近处理原则, 确定控制指令响应态势, 实现对控制执行指令的设置, 联合相关硬件应用结构, 完成基于模糊 RBF 神经网络的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统的设计。实验结果表明: 所设计系统可将预设位置与实际行为位置之间的数值误差控制在 2% 之内, 轨迹控制更为精确。

关键词: 模糊 RBF 神经网络; 吸附爬壁机器人; 伺服控制; 行为位置; 神经元逼近; 响应态势

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0216-08

Design of Position Servo-control System of Adsorption Wall-climbing Robot Based on Fuzzy RBF Neural Network

LI Fengpan¹, WANG Chao², LIU Junling³

(1. Global Institute of Software Technology, Suzhou 215163, China; 2. Wuhan University of Engineering Science, Wuhan 430200, China;

3. Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China)

Abstract: Affected by external environment, a certain deviation may occur in the climbing trajectory of the adsorption climbing robot, and a larger deviation may cause incorrect moving into other behavior areas, resulting in poor position servo control accuracy of the adsorption climbing robot. To address the very issue, a position servo control system for an adsorption climbing robot based on fuzzy RBF neural network is designed. The electrical signal parameters output by the servo circuit is assigned as needed to three types of structural components: the position analog-to-digital conversion module, the servo control microcontroller, and the motion behavior encoder, and the hardware design of the position servo control system is completed for the adsorption climbing robot. The software part analyzes the robot's motion behavior, solves the position node transfer function, improves the fuzzy RBF neural network, and determines the response situation of control instructions according to the principle of neural approximation processing, realizes the setting of control execution instructions, and combines relevant hardware application structures to complete the design of the position servo control system of the adsorption climbing robot based on the fuzzy RBF neural network. The experimental results show that the designed system can control the numerical error between the preset position and the actual behavior position within 2%, with more accurate trajectory control.

Keywords: fuzzy RBF neural network; adsorption wall-climbing robot; servo control; behavioral position; neuron approximation; response situation

0 引言

吸附爬壁机器人是一种能够在垂直或倾斜表

面移动的机器人, 其特殊的粘附机制可以使其在光滑和粗糙的表面上实现可靠的附着和移动。由于其在狭窄和危险环境中的应用潜力, 吸附爬壁

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(23KJB510029); 江苏省高等职业教育高水平专业群项目(苏教函[2021]1号)

第一作者简介: 李凤盼(1987—), 女, 山东聊城人, 讲师, 硕士, 研究方向为控制理论与控制工程, 人工智能, www5874554@yeah.net。

通信作者简介: 望超(1990—), 男, 湖北宜昌人, 讲师, 硕士, 研究方向为通信与信息系统, 15102744299@139.com。

机器人已成为机器人技术领域的研究热点。为保证作业任务的顺利执行,爬壁机器人必须具有自由移动和自主吸附两项基本功能,常见的机器人包括永磁吸附、负压吸附两种类型^[1]。其中,永磁吸附型爬壁机器人内部必须配有电磁铁或永磁体部件,在吸附导磁性壁面中依靠磁力作用完成攀爬。负压吸附型爬壁机器人借助吸盘内产生的负载压力吸附于壁面之上,相较于永磁型机器人,该类型机械部件不受壁面材料的限制与影响。执行作业任务的过程中,相关操作人员可以在核心主机中对机器人爬壁运动行为进行控制。随着机器人作业范围的不断扩大,实际行为位置与预设位置不一致的问题时有发生,如果不能有效控制两类位置节点间的坐标误差,则有可能使机器人错误运动至其他行为区域之中,从而导致完全错误的爬壁行为。吸附爬壁机器人的位置伺服控制是该领域中一个重要的研究课题。位置伺服控制针对机器人在运动过程中精确跟踪给定目标位置的问题进行研究,并能够保持稳定和高效的运动。然而,由于吸附爬壁机器人的特殊性质,传统的位置伺服控制方法在该领域的应用存在一些挑战和限制。

为解决上述问题,文献[2]提出柔索驱动型机器人控制系统,该系统从伺服驱动、机器视觉、运动控制 3 个方面完善硬件结构连接模型,并联合视觉系统软件与运动控制软件,定义了具体的软件执行程序。肖金壮等^[3]提出基于接触力识别的人机协作型机器人控制系统,联合伺服电机、刚性杆、位置控制器等多个硬件应用部件,构建转矩工作模式下的闭环控制组织,又遵循相应映射规则,识别机器人运动行为意图,并根据主机元件中所生成的指令文件,确定期望运动的判定条件。然而上述方法的应用能力有限,并不能实现对预设位置坐标与实际行为位置坐标之间数值误差的有效控制,故而也就不能完全解决机器人爬壁轨迹偏差的问题。

模糊 RBF 神经网络是模糊理论、神经网络、径向基神经网络相结合的产物,是一种常用的三层前馈型网络结构,既可以用于模式分类,也可以用于对函数表达式进行数值逼近处理。相较于其他类型的人工神经网络结构,模糊 RBF 神经网络的架构体系更简单、对于信息参量的学习速度更快,在数值泛化方面,也不会因为信息参量的提取量过多而导致错误计算的问题。此外,该类型神经网络对于主机元件所提取信息参量不设置明

确的规定性条件,因此发生数值解错误排序问题的可能性也就相对较小。利用模糊 RBF 神经网络的应用优势,设计一种新型的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统,并通过对比实验的方式,突出该系统在解决爬壁轨迹偏差问题方面的适用性能力。

1 吸附爬壁机器人位置伺服控制系统总体结构

吸附爬壁机器人位置伺服控制系统由硬件和软件组成,控制系统整体结构如图 1 所示。

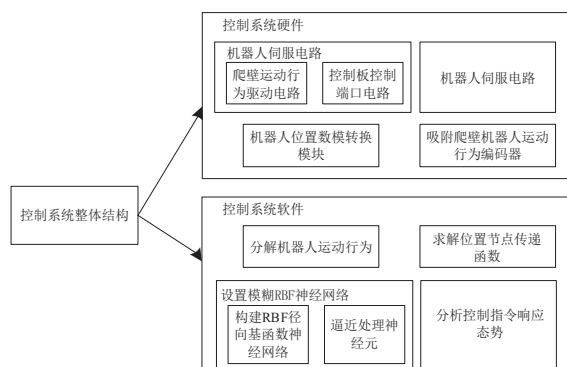


图 1 控制系统整体结构图

1.1 吸附爬壁机器人位置伺服控制系统硬件设计

吸附爬壁机器人位置伺服控制系统的硬件单元由机器人伺服电路、机器人位置数模转换模块、伺服控制单片机、运动行为编码器四部分组成,本章节针对其具体设计方法展开研究。

1) 机器人伺服电路

伺服电路提供了吸附爬壁机器人位置伺服控制系统所需的全部电力信号^[4],包括爬壁运动行为驱动电路、控制板控制端口电路两类组成结构。

a) 爬壁运动行为驱动电路

爬壁运动行为驱动电路是机器人伺服电路中的直流部分,可以将伺服控制单片机从+VCC 端获得的高压电量转换为低压输出状态^[5]。驱动电路+VCC 端口与伺服控制系统的外接高压端相连,-VDD 端口与伺服控制系统的外接低压端相连。由于爬壁运动行为驱动电路具有多个处于开放状态的端口组织,所以-VDD 端口所输出电量信号可被直接分配至其他系统部件结构之中。GPIO81 驱动装置负责存储爬壁运动行为驱动电路中处于传输状态的电信号参量,在吸附爬壁机器人位置伺服控制系统运行过程中,该元件始终不会达到存储能力已达上限的情况^[6]。具体的爬

壁运动行为驱动电路结构模型如图 2 所示。

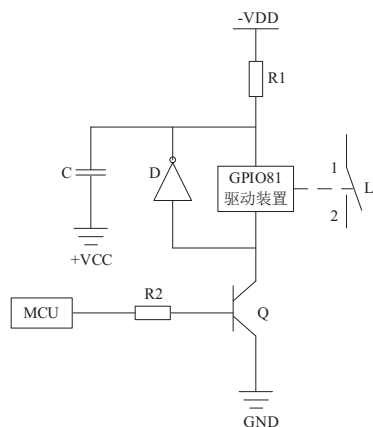


图 2 爬壁运动行为驱动电路结构模型

控制开关 L 具有双极性,当其与 1 号端口相接时,爬壁运动行为驱动电路中的电信号参量保持输入状态,MCU 元件接入电路,直流量快速进入 GPIO81 驱动装置;当控制开关 L 与 2 号端口相接时,爬壁运动行为驱动电路中的电信号参量保持输出状态,MCU 元件完全断开,直流量由 GPIO81 驱动装置快速向外输出。

b) 控制板控制端口电路

在机器人伺服电路单元中,控制板控制端口电路的连接等级与爬壁运动行为驱动电路相同,都可以直接接收伺服控制系统外部电源装置输入的电量负载信号^[7]。HD7279A 部件与控制板控制端口电路的 -VCC 端口相连,使伺服电路中的实时电压与电流均保持相对稳定的数值状态。MSP430 装置作为 HD7279A 部件的下降连接结构,同时确保 F149 元件保持闭合状态。具体的控制板控制端口电路结构模型如图 3 所示。

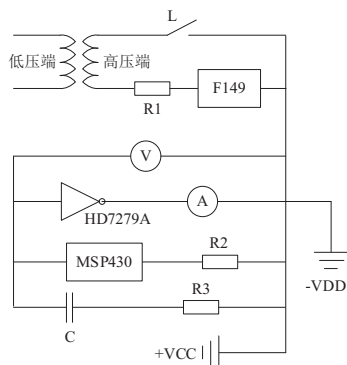


图 3 控制板控制端口电路结构模型

2) 机器人位置数模转换模块

机器人位置数模转换模块完成了由电力输入信号到伺服控制指令程序的转换,可以在反馈控

制指令的同时,筛选关键的吸附爬壁机器人位置信息,并将所得数据样本作为制定实时控制指令的参考依据^[8]。伺服电路所输出电力信号进入机器人位置数模转换模块后,首先被存储于电量寄存器部件之中,当其实时累积量达到一定数值标准后,所得数据信息参量继续向外传输,并进入吸附爬壁机器人位置信息寄存器之中,以便于主机元件对其进行深度的加工与整合处理^[9]。DAC 转换器连接于吸附爬壁机器人位置信息寄存器下级端口,直接执行由电量信号到伺服控制指令程序转换,且完成转换的程序指令可以直接被 DAC8728 信号源所接收。完整的机器人位置数模转换模块连接结构如图 4 所示。

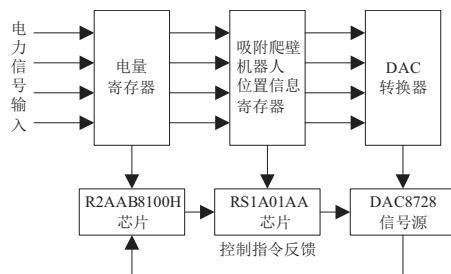


图 4 机器人位置数模转换模块行为模式

DAC8728 信号源作为机器人位置数模转换模块的核心部件组织,接收 DAC 转换器、RS1A01AA 芯片、R2AAB8100H 芯片输出的一切数据信息参量,由于整个控制系统的搭建完全遵循模糊 RBF 神经网络模型,且网络体系不允许信息过量累积行为的出现,所以 DAC8728 信号源中不会出现程序指令不断累积的情况,所有信息参量在得到存储的同时,也会继续反馈至其他部件组织之中,以此来保证数据信息样本在机器人位置数模转换模块中的稳定传输^[10]。R2AAB8100H 芯片对应电量寄存器、RS1A01AA 芯片对应吸附爬壁机器人位置信息寄存器,在传输机器人位置信息的过程中,两类模块组织之间的程序指令互传行为也不会发生中断。

3) 伺服控制单片机

伺服控制单片机保持环形连接状态,PC 装置、DA 装置分别与模糊 RBF 神经网络编码器与模糊 RBF 神经网络驱动器相连接,并可以配合 DC 电动机部件、AC 电动机部件,实现对 ASP 单级板的伺服性控制。PC 装置具有较强的识别能力,在吸附爬壁机器人位置伺服控制系统运行过程中^[11],负责将满足模糊 RBF 神经网络识别需求的数据信息参量提取出来,并对其进行集中性编

码处理。PC 装置、模糊 RBF 神经网络编码器之间保持双向反馈关系,当系统主机完成对数据信息样本的编码处理后,DC 电动机部件正式进入连接状态,编码端口被完全独立出来,表示伺服控制单片机正处于编码处理的闭环运行模式之中。DA 装置具有一定的聚合处理能力,在吸附爬壁机器人位置伺服控制系统运行过程中,负责将控制系统提取所得的数据信息聚合成多个数据包文件,并对其进行统一的驱动处理^[12]。DA 装置、模糊 RBF 神经网络驱动器之间保持单向连接关系,当系统主机完成对数据信息样本的驱动处理后,AC 电动机部件进入连接状态,驱动端口被独立出来,表示伺服控制单片机正处于驱动处理的闭环运行模式之中。详细的伺服控制单片机闭环连接结构如图 5 所示。

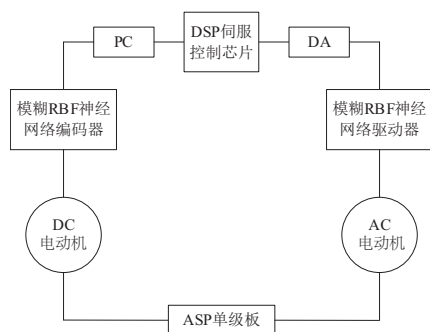


图 5 伺服控制单片机结构图

ASP 单级板同时收集 DC 电动机部件输出的编码信息与 AC 电动机部件输出的驱动信息,该元件将两类数据样本参量融合在一起,并可以根据模糊 RBF 神经网络的识别需求,更改数据包文本的实时传输行为。

4) 吸附爬壁机器人运动行为编码器

为适应模糊 RBF 神经网络的运行需求,吸附爬壁机器人位置伺服控制系统采样绝对式编码器对机器人运动行为信息进行编码处理。由于编码器元件与伺服控制单片机直接相连,所以在定义编码条件的同时,主机元件还会在当前所传输的数据样本中选择必要行为信息作为核心控制主机的处理对象。线缆接入端深入吸附爬壁机器人位置伺服控制系统内部,负责获取处于传输状态的机器人运动位置信息参量,且这些已取样数据样本会在编码器核心脉冲芯片中大量累积,直至其实时数值量满足模糊 RBF 神经网络对于数据信息参量的取样需求^[13]。卡扣装置将吸附爬壁机器人运动行为编码器与伺服控制单片机固定在一

起,在吸附爬壁机器人运行过程中,闭合所有卡扣装置,才能保证控制主机对机器人位置信息的准确识别。脉冲编码芯片是吸附爬壁机器人运动行为编码器的核心应用部件,在旁边 USB 接口中接入数据导线的情况下,脉冲芯片首先提取数据线导入的信息参量,然后再按照模糊 RBF 神经网络的识别需求,完成对数据信息参量的实时处理^[14]。线缆接入端输入的信息参量与 USB 接口输入的信息参量在脉冲编码芯片中汇总,且在经过编码器元件的编码处理之后,两类信息对象的输入行为不会具有明显差异性。

1.2 吸附爬壁机器人位置伺服控制系统软件设计

为实现吸附爬壁机器人位置伺服控制,应利用各级应用部件分解机器人运动行为,并通过求解位置节点传递函数的方式,推导得出具体的机器人行为位置表达式。吸附爬壁机器人位置伺服控制系统对于控制指令程序的设置遵循模糊 RBF 神经网络模型,特别是在无法确定基础网络体系完整性的情况下,需要完成对神经元的逼近处理,最终得到较为可靠的控制指令响应态势分析结果。

1) 机器人运动行为分解

由于吸附爬壁机器人的运动状态极为复杂,在分解其运动行为时,为保证位置信息的定义准确性,应考虑如下几方面内容。

a) 将吸附爬壁机器人所表现出的运动行为视为理想运动状态,即整条运动轨迹内不存在明显的转向或相互碰撞情况。

b) 如果同一运动区域内存在不止一个吸附爬壁机器人,那么机器人位置节点不会发生相互覆盖。

c) 同一运动区域内吸附爬壁机器人所承载的运动牵引力始终保持绝对均匀的状态,任意时刻机器人的动态行为能力都完全相等,且运动行为满足模糊 RBF 神经网络所定义的准平衡方程^[15]。

d) 机器人动态行为过程中的每一瞬间,实时位置节点坐标的定义都应对照预设轨迹中与该节点标记号相同的位置节点。

e) 运动过程中忽略由于动力迁移变化引起的行为惯性力的影响,认为影响吸附爬壁机器人位置节点坐标数值的只有静态运动压力。

规定 L 表示吸附爬壁机器人在单位运动区域内的行为总量, $l_1, l_2, \dots, l_n$ 表示运动行为分解后 n

个不重合的位置节点,在 L 取值不为零的情况下,推导 $l_1, l_2, \dots, l_n$ 的定义式为

$$\begin{cases} l_1 = \left(k_1 + \frac{1}{2}\alpha_1 L\right)^{-\delta_1} \\ l_2 = \left(k_2 + \frac{1}{2}\alpha_2 L\right)^{-\delta_2} \\ \vdots \\ l_n = \left(k_n + \frac{1}{2}\alpha_n L\right)^{-\delta_n} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k_1, k_2, \dots, k_n$ 表示 n 个随机选择的运动行为动力学参量,且 $k_1 \neq 0, k_2 \neq 0, \dots, k_n \neq 0$ 的不等式条件恒成立; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 表示单位运动区域内 n 个不相等的机器人运动行为分解系数; $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 分别表示与机器人位置坐标相关的数值定义项参数。分解后机器人位置节点的排列关系不发生变化,所以这些位置节点依然处于同一运动行为轨迹之中。

2) 位置节点传递函数求解

运动行为分解后的机器人位置节点传递函数是依照机器人运动行为分解条件所定义的位置节点坐标数值表达式,所谓传递可以理解运动位置节点的相互连接,如果将吸附爬壁机器人运动区域视为一个无穷大的平面,那么运动位置节点的定义就具有无穷延续的特性,而传递函数的连续性则可以用来代替表示节点坐标的无穷延续性。经过分解处理后,吸附爬壁机器人运动行为节点由统一曲线状态转化为散点状态,定义这些散点坐标之间的数值关联性,也就可以大致掌握吸附爬壁机器人的运动行为轨迹,因此对于位置节点传递函数的求解也就等同于对吸附爬壁机器人行为轨迹曲线的求解。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示 n 个互不重合的机器人运动位置节点的坐标数值定义项, $j_1, j_2, \dots, j_n$ 分别表示机器人运动位置节点在轨迹曲线内的坐标值统计参数,联立式(1),可将分解后行为位置节点的曲线轨迹表达式定义为

$$J = x_1 \frac{j_1^2}{l_1} + x_2 \frac{j_2^2}{l_2} + \dots + x_n \frac{j_n^2}{l_n} \quad (2)$$

在式(1)的基础上,求解位置节点传递函数,具体计算式如式(3)所示。

$$H = \frac{J}{\beta \bar{h} + g^2} (G_{\max} - G_{\min})^{-1} \quad (3)$$

式中: $\bar{h}$ 表示吸附爬壁机器人运动轨迹内位置节点的累积量均值; β 表示机器人位置节点坐标的数

值延续性向量; $\hat{g}$ 表示机器人位置节点坐标的数值特征; $G_{\max}$ 表示已标记位置节点数量的最大值; $G_{\min}$ 表示已标记位置节点数量的最小值。

3) 模糊 RBF 神经网络设置

求解吸附爬壁机器人位置节点传递函数,能够描述机器人在位置伺服控制中的动态行为,反映系统的动态特性和响应特性。在吸附爬壁机器人位置伺服控制系统中,应用模糊 RBF 神经网络模型能够有效处理非线性和不确定性问题。该模型可用于构建控制指令的生成和响应机制。在无法确定神经网络的精确结构和参数设置时,采用逼近处理方法可以克服这一问题。逼近处理通过使用大量的样本数据和有效的优化算法,实现对神经网络模型的完善与调整,从而获得较为可靠的控制指令响应态势分析结果,保证位置伺服控制系统的可靠性和高效性。

a) RBF 径向基函数神经网络构建

RBF 径向基函数神经网络是模糊 RBF 神经网络模型的基础单元结构,由输入层、RBF 径向基隐含层、输出层 3 个次级体系组成。在吸附爬壁机器人位置伺服控制系统中,输入层节点负责录入与吸附爬壁机器人运动行为相关的位置信息,且神经网络单元所录入信息的数值状态与伺服控制系统中传输位置信息的数值状态完全一致。RBF 径向基隐含层是 RBF 径向基函数神经网络的核心运算部分,能够根据已录入机器人位置信息,计算其在伺服状态下的具体输出数值。输出层是伺服状态下机器人位置信息的实时输出口。完整的 RBF 径向基函数神经网络单元结构如图 6 所示。

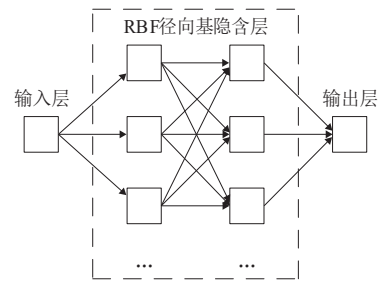


图 6 RBF 径向基函数神经网络单元

设 ε, γ 表示两个不相等的径向基定义参数, d_ε 表示基于参数 ε 的 RBF 神经元向量, d_γ 表示基于参数 γ 的 RBF 神经元向量, f 表示吸附爬壁机器人位置信息的统计运算系数。在上述物理量的支持下,联立式(3),推导 RBF 径向基函数神经网络

络的函数表达式为

$$F = \exp\left(-f \times \frac{\|d_\varepsilon + d_\gamma\|^2}{2H^2}\right) \quad (4)$$

单位运算周期内,RBF 径向基函数神经网络单元所需计算的位置信息数据总量,受到伺服控制系统对于吸附爬壁机器人实时作用行为的直接影响。

b) 神经元逼近处理

神经元逼近处理的目标是保障系统主机对吸附爬壁机器人位置节点的控制准确性,RBF 径向基函数神经网络提供了较为稳定的调节与调度环境,而依照神经元定义式,完成对位置节点坐标的数值逼近处理,才能得到较为可靠的控制指令执行结果。逼近是指机器人位置节点的数值趋近作用,模糊 RBF 神经网络模型规定,位置节点实时坐标越趋近于当前神经元所在位置,就表示主机元件在当前情况下对机器人位置节点的伺服控制能力越强。

基于模糊 RBF 神经网络模型的神经元逼近处理表达式参考式(5)。

$$D = \frac{1}{2} \sum_{\varphi=1}^{+\infty} [F(\tilde{S}) - \phi(\hat{A} - 1)]^2 \quad (5)$$

式中: $\tilde{S}$ 表示机器人位置节点的神经元定义向量; φ 表示机器人位置节点对象的实时标记参数; $\hat{A}$ 表示神经元节点与机器人位置节点之间的数值逼近特征; ϕ 表示逼近运算系数。在机器人运动区域内,神经元节点、机器人位置节点之间具有唯一性数值对应关系,所以依照模糊 RBF 神经网络模型完成数值逼近处理时,每一运动行为周期内只能提取一个位置节点对象。

4) 控制指令响应态势分析

设置神经网络模型,计算了神经元逼近处理结果,获取了机器人运动神经元节点、机器人位置节点的对应关系,为实现神经元节点和机器人位置节点的一一对应控制,设计吸附爬壁机器人位置伺服控制指令。控制指令响应态势可以用来描述系统主机对吸附爬壁机器人运动位置节点的控制能力,由于模糊 RBF 神经网络在运算机器人位置信息时会表现出明显的对象联系录入行为,所以系统控制主机在分析指令程序响应态势时,必须面对运动行为区域内所有的位置信息参量进行取样。在伺服控制系统中,指令程序的响应与吸附爬壁机器人的运动行为直接相关,所以依照模糊 RBF 神经网络模型分析控制指令响应

态势时,应确定机器人位置节点与运动行为之间的实时相关性。

I 表示机器人位置节点与运动行为之间的实时相关性定义式,其计算结果如下:

$$I = D(y+p) \quad (6)$$

式中: y 表示机器人实时运动向量; p 表示位置节点的伺服控制向量。

利用式(6),推导基于模糊 RBF 神经网络的控制指令响应态势分析表达式为

$$Q = \lambda I |\dot{W}| R^2 \left(\frac{1}{1+u^2} \right) \quad (7)$$

式中: λ 表示基于模糊 RBF 神经网络的位置节点坐标值定义参数; $\dot{W}$ 表示伺服控制指令的实时响应特征; R 表示伺服控制指令的实时执行向量; u 表示机器人位置节点的数值标记系数。对于控制指令响应态势的分析决定了系统主机在单位运行周期内是否能够实现机器人位置节点的有效控制,因此在选择位置节点时,还应避免取得某一项坐标值为零的节点对象。

2 实验分析

2.1 实验准备

以 iRobot Roomba 675 型号的吸附爬壁机器人作为实验对象,将其放置在绝对平整的壁面区域内进行实验,规定实验过程中,机器人始终进行由上至下或由下至上的竖直方向运动,具体实验情况如图 7 所示。

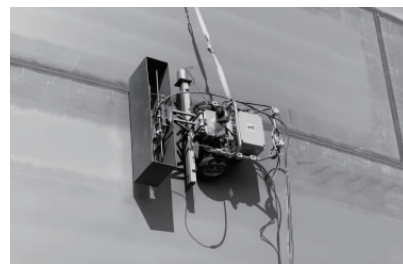


图 7 水平壁面内的机器人运行行为

本次实验所选定壁面的长度为 15 m、宽度为 10 m,在水平方向上将实验壁面划分为 5 个区域,每一区域的长度均为 3 m。机器人搭载水平刮板的宽度为 50 cm,在每一水平区域内机器人都可以自由移动。规定:吸附爬壁机器人中心点所处位置表示机器人的当前位置坐标。

在每一区域内选定一个预设位置节点,其坐标情况如表 1 所示。

表 1 预设位置节点坐标 单位:m

位置节点编号	横向坐标	纵向坐标
1	1.5	6.1
2	3.7	5.3
3	7.0	6.9
4	11.2	4.8
5	13.6	7.5

由于实验区域为一个二维平面,所以预设位置节点只具有横向与纵向坐标。根据实验过程中机器人预设位置与实际行为位置坐标之间的数值误差,来判断所选用控制系统的实际应用能力。

2.2 实验流程

分别应用本文设计的基于模糊 RBF 神经网络的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统、文献[2]提出的柔索驱动型机器人控制系统、文献[3]提出的基于接触力识别的人机协作型机器人控制系统进行实验,记录不同系统作用下,机器人实际行为位置的横向与纵向坐标数值,所得结果分别为实验组、A 对照组、B 对照组变量。

图 8 反映了实际行为位置横向坐标的实验数值。

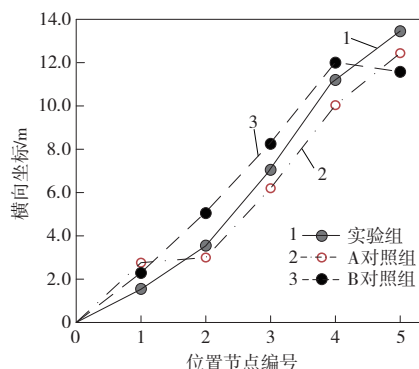


图 8 实际行为位置横向坐标

图 9 反映了实际行为位置纵向坐标的实验数值。

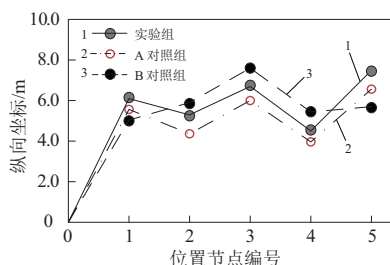


图 9 实际行为位置纵向坐标

根据图 8、图 9 所示实验结果,可知实验组、A 对照组、B 对照组实际行为位置坐标均不能与预设位置节点坐标保持一致,但实验组坐标结果与预设位置节点坐标之间的差值明显最小。

2.3 数值误差分析

表 2 统计了实际行为位置坐标与预设位置节点坐标之间的数值差。

表 2 坐标差统计 单位:m

位置节点编号	横向坐标			纵向坐标		
	实验组	A 对照组	B 对照组	实验组	A 对照组	B 对照组
1	0.01	1.38	0.60	0.06	0.58	1.10
2	0.05	0.70	1.31	0.04	1.09	0.68
3	0.04	0.83	1.13	0.02	0.90	0.96
4	0.02	1.18	0.80	0.03	0.81	0.63
5	0.03	1.35	2.01	0.02	2.86	1.63

分析表 2 可知,实验组横向、纵向坐标分别在 2 号和 1 号位置节点处取得坐标差最大值;A 对照组横向、纵向坐标分别在 1 号和 5 号位置节点处取得坐标差最大值;B 对照组横向、纵向坐标也同时在 5 号位置节点处取得坐标差最大值。

对于机器人预设位置与实际行为位置之间坐标数值误差的求解参考式(8)。

$$\omega = \frac{\psi}{\xi} \times 100\% \quad (8)$$

式中: ψ 表示坐标差数值; ξ 表示机器人预设位置坐标数值。

利用表 2 中的坐标差最大值对机器人预设位置与实际行为位置之间的数值误差进行求解可知:

实验组横向坐标数值误差为 1.4%、纵向坐标数值误差为 1.0%;A 对照组横向坐标数值误差为 92.0%、纵向坐标数值误差为 38.1%;B 对照组横向坐标数值误差为 14.8%、纵向坐标数值误差为 21.7%。综上可知,在基于模糊 RBF 神经网络的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统作用下,机器人横向坐标、纵向坐标的数值误差均得到了有效控制,实际行为位置与预设位置之间的误差水平较小,不会导致机器人爬壁轨迹偏差的问题。

2.4 移动轨迹控制分析

在本次实验中,分别控制 3 种不同方法下的移动轨迹的数据后,绘制出吸附爬壁机器人移动

轨迹控制结果对比如图 10 所示。

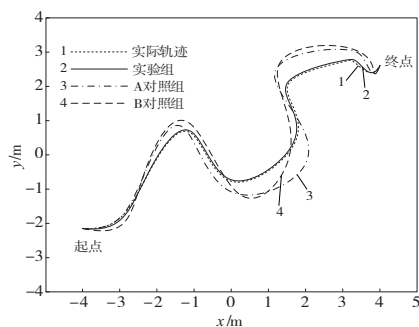


图 10 不同方法下吸附爬壁机器人移动轨迹控制结果

从图 10 中可以看出,无论采用 A 对照组、B 对照组还是实验组,都能有效地对吸附爬壁机器人的移动轨迹进行控制。与两个对照组方法相比,本文方法在控制吸附爬壁机器人移动轨迹方面,显示出更高的轨迹控制结果与实际轨迹之间的拟合度,在轨迹控制上更为精确。

3 结语

基于模糊 RBF 神经网络的吸附爬壁机器人位置伺服控制系统的设计,以解决实际行为位置与预设位置不一致所导致的机器人爬壁轨迹偏差问题为目标,联合伺服电路、位置数模转换模块等多个硬件应用结构,在编码吸附爬壁机器人运动行为的同时,完成对运动位置节点传递函数的构建,从而实现对系统控制执行指令的设置与调节。相较于柔索驱动型机器人控制系统、基于接触力识别的人机协作型机器人控制系统,这种新型控制系统的应用解决了由实际行为位置与预设位置不一致所导致的机器人爬壁轨迹偏差的问题,与维持吸附爬壁机器人运动行为稳定性的实际应用需求相符合。

参考文献:

- [1] 吕志忠,汪维杰,陈金鹏,等. 四足磁吸附爬壁机器人稳定性与动力学分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022,43(3):429-435.
- [2] 郭蓉蓉,黎大健,覃剑,等. 变电站室内柔索驱动巡检机器人系统设计与运动学分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(10):89-97.

- [3] 肖金壮,赵帅,王伟,等. 基于接触力识别的人机协作控制系统设计与实现[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2021,41(1):93-98.
- [4] 杨晓丽,黄宏光,舒勤,等. 基于 SVD 和低秩 RBF 神经网络的局部放电信号提取方法[J]. 高电压技术, 2021,47(10):3608-3616.
- [5] 李虹,邱志东,杜海涛,等. 提升桥式电路中 SiC MOSFET 关断性能和栅极电压稳定性的有源驱动电路研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7922-7934.
- [6] 张文,丁雨林,陈咏华,等. 圆柱形钢制构件表面爬壁机器人姿态估计方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5):1-7.
- [7] 丁杨,张明路,焦鑫,等. 关节电机驱动六足机器人仿生结构设计与柔顺运动控制[J]. 工程设计学报, 2023,30(2):154-163.
- [8] 杨慧轩,刘荣,何建东,等. 爬壁机器人吸附模块优化设计及仿真[J]. 机械工程与自动化, 2023(4): 51-52,56.
- [9] 左浩. 基于 Netvlad 神经网络的变磁力吸附爬壁机器人控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1):106-112.
- [10] 薛朝军,王海波,陈俞鹏. 推力吸附爬壁机器人的优化设计与试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(6):1181-1190,1198.
- [11] 邱健龙,王森,应付俊,等. 微型磁吸附爬壁机器人结构设计及实现[J]. 机械设计, 2023,40(增刊1):1-8.
- [12] 张栋,杨培,黄哲轩,等. 爬壁机器人悬摆式磁吸附机构的设计与优化[J]. 工程设计学报, 2023,30(3): 334-341.
- [13] 郭琳钰,高剑,焦慧锋,等. 基于 RBF 神经网络的自主水下航行器模型预测路径跟踪控制[J]. 西北工业大学学报, 2023,41(5):871-877.
- [14] 李晓飞,范元勋,许鹿辉. 基于 ESO 的电动伺服系统 RBF 神经网络滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(4):108-111,115.
- [15] 赵智浩,陶友瑞,裴佳星,等. 履带式爬壁机器人磁吸附单元的参数分析与优化[J]. 机械强度, 2023, 45(3):626-632.

收稿日期:2023-12-29