

基于 Sigmoid 函数的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统设计

李妮

(西安明德理工学院 通识教育学院, 西安 710124)

摘要: 为了保证机器人能够在保持稳定的情况下, 按照规划轨迹执行工作任务, 从硬件和软件两个方面, 设计了基于 Sigmoid 函数的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统。装设机器人传感器与状态观测器, 改装机器人鲁棒滑模跟踪控制器, 完成系统硬件设计; 综合机器人结构、运动机理和动力机制 3 个方面, 构建机器人数学模型; 根据状态数据采集结果与规划轨迹之间的偏差, 计算机器人跟踪控制量; 依据滑模运动与切换方程, 利用 Sigmoid 函数生成机器人鲁棒滑模控制律, 将生成控制指令作用在机器人执行元件上, 实现系统的鲁棒滑模跟踪控制功能; 在系统测试与分析中, 所设计控制系统的平均位置跟踪控制误差为 0.93 mm, 与设定轨迹目标基本重合, 机器人姿态角跟踪控制误差为 0.06 mm, 具有较好的鲁棒滑模跟踪控制效果, 能够有效提高机器人鲁棒滑模跟踪控制精度。

关键词: Sigmoid 函数; 机器人控制; 鲁棒滑模控制; 跟踪控制系统

Design of Robust Sliding Mode Tracking Control System for Robot Based on Sigmoid Function

LI Ni

(School of General Education, Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China)

Abstract: In order to ensure that a robot can perform tasks according to the planned trajectory while maintaining stability, a robust sliding mode tracking control system based on Sigmoid function is proposed from the hardware and software design. The system installs the robot sensors and state observers, modifies the robot robust sliding mode tracking controller, and completes the hardware design. The mathematical model of the robot is constructed by integrating the robot structure, motion mechanism and dynamic mechanism. The deviation between the state data acquisition result and the planned trajectory is used to calculate the robot tracking control quantity. According to the sliding mode motion and switching equations, the robust sliding mode control law of the robot is generated by using the Sigmoid function, and the generated control instructions are applied to the robot's executive components to achieve the robust sliding mode tracking control function of the system. In the system test and analysis, the average position tracking control error of the designed control system is 0.93 mm, which basically coincides with the set trajectory target. The robot attitude angle tracking control error is 0.06 mm, which has a good robust sliding mode tracking control effect and can effectively improve the robot robust sliding mode tracking control accuracy.

Keywords: Sigmoid function; robot control; robust sliding mode control; tracking control system

0 引言

机器人作为现代工厂中的一种重要设备, 其存在使一般工人不能从事简单的重复劳动, 而由工业机器人实现了更为准确、全面、有效的现代化生产过程。为了保证机器人能够精准地完成工业生产工作, 有必要对机器人的实时轨迹进行跟踪控制。机器人跟踪控制的最终目的是使得机器人的位置、速度等状态量与给定的理想参数一致^[1-2]。在实际的跟踪控制过程中, 尽量降低控制程序对机器人启动工作参数的影响, 为此, 设计了机器人鲁棒滑模跟踪控制系统。

鲁棒控制为: 当控制系统存在参数不确定性或环境干扰时, 闭环系统依然保持稳定。而滑模控制的基本原理是在给定的时间内, 将系统置于任何位置的初始状态强制控制到预定的滑模表面, 再利用此控制动作将系统的状态沿滑模表面滑回原点, 进入稳定状态。现阶段对机器人跟踪控制系统进行了研究, 文献 [3] 设计了一种基于逆动力学的机械臂鲁棒位置控制方法。分析机械臂的电机系统, 采用转矩位置转换和反演滑模控制方法, 设计逆动力学控制器, 得到电机转矩控制函数以及与电机的当前位置信息, 以此计算机械臂位置控制量, 从而实现机械臂鲁棒位置控

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-01-18。

基金项目: 2020 年陕西省教育厅科研(20JK0953); 西安明德理工学院校级项目(2021XY06L14)。

作者简介: 李妮(1985-), 女, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 主要从事不确定性控制系统的理论与应用方向的研究。

引用格式: 李妮. 基于 Sigmoid 函数的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 136-142.

制，其鲁棒性能较强。文献 [4] 设计了基于 D-H 参数的 M-DOF 机器人建模、规划与控制系统，构建工业机器人设计中的运动学模型，建立 D-H 参数坐标系，对正逆运动学模型进行推导，利用五次多项式插值算法，完成关节空间的轨迹规划，结合直线插补算法，实现 M-DOF 机器人建模、规划与控制。该方法具有较好的应用价值。然而，上述系统在实际运行过程中无法同时兼顾机器人的鲁棒性和滑模转换状态，最终导致系统输出结果存在控制效果差、精度低的问题。

为了解决上述问题，引入 Sigmoid 函数。Sigmoid 函数是一种连接函数，从统计学角度而言，Sigmoid 函数遵循了正态分布规律，并且其误差项的平均值为 0，具有同方差的特性。Sigmoid 函数在机器学习中具有极其重要的地位，经常被作为一种用于将变量映射到 [0, 1] 的阈值函数。设计基于 Sigmoid 函数的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统。通过分析机器人超声采集传感器工作原理等效电路图和机器人状态观测器结构图，确定机器人轨迹跟踪控制目标，对机器人鲁棒滑模跟踪控制器进行改装。根据机器人的结构构建机器人数学模型，利用机器人传感器与状态观测器采集实时运行数据，计算机器人跟踪控制量，构建滑模运动与切换方程，完成滑模运动状态的切换，采用 Sigmoid 函数生成机器人鲁棒滑模控制律，实现机器人鲁棒滑模跟踪控制。通过上述设计，以期实现机器人的鲁棒滑模跟踪控制功能，并保证机器人的跟踪控制效果。

1 机器人鲁棒滑模跟踪控制硬件系统设计

在机器人内部装设 UB500-18GM75 型号的超声采集传感器，通过发光二极管工作状态判断传感器的采集情况，在机器人状态观测器中嵌入一组滤波器，提高数据观测精度。以 DSPTMS320F281 型号的处理器为控制器的核心处理元件，实现控制算法。

1.1 机器人传感器与状态观测器

装设机器人传感器的目的是获取机器人与外界环境之间的位置信息，从而确定机器人轨迹跟踪的控制目标。而状态观测器的工作内容是确定当前机器人的工作状态，具体包括关节位置、姿态等。以获取机器人及环境位置信息为目的，装设 UB500-18GM75 型号的超声采集传感器，该设备具有两个发光二极管工作状态，其中红色 LED 常亮表示收集错误，闪烁表示精确超声波在 TEACH-LLV 工作方式下的暂停目标检测；黄色 LED 常亮表示目标在测量范围内，而闪烁则表示在 TEACH-IN 工作方式下执行超声检测任务。装设超声采集传感器的工作原理等效电路如图 1 所示。

在采集传感器的实际连接过程中，利用 INPUT1、INPUT2 和 OUTPUT 连接 LPC2119 的相应引脚。在机器人超声采集传感器中嵌入一个无触点磁性转动编码器，可实现 360 度角的准确测量。集成的 Hall 元件，模拟前端，以

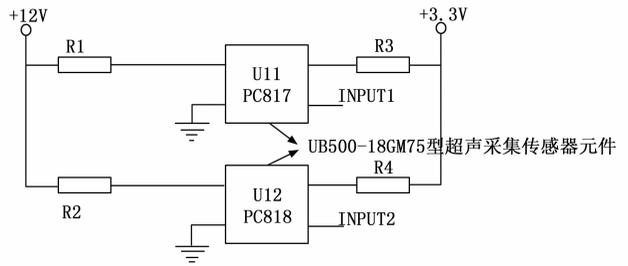


图 1 机器人超声采集传感器工作原理等效电路图

及数据信号的处理。将一个双极型磁体置于晶片的中央，构成了一种位置传感器。该位置传感器内置了 DSP 处理器，它可以探测到磁场的方向，并且可以对 12 比特的二进制编码进行运算。另外，绝对角值也可以由脉冲宽度调制信号表示。另外机器人内置状态观测器的基本结构如图 2 所示。

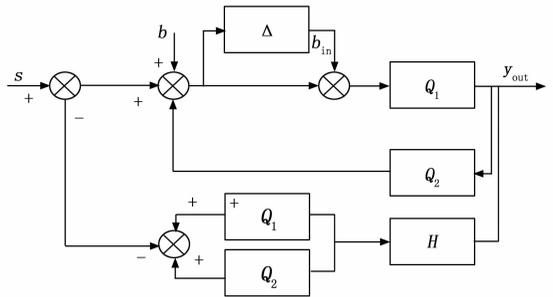


图 2 机器人状态观测器结构图

图 2 中， Q_1 和 Q_2 分别为机器人检测对象及其标称模型， Δ 为机器人的乘法建模动态， b 和 b_{in} 对应的是机器人工作信号和未建模动态产生的等效信号， y_{out} 为机器人实时工作状态观测输出量。为了提高状态观测器输出的机器人状态数据的观测精度，在现有状态观测器的基础上嵌入了一组滤波器 H 。

1.2 改装机器人鲁棒滑模跟踪控制器

控制器是机器人鲁棒滑模跟踪控制功能的执行元件，鲁棒滑模跟踪控制器的改装结构如图 3 所示。

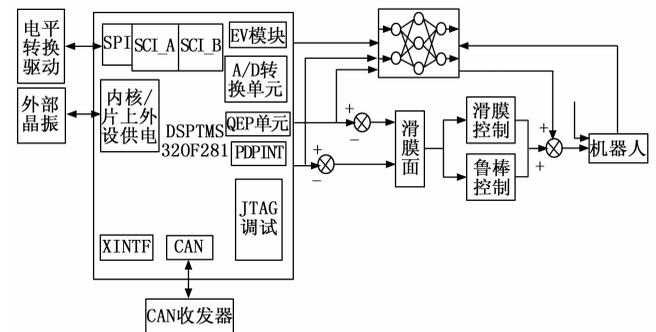


图 3 机器人鲁棒滑模跟踪控制器结构图

从图 3 中可以看出，改装的鲁棒滑模跟踪控制器的核心处理元件为 DSPTMS320F281 型号的处理器，负责实现

控制算法并运行 Sigmoid 函数, 为系统提供多种 PWM 控制信号。DSP 芯片内部 A/D 变换, 采集反馈信号, 如电动机的电流、输出电压; 当需要模拟量信号时, 外延四路 D/A 变换器可以被指定: 当输入到 DSP 时, 过电流保护信号将会直接阻断切换管的驱动信号, 当 DSP 接收到超过预先设定的限位数量时, DSP 将会判断为长期过流, 并且永久地关闭 PWM 信号直到人工恢复为止; 在芯片上设置了一个正交编码的脉冲, 它可以捕捉两个相位的差动输出脉冲, 从而方便了速度和位置的控制^[5]。另外, 改装的控制器具备强大的数字通讯功能, 内置了 RS-232 和 RS-485 通讯接口。通过 RS-232 通讯接口与主机通讯, 上层机可以向驱动电机以及机器人关节发送命令。

2 机器人鲁棒滑模跟踪控制系统软件功能设计

分析机器人的结构, 建立机器人运动学模型, 进而获取机器人的数学模型, 通过状态观测器采集机器人实时运行数据, 根据机器人的各个关节的运动轨迹, 计算机器人跟踪控制量, 在趋近模态和滑动模态下, 构建滑模运动与切换方程, 利用 Sigmoid 函数生成相应的机器人鲁棒滑模控制律, 获取机器人鲁棒滑模控制律的生成结果, 通过积分分离 PID 控制方法降低系统振动频率, 提高系统的控制精度。

2.1 构建机器人数学模型

从结构方面来看, 研究的机器人由执行、检测以及控制 3 个部分组成, 其中控制部分主要用来发布控制任务, 保证机器人可以在稳定移动的情况下完成既定任务^[6]。在考虑机器人组成结构的情况下, 结合机器人的运动原理构建相应的运动学模型如图 4 所示。

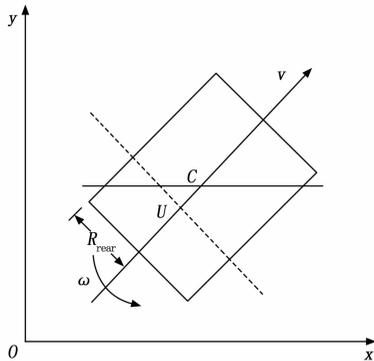


图 4 机器人运动学模型示意图

图 4 中, 参数 U 和 C 分别表示机器人后轴中心和质心, v 和 ω 分别为机器人的实际移动速度和角速度, R_{rear} 机器人后轮间距。在理想条件下, 机器人实时转弯半径和横摆角速度可以表示为:

$$\begin{cases} R_{\text{turn}} = \sqrt{(L_f \sin \theta_{\text{turn}} - L)^2 + (L_f \cos \theta_{\text{turn}})^2} \\ \theta_{\text{yaw}} = \frac{L_{\text{wheel}}}{2d_{\text{wheel}}}(v_r - v_l) \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_f 和 L_{wheel} 分别为瞬心到前轮距离以及质心与前轮垂直距离, θ_{turn} 为前轮转向角, $2d_{\text{wheel}}$ 表示的是前轮轮距, v_r 和

v_l 分别为左、右轮转速^[7]。在设计实际机器人动态控制系统时必须考虑不确定性因素对控制品质的影响, 确保系统的鲁棒性。在充分考虑不确定性因素, 得到的机器人完整动力学模型如下:

$$P(q)\ddot{q} + A(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}) = Q \quad (2)$$

式中, $P(q)\ddot{q}$ 为机器人对称且正定有界的惯性矩阵, $A(q, \dot{q})\dot{q}$ 为机器人向心力矩阵, $G(q)$ 和 $F_f(\dot{q})$ 分别为机器人的重力矢量和摩擦力矩阵, q, \dot{q} 和 \ddot{q} 分别表示的是机器人关节的角度、角速度和角加速度, 参数 Q 为外界干扰矩阵^[8]。机器人装置内部安装的关节驱动执行机构为系统滑模跟踪的控制对象, 驱动执行机构选择的是直流力矩电机, 其电磁转矩可以表示为:

$$Z_{\text{ele}} = \kappa_{\text{ele}} \Phi I_{\text{ele}} \quad (3)$$

式中, 变量 κ_{ele} 和 I_{ele} 分别表示常数系数和电机电枢电流, Φ 表示通过直流驱动电机的单极磁通量。在机器人移动与执行任务过程中, 各个关节驱动电机的转矩始终处于满足如下平衡关系:

$$Z_{\text{ele}} = Z_f + Z_{\text{load}} + Z_{\text{inertia}} + \mu_j \omega \quad (4)$$

其中: Z_{ele} 为驱动电机的电磁转矩, 也就是驱动设备的输出转矩, 变量 Z_f 、 Z_{load} 和 Z_{inertia} 分别为摩擦转矩、负载转矩和惯性转矩^[9]。最终将驱动电机工作原理、动力学模型和运动学模型代入到机器人结构中, 从而完成机器人数学模型的构建结果。

2.2 采集机器人实时运行数据

利用装设的机器人传感器与状态观测器, 设置硬件设备的工作参数, 传感器与状态观测器的输出结果即为机器人实时运行数据的采集结果, 其中机器人状态观测器的实时输出结果可以表示为:

$$y_{\text{out}} = h_{\text{transmit}}(s) + h_{\text{transmit}}(b) + h_{\text{transmit}}(n) \quad (5)$$

其中, $h_{\text{transmit}}()$ 为机器人状态信号在观测器中的传递函数。通过状态观测器的运行, 得出机器人在任意时刻的位置信息以及运行速度信息。

2.3 计算机器人跟踪控制量

机器人跟踪控制量也就是当前机器人位姿与目标轨迹之间的偏差, 根据机器人的执行任务生成各个关节的运动轨迹, 标记各节点位置信息^[10]。利用装设的机器人传感器与状态观测器, 将当前机器人的实际运行状态表示为:

$$X(t) = \{[x(t), y(t)], v, \omega, \vartheta\} \quad (6)$$

式中, $[x(t), y(t)]$ 表示机器人的位置坐标, v, ω 和 ϑ 分别为机器人的移动速度、关节角速度和关节角度, 利用公式 (6) 可以得出机器人内各个组成元件在任意时刻的运行状态^[11]。利用公式 (7) 计算当前机器人位置与输入轨迹中任意一点的距离。

$$d(j, p_i) = \sqrt{(x(t) - x_{p_i})^2 + (y(t) - y_{p_i})^2} \quad (7)$$

式中, (x_{p_i}, y_{p_i}) 为输入轨迹中第 i 个节点的坐标值^[12]。选择 $d(j, p_i)$ 最小值对应的轨迹节点作为跟踪点, 若公式 (7) 的计算结果为 0, 则表示机器人的坐标属于规划轨迹, 即当前机器人处于规划轨迹上, 否则认为机器人行驶轨迹存在

偏差，那么机器人的跟踪控制量可以表示为：

$$\begin{cases} \Delta l_{\text{track}} = d(j, p_i) \\ \tan \vartheta_{\text{track}} = \frac{y_{p_i} - y(t)}{x_{p_i} - x(t)} \end{cases} \quad (8)$$

其中： Δl_{track} 和 ϑ_{track} 分别为移动距离控制量和关节角度控制量。按照上述步骤，即可得出机器人跟踪的实时控制量计算结果。

2.4 构建滑模运动与切换方程

机器人的运动模式包括趋近模式和滑动模式两类，到达滑模面之前的过程称为趋近模式，到达滑模面之后的运动过程称为滑动模式^[13]。机器人滑动模式运动方程可以表示为：

$$R_{\text{slide}} = f_{\text{slide}}(r, k_{\text{eq}}, t) \quad (9)$$

式中， r 和 k_{eq} 分别为当前机器人的滑动状态和等效控制，变量 r 的取值分别为 0 或 1，当 r 取值为 0 时证明当前机器人的运动模式处于趋近模式，否则认为机器人处于滑动模式。另外， $f_{\text{slide}}(\cdot)$ 表示的是为了达到全局滑模面设计的函数，其函数表达式如下：

$$f_{\text{slide}}(0) = \epsilon_{\text{speed}} + \Lambda \cdot \Delta l_{\text{track}} \quad (10)$$

其中： ϵ_{speed} 为机器人的速度跟踪控制量， Λ 为正定矩阵^[14]。将公式(8)的计算结果代入到公式(10)中，并与公式(9)进行联立，得出机器人滑动模式运动方程的构建结果，并通过变量 r 的控制，实现滑模运动状态的切换。

2.5 利用 Sigmoid 函数生成机器人鲁棒滑模控制律

在改装鲁棒滑模控制器的支持下，根据机器人跟踪控制量的计算结果以及滑模运动与切换规律，利用 Sigmoid 函数生成相应的机器人鲁棒滑模控制律。Sigmoid 函数也就是 S 型生长曲线，一般将其应用于神经网络中作为激活函数，取值范围在 0~1 之间。既可以映射实数、也可进行二分类，具有易于求导、平滑等特点，利用该函数对机器人实行鲁棒控制，可有效提升机器人的响应速度和控制精度。Sigmoid 函数曲线如图 5 所示。

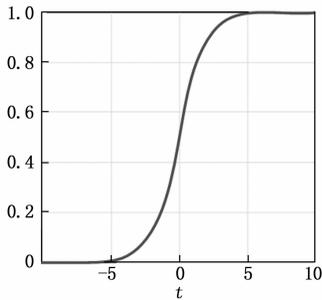


图 5 Sigmoid 函数曲线

机器人鲁棒滑模控制律生成过程中使用的 Sigmoid 函数表达式如下：

$$f_{\text{Sigmoid}} = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (11)$$

由于 Sigmoid 函数通常伴随神经网络一同运行，因此 Sigmoid 函数以神经网络作为运行背景^[15]。假设在 Sigmoid

函数支持下，神经网络输出的机器人鲁棒滑模控制律为一维数据，则生成的机器人鲁棒滑模控制律可以表示为：

$$\psi = f_{\text{Sigmoid}}\left(-\mathbf{\Lambda}_1 \Delta l_{\text{track}} - \mathbf{\Lambda}_2 \text{sign}\left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2\right)\right) \quad (12)$$

式中， $\mathbf{\Lambda}_1$ 和 $\mathbf{\Lambda}_2$ 为对角正定矩阵， ϵ_i 为神经网络输出的误差，误差函数对权值的偏导数分别为：

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_j} = - \sum_{i=1}^n \epsilon_i \psi_j \quad (13)$$

其中： n_y 为训练样本数， ω_j 为神经网络的权重值， E 为滑模控制误差集合。按照上述方法可以得出误差函数与神经网络中心以及宽度的偏导数计算结果，并对其进行实时更新^[16]。在 Sigmoid 函数的支持下，保证生成的机器人鲁棒滑模控制律满足滑模的可达条件，并且通过选取合适的参数，能够保证系统在期望时间内到达滑模面^[17]。为了保证改装鲁棒滑模跟踪控制器控制任务的执行力度，还需要利用 Sigmoid 函数以及神经网络进行控制律补偿，控制补偿量可以表示为：

$$\zeta = \exp\left(-f_{\text{Sigmoid}}\left(\frac{\|x - \chi_i\|^2}{\phi_j^2}\right)\right) \quad (14)$$

其中： χ_i 为 Sigmoid 函数的执行宽度。按照上述方式得出机器人鲁棒滑模控制律的生成结果，并通过改装控制器输出，直接作用在机器人执行元件上。

2.6 实现机器人鲁棒滑模跟踪控制功能

改装的机器人鲁棒滑模跟踪控制器能够执行常值切换、函数切换以及比例切换等控制任务，具体的控制原理可以表示为：

$$\begin{cases} \lambda_{\text{con}} = \lambda_{\text{vss}} \text{sgn}(u) \\ \lambda_{\text{fun}} = \lambda_{\text{vss}} \text{sgn}(u) + \lambda_{\text{pro}} \\ \lambda_{\text{pro}} = \sum_{i=1}^n \kappa_{\text{pro}} u_i \end{cases} \quad (15)$$

式中， u 为输入到控制器中的机器人实时运行状态信号， $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数， λ_{vss} 为机器人跟踪控制目标的最优解， λ_{con} 、 λ_{fun} 和 λ_{pro} 对应的是常值切换、函数切换以及比例切换的控制指令。与普通的跟踪控制相比，滑模跟踪控制的根本在于其控制的不连续性，当运动点运动到切换平面附近时，将从切换平面的两边同时趋向于该点，运动终止，由此可以定义机器人运动滑动模式区为：

$$\lim_{\xi \rightarrow 0^+} \xi \leq 0 \leq \lim_{\xi \rightarrow 0^-} \xi \quad (16)$$

其中： ξ 为切换平面。在滑模区域内按照控制函数控制系统按照规定的状态运动，即实现了机器人的滑模控制。系统的滑模控制、鲁棒控制以及跟踪控制同步进行，利用改装的控制器生成滑模与跟踪控制指令，直接作用在执行元件上，在跟踪控制执行过程中，实时检测机器人的运行状态，光电编码器与减速器的输出轴相连，以实现伺服电机的位置回馈输出，并产生转速输出^[18-20]。针对位置环，利用积分分块 PID 控制方法，在上位机的位置指示值与系统的位置反馈值有很大的偏差时，利用积分隔离 PID 控制的功能，既能有效地防止系统的振动，又能保证系统的控

制精度。

3 系统测试与分析

为了验证所设计的基于 Sigmoid 函数的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统的实际控制功能,设计系统测试实验。此次系统测试实验主要分为两个部分,一部分是测试在所设计控制系统下,机器人是否能够按照既定轨迹执行运动任务,另一部分是对比在有无环境干扰的情况下控制精度的变化情况。为保证所设计的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统能够在实验环境中正常运行,需要对实验平台进行基本配置,实验平台的主控制器为百为公司的 STM32 开发板,系统上位机为 LabVIEW8.2 软件、下位机为 C 语言。实验平台中的所有节点通过一对双绞线连接组成 CAN 通信网络,在所有硬件设备中集成串口以及 CAN 收发模块,保证各个硬件设备能够与上位机之间实现数据传输与通信。考虑到系统测试数据的复杂性,需要借助 Matlab 工具收集训练数据以及测试结果数据。

3.1 准备机器人样机

系统测试实验选择的机器人样机为 IRB140 型号的机器人,该机器人样机在出厂时包含两条机械臂和一个可移动的底座装置,每条机械臂中包含 3 个关节,分别为肩关节、肘关节和腕关节,每个关节的初始自由度设置情况不同。肩关节采用电机直接驱动,驱动电机型号为 HC-KFS43,其转矩的额定值和最大值分别为 $1.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $0.85 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。腕关节和肘关节均采用同步轮同步带传动,转速比为 8:1。在机器人的各个关节上安装编码器和传感器,编码器分辨率为 $120\,000 \text{ p/rev}$ 。在开始系统测试实验之前,需要在实验环境中通过手动操作、远程传输等方式对机器人的功能进行测试,判断机器人样机是否能够在实验环境中正常运行,若存在功能运行异常的情况,需要对机器人元件甚至整机作替换处理。

3.2 生成机器人轨迹及鲁棒滑模跟踪控制任务

将生成直线轨迹、圆轨迹和曲线轨迹作为机器人的轨迹跟踪目标,在机器人的移动平台中任意选择两个点作为直线轨迹的起点和终点,根据两点确定一条直线的原理,生成机器人的直线轨迹。另外,圆轨迹和曲线轨迹的生成结果可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{circular}} = \begin{cases} x = r\cos(\varphi_r, t) \\ y = r\sin(\varphi_r, t) \end{cases} \\ \sigma_{\text{curve}} = \alpha \sin t \end{cases} \quad (17)$$

式中, r 为圆轨迹半径, φ_r 为圆曲率, α 为幅值参数。从公式 (17) 中可以看出,曲线轨迹的生成方式是模拟正弦运动。设定轨迹参数在 $0 \sim 8 \text{ mm}$ 之间,得出机器人轨迹的生成结果如图 6 所示。

对生成轨迹中的所有节点进行量化标记,作为机器人鲁棒滑模跟踪控制系统位置跟踪控制目标。除此之外还需要设置包含机器人姿态角、速度等信息的鲁棒滑模跟踪控制任务,部分控制任务的设置情况如表 1 所示。

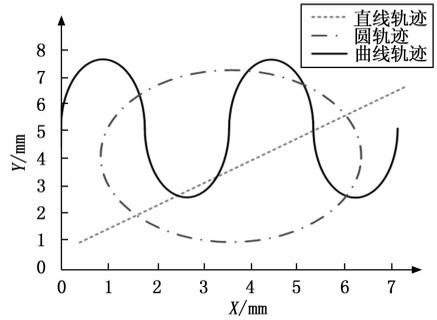


图 6 机器人移动轨迹生成结果

表 1 鲁棒滑模跟踪控制任务设置表

控制任务编号	跟踪轨迹类型	关节姿态角/(°)			移动轮转速/rpm
		肩关节	肘关节	腕关节	
1	曲线轨迹	1.5	0.7	1.9	464
2	直线轨迹	0.6	1.1	2.5	470
3	曲线轨迹	1.2	0.4	0.6	415
4	圆轨迹	3.8	0.2	0.9	463
5	直线轨迹	2.5	1.8	1.4	470

由于机器人的位姿以及移动速度处于实时变化的状态,因此需要记录机器人任务执行状态下任意时刻的运动参数,以此作为验证机器人跟踪控制功能的比对标。

3.3 加设机器人运行环境干扰器

在机器人的作业平台中加设一个干扰器装置,选择的干扰性型号为 GRQ-03C,该设备通过发射无规律电磁信号实现对工作信号的干扰。设置环境干扰器的工作强度分别为 0 dB 和 5 dB,从而实现对环境干扰的设置。

3.4 设置系统测试指标

根据系统测试实验目的,此次实验分别从机器人的轨迹跟踪控制精度和鲁棒控制效果两个方面进行,其中轨迹跟踪控制精度的量化测试指标分别为移动位置控制误差和关节姿态角控制误差,其中移动位置控制误差的测试结果

$$\epsilon_{\text{position}} = |x_{\text{control}} - x_{\text{target}}| + |y_{\text{control}} - y_{\text{target}}| \quad (18)$$

其中: $(x_{\text{control}}, y_{\text{control}})$ 和 $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}})$ 分别为机器人移动位置的实际值和目标值,根据表 1 的控制任务设置情况可以确定变量 $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}})$ 的具体取值。同理,可以得出关节姿态角控制误差的数值结果如下:

$$\epsilon_{\text{angle}} = |\vartheta_{i,\text{control}} - \vartheta_{i,\text{target}}| \quad (19)$$

式中, $\vartheta_{i,\text{control}}$ 和 $\vartheta_{i,\text{target}}$ 分别为关节 i 姿态角的控制值与目标值。最终计算得出 ϵ_{angle} 和 $\epsilon_{\text{position}}$ 的值越小,说明对应系统的跟踪控制功能越好。另外,系统鲁棒控制效果的测试指标设置为 ι ,该指标用来表示机器人在有、无干扰环境的情况下,控制误差的变化情况,该指标的数值结果为:

$$\iota = |\epsilon_{\text{position,interfere}} - \epsilon_{\text{position}}| \quad (20)$$

式中,变量 $\epsilon_{\text{position,interfere}}$ 表示在干扰环境下,机器人位置跟踪控制误差。在此次实验中,只考虑位置误差变化率,最终

计算得出 t 的值越小，说明对应系统的鲁棒控制效果越好。

3.5 系统测试过程与结果分析

由于所设计的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统应用了 Sigmoid 函数，因此需要对相关的函数参数进行设置，并建立 Sigmoid 函数的运行环境。为了体现出所设计系统在控制功能方面的优势，分别设置文献 [3] 设计的基于逆动力学的跟踪控制系统和文献 [4] 设计基于 D-H 参数的跟踪控制系统作为实验对比系统，在相同的实验环境中对比 3 种控制系统，并保证系统的控制对象均相同。

3.5.1 机器人轨迹跟踪控制功能测试

将生成的机器人移动轨迹数据输入到所设计的控制系统中，进而生成对应的控制指令，在鲁棒滑模跟踪控制器的支持下，得出所设计控制系统的机器人移动轨迹，如图 7 所示。

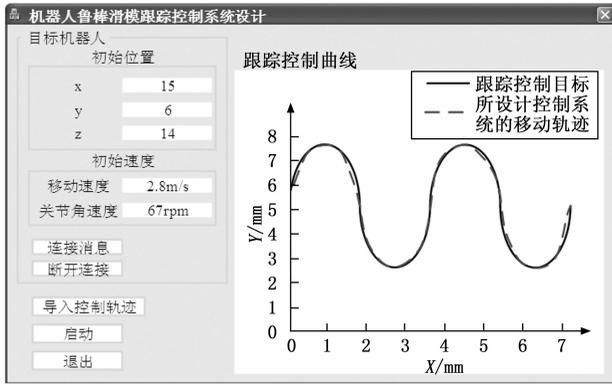


图 7 所设计控制系统的机器人移动轨迹

同理可以得出文献 [3] 设计的基于逆动力学的跟踪控制系统和文献 [4] 设计基于 D-H 参数的跟踪控制系统的机器人移动轨迹，如图 8 所示。

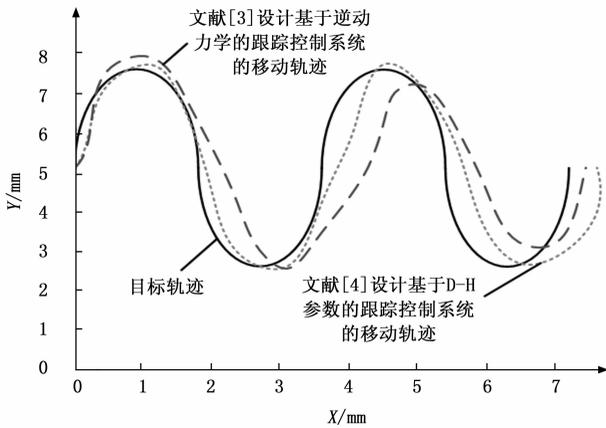


图 8 对比控制系统的机器人移动轨迹图

从图 7 和图 8 中可以直观看出，所设计控制系统的机器人移动轨迹与设定轨迹目标基本重合，将机器人的实时位置信息代入到公式 (18) 中，计算得出文献 [3] 设计的基于逆动力学的跟踪控制系统和文献 [4] 设计基于 D-H 参数的跟踪控制系统位置跟踪控制误差的平均值分别为 6.74 mm 和 5.85 mm，而所设计系统的平均位置跟踪控制误差为

0.93 mm，低于文献 [3] 设计的基于逆动力学的跟踪控制系统和文献 [4] 设计基于 D-H 参数的跟踪控制系统的控制误差，证明所设计控制系统的轨迹跟踪控制功能更好。另外，机器人姿态角跟踪控制误差的测试结果，如表 2 所示。

表 2 机器人姿态角跟踪控制误差测试数据表

控制任务编号	文献[3]设计的基于逆动力学的跟踪控制系统			文献[4]设计的应用基于 D-H 参数的跟踪控制系统			所设计的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统		
	肩关节 / (°)	肘关节 / (°)	腕关节 / (°)	肩关节 / (°)	肘关节 / (°)	腕关节 / (°)	肩关节 / (°)	肘关节 / (°)	腕关节 / (°)
1	1.1	0.4	1.6	1.2	0.3	1.5	1.5	0.7	1.8
2	0.3	1.0	2.2	0.4	1.0	2.1	0.6	1.0	2.5
3	1.0	0.2	0.4	1.0	0.2	0.2	1.1	0.4	0.5
4	3.4	0.1	0.6	3.5	0.2	0.6	3.8	0.2	0.9
5	2.1	1.5	1.2	2.3	1.6	1.1	2.4	1.7	1.4

将表 2 中的数据代入到公式 (19) 中，计算得出 3 种控制系统的机器人姿态角跟踪控制误差的平均值分别为 0.27°、0.26°和 0.04°，由此可知，所设计控制系统的姿态角跟踪控制误差最小，轨迹跟踪控制功能好。因为所设计控制系统利用 Sigmoid 函数生成相应的机器人鲁棒滑模控制律，并通过积分分离 PID 控制方法降低了系统振动频率，提高系统的控制精度。

综合上述实验结果可知，所设计控制系统的机器人移动轨迹与设定轨迹目标基本重合，其机器人姿态角跟踪控制误差平均值较小，能够有效提高机器人鲁棒滑模跟踪控制精度。

3.5.2 机器人鲁棒控制功能测试

将实验环境中的干扰器输出信号强度调整至 5 dB，按照上述流程控制机器人，并得出相应的控制误差测试结果。将其与无干扰环境下的误差数据进行对比，得出系统鲁棒控制功能的测试结果，如图 9 所示。

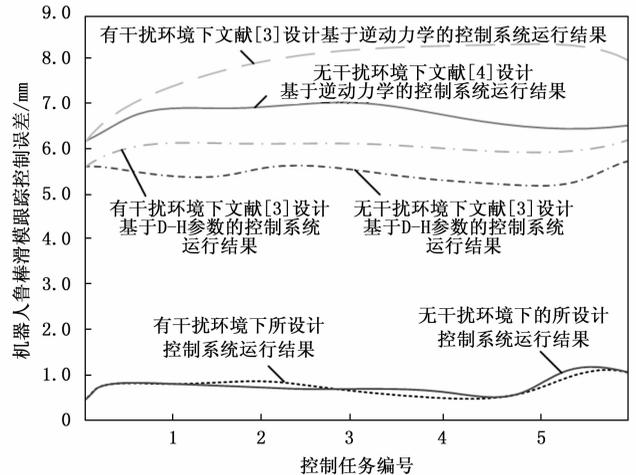


图 9 机器人鲁棒滑模跟踪控制功能测试对比结果

由图 9 可以直观地看出，所设计控制系统的鲁棒滑模跟踪控制误差较低。通过公式 (20) 的计算，可得出文献

[3] 设计的基于逆动力学的跟踪控制系统和文献 [4] 设计基于 D-H 参数的跟踪控制系统的机器人鲁棒滑模跟踪控制误差的变化指数分别为 0.34 mm 和 0.28 mm。而所设计系统的机器人鲁棒滑模跟踪控制误差的变化指数为 0.06 mm, 远远低于文献 [3] 设计的基于逆动力学的跟踪控制系统和文献 [4] 设计基于 D-H 参数的跟踪控制系统的控制误差, 证明所设计控制系统的鲁棒滑模跟踪控制效果较好。

4 结束语

在实际的机器人使用中, 为了实现对机器人的精准控制, 设计了基于 Sigmoid 函数的机器人鲁棒滑模跟踪控制系统, 保证了鲁棒精确跟踪运动轨迹。同时由于滑模在跟踪过程中与外界环境有较强的相关性, 因此, 根据其相关性进行了误差补偿, 从而在保证鲁棒精准跟踪运动的同时, 又不会影响到对环境的探测。从系统测试结果中可以看出, 所设计系统可以实现对机器人实时、准确的控制, 提高了机器人的跟踪精度, 同时该系统可以对滑模跟踪的运行情况进行监测, 使之保持高效稳定运行。

参考文献:

- [1] 郭文东, 魏莹, 李振阳, 等. 基于模糊干扰观测器的移动机器人自适应滑模跟踪控制 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (36): 15529 - 15536.
- [2] 万军, 贾宇明. 基于全阶滑模控制的双轮移动机器人跟踪误差研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (1): 24 - 27.
- [3] 段纯, 顾建华. 基于逆动力学的机械臂鲁棒位置控制方法的设计 [J]. 中国工程机械学报, 2020, 18 (3): 242 - 247.
- [4] 钟秋波, 陈浩文, 张文辉. 基于 D-H 参数的 M-DOF 机器人建模、规划与控制系统设计 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2020, 37 (3): 367 - 371.
- [5] 肖光飞, 胡秋霞, 韩磊, 等. 基于滑模变结构的轮式机器人双环轨迹跟踪控制 [J]. 机械设计与制造, 2020 (4): 244 - 247.
- [6] 宋子浩, 吴斌, 周挺. 输入受限情况下的球形机器人轨迹跟踪控制 [J]. 中国测试, 2020, 46 (5): 120 - 126.
- [7] 马飞越, 周秀, 倪辉, 等. 基于区间二型模糊滑模的移动
- (上接第 69 页)
- [14] WANG Y, ZHANG C G, ZHANG X X. Design of multi-channel signal acquisition system based on FPGA [J]. International Core Journal of Engineering, 2019, 5 (8): 336 - 342.
- [15] LI C, ZHU Y M, LI R. Design of adaptive camouflage system based on SOPC [C] //Proceedings of 2019 5th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science, 2019: 327 - 332.
- [16] 曾宪佑, 黄佐华, 周进朝. 基于差分分层噪声检测的开关中值滤波算法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (14): 176 - 179.
- [17] MIAO Y H, GAO S, LIU J M, et al. Design of edge detection system based on FPGA [C] //2021 International Conference

- 机器人轨迹跟踪控制 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (30): 12472 - 12477.
- [8] 艾青林, 王国栋, 徐巧宁. 基于改进趋近律滑模控制的钢结构柔性探伤机器人轨迹跟踪 [J]. 高技术通讯, 2020, 30 (12): 1264 - 1273.
- [9] 匡文龙, 沈文龙, 姬长英, 等. 农用履带机器人轨迹跟踪控制系统设计与试验 [J]. 东北农业大学学报, 2020, 51 (4): 78 - 87.
- [10] 孔慧芳, 丁道远, 房耀. 基于干扰观测器的移动机器人路径跟踪控制 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (12): 91 - 96.
- [11] 张品, 李长勇. 基于改进模糊 PID 的全向搬运机器人路径跟踪控制研究 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (6): 114 - 119, 190.
- [12] 韩江, 王凡志, 董方方, 等. 基于 Udwadia-Kalaba 理论的协作机器人轨迹跟踪控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (1): 78 - 83.
- [13] 梁捷, 秦开宇, 陈力. 基于非线性级联系统的弹性关节空间机器人新型滑模控制 [J]. 力学与实践, 2021, 43 (4): 544 - 554.
- [14] 于树友, 常欢, 孟凌宇, 等. 基于扰动观测器的轮式移动机器人滚动时域路径跟踪控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (3): 1097 - 1105.
- [15] 毛文勇, 张文安, 仇翔. 基于多传感器融合的机器人轨迹跟踪控制 [J]. 控制工程, 2020, 27 (7): 1125 - 1130.
- [16] 董焜焜, 陈志伟. 基于干扰观测器的平面 2RR 并联机器人高速运动的滑模控制 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2022, 51 (3): 419 - 427.
- [17] 郑雪芳, 林意. 基于布谷鸟算法的工业机器人轨迹跟踪控制 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (5): 50 - 54.
- [18] 席万强, 宋莹, 宋长坡, 等. 基于迭代学习的机器人自适应滑模控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (9): 111 - 116.
- [19] 谢帅, 陈力, 于潇雁. 基于状态观测器的空间机器人滑模容错控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (6): 110 - 113.
- [20] 公成龙, 蒋沅, 代冀阳. 基于组合非线性反馈的机器人鲁棒控制方法 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (5): 130 - 134.
- [18] 田禹泽, 王煜, 代海山, 等. 基于数字锁相环的星载光谱仪本地时钟源设计 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39 (10): 2397 - 2403.
- [19] LU T C, LIU P, GAO X, et al. A portable ECG monitor with low power consumption and small size based on AD8232 chip [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (2987): 2884 - 2887.
- [20] KHITER A, AMEL B H, MITICHE A, et al. Denoising electrocardiogram signal from electromyogram noise using adaptive filter combination [J]. Revue d'Intelligence Artificielle, 2020, 34 (1): 67 - 74.