Research on Constrained Follow Control of Flexible Joint Robot Arm Based on Wireless Accelerometer Sensor Network*

ZHOU Da, CAI Zhimeng, CHEN Mingming*
(School of Information and Smart Electromechanical Engineering, Xiamen Huaxia University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: A flexible joint robotic arm constraint following control method based on wireless accelerometer network is proposed to address the issue of existing methods being unable to simultaneously control both direction and position constraints, and ignoring nonlinear interference, resulting in a decrease in tracking control performance. Wireless acceleration sensors are utilized to collect and fuse acceleration data of flexible joint robotic arms, and the data are estimated through a hybrid filtering technique combining particle filtering and Kalman filtering to obtain accurate joint position and direction constraints. Based on position and direction constraint information, the sliding mode controller adjusts the angle of the robotic arm through feedback control strategy, a disturbance observer is established, a nonlinear compensator in the exponential convergence law is introduced to counteract the interference of nonlinear factors, achieving precise and stable constraint following control of flexible joint robotic arms. The results show that the proposed method can accurately track and control the joint angle position, with overshoot controlled below 20% and entropy value of 0.19, demonstrating high tracking and control stability.

Key words: flexible joint robotic arm; wireless accelerometer; particle filtering; Kalman filtering; interference observer
EEACC: 7220; 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.016

基于无线加速度传感器网络的柔性关节机械臂约束跟随控制研究*

周 达, 蔡志猛, 陈明明*
(厦门华厦学院信息与智能机电学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 针对现有方法无法同时对方向和位置两种约束进行跟随控制, 且忽略了非线性干扰, 导致跟随控制性能下降的问题, 提出基于无线加速度传感器网络的柔性关节机械臂约束跟随控制方法。利用无线加速度传感器采集并融合柔性关节机械臂的加速度数据, 并通过粒子滤波和卡尔曼滤波相结合的混合滤波技术估算数据, 获取准确的关节位置、方向约束; 依据位置和方向约束信息, 滑模控制器通过反馈控制策略, 来调节机械臂的角度; 并建立干扰观测器, 且在指数趋近律中引入非线性补偿器, 以抵消非线性因素干扰, 完成精准稳定的柔性关节机械臂约束跟随控制。结果表明, 所提方法可准确跟踪控制关节角位置, 超调量控制在 20%以下, 熵值结果为 0.19, 具有较高的跟踪控制稳定性。

关键词: 柔性关节机械臂; 无线加速度传感器; 粒子滤波; 卡尔曼滤波; 干扰观测器
中图分类号: TP242 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2048-07

机械臂的应用范围涵盖了医疗手术、航空航天、工业自动化等领域。机械臂主要分为: 刚性机械臂、柔性关节机械臂和柔性臂杆机械臂三类。由于柔性关节机械臂灵活性高、能耗低、负载能力小等优点, 在多柔体系统的研究中被广泛应用。然而, 因柔性关节的特性会导致较大的非线性和不确定性, 对机械臂的工作状态产生影响, 导致定位精度不高、动态响应速度慢等问题, 使得柔性关节机械臂的应用面临着挑战。为了适应复杂的工作场景要求, 需要解决这些问题。因此, 展开柔性关节机械臂的约束跟随控制研究具有重要意义。

柔性关节机械臂的约束跟随控制是指通过控制手段使机械臂能够在约束环境中灵活移动, 使其定位精度、动态响应速度以及运动灵活性都得以提高。

项目来源: 福建省自然科学基金项目(2023J011665)
收稿日期: 2024-03-06 **修改日期**: 2024-03-25

这种控制方法能够使机械臂更好地适应不同的工作环境,并更高效地完成任务。总之,实现柔性关节机械臂的约束跟随控制对于提高机械臂的性能和适应复杂工作场景具有重要意义。通过持续努力和创新,可以进一步探索和发展相关技术,推动机械臂在各个领域的应用和发展。

欧劲松等[1]首先根据奇异摄动法将柔性关节机械臂系统拆分为快系统与慢系统;其次根据 U-K 算法设计的快、慢系统的状态反馈约束跟随规律将其约束跟随误差收敛到零;最后,将上述过程运用在二连杆柔性关节机械臂系统中,解决二连杆柔性关节机械臂的约束跟随和柔性振荡的问题,完成柔性关节机械臂约束跟随控制。但该方法在实际应用中未能充分考虑非线性和不确定性因素,导致奇异摄动法的应用会存在一定的模型误差,导致控制性能差。

陈强等[2]基于构造指数建立了时变切线障碍李雅普诺夫函数来衰减时变约束边界。该算法可以应用于约束和非约束情况,扩大其适用性;基于预设的时变边界函数的相关参数,系统输出在初始阶段超调小,跟踪速度快,满足系统稳态性能要求。结合反馈空置率,保证了系统的输出约束性能和轨迹跟踪精度;最后根据李雅普诺夫稳定性定理完成柔性关节机械臂约束跟随控制。但该方法无法同时对方向和位置两种约束进行跟随控制,仍会受不确定性的干扰,阻碍了李雅普诺夫函数方法的应用效果,使得控制性能下降。

Prasad 等[3]提出基于李亚普诺夫的关节机械臂跟随控制方案。首先,将状移动平台从初始位置移动到其伪目标,其次,当移动平台距离伪目标在预定距离内时,机械臂的末端执行器被吸引到其指定目标。最后,采用李亚普诺夫完成最终的关节式移动机械手的三维跟踪控制运动。然而该方法在对柔性关节机械臂进行约束跟随控制时,未同时对方向和位置进行有效约束,会受不确定性的干扰,导致末端执行器无法完全准确到达目标位置,影响最终控制效果。

陈晓彤等[4]首先构建单关节机械臂模型,利用比例微分控制率对单关节机械臂展开轨迹跟踪;其次,对控制系统中所消耗的能量展开优化,获得最佳的离散值;最后对其偏差值采用三次样条插值法获得机械臂实际最佳轨迹,完成机械臂约束跟随控制。但该方法未能考虑非线性干扰,引起轨迹跟踪误差,影响最终的控制效果。

为了解决上述方法中所存在的问题,提出一种柔性关节机械臂约束跟随控制方法。

1　柔性关节机械臂约束跟随控制方法

为提高机械臂约束跟随控制的有效性,首先需在机械臂的每个关节处安装无线加速度传感器,采集的数据主要为关节加速度信息,用于后续的控制算法。并将无线加速度传感器与采集器连接,通过网络将传感器数据发送到处理中心,并进行融合处理,使数据的准确性得到提高;其次,基于融合后的数据,结合粒子滤波和卡尔曼滤波估算柔性关节机械臂的相对位置和方向;最后,利用滑模控制器通过反馈控制策略,根据约束信息来调节机械臂的角度;并建立由滑模控制器、机械臂系统和干扰观测器组成的控制系统,以抵消系统中的非线性因素干扰,完成精准稳定的柔性关节机械臂约束跟随控制。

1.1　柔性关节机械臂数据采集与融合处理

在机械臂的各关节处安装无线加速度传感器,展开数据采集,以为后续控制研究提供数据支撑。其传感器布置如图 1 所示。

图 1　传感器布置图

将无线加速度传感器 SAED00X25 粘贴在机械臂的基座位置,无线加速度传感器 SAED00X5 粘贴于主臂和副臂的关节位置,无线加速度传感器 SAED0001 粘贴在机械臂末端夹持装置上。固定粘贴完传感器之后,将三个传感器与 SA1604 采集器的前三个 BNC 插口进行连线,采集器的前三个接口分别对应 SA1600 采集软件的通道 1、通道 2 和通道 3。即无线加速度传感器 SAED0001 测量的基座加速度信号通过通道 1 进行采集;无线加速度传感器 SAED00X5 测量的关节处加速度信号通过通道 2 进行采集;无线加速度传感器 SAED00X25 测量的机械臂末端夹持装置加速度信号通过通道 3 进行采集。

接着通过网络将传感器数据发送到处理中心,对采集的数据进行融合处理,从而得到更准确、全面和可靠的信息[5-6]。设无线加速度传感器采集的数据量为 n,则采集的柔性关节机械臂加速度数据为 $a_i=(a_1,a_2,\cdots,a_n)$。

对任意两个柔性关节机械臂数据的相对距离展开计算,即:

$$b_{ij}=|a_i-a_j| \tag{1}$$

式中:b_{ij}为相对距离,值越大,相互支持程度越小;a_i与 a_j 为柔性关节机械臂加速度数据,$i,j=1,2,\cdots,n$。

采用支持度函数 z_{ij}统一量化 a_i 与 a_j 之间的相互支持程度:

$$z_{ij}=\frac{2\arccos(b_{ij})}{\pi},b_{ij}\geqslant 0 \tag{2}$$

根据式(2)构建支持度矩阵 $\boldsymbol{Z}$,该矩阵只用于描述 a_i 与 a_j 之间的相互支持度,即:

$$\boldsymbol{Z}=\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{vmatrix} \tag{3}$$

式中:$z_{i1},z_{i2},\cdots,z_{\mathrm{in}}$为 a_i 的真实程度。

设柔性关节机械臂的其他数据对 a_i 的支持程度为 c_i,c_i 越高,a_i 的真实性越高。

根据一组非负数 $d_i=\{d_1,d_2,\cdots,d_n\}$ 对 c_i 展开计算,完成对支持程度的衡量:

$$c_i=\frac{d_i}{d_1+d_2+\cdots+d_n} \tag{4}$$

最后,基于此,对无线加速度传感器采集的数据展开数据融合,完成对数据的处理,获得更准确、全面和可靠的信息,即:

$$A=c_1a_1+c_2a_{12}+\cdots+c_na_n \tag{5}$$

1.2 机械臂融合数据的估算及方向和位置约束确定

接下来,基于上述融合后的数据,利用粒子滤波[7-9]和卡尔曼滤波[10-11]相结合的混合滤波技术。混合滤波技术则是结合了粒子滤波和卡尔曼滤波的优点,以处理更为复杂和多变的数据。在柔性关节机械臂的应用中,由于机械臂的运动可能涉及非线性、非高斯噪声等复杂因素,混合滤波技术可以通过粒子滤波处理这些复杂情况,而卡尔曼滤波则可以提供更为稳定和精确的状态估计。这样,两者相结合,可以更准确地估算柔性关节机械臂的加速度数据,并确定其方向和位置的约束,实现有效的柔性关节机械臂约束跟随控制。

首先,基于上述融合后的加速度数据,建立柔性关节机械臂状态空间方程:

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{n+1}=\boldsymbol{E}\boldsymbol{x}_n+\beta_n \\ \boldsymbol{y}_n=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}_{n+1}+\delta_n\end{cases} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{x}_n$ 为加速度状态向量,其中元素来源于融合所获得加速度数据 A,$\boldsymbol{E}$ 为状态转移矩阵,β_n 为状态误差;$\boldsymbol{y}_n$ 为观测向量,$\boldsymbol{G}$ 为观测矩阵,δ_n 为观测误差;β_n 和 δ_n 互相独立,即 $\boldsymbol{E}\beta_i\delta_j=0$,对一切 i、j 都成立,初始状态 $\boldsymbol{x}_0$ 独立于 β_n 和 δ_n。

根据观测向量 $\boldsymbol{y}_n$ 估计状态向量 $\boldsymbol{x}_n$ 的顺序,完成重要性采样,得到一组离散样本点 $\{x_{0:n}^i\}_i^N=1$,通过粒子滤波近似计算后验概率[12-13],得到粒子的重要性权重 e_n^i 的推导过程:

$$e_n^i=\frac{g(x_{0:n}^i|y_{0:n})}{\phi(x_{0:n}^i|y_{0:n})}=e_{n-1}^i\frac{g(\boldsymbol{y}_n|x_n^i)g(x_n^i|x_{n-1}^i)}{\phi(x_n^i|\boldsymbol{y}_n,x_{0:n-1}^i)}$$
$$i=1,2,\cdots,N \tag{7}$$

式中:$g(x_{0:n}^i|y_{0:n})$为后验概率;$\phi(\cdot)$为重要性采样后的后验概率。

基于概率分布更新粒子以获得更新的重要性采样后的后验概率,表达式为:

$$\phi(x_n^i|\boldsymbol{y}_n,x_{0n-1}^i)=g(x_n^i|x_{n-1}^i) \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)中,获得粒子的重要性权重,即 $e_n^i=e_{n-1}^ig(\boldsymbol{y}_n|x_n^i)$,对其展开归一化,即 $\tilde{e}_n^i=\dfrac{e_n^i}{\sum_{i=1}^N x_n^ie_n^i}$。

在样本 $x_0^i,i=1,2,\cdots,N$ 中,通过归一化粒子的重要性权重 $\tilde{e}_n^i$ 展开重新抽样,获取 n 个粒子,并对粒子权重进行重新分配 $e_n^i=\tilde{e}_n^i=\dfrac{1}{n}$,将加速度状态向量状态 $\boldsymbol{x}_n$ 的最小均方估计输出,以确定柔性关节机械臂的方向约束,即:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_n^{\mathrm{MMSE}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_n^i\tilde{e}_n^i \tag{9}$$

与此同时,根据卡尔曼滤波对融合后的柔性关节机械臂加速度数据展开最优位置估计[14-15],以确定柔性关节机械臂位置约束 $\hat{x}_n$ 即:

$$\begin{cases}\hat{x}_n=\hat{x}_{n-1}+Y_n(\dot{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{MMSE}}-\boldsymbol{x}_{n-1}) \\ Y_n=K_{t|t-1}(\boldsymbol{H}+K_{t|t-1})^{-1} \\ K_{t|t-1}=\boldsymbol{E}K_{t-1|t-1}\boldsymbol{H}+\boldsymbol{F}\end{cases} \tag{10}$$

式中:$\hat{x}_{n-1}$为前一时刻柔性关节机械臂位置,Y_n 为卡尔曼增益,$\boldsymbol{F}$ 为状态噪声协方差矩阵,$K_{t|t-1}$为 t 时刻的更新增益,$\boldsymbol{H}$ 为观测矩阵,$\boldsymbol{x}_{n-1}$为前一时刻加速度状态向量,$\dot{\boldsymbol{x}}_{n-1}^{\mathrm{MMSE}}$为前一时刻柔性关节机械臂的方向

向量。

根据上述过程,可确定柔性关节机械臂相对位置和方向约束,为接下来的约束跟随控制提供可靠的信息支撑,从而实现更准确和高效的跟随控制。

1.3　基于机械臂位置和方向约束的跟随控制方法

基于前述确定的柔性关节机械臂位置和方向约束,为同时实现对两种约束的跟随控制,根据机械臂的结构和关节连接方式,应用运动学方程将位置和方向约束作为输入,获取机械臂的实际输出角度 q。随后,设计了一个控制系统,用于对柔性关节机械臂实际输出角度进行跟随控制,以同时满足两种约束。该控制系统由滑模控制器[16]、机械臂系统和干扰观测器组成[17-18],以抵消系统中的非线性因素干扰,提高指数趋近律的控制性能和适应能力,完成精准稳定的柔性关节机械臂约束跟随控制。柔性关节机械臂约束跟随控制的过程如下:

在滑模控制器通过反馈控制策略来调节机械臂的角度之前,首先需要建立柔性关节机械臂动力学方程。机械臂系统提供了对机械臂动力学行为的理论描述,接下来根据拉格朗日方程,将 $\dot{\boldsymbol{x}}_n^{\mathrm{MMSE}}$、$\hat{x}_n$ 作为输入,建立柔性关节机械臂动力学方程,获取柔性关节机械臂系统的实际输出角度 q,即:

$$W(\boldsymbol{M}(\dot{\boldsymbol{x}}_n^{\mathrm{MMSE}})+\boldsymbol{U}(\hat{x}_n))+\boldsymbol{V}(\hat{x}_n)+\vartheta=q \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{M}(\dot{\boldsymbol{x}}_n^{\mathrm{MMSE}})$、$\boldsymbol{U}(\hat{x}_n)$ 分别为正定惯性矩阵与离心力和哥氏力相关矩阵;$\boldsymbol{V}(\hat{x}_n)$ 与 W 分别为机械臂的重力矩阵与控制系统的控制力矩;ϑ 为观测误差。

根据柔性关节机械臂动力学方程来进一步建立干扰观测器,即:

$$T_\alpha=-L(q)\boldsymbol{h}r+W_0 \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{h}$、r、W_0 为辅助向量、干扰观测量、关节控制输入力矩;$L(q)$ 为待定观测增益,满足于 $L(q)=\dfrac{r\boldsymbol{h}}{\boldsymbol{M}(\dot{\boldsymbol{x}}_n^{\mathrm{MMSE}})q}$。

将 r 的估计值设为 $\dot{r}$,干扰观测器的观测误差为 $\vartheta=r-\dot{r}$。根据构建的干扰观测器处理外部干扰 r,使 $\dot{r}$ 根据指数逼近 r,从而使得 ϑ 逼近 0,以有效地减小外界干扰对系统的影响。

采用干扰观测器后,机械臂系统模型动力学方程转变为:

$$\dot{q}=W(\boldsymbol{M}(\dot{\boldsymbol{x}}_n^{\mathrm{MMSE}})+\boldsymbol{U}(\hat{x}_n)^{-1})+\boldsymbol{V}(\hat{x}_n) \tag{13}$$

接下来,采用改进指数趋近律处理误差信号 x。设 q_r 为柔性关节机械臂的期望角度,x 为柔性关节机械臂误差信号,由期望关节角度 q_r 与实际输出关节角度 q 作差所产生,即 $x=q_r-q$。

因为采用传统的指数趋近律对误差信号 x 展开处理,会造成控制系统的抖振现象,对控制系统造成损伤。因此,在指数趋近律中引入非线性补偿器,进行实时补偿,以抵消系统中的非线性因素干扰,从而提高指数趋近律的控制性能和适应能力。改进后的指数趋近律表达式为:

$$\dot{S}=-\bar{\omega}\times\mathrm{sgn}(S)-k\times S\quad \bar{\omega}>0,k>0 \tag{14}$$

式中:设 S 作为趋近律参数,S 与 $\bar{\omega}\times\mathrm{sgn}(\cdot)$ 分别为滑模变量、纯指数趋近项。

采用改进指数趋近律的滑模控制器处理误差信号 x,获得关节控制输入力矩 W_0,即

$$W_0=\dot{S}[\boldsymbol{O}(q_r-q)]=\dot{S}[\boldsymbol{O}x] \tag{15}$$

式中:$\boldsymbol{O}$ 为常数矩阵,该矩阵能够使控制系统具备快速响应性能。

滑模控制器通过反馈控制策略,根据估算得到的位置和方向约束信息来调节机械臂的角度。该控制策略能够有效地抵消系统中的非线性因素干扰,提高指数趋近律的控制性能和适应能力。最后,利用干扰观测器处理机械臂系统输出力矩 W_r,获取机械臂系统力矩的反馈输出,即:

$$W_a=W_\eta+K_\sigma\times W_r \tag{16}$$

式中:W_η 为估计干扰力矩,K_σ 为补偿增益。通过滑膜控制器,控制力矩 W_0 与机械臂系统力矩的反馈输出 W_a 作差,得到控制系统的控制力矩 W,将其输入到式(13)中,在满足机械臂的位置约束和方向约束的同时,实现柔性关节机械臂工作的实际输出角度跟随控制。

综上,完成基于无线加速度传感器网络的柔性关节机械臂约束跟随控制。基于利用无线加速度传感器采集并融合柔性关节机械臂的加速度数据,通过粒子滤波和卡尔曼滤波相结合的混合滤波技术进行估算,获取准确的关节位置、方向约束;基于此,采用滑模控制器通过反馈控制策略,根据约束信息来调节机械臂的角度;并建立干扰观测器,来抵消外部干扰。且针对非线性因素干扰,引入非线性补偿器,进行实时补偿,提高指数趋近律的控制性能和适应能力,完成精准稳定的柔性关节机械臂约束跟随控制。

2　实验与分析

2.1　参数设置

为了验证基于无线加速度传感器网络的柔性关节机械臂约束跟随控制方法的整体有效性,需要对柔性关节机械臂约束跟随控制展开测试。其实验环境如上述图 1 所示,并按其布置方式对无线加速度传感

器进行布置。其所采用 SAED00X25、SAED00X5 和 SAED0001 型号的无线加速度传感器的相关设置如表 1 所示。

表 1 无线加速度传感器设置

型号	量程/g	敏感度/(mV/g)	频率范围/Hz
SAED0001	10	498.5	0.2~20 000
SAED00X5	5	1018.1	0.2~10 000
SAED00X25	0.25	2018.7	0.2~10 000

将 SA1604 采集器通过网线端口与电脑连接，启动 SA1600 采集软件，为了能更加准确地反应机械臂的振动响应，建立项目之后设置通道的采样频率为 1 kHz，设置采集器的采样方式为连续记录的触发方式。

为确保测试所得结果的可靠性，进行测试前，初始设置相关参数，具体如表 2 所示。

表 2 初始参数设置

参数	数值	参数	数值
粒子数目	500	补偿增益	0.1
控制增益	10	学习速率	0.01

2.2 指标设置

因关节角加速度数据是后续控制的数据基础，其结果将直接影响后续的跟踪控制效果，因此基于上述设置，为验证所提方法的有效性，针对关节加速度跟踪指标，对所提方法进行测试，其结果与实际结果越相近，说明其数据越可靠，可有效为后续提供支撑，以提升控制效果。

接着，为验证所提方法的性能，将文献[1]中基于奇异摄动的控制方法、文献[2]中带有输出约束的控制方法和文献[3]中李亚普诺夫的控制方法作为对比方法，选取关节角位置跟踪、关节响应性能超调量、控制稳定性作为测试指标，以实现所提方法有效性的验证。

关节角位置跟踪指标用于评估方法在执行关节运动时，能够准确地跟踪和控制期望的关节角度位置的能力。关节角位置跟踪指标可以衡量系统的控制精度和稳定性，较小的误差表明方法能够实现高精度的关节角位置控制，具有较强的控制性能。

关节响应性能超调量指标用于评估方法在关节运动过程中响应的超调情况，表示方法响应达到峰值时相对于目标位置的超出量。较小的超调量可以表明方法具有快速的响应速度和较好的阻尼特性。

控制鲁棒性指标用于评估方法在约束跟随控制过程中的抗干扰能力。具有较好的鲁棒性意味着在干扰或不确定性条件下，能够维持稳态并保持良好的跟踪能力。该指标可用熵值进行衡量，在不同的干扰或不确定性条件下，其控制结果熵值越低，说明跟踪控制鲁棒性越好。

通过对这些指标进行评估和分析，可以全面了解方法在跟踪控制方面的性能。

2.3 结果分析

为验证所提方法的有效性，针对关节加速度跟踪指标，采用所提出的基于无线加速度传感器网络的柔性关节机械臂约束跟随控制方法对柔性关节机械臂的关节加速度展开测试，其结果如图 2 所示。

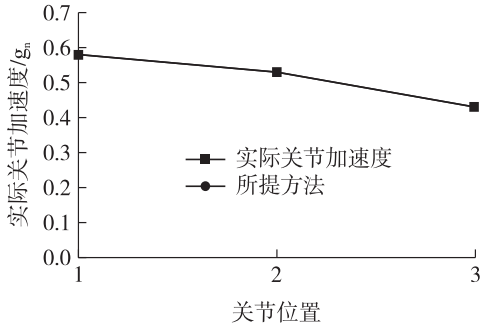

图 2 关节加速度测试结果

根据图 2 所呈现的测试结果可以发现，所提方法对关节加速度的跟踪数值与实际关节的加速度数值相同，表明了所提方法对柔性关节机械臂的关节加速度跟踪比较准确，可有效完成对加速度的获取，以为后续控制提供可靠的数据支撑，以提高控制效果。

为对所提方法展开进一步的测试，先针对关节角位置跟踪指标，将所提方法、文献[1]中基于奇异摄动的控制方法、文献[2]中带有输出约束的控制方法和文献[3]中李亚普诺夫的控制方法展开对比测试，其结果如图 3 所示。

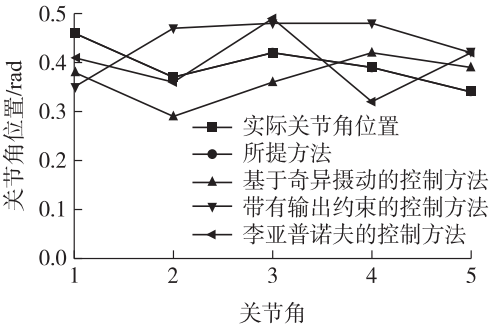

图 3 不同方法的关节角位置跟踪测试

根据图 3 所呈现的测试结果可以发现，所提方法对关节角位置的跟踪数值与实际关节角的位置数值相同，基于奇异摄动的控制方法、带有输出约束的控制方法和李亚普诺夫的控制方法对柔性关节机械臂的关节角位置跟踪存在一定差距，表明了所提方

法对柔性关节机械臂的关节角位置跟踪比较准确,验证了所提方法对于控制柔性关节机械臂具有较强的控制性能。所提方法之所以可准确的对柔性关节机械臂的关节角位置进行跟踪,是因为利用无线加速度传感器采集并融合柔性关节机械臂的加速度数据,并通过粒子滤波和卡尔曼滤波相结合的混合滤波技术对数据进行估算,从而获取准确的关节位置和方向约束。这样可以降低数据采集过程中的误差,提高位置估算的准确性。

利用超调量作为测试指标,采用所提方法、文献[1]中基于奇异摄动的控制方法、文献[2]中带有输出约束的控制方法和文献[3]中李亚普诺夫的控制方法对柔性关节机械臂各关节展开响应性能测试。当该指标的数值越低时,机械臂的关节响应性能越高;当该指标的数值越高时,机械臂的关节响应性能越低。其测试结果如图 4 所示。

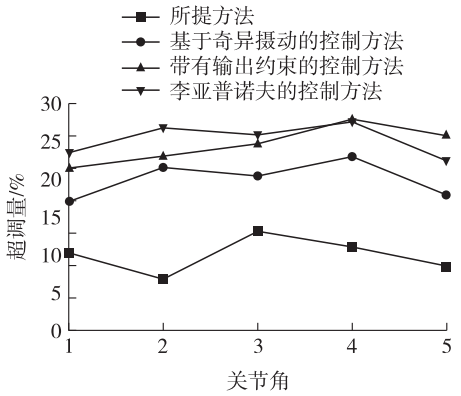

图 4　不同方法的关节响应性能超调量测试

根据图 4 所呈现的测试结果可以发现,所提方法的超调量较低,可有效控制在 20% 以下,而基于奇异摄动的控制方法、带有输出约束的控制方法和李亚普诺夫的控制方法在对柔性关节机械臂展开跟踪控制时,其超调量较高,其最小值分别 23.5%、28.7% 和 24.95。对比四种方法所得结果,得出所提方法的超调量较低,表明所提方法的机械臂关节响应性能较高,具有快速的响应速度和较好的阻尼特性。这是因为所提方法采用滑模控制器通过反馈控制策略,根据估算得到的位置和方向约束信息来调节机械臂的角度,实现对关节角位置的精准控制。滑模控制器能够快速响应系统变化,并具有较好的鲁棒性,有利于降低超调量。

接着,针对鲁棒性指标,分别采用所提方法、文献[1]中基于奇异摄动的控制方法、文献[2]中带有输出约束的控制方法和文献[3]中李亚普诺夫的控制方法对柔性关节机械臂展开跟踪控制,并统计三种方法的熵值结果,如图 5 所示。

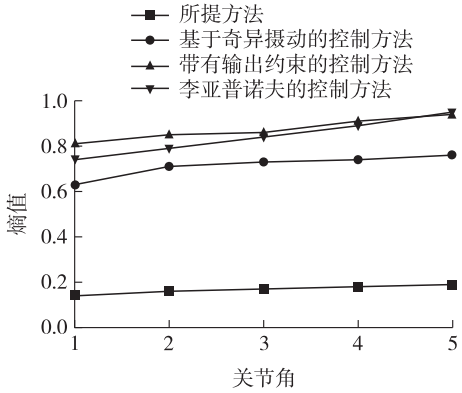

图 5　不同方法的鲁棒性测试

根据图 5 所呈现的测试结果可知,四种方法在噪声干扰逐渐增强的情况下,其熵值结果均呈现出上升的取值,但总体上,所提方法的熵值结果更低。当其噪声干扰达到 50dB 时,其熵值结果为 0.19,基于奇异摄动的控制方法、带有输出约束的控制方法和李亚普诺夫的控制方法的熵值结果分别为 0.76、0.94 和 0.95。对比四种方法结果可得出,所提方法在干扰条件下,其控制结果熵值较低,具有较高的跟踪控制鲁棒性。因为所提方法对柔性关节机械臂的位置和方向展开了估计,克服了不确定性的影响,并利用干扰观测器对外部干扰进行实时监测和抵消,同时在指数趋近律中引入非线性补偿器,进行实时补偿,以抵消系统中的非线性因素干扰,从而提高指数趋近律的控制性能和适应能力,使其具有较好的控制鲁棒性。

3　结束语

针对目前柔性关节机械臂约束跟随控制中所存在的问题,提出一种基于无线加速度传感器网络的柔性关节机械臂约束跟随控制方法。该方法利用无线加速度传感器采集并融合柔性关节机械臂的加速度数据;利用粒子滤波和卡尔曼滤波相结合的混合滤波技术对所融合的数据进行估算,获取准确的关节位置、方向约束;滑模控制器通过反馈控制策略,根据估算得到的位置和方向约束信息来调节机械臂的角度;并建立干扰观测器,用于对外部干扰进行实时监测和抵消。且针对抖振现象,在指数趋近律中引入非线性补偿器,进行实时补偿,以抵消系统中的非线性因素干扰,从而提高指数趋近律的控制性能和适应能力,以实现对柔性关节机械臂实施精准稳定的约束跟随控制。结果表明,所提方法关节角位置的跟踪数值与实际关节角的位置数值相同,关节响应性能超调量可有效控制在 20% 以下,熵值结果为 0.19,具有较高的稳定性,可为未来的研究提供了新的思路和方向。

参考文献：

[1] 欧劲松,李蓉,尹辉,等. 基于奇异摄动的柔性关节机械臂约束跟随控制研究[J]. 应用数学和力学,2023,44(5):513-524.

[2] 陈强,丁科新,南余荣. 带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制[J]. 控制与决策,2021,36(2):387-394.

[3] Prasad A,Sharma B,Vanualailai J,et al. Motion Control of an Articulated Mobile Manipulator in 3D Using the Lyapunov-Based Control Scheme [J]. International Journal of Control,2022,95(9):2581-2595.

[4] 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):38-41,47.

[5] 李德昀,徐德刚,桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. 控制与决策,2021,36(6):1311-1323.

[6] 孙佳鑫,万振凯. CNT 纱线传感器配置算法在健康监测中的应用[J]. 兵器材料科学与工程,2022,45(2):129-133.

[7] 杨傲雷,金宏宙,陈灵,等. 融合深度学习与粒子滤波的移动机器人重定位方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):226-233.

[8] 符强,昌涛,任风华,等. 上下文感知自适应的相关滤波跟踪算法[J]. 计算机仿真,2021,38(12):267-271.

[9] 刘许亮. 基于改进粒子滤波的焊缝磁光成像增强[J]. 电子器件,2023,46(1):96-102.

[10] 邱权,胡青含,樊正强,等. 基于自适应系数卡尔曼滤波的农业移动机器人组合定位[J]. 农业机械学报,2022,53(S1):36-43.

[11] 徐立友,马可,杨晴霞,等. 基于卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估算[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2024,45(1):24-29.

[12] You Y H,Huang C L,Hou J L,et al. Improving the Estimation of Snow Depth in the Noah-MP Model by Combining Particle Filter and Bayesian Model Averaging [J]. Journal of Hydrology,2023,617:128877.

[13] Kanthalakshmi S,Raghappriya M. Active Fault Diagnosis of 2 DoF Helicopter Using Particle Filter-Based Log-Likelihood Ratio[J]. International Journal of Control,2022,95(10-12):3148-3165.

[14] Puri N,Caverly R J. Coupled Least-Squares Forward Kinematics and Extended Kalman Filtering for the Pose Estimation of a Cable-Driven Parallel Robot[J]. International Journal of Mechanisms and Robotic Systems,2023,5(3):270-289.

[15] Li Z,Li S,Liu B,et al. A Stochastic Event-Triggered Robust Cubature Kalman Filtering Approach to Power System Dynamic State Estimation with Non-Gaussian Measurement Noises[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2023,31(2):889-896.

[16] 张世界,魏静,汤宝平,等. 基于变系数滑模控制器的风电机组振动主动控制研究[J]. 太阳能学报,2023,44(5):407-415.

[17] 尚东阳,李小彭,尹猛,等. 基于干扰观测器的含有柔性关节的柔性机械臂抑振策略[J]. 振动与冲击,2022,41(24):125-133,200.

[18] 华长春,陈传虎,陈健楠,等. 基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制[J]. 控制与决策,2022,37(5):1160-1166.

周　达(1977—),男,汉族,福建省福州市人,毕业于厦门大学项目管理专业,厦门华厦学院信息与智能机电学院高级实验师,研究方向:项目管理,计算机网络,创新创业;

陈明明(1979—),女,汉族,黑龙江省鸡西市,硕士毕业于厦门大学无线电物理专业。厦门华厦学院信息与智能机电学院教授。研究方向:通信网络模型构建及优化、大数据系统开发、信息系统工程在商务、人才、教育等领域的应用研究,cmm136452@ yeah.net。