

基于模糊控制系统的机械臂自适应控制算法设计

王萍

(陕西工业职业技术学院 航空工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 针对现有机械臂控制算法, 在轨迹控制和精度补偿方面存在的不足, 设计了一种基于模糊补偿系统的自适应控制算法; 先在笛卡尔空间内分析了机械臂的空间动力学运动过程, 并得出机械臂运动中的最优力矩值, 构建模糊控制规则并设定模糊子集; 对经典模糊理论进行优化, 引入可变量域思维在机械臂运动过程中, 系统会实时反馈末端执行器行动轨迹, 并实施动态化补偿; 基于自适应算法对可变量域模糊控制器进行二次优化, 修正模糊规则并校正模型的控制量参数, 提升和改善整个机械臂系统的控制精度; 实验结果显示, 模糊补充自适应控制算法在多关节和多连杆机械臂的角度控制和位移控制精度方面有较大的优势, 同时各关节和连杆的运动相应时间仅为 0.27 s 和 0.20 s。

关键词: 模糊补偿系统; 机械臂; 自适应控制; 可变量域; 角度; 位移

Design of Adaptive Control Algorithm for Manipulator Based on Fuzzy Compensation System

WANG Ping

(Shaanxi Industrial Vocational and Technical College, Aviation Engineering College, Xianyang 712000, China)

Abstract: Aimed at existing control algorithms for manipulators, there are the shortcomings of trajectory control and precision compensation, an adaptive control algorithm based on fuzzy compensation system is designed. Firstly, the space dynamic motion process of the manipulator is analyzed in Cartesian space to obtain the optimal torque value of the manipulator, construct the fuzzy control rules, and set the fuzzy subsets. The classical fuzzy theory is optimized, and the variable domain idea is introduced in the movement of the manipulator, the system feedbacks the action trajectory of the end actuator in real time, and implements the dynamic compensation. Based on the adaptive algorithm, the quadratic optimization of the variable theory domain fuzzy controller is carried out, which corrects the fuzzy rules and control parameters of the mode, improving the control accuracy of the whole manipulator system. The experimental results show that the fuzzy compensation adaptive control algorithm has great advantages in the angle and displacement control accuracy of the multi-joint and multi-link manipulator, at the same time, the corresponding motion time of each joint and link is only 0.27 s and 0.20 s.

Keywords: fuzzy compensation system; manipulator; adaptive control; variable domain; angle; displacement

0 引言

随着计算机科学技术和自动化控制技术的快速发展, 机械臂智能化程度与自动化控制水平不断提高, 并被不断地应用到高精度工业控制领域之中^[1]。机械臂与传统人工、半自动机械控制方式相比, 具有控制精度高、效率高、适用场景广泛等多重优势, 尤其是在一些高温、高压和作业环境相对复杂和危险的场景之中, 机械臂发挥着至关重要的作用^[2-3]。机械臂是一种耦合性较强且复杂多变的非线性系统, 由执行机构、运动机构和控制机构等共同构成, 其中控制机构是机械臂的核心模块^[4]。在执行指令程序时, 对机械臂的各关节施加驱动力, 各关节和连杆的位移、速度、加速度变化要与事先设定的值相吻合, 才能确保机械

臂沿着既定轨迹运动。但在实际作业过程中, 机械臂关节和连杆的负载情况随时会发展变化, 导致控制参数发生改变^[5]; 而外部扰动因素和系统摩擦等也会导致机械臂的运动轨迹出现偏差^[6]。在现有的机械臂控制程序和控制算法下, 机械臂能够完成一些相对简单的作业任务, 但在一些有着高精度作业要求, 不确定环境和非结构场景的复杂任务下, 机械臂的轨迹控制精度会出现下降趋势, 甚至难以满足高精度的控制要求。在复杂和非线性环境下, 要求机械臂要具有一定的自适应运动感知能力和轨迹纠偏能力^[7-8], 即在一定程度上要实现机械臂的自适应高精度轨迹控制。

汇总分析当前国内外机器人和机械臂控制领域的相关

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-09-08。

基金项目: 基于 Petri 网的 FMS 物料储运系统智能化改造研究(2021YKYB-055)。

作者简介: 王萍(1979-), 女, 硕士, 讲师。

引用格式: 王萍. 基于模糊控制系统的机械臂自适应控制算法设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 145-151.

研究,主要有 3 个较为集中的研究方向,具体包括以 PID 控制为代表的鲁棒控制,以 ANN (artificial neuro network, 人工神经网络) 为代表的智能控制和以改进 PSO (particle swarm optimization, 粒子群) 为代表仿生控制。其中 PID 控制算法起步最早,应用最为广泛, PID 控制的主要优势有参数设定相对简单,且各种参数容易被控制和调整,具有较强的可操作性,而且可以与其他控制算法进行深度融合,具有良好的兼容性^[9]。但 PID 控制对作业环境有较高的要求,算法的适用性较差,而且将 PID 控制算法应用到高精度领域时,对机械臂运动轨迹偏差的控制效果往往难以满足要求。应用 ANN 控制时,通常构建一个多层次的神经网络,协同各系统参数以实现同步控制,同时基于参数补偿消除各种不确定性因素对机械臂系统造成的影响^[10]。ANN 智能算法的优势在于无需构建复杂的控制模型或数学模型,就能够实现对整个机械臂系统的控制,具有极佳的适应性,而且 ANN 算法的计算能力较强,能够处理较大规模的数据集;但 ANN 算法缺点是暂态性能较差,如果控制参数集合中有一个或几个参数超出了阈值范围,系统的可控性变差且控制精度会出现严重衰减。

PSO 算法作为一种智能仿生算法,近年来发展迅速且应用较为广泛,改进 PSO 算法在经典算法基础上对全局性能进行了优化,进一步提升了控制精度^[11]。但改进 POS 算法在相对复杂的结构下容易出现短时间的异常抖动现象,进而影响到最终的轨迹控制效果,会给高精度控制增加一定风险因素;而且 POS 算法对软硬件匹配程度等有较高要求,通常与其他控制方法融合使用,如果兼容度不佳会影响到控制精度和控制效率。

随着自动化控制技术、深度神经网络技术和模糊控制理论不断发展,智能控制逐步开始成为机械臂轨迹控制的主流^[12-13]。本文以模糊控制理论为基础结合了自适应控制算法,并在分析国内外现有的研究成果和已有的控制算法基础上,设计了一种基于模糊补偿系统的自适应控制算法。通过分析机械臂的运动过程和空间动力学变化情况,构建了机械臂的空间运动动力学模型,结合模糊控制理论和自适应控制算法的优点,使自适应控制模型具备了多人多出功能。利用模糊系统的轨迹逼近特征,实现对机械臂运动轨迹的实时纠偏,提升算法的控制精度。

1 机械臂的空间动力学分析

机械臂是一个结构较为复杂的非线性系统,其机械结构由关节、连杆和末端执行器构成,机械臂运动过程中各个部件都会出现运动轨迹或角度的误差。对机械臂进行实时地补偿控制^[14],需要先构建机械臂的空间动力学模型,对机械臂刚体的当前位置、行进方向及空间位姿进行系统化的描述,并在此基础上实施模糊补偿控制,使其运动轨迹接近于理论上设定的理想轨迹。令点 P 为笛卡尔空间坐标系 $\{A\}$ 中机械臂上的任一点,表示为:

$${}^A\mathbf{P} = [P_x, P_y, P_z]^T \quad (1)$$

其中: ${}^A\mathbf{P}$ 为点 P 在坐标系中的位置矢量, P_x, P_y, P_z 为 3 个轴向的坐标分量。当机械臂的关节发生旋转时,定义一个以 P 为坐标原点的坐标系 $\{B\}$,其中 ${}^A\mathbf{H}$ 为坐标系 $\{A\}$ 的旋转矩阵,满足条件 $|\mathbf{H}| = 1$ 。在机械臂的运动过程中, $\{A\}$ 绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的旋转角度分别为 β_1, β_2 和 β_3 ,则 ${}^A\mathbf{H}$ 可以表示为:

$${}^A\mathbf{H} = {}^A_{B_1}\mathbf{H} \cdot {}^A_{B_2}\mathbf{H} \cdot {}^A_{B_3}\mathbf{H} \quad (2)$$

$${}^A_{B_1}\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 \\ 0 & \sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^A_{B_2}\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos\beta_2 & 0 & \sin\beta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_2 & 0 & \cos\beta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^A_{B_3}\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos\beta_3 & -\sin\beta_3 & 0 \\ \sin\beta_3 & \cos\beta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

机械臂移动过程中坐标系 $\{B\}$ 沿着 3 个轴向绕坐标系 $\{A\}$ 旋转或平移。机械臂的空间位姿描述如图 1 所示。

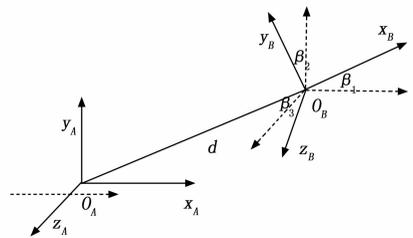


图 1 机械臂移动空间位姿描述

机械臂移动过程中的最优力矩是一种极为关键的控制指标,机械臂各连杆、关节的当前位置、移动距离和旋转角度都会影响到机械臂末端执行器的空间运动轨,而机械臂的最优力矩决定了机械臂的末端执行器能否按照预期的速度和规模移动。本文基于 Lagrange 函数分析与描述机械臂移动过程中的动力学状态和动能、势能转换关系,定义 Lagrange 函数为 L :

$$L = EN_1 - EN_2 \quad (6)$$

其中: EN_1 和 EN_2 分别表示机械臂系统的动能和势能,以 Lagrange 函数为基础构建机械臂运动过程中的动力学方程, F 为最优力矩值:

$$F = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial EN_1}{\partial v_i} \right) - \frac{\partial EN_2}{\partial \kappa_i} + \frac{\partial EN_1}{\partial \kappa_i} \quad (7)$$

其中: v_i 为广义上的速度分量, κ_i 为广义上的坐标函数,两者都是机械臂运动时间 t 函数。在基于 Lagrange 函数构建机械臂动力学模型过程中,先要选取坐标系并确定相互独立的关节变量^[15],根据各连杆的移动距离和关键的旋转角度求出机械臂系统的动能和势能。通过调整各个关节和连杆的旋转角度、位移等相关参数,计算出机械臂移动过程中的最优力矩值,使机械臂末端执行器的移动轨迹,更趋近于理论值。

2 自适应模糊补偿系统的构建及优化

模糊控制突出优点是基于模糊经验和知识对被控制对象实施控制，而不依赖于精确的数学模型，控制量可以由模糊推理而导出。包括多个关节的机械臂系统在运动过程中的复杂程度较高，在本文所构建的空间动力学模型框架内，通过全过程的可变论域自适应模糊补偿，使机械臂运动过程中的最优力矩值差值逐步缩小^[16]，并在线修正机械臂末端执行器真实运动轨迹与理论设定轨迹之间的偏差，提升对机械臂的控制精度。

2.1 可变论域的模糊控制算法及改进

模糊控制主要基于模糊隶属度函数来描述边界不清事物的理论，隶属度函数在 $[0, 1]$ 取值范围内能够清晰表达出事物的模糊性，令模糊集合为 M ，定义模糊隶属度函数 $f_M(x)$ 如下：

$$f_M(x) = \begin{cases} 1, & x \in M \\ 0, & x \notin M \\ (0, 1), & x \in M \end{cases} \quad (8)$$

当模糊隶属度函数 $f_M(x)$ 的值越趋近于 1 时，表明数据 x 隶属于集合 M 的程度越高；反之，当模糊隶属度函数 $f_M(x)$ 的值越趋近于 0，表明数据 x 隶属于集合 M 的程度越低。隶属度函数的类别多样，包括高斯隶属度函数^[17]、梯形隶属度函数^[18]、三角隶属度函数^[19]等。模糊控制器的结构设计包括模糊规则，模糊化过程、模糊推理和非模糊化，当未知或不确定的控制数据输入到模糊控制器中，经过模糊推理和非模糊化最终输出清晰的结果。模糊控制的依赖于过程先验知识和已形成理论，模糊规则的形成主要基于成熟的经验和已被确定理论和知识，模糊规则类似于人脑思维，具有一定的逻辑性并适合模糊推理^[20]。被输入系统的值为清晰值，先经过模糊化接口进行数值转化形成模糊量，最常用的模糊子集如表 1 所示。

表 1 可变论域模糊子集设定

子集	负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
符号	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB

用途最广的模糊规则是“IF-THEN”语句，此外“also, else, or, and”等也是较为常用的语句。模糊化的过程将输入的真实值转换为模糊量，将真实值变量用 $[0, 1]$ 范围内的模糊量替代，其中单点模糊化是最常用和效率最高的模糊化方法。模糊推理的过程是模糊控制器最重要的功能，可以实现自前向后推理正向推理，或自后向前的逆向推理。清晰化的过程是模糊化的逆运算过程，即基于模糊隶属度函数将模糊推理后的数据集合做非模糊化处理，本文所采用的清晰化方法为中心加权平均清晰法，具体的推导过程如下：

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M c(f, R)}{\sum_{i=1}^M c'(f, R')} \quad (9)$$

其中： y 为模糊化处理后的结果， R 和 R' 为推理前后的

模糊集， c 和 c' 为推理前后的模糊集中心，通过加权平均提升数据清晰化的效率。本文设计的自适应模糊控制器在模糊推理过程中，对输入数据进行了比较性能度量以改善最终的控制效果，同时降低实际清晰化效果与预期结果之间的差距。具体的性能度量控制策略包括局部控制和全局控制两种，其中局部控制算法较为简单，对模糊控制器的性能要求相对而言更低；而全局控制对整个模糊控制系统的性能要求较高。可变论域模糊控制规则，如表 2 所示。

表 2 可变论域模糊规则表

—	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	NS	NS	NM	NM	NB	NB
NM	PM	ZO	NS	NS	NS	NM	NB
NS	PB	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
ZO	PB	PS	PS	PS	ZO	NS	NB
PS	PB	PB	PS	PS	NS	NS	NB
PM	PB	PM	PS	ZO	PS	ZO	NB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	NM

自适应模糊过程中还要根据修正量偏差的大小，不断地调整模糊规则、模糊化方式和模糊推理的方式，模糊控制器的模糊规则越准确、越简洁，将更有助于降低模糊推理过程中的数据存储成本，及降低推理过程的复杂度。经典模糊控制系统具有较强的适用性和鲁棒性，且无需构建精确的数学模型即可以求解出最优解，但是经典的模糊控制器所确定的模糊规则有限，如果选定的模糊规则确定以后，通常情况下不会改变。如果输入的数据集较为复杂，给定的输入值与输出值之间的偏差及变化率会同步减少，进而导致对初始论域划分越来越粗糙，影响到输出结果的清晰化。

由于多关节机械臂系统的运动过程较为复杂，为进一步提升自适应模糊控制系统的轨迹控制精度，本文引入了一种可变论域思维，以提升自适应模糊控制系统的适用范围和控制精度。可变论域本质上是一种以动态逐点为基础的插值器，在机械臂运动过程中系统会实时反馈末端执行器行动轨迹的动态误差。当实时反馈的误差较小时表明末端执行器轨迹与理论轨迹趋近，此时收缩论域的范围并进一步提升控制精度；当实时反馈的误差增大时表现末端执行器的轨迹与理论值有较大偏差，此时为了提升系统的收敛速度要适度减少模糊规则的数量，同时扩张论域范围并逐步缩小控制系统的动态误差。设 $X_i = \{x_i\} (1 \leq i \leq n)$ 为给定论域上的一组模糊集，其中 x_{\max} 为模糊集的峰值，在 $1 \leq i \leq n$ 范围内 $\forall p, q$ ，满足条件 $p \neq q$ ，则 $x_p \neq x_q$ ，可以推导出：

$$\sum_{i=1}^n X_i \{x\} = 1, x \in X \quad (10)$$

其中： X_i 为 X 上的基元，而 X 是 $\{x_i\}$ 上的基元组。如果相邻的两个基元 X_i 和 X_{i+1} 满足如下条件：

$$\begin{cases} X_i \neq X_{i+1} \neq 0 \\ X_i(x) + X_{i+1}(x) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

当 $X_i(x)$ 为线性函数时, 则 X 是 $\{x_i\}$ 上的双相线性基元组。按照可变论域理论给定机械臂系统两个输入和一个输出, 其中基元组 $X = [-D, D]$ 为输入数据的偏差论域, 将输入数据的偏差变化率论域 $Z = [-E, E]$ 作为另一个输入项, 输出的论域表示为 $Y = [-G, G]$, 当 $p, q \in n$ 时与 $Z = [-E, E]$ 对应的基元为 $\{z_j\}$, 由此可以说 $\{x_i\}$ 和 $\{z_j\}$ 分别为论域 $X = [-D, D]$ 和论域 $Z = [-E, E]$ 上的双相基元组; 而输出端 $Y = [-G, G]$ 的基元组为 $\{y_{ij}\}$ 。根据可变论域制定新的模糊规则:

if x is X_i and z is Z_i then Y_i is y_{ij}

此时含有两个输入项的模糊隶属度函数 $f(x, z)$ 的逼近函数 $F(x, z)$ 表示如下:

$$F(x, z) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q X_i(x) Z_i(z) y_{ij} \quad (12)$$

逼近误差 ϵ 具体表示如下, 如果逼近误差 ϵ 的取值越小表明对机械臂末端执行器的运动轨迹控制效果就越好:

$$\epsilon = |F(x, z) - f(x, z)| \quad (13)$$

可变论域的可变性主要通过两个输入项和一个输出项的对应的伸缩因子来体现, 其中偏差论域 $X = [-D, D]$, 偏差变化率论域 $Z = [-E, E]$ 和输出端 $Y = [-G, G]$ 对应的伸缩因子分别为 $\zeta(x), \tau(z)$ 和 $\xi(y)$:

$$\begin{cases} \zeta(x) = \left(\frac{|x|}{D}\right)^{\tau_1} \\ \tau(z) = \left(\frac{|z|}{E}\right)^{\tau_2} \\ \xi(y) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{|x|}{D}\right)^{\tau_1} + \left(\frac{|z|}{E}\right)^{\tau_2} \right) \end{cases} \quad (14)$$

其中: τ_1 和 τ_2 为取值 $0 \sim 1$ 之间的控制参数, 偏差论域伸缩因子和偏差论域变化率伸缩因子函数具有对偶性、单调性和保零性, 以偏差变化率论域的伸缩过程为例, 分析可变论域的伸展和压缩过程, 如图 2 所示。

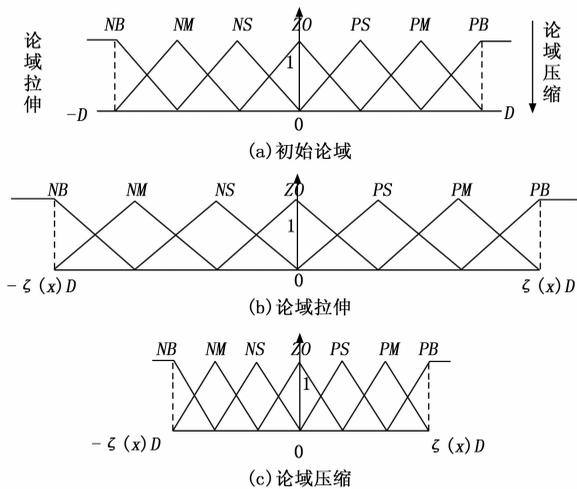


图 2 可变论域的压缩和拉伸过程示意图

根据机械臂控制对象的复杂程度, 选择不同的模糊隶属度函数 $f_M(x)$ 的具体类型, 例如, 当选择三角隶属度函

数时, 在 t 时刻两个输入项和一个输出项元素分别为 x'_i, z'_i 和 y'_i , 在第 t 时刻偏差论域隶属度函数和偏差论域变化率隶属度函数分别记为 $X_i(x', t)$ 和 $Z_i(z', t)$, 新的模糊规则如下:

if $x(t)$ is $X_i(t)$ and $z(t)$ is $Z_i(t)$ then $Y_i(t)$ is $y_{ij}(t)$

对应的控制函数如下:

$$F(x', z', t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q X_i(x', t) Z_i(z', t) y_{ij}(t) \quad (15)$$

相应地可变论域模糊控制器结构要更加地复杂, 即在常规的控制器的基础上增加了两个输入项和一个输出项伸缩因子的计算。

2.3 可变论域稳定性分析

可变论域模糊控制器也为双输入单输出的模式, 基于输入偏差量来讨论可变论域模糊控制器的稳定性和可靠性, 将模糊集 $X_i = \{x_i\} (1 \leq i \leq n)$ 视为一个 n 阶连续的非线性系统, 表示如下:

$$x^{(n)} = g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + \lambda \quad (16)$$

其中: $g(x)$ 为一个非线性的实值函数, λ 为任一常数, 且 $g(x)$ 满足如下条件:

$$|g(x)| \leq g_0(x) \quad (17)$$

其中: $g_0(x)$ 为已知的连续函数和, 令 $r(t)$ 为参考输入为 $x(t)$ 和 $z(t)$ 的和, 输入项与输出项之间的偏差记为 $e(t) = r(t) - y(t)$, 每一项的偏差状态变量 e 记为:

$$e = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T \triangleq (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \quad (18)$$

可变论域模糊控制的目标是让输入项和输出项之间的偏差趋近于零:

$$\lim \|e(t)\| = 0 \quad (19)$$

构造一个误差函数:

$$e^{(n)} + \gamma_1 e^{(n-1)} + \dots + \gamma_{n-1} \dot{e} + \gamma_n e = 0 \quad (20)$$

由式 (21) 和 (22) 可知, $e(t)$ 会随着机械臂的运动输入数据的变化而出现一种渐进和稳定的变化趋势, 并通过实时修正轨迹偏差, 达到趋近于理论轨迹的效果:

$$e^{(n)} = -\gamma^T e \quad (21)$$

$$\gamma \triangleq (\gamma_n, \gamma_{n-1}, \dots, \gamma_1) \quad (22)$$

3 基于自适应模糊补偿的机械臂运动轨迹优化控制

可变论域模糊控制器主要采用 if-then 控制规则, 为进一步提升和改善算法的控制精度, 并排除外部扰动和摩擦对机械臂轨迹控制精度的影响, 采用自适应算法对可变论域模糊控制器做二次优化。自适应模糊控制器针对可变论域模糊控制器增加了规则校正和控制量校正两个环节, 在系统运行过程中实施调整可变论域模糊控制器的各种参数, 以提升系统的稳定性并使输入项和输出项之间的偏差趋近于零, 经过优化的模糊控制器结构, 如图 3 所示。

自适应模糊控制本质上是通过参数调整对模糊控制内部进行软反馈, 在系统运行的同时自适应调整各类控制参数, 并提升和改善控制效果。鉴于机械臂系统的复杂性本文选用间接逼近的自适应模糊控制方式, 根据机械臂当前

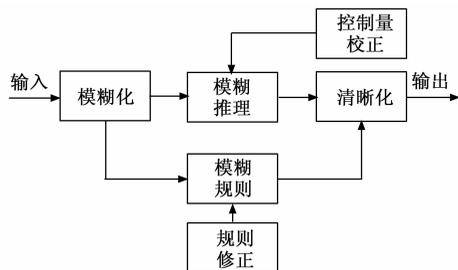


图 3 经过自适应优化的可变论域模糊控制器

实际的运动状态，适时调整自身的控制规则；同时模糊逼近自适应控制系统还能够根据被控制对象的运动特点调整和再生控制规则，并选择最佳的论域空间，确保整个机械臂控制系统的控制精度。在对机械臂末端执行器的轨迹控制过程中，根据系统实施反馈的运动参数和运动轨迹，预估机械臂各关节的旋转角度参数和机械臂连杆的位移参数，先假定这些参数是真实的理论参数并将这些数据输入到自适应可变论域模糊器内，并在线评估误差，进而以修正模糊规则和校正控制量的方式逼近误差。在可变论域的稳定性分析时，已经设定模糊补偿系统为一个 n 阶连续非线性系统：

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + h(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})r \\ y = r(x) \end{cases} \quad (23)$$

其中： g 和 h 是与模型两个输入项对应的非线性实值函数， r 和 y 代表模糊自适应补偿系统的输入量和输出量。选择一组控制参数 $K = (k_n, k_{n-1}, \dots, k_1)^T$ ，对应输入项的控制率 r^* 表示如下：

$$r^* = \frac{F}{h(x)} [-g(x) + y_E + K^T e] \quad (24)$$

其中： y_E 为预期的输出结果， e 为偏差状态向量， F 为机械臂的最优力矩值，在存在系统逼近误差和系统噪声干扰的前提下，可以得到一个闭环系统的误差控制方程：

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0 \quad (25)$$

在选定合适的控制参数 K 时，自适应调整和校正可变论域模糊补偿系统的控制量，由于 $g(x)$ 和 $h(x)$ 都为已知函数，通过选择控制率 r^* 来消除系统的非线性特征。本文设计的可变论域模糊控制系统的最大优势是通过误差逼近与控制，实现对系统参数的在线调节，提升整个系统的控制精度，并确保机械臂末端执行器的运动轨迹趋近于理论值。

4 实验部分

4.1 实验环境与参数设置

在实验室的环境下以一个三自由度的机械臂为研究对象，验证模糊补偿控制系统的实际控制效果，机械臂如图 4 所示。

机械臂的连杆质量 m 和连杆长度 l 等相关参数的设定，如表 3 所示。



图 4 实验用三自由度机械臂

表 3 机械臂的相关参数

参数	描述	参数值
m_1	连杆 1 质量	3.5 kg
m_2	连杆 2 质量	1.5 kg
m_3	连杆 3 质量	1.2 kg
l_1	连杆 1 长度	0.21 m
l_2	连杆 2 长度	0.32 m
l_3	连杆 3 长度	0.35 m

给定各关节的映射矩阵如下所示：

$$R = \begin{pmatrix} 0.0042 & 0.0051 & -0.0033 \\ 0.0051 & -0.0051 & -0.0045 \\ 0 & 0 & 0.0038 \end{pmatrix} \quad (26)$$

三个关节的期望轨迹值分别为 $0.1 \sin(t)$ ， $0.5 \sin(t)$ 和 $0.3 \sin(t)$ 。机械臂控制系统核心功能模块主要包括内核模块、电源模块和无线网络通信模块。其中，内核模块是系统的控制中心，内置了控制器、执行器、A/D 转换接口、网络接口等，A/D 转换器输入和输出的是连续信号，其他接口的输入输出的离散信号。内核模块的程序可由用户自定义并采用中断的方式产生，模块功能的初始化通过编写脚本代码来完成，每次启动程序前需要对系统程序进行初始化；电源模块能够为系统提供 5 V 的工作电压，并提供 3 A 和 1 A 两种电流，其中 3 A 电流适合机械臂和关节的供电，1 A 电流适合给内核模块和通信模块供电，分区独立供电的优势是具有较强的稳定性和可靠性；无线网络通信模块包括数字信号接收端、数字信号发送端，数字信号的传输基于事件驱动的方式，当机械臂系统识别到有信号进入系统后随即启动网络模块。数字信号的发送或接收可以基于多个接口来实现，根据通信数据的规模决定参与工作接口的数量，机械臂系统其他核心参数的设置，如表 4 所示。

表 4 机械臂系统核心参数的设置

参数	取值
τ_1	0.35
τ_2	0.65
λ	0.50
伸缩因子的 $\zeta(x)$ 最小倍数	0.3
伸缩因子的 $\zeta(x)$ 最大倍数	1.7

可变论域模糊补偿控制算法的具体应用步骤如下所示：

- 1) 设定机械臂的初始值，并调整机械臂学习因子等关

键参数。

2) 调整可变论域模糊规则, 伸缩、扩张倍数等核心参数, 并与机械臂的关节旋转角度等参数进行匹配。

3) 试运行 3 轴机械臂系统程序和各模块的子程序, 验证系统能否正常运行。

4) 确定机械臂系统的能够稳定运行后, 选择模糊隶属度函数, 并使机械臂系统进入待命状态。

4.2 实验结果与分析

本文实验过程中的模糊隶属度函数, 选择三角函数中的正弦函数, 在固定的控制周期内 (7 s) 观测机械臂三个关节运动轨迹偏差情况, 进而对比本文算法和其他 3 种传统控制算法的轨迹控制精度, 其中 PID 算法的三个核心参数, 即积分、微分和比例参数取值分别为 0.25, 0.35 和 0.40; ANN 算法的学习率参数设定为 0.75, 神经网络层数为 10 层, 最高迭代次数为 500 次; PSO 算法的种群规模为 1 000 个粒子, 最高迭代次数设定为 500, 实验结果如图 6~8 所示。

臂轨迹补偿控制造成巨大难度。进一步测量三个机械臂连杆在运动中偏差及控制补偿情况, 在每个连杆的运动轨迹上随机采样 10 个样本点, 观测其实际运行和理论轨迹的偏差情况, 数值统计如表 5~7 所示。

表 5 连杆 1 运动轨迹偏差统计情况

样本点	机械臂连杆 1 运动轨迹偏差/mm			
	本文	PID	ANN	PSO
1	0.09	0.12	0.15	0.16
2	0.08	0.15	0.23	0.15
3	0.00	0.15	0.36	0.12
4	0.00	0.17	0.12	0.15
5	0.05	0.21	0.16	0.16
6	0.06	0.16	0.13	0.14
7	0.07	0.14	0.12	0.33
8	0.00	0.14	0.17	0.30
9	0.01	0.16	0.22	0.21
10	0.00	0.19	0.18	0.19
均值	0.04	0.16	0.18	0.19

表 6 连杆 2 运动轨迹偏差统计情况

样本点	机械臂连杆 2 运动轨迹偏差/mm			
	本文	PID	ANN	PSO
1	0.03	0.23	0.23	0.23
2	0.04	0.24	0.23	0.35
3	0.05	0.32	0.27	0.24
4	0.05	0.21	0.26	0.35
5	0.02	0.28	0.27	0.33
6	0.05	0.36	0.30	0.31
7	0.07	0.31	0.31	0.32
8	0.07	0.29	0.30	0.36
9	0.05	0.26	0.33	0.37
10	0.04	0.33	0.36	0.36
均值	0.05	0.28	0.29	0.32

表 7 连杆 3 运动轨迹偏差统计情况

样本点	机械臂连杆 3 运动轨迹偏差/mm			
	本文	PID	ANN	PSO
1	0.07	0.31	0.33	0.31
2	0.06	0.31	0.33	0.32
3	0.02	0.28	0.34	0.33
4	0.08	0.33	0.35	0.34
5	0.09	0.35	0.33	0.35
6	0.06	0.36	0.35	0.36
7	0.07	0.38	0.40	0.40
8	0.06	0.39	0.40	0.41
9	0.07	0.40	0.41	0.36
10	0.08	0.38	0.36	0.39
均值	0.07	0.35	0.36	0.36

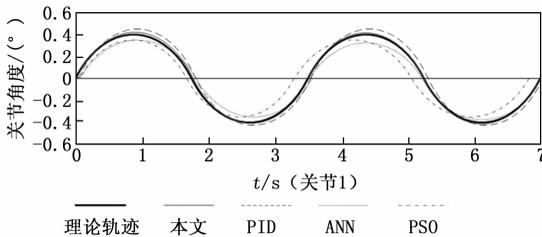


图 6 机械臂关节 1 各算法的控制角度偏差

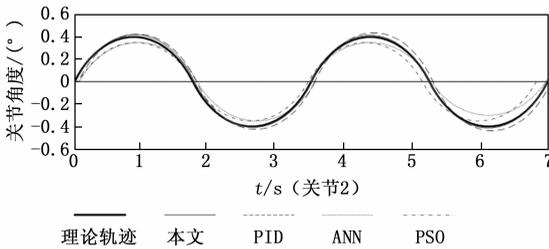


图 7 机械臂关节 2 各算法的控制角度偏差

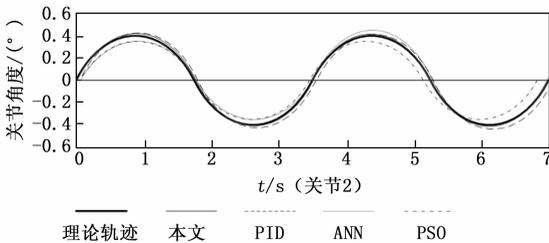


图 8 机械臂关节 3 各算法的控制角度偏差

如图 6~8 的数值仿真结果显示: 本文提出的模糊补偿自适应控制算法的各关节旋转角度控制偏差, 最接近于理论轨迹, 而在传统的 PID 算法、ANN 算法、PSO 算法和自适应算法控制下, 关节角度均与理论值存在较大偏差。机械臂的关节旋转角度偏差与轨迹补偿密切相关, 如果每个关节角度控制的精度较差, 多关节累加后会给后续的机械

臂数值统计结果显示: 在本文模糊补偿自适应系统控制下, 机械臂的 3 个连杆采样点轨迹偏差值都较小, 均值分别为 0.04、0.05 和 0.07, 与理论轨迹值趋近; 而 4 种传统

控制算法的轨迹偏差值较高,而且越接近末端执行器的连杆轨迹偏差值越高。这说明连杆 1 和连杆 2 的出现的轨迹偏差并没有得到有效补偿控制,会导致连杆 3 及末端执行器出现更大的偏差,严重影响机械臂末端执行器的控制精度。

最后,分析了在不同控制算法下机械臂关节角位移和连杆位移响应时间。响应时间与机械臂的控制算法效率密切相关,影响到机械臂的工作效率,在大规模工作企业生产线作业中,机械臂的工作效率与控制精度同样重要,因此机械臂的工作响应时间也是控制系统设计需要考虑到的重要指标之一。在不同的控制算法下随机给机械臂一个动态指令,同时观测和记录各关节和连杆的响应时间,统计结果如表 8 和表 9 所示。

表 8 不同算法下机械臂各关节响应时间

样本点	机械臂关节响应时间/s			
	本文	PID	ANN	PSO
关节 1	0.31	0.76	0.81	0.76
关节 2	0.25	0.87	0.85	0.82
关节 3	0.24	0.69	0.89	0.88
均值	0.27	0.77	0.85	0.82

表 9 不同算法下机械臂各关节响应时间

样本点	机械臂连杆响应时间/s			
	本文	PID	ANN	PSO
关节 1	0.22	1.05	1.03	0.88
关节 2	0.19	1.08	1.02	0.83
关节 3	0.20	0.81	0.83	0.69
均值	0.20	0.98	0.96	0.80

表 8 和表 9 中的数据显示,本文提出的模糊补偿自适应控制算法的关节旋转响应时间和连杆移动相应时间均少于 3 种传统算法,表现本文提出算法的控制效率更高,在确保控制精度的同时改善了算法的适用性,具有良好的推广使用价值。

5 结束语

机械臂在高精度工业控制领域有着越来越广泛的市场需求,作为一种高复杂度的非线性控制系统,机械臂轨迹精度控制受多重因素影响。为提升机械臂的控制精度,使其最大化地沿着理论轨迹运动,就需要对机械臂的当前运动轨迹进行实时补偿控制。本文在经典模糊控制理论上引入了可变论域思维,通过伸张和收缩论域区间范围,扩展论域的有效范围,实时调整和补偿控制机械臂的精度,最后再结合自适应控制的软反馈特性,进一步提升控制精度和缩短响应时间。实验结果表明,本文在本文提出模糊补偿控制算法下,机械臂各关节和连杆的运动轨迹偏差较小,同时在机械臂的运动响应时间上与传统方法相比也具有一定优势。

参考文献:

[1] 张建宇,高天宇,于潇雁,等.基于自适应时延估计的空间机

械臂连续非奇异终端滑模控制[J].机械工程学报,2021,57(11):177-183.

[2] 高阳,张晓晖,高玉儿,等.基于神经网络和模糊补偿的水下机械臂控制[J].计算机工程与应用,2022,58(15):317-323.

[3] 赵修琪,卢文豪,王珊.基于Arduino的自动分拣机械臂控制系统设计[J].现代电子技术,2021(24):163-166.

[4] 邓欣,肖立峰,杨鹏飞,等.融合运动想象脑电与眼电信号的机械臂控制系统开发[J].智能系统学报,2022,17(6):1163-1172.

[5] 李小彭,周赛男,尹猛,等.双柔性机械臂伺服系统PI控制策略[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(5):642-651.

[6] 冯硕,李旗.奇异果采摘机器人机械臂控制系统研究——基于计算机视觉和卷积神经网络[J].农机化研究,2022(10):25-29.

[7] 陈晓彤,祁文哲,孟建军,等.一种改进差分进化算法的单关节机械臂控制方法[J].组合机床与自动化加工技术,2022(7):39-45.

[8] 张蕾,刘宇航,王晓华,等.融合速度信息的机械臂自适应轨迹跟踪控制方法[J].西安交通大学学报,2022(7):47-55.

[9] 马天兵,宫晗,杜菲,等.基于线结构光和优化PID的压电柔性机械臂振动控制[J].光学精密工程,2021,29(11):2661-2671.

[10] 徐学义.基于ANN-VRFT的机械臂位置控制[J].工业控制计算机,2016(9):59-61.

[11] 潘昌忠,罗晶,李智靖,等.平面欠驱动柔性机械臂的PSO轨迹优化与自抗扰振动抑制[J].振动与冲击,2022,41(14):181-189.

[12] 刘凌,李志成,张莹.面向双关节机械臂的参数可调RBF神经网络控制[J].西安交通大学学报,2021,55(4):1-7.

[13] 张锦,李正楠,殷玉枫,等.多关节机械臂的高阶滑模神经网络自适应控制[J].机械科学与技术,2021,40(5):710-715.

[14] 沙毅刚,王强,何晓晖,等.基于模糊补偿的液压机械臂轨迹跟踪控制[J].信息与控制,2021,50(2):184-194.

[15] 史洪松,敖昕.一种液压驱动机械臂多关节力矩控制方法[J].计算机仿真,2022(7):391-395.

[16] 周名侦,廖志青.干扰观测器与滑模控制结合的机械臂跟踪控制[J].机械设计与制造,2021(12):215-219.

[17] 吴春华,俞薛颖,李智华,等.基于FCM与高斯隶属度的光伏组件健康状态诊断[J].电网技术,2022(5):1887-1896.

[18] 张月,赵罡,胡春光,等.基于改进优化隶属度函数的便携式电量计量装置综合评估方法[J].电测与仪表,2021,58(11):186-193.

[19] 王小鹏,王庆圣,焦建军,等.快速自适应非局部空间加权与隶属度连接的模糊C-均值噪声图像分割算法[J].电子与信息学报,2021,43(1):171-178.

[20] 许四平,李琳.模糊规则下IM换相转矩脉动控制方法仿真[J].计算机仿真,2023,40(1):354-358.