

基于扩张状态观测器的柔性关节动态曲面控制^①贾庆轩^② 黄飞杰 褚 明^③ 孙汉旭

(北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

摘 要 针对柔性关节高精度轨迹跟踪问题,提出了一种基于扩张状态观测器(ESO)的动态曲面控制(DSC)算法。该算法采用 ESO 对系统的状态及不确定项进行观测并反馈补偿,通过设计 Lyapunov 稳定意义下的 DSC 鲁棒控制器来消除系统不确定性的影响。该算法不但无需测量关节角速度,而且避免了常规反演控制算法的“计算膨胀”问题,降低了控制器的复杂度。稳定性分析证明了该算法的误差有界性及收敛性。仿真和实验结果验证了该算法的有效性。

关键词 柔性关节,扩张状态观测器(ESO),动态曲面控制(DSC),鲁棒性

0 引言

机械臂关节一般由伺服电机、谐波减速器、扭矩传感器及相应的测量元件组成,由于谐波减速器、力矩传感器的引入及存在传动过程中的摩擦、变形及干扰,不可避免使关节具有柔性特性,使关节易产生滞后、谐振等问题。而机械臂依靠关节电机转动带动臂杆,从而实现末端执行器的操作与定位,关节处的微小变形及转动误差,经过转换放大到机械臂末端所带来的误差都是不可忽略的。因此,针对关节柔性及扰动等非线性干扰,须采取有效的鲁棒控制策略。本文基于柔性关节动力学模型的研究,提出了一种基于扩张状态观测器(extended state observer, ESO)的动态曲面控制(dynamic surface control, DSC)算法,该算法可应用于机械柔性关节控制,也可扩展应用于一般控制系统。稳定性分析和仿真实验结果验证了该算法的鲁棒性和有效性。

1 相关研究

为了提高柔性关节跟踪控制精度,诸多控制算法被应用于柔性关节控制中,如 PID 控制、反演控制、自适应控制、神经网络控制、滑模控制、模糊控制

以及基于这些算法的复合控制策略。Lee 等^[1]将鲁棒性引入反演控制算法,控制器每一步设计都满足干扰抑制性能,提出鲁棒反演控制算法以补偿关节模型的不确定性;Khoder 等^[2]在控制器设计时引入滤波器及观测器消除了电机及关节角速度测量的需要,采用积分反演算法设计了全局输出反馈控制器;张晓东等^[3]采用模糊控制与逆向设计相结合的方法设计了柔性关节控制器,结果表明与传统的 PID 控制相比,所提出的控制算法提高了关节控制精度,但所需计算量较大;Chang 和 Yen^[4]采用降阶观测器观测系统的状态,结合反演算法设计了柔性关节的鲁棒位置反馈跟踪控制器;Sung 等^[5]采用自回归小波神经网络与动态曲面相结合的输出反馈方法进行柔性关节控制,实验结果表明了所采用算法的鲁棒性和有效性,但需要在线实时更新较多的权值系数;孙汉旭等^[6]基于小波神经-鲁棒复合控制策略,采用全局 Lyapunov 函数的反演方法设计了具有柔性补偿和干扰抑制的控制器,仿真结果表明具有良好的跟踪控制效果;彭济根等^[7]给出了一种基于奇异摄动理论的神经网络控制策略,对降阶柔性关节子系统分别设计快慢控制器,以达到对原柔性关节系统轨迹跟踪控制的目的;Sanjay 等^[8]利用扩张状态观测器观测系统的状态及不确定项并用于反馈补偿,采用反馈线性化技术设计了柔性关节控制器;

① 863 计划(2010AA7090304),国家自然科学基金(61175080)和高等学校博士学科点专项科研基金(20110005120004)资助项目。

② 男,1964 年生,博士,教授,博士生导师;研究方向:机器人学,空间机器人技术和虚拟现实技术;联系人, E-mail: hfjda@sina.com

③ 通讯作者, chuming_bupt@yahoo.com.cn

(收稿日期:2012-09-26)

Withit 等^[9]将 Luenberger 观测器、反演控制、变结构控制以及高阶微分神经网络相结合,设计了柔性关节机械手控制器,克服了摩擦、扰动等非线性因素的影响,且无需测量关节角速度。

将神经网络和模糊控制用于柔性关节控制器设计具有一定的难度和复杂度,采用反演设计不可避免引入由于重复求导所带来的“计算膨胀”问题,其中部分控制算法需要关节速度的测量,不利于关节控制器的实现。本文在考虑关节控制设计难易实现程度及无需速度测量的基础上,提出了基于扩张状态观测器(ESO)的动态曲面控制(DSC)算法,将扩张状态观测器用于控制器设计,可以利用其所观测速度状态进行控制器设计,避免速度传感器的使用及通常通过差分求速度所带来的问题,而且其扩张状态可用于反馈补偿系统不确定性,能提高系统控制性能;通过与动态曲面控制结合,并基于 Lyapunov 稳定意义下设计关节控制器,可进一步消除不确定性的影响,同时避免了反演算法所带来的“计算膨胀”问题,稳定性分析、仿真和实验结果表明算法的有效性。

2 柔性关节动力学模型

通常,机械臂柔性关节组成部分谐波减速器的弹性变形具非线性特征,其弹性变形是关节具有柔性特性的主要因素,在考虑精确建模时需考虑其非线性因素。但是,在建模及控制时将关节柔性等效成一个线性表达式也并非不可取,目前很多研究为了便于控制系统设计及实验,将关节柔性特性简化为线性关系,其具有简单、易实现的特点,也具有良好的控制效果^[3,5,6]。因此,关节柔性的选择问题对于研究者来说是一个较为开放的问题,主要看研究者的研究重点偏向于关节建模还是控制方法,但最终目的都是实现柔性关节的高精度控制性能。

图 1 所示为关节模型,为了便于控制设计及仿真实验,将其柔性简化为一线性扭簧,其动力学方程

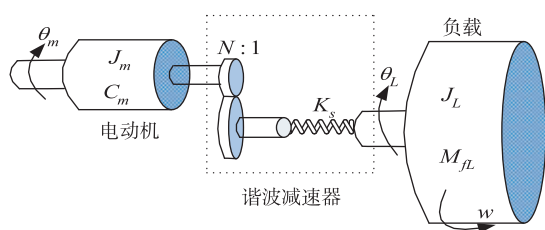


图 1 柔性关节模型

为

$$\begin{cases} J_L \ddot{\theta}_L + M_f(\dot{\theta}_L) + K_s \theta_L + w_L = \frac{K_s}{N} \theta_m \\ J_m \ddot{\theta}_m + C_m \dot{\theta}_m + \frac{K_s}{N} \left(\frac{\theta_m}{N} - \theta_L \right) + w_m = \tau_m \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ_L 为关节输出轴位置, θ_m 为电机轴位置, J_L 为负载惯量, K_s 为扭转弹簧刚度系数, N 为减速比, M_f 为非线性摩擦力矩, J_m 为电机惯量, C_m 为电机的阻尼系数, τ_m 为电机的驱动力矩, w_L 为负载端扰动, w_m 为电机端扰动。

关节模型中摩擦采用经典的非线性 Lugre 鬃毛摩擦模型,其动力学模型由下式描述:

$$\begin{cases} \dot{z} = \dot{\theta}_L - \frac{|\dot{\theta}_L| z}{g(\dot{\theta}_L)} \\ \sigma_0 g(\dot{\theta}_L) = T_c + (T_s - T_c) \exp\left(-\left(\frac{|\dot{\theta}_L|}{\dot{\theta}_s}\right)^2\right) \\ M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{\theta}_L \end{cases} \quad (2)$$

式中, z 为鬃毛的平均变形量, σ_0 为鬃毛刚性系数, σ_1 为滑动阻尼系数, σ_2 为粘性摩擦因数, T_c 为库伦摩擦力矩, T_s 为最大静摩擦力矩, $\dot{\theta}_s$ 为 Stribeck 特征速度。

令 $x_1 = \theta_L, x_2 = \dot{\theta}_L, y_1 = x_1, x_3 = \theta_m, x_4 = \dot{\theta}_m, y_2 = x_3$, 为了便于控制器设计,将关节动力学方程转化为状态空间表达式,则式(1)可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, w_L) + b_1 x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, w_m) + b_2 u \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_3 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $b_1 = \frac{K_s}{NJ_L}, b_2 = \frac{1}{J_m}, u = \tau_m$

$$f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, w_L) = -\left(\frac{M_f}{J_L} + \frac{K_s}{J_L} x_1 + \frac{w_L}{J_L}\right)$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, w_m) = -\left(\frac{C_m}{J_m} x_4 + \frac{K_s}{NJ_m} \left(\frac{x_4}{N} - x_1\right) + \frac{w_m}{J_m}\right)$$

由此看到,可将上述模型分解成两个子系统,即由状态变量 x_1 和 x_2 表征的负载子系统以及由 x_3 和 x_4 表征的电机子系统, f_1 和 f_2 分别表示子系统总不确定性。下面将分别通过扩张状态观测器(ESO)观

测子系统的变量 x_2 、 f_1 及 x_4 、 f_2 , 然后采用动态曲面技术完成关节控制器设计。

3 动态曲面控制(DSC)系统设计

3.1 ESO

ESO 仅需要所观测对象的输入量和输出量作为信息来源,通过 ESO 不仅可以得到系统各个状态变量的估计值且能够估计出不确定模型和外扰的实时作用量,通过反馈可以使对象的不确定性能得以补偿,从而达到重新构造系统和简化控制器设计的目的。

对于一般的系统,有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, w) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, x_1 , x_2 为系统的状态变量, w 为系统扰动, u 为控制输入, y 为系统输出, b 为不等于零的常数, $f(x_1, x_2, w)$ 为系统的有界不确定项。

对于系统的不确定项,一般通过神经网络或自适应等方法逼近,从而降低了控制器设计难度。如果将不确定项视为系统的扩张状态,系统(4)可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \sigma(t) \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\sigma(t)$ 为系统的扩张状态,表示原来系统的不确定项,这样就可以对其进行观测并进行反馈补偿了。

根据 ESO 设计方法,通过选择合适的 α_i , 使 $s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3 = 0$ 的特征根均具有负实部,所设计的扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \frac{\alpha_1}{\varepsilon}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = bu + \hat{\sigma}(t) + \frac{\alpha_2}{\varepsilon}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{\sigma}}(t) = \frac{\alpha_3}{\varepsilon}(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (6)$$

该观测器需要两个输入作为信息来源,即 u 和 x_1 , 分别为所观测系统的输入和输出状态。状态变量 $\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$, $\hat{\sigma}$ 分别为所观测系统中的 x_1 , x_2 及 f 的观测值。其中,为了兼顾跟踪性能与抑制峰值现象,摄

动参数 ε 可取为

$$\frac{1}{\varepsilon} = \begin{cases} a + bt^3, & 0 \leq t \leq t_{\max} \\ c, & t \geq t_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

合理选择 a 的取值可保证观测器的初始跟踪性能,不会因为 a 太小而影响初始观测性能,但又不会因为太大而引起峰值现象,通过选择合适的参数 b 、 c 可进一步保证观测器的跟踪特性。

将 ESO 引入控制系统设计,避免了速度状态变量的测量,同时可实现对系统内扰和外扰总不确定性的估计和补偿。

由上可知,关节控制效果的好坏在很大程度上取决于 ESO 的性能,其收敛性分析可请参看文献[10]。

3.2 DSC 控制器设计

针对上述柔性关节动力学模型,将该系统分解为负载子系统及电机子系统,控制器的设计思想是采用 ESO 分别观测负载子系统及电机子系统的状态,利用观测到的状态进行状态反馈,进一步结合 DSC 逐步完成鲁棒控制器的设计。控制系统设计目标为使状态变量 x_1 趋向于期望的轨迹向量 q_d 。针对柔性关节系统,根据动态曲面控制(DSC)技术的设计方法,分步进行柔性关节控制系统设计。

第一步:定义第一个误差面函数 $S_1 = x_1 - q_d$, 其一阶导数为

$$\dot{S}_1 = \dot{x}_1 - \dot{q}_d = x_2 - \dot{q}_d \quad (8)$$

基于 Lyapunov 函数稳定思想,设计虚拟控制量 $\bar{x}_2$ 使得 $S_1 \rightarrow 0$, 则 $\bar{x}_2$ 可设计为

$$\bar{x}_2 = -k_1 S_1 + \dot{q}_d \quad (9)$$

其中, k_1 为所设计的正常数。为了消除对 $\bar{x}_2$ 求导产生的多阶导数问题,引入另一个状态变量 x_{2f} , 并让虚拟控制量 $\bar{x}_2$ 通过时间常数为 τ_2 的一阶滤波器来得到 x_{2f} , 则滤波后虚拟控制量可表示为

$$\tau_2 \dot{x}_{2f} + x_{2f} = \bar{x}_2, x_{2f}(0) = \bar{x}_2(0) \quad (10)$$

第二步:定义 x_2 与滤波后的虚拟控制量 x_{2f} 之差为第二个误差面函数,可表示为

$$S_2 = x_2 - x_{2f} \quad (11)$$

其一阶导数为

$$\dot{S}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2f} = f_1 + b_1 x_3 - \dot{x}_{2f} \quad (12)$$

以观测器的扩张状态 $\hat{\sigma}_1(t)$ 替代 f_1 , 设计虚拟控制量 $\bar{x}_3$ 使得 $S_2 \rightarrow 0$, 则 $\bar{x}_3$ 可设计为

$$\begin{aligned} \bar{x}_3 &= \frac{1}{b_1}(-k_2 S_2 - f_1 + \dot{x}_{2f}) \\ &= \frac{1}{b_1}(-k_2 S_2 - \hat{\sigma}_1(t) + \dot{x}_{2f}) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, k_2 为所设计的正常数。引入状态变量 x_{3f} , 并让虚拟控制量 $\bar{x}_3$ 通过时间常数为 τ_3 的一阶滤波器来得到 x_{3f} , 则滤波后的虚拟控制量 x_{3f} 可表示为

$$\tau_3 \dot{x}_{3f} + x_{3f} = \bar{x}_3, x_{3f}(0) = \bar{x}_3(0) \quad (14)$$

第三步: 定义 x_3 与滤波后的虚拟控制量 x_{3f} 之差为第三个误差面函数, 可表示为

$$S_3 = x_3 - x_{3f} \quad (15)$$

其一阶导数为

$$\dot{S}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_{3f} \quad (16)$$

设计虚拟控制量 $\bar{x}_4$ 使得 $S_3 \rightarrow 0$, 则 $\bar{x}_4$ 设计为

$$\bar{x}_4 = -k_3 S_3 + \dot{x}_{3f} \quad (17)$$

其中, k_3 为所设计的正常数。引入状态变量 x_{4f} , 并让虚拟控制量 $\bar{x}_4$ 通过时间常数为 τ_4 的一阶滤波器来得到 x_{4f} , 则虚拟控制量 x_{4f} 可表示为

$$\tau_4 \dot{x}_{4f} + x_{4f} = \bar{x}_4, x_{4f}(0) = \bar{x}_4(0) \quad (18)$$

第四步: 定义 x_4 与滤波后的虚拟控制量 x_{4f} 之差为第四个误差面函数, 可表示为

$$S_4 = x_4 - x_{4f} \quad (19)$$

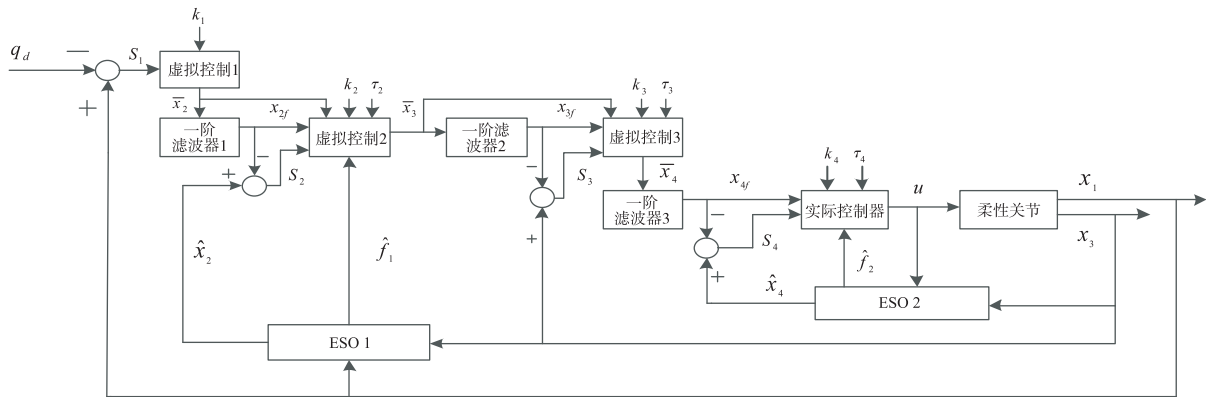


图2 柔性关节动态曲面控制系统结构框图

3.3 稳定性分析

(1) 首先, 定义 $z_2 = -\tau_2 \dot{x}_{2f}$ 。对于 S_1 , 有

$$\dot{S}_1 = S_2 + x_{2f} - \dot{q}_d = S_2 - k_1 S_1 + z_2$$

其次, 定义 $z_3 = -\tau_3 \dot{x}_{3f}$ 。对于 S_2 , 有

$$\dot{S}_2 = f_1 + b_1 x_3 - \dot{x}_{2f} = b_1 S_3 - k_2 S_2 + b_1 z_3 + \varepsilon_1$$

其中, $\varepsilon_1 = f_1 - \hat{f}_1$ 为不确定性观测误差。最后, 定义 $z_4 = -\tau_4 \dot{x}_{4f}$ 。对于 S_3 , 有

$$\dot{S}_3 = S_4 + x_{4f} - \dot{x}_{3f} = S_4 - k_3 S_3 + z_4$$

对于 S_4 , 有

$$\dot{S}_4 = -k_4 S_4 + \varepsilon_2$$

其中, $\varepsilon_2 = f_2 - \hat{f}_2$ 为不确定性观测误差。

(2) 对于 z_2 , 有

其一阶导数为

$$\dot{S}_4 = \dot{x}_4 - \dot{x}_{4f} = f_2 + b_2 u - \dot{x}_{4f} \quad (20)$$

以观测器的扩张状态 $\hat{\sigma}_2(t)$ 替代 f_2 , 设计实际控制量 u 使得 $S_4 \rightarrow 0$, 则 u 可设计为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{b_2} (-k_4 S_4 + \dot{x}_{4f} - f_2) \\ &= \frac{1}{b_2} (-k_4 S_4 + \dot{x}_{4f} - \hat{\sigma}_2(t)) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, k_4 为所设计的正常数。

与传统的反演控制算法相比, 采用动态曲面设计方法克服了虚拟控制量由于反复求导带来的计算膨胀问题, 且结合扩张状态观测器 (ESO), 进一步优化了控制器的设计。本文将以 $\bar{x}_2$, $\bar{x}_3$, $\bar{x}_4$ 为输入的一阶滤波的输出量代替反演控制中需要用的 $\dot{\bar{x}}_2$, $\dot{\bar{x}}_3$, $\dot{\bar{x}}_4$, 降低了系统设计的复杂度, 提高了关节控制策略的可实现性, 所设计的柔性关节控制系统结构框图如图 2 所示。

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \dot{x}_{2f} - \dot{\bar{x}}_2 = \dot{x}_{2f} + k_1 \dot{S}_1 - \ddot{q}_d \\ &= -\frac{z_2}{\tau_2} + k_1 \dot{S}_1 - \ddot{q}_d = -\frac{z_2}{\tau_2} + \delta_1 \end{aligned}$$

其中, $\delta_1 = k_1 \dot{S}_1 - \ddot{q}_d$ 为连续函数。

对于 z_3 , 有

$$\dot{z}_3 = \dot{x}_{3f} - \dot{\bar{x}}_3 = \dot{x}_{3f} + \frac{k_2 \dot{S}_2 + \dot{f}_1 - \ddot{x}_{2f}}{b_1} = -\frac{z_3}{\tau_3} + \delta_2$$

其中, $\delta_2 = \frac{k_2 \dot{S}_2 + \dot{f}_1 - \ddot{x}_{2f}}{b_1}$ 为连续函数。

对于 z_4 , 有

$$\dot{z}_4 = \dot{x}_{4f} - \dot{\bar{x}}_4 = \dot{x}_{4f} + k_3 \dot{S}_3 - \ddot{x}_{3f} = -\frac{z_4}{\tau_4} + \delta_3$$

其中, $\delta_3 = k_3 \dot{S}_3 - \ddot{x}_{3f}$ 为连续函数。

(3) 定义如下 Lyapunov 函数:

$$V_0 = \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2)$$

$$V_1 = \frac{1}{2}(z_2^2 + z_3^2 + z_4^2)$$

所以有

$$\begin{aligned}\dot{V}_0 &= S_1\dot{S}_1 + S_2\dot{S}_2 + S_3\dot{S}_3 + S_4\dot{S}_4 \\ &= S_1(S_2 - k_1S_1 + z_2) + S_2(b_1S_3 - k_2S_2 \\ &\quad + b_1z_3 + \varepsilon_1) + S_3(S_4 - k_3S_3 + z_4) \\ &\quad + S_4(-k_4S_4 + \varepsilon_2) \\ &= \sum_{i=1}^4 (-k_i S_i^2) + S_1S_2 + b_1S_2S_3 + S_3S_4 + S_1z_2 \\ &\quad + b_1S_2z_3 + S_3z_4 + S_2\varepsilon_1 + S_4\varepsilon_2 \\ \dot{V}_1 &= z_2\dot{z}_2 + z_3\dot{z}_3 + z_4\dot{z}_4 = z_2\left(-\frac{z_2}{\tau_2} + \delta_1\right) \\ &\quad + z_3\left(-\frac{z_3}{\tau_3} + \delta_2\right) + z_4\left(-\frac{z_4}{\tau_4} + \delta_3\right) \\ &= \sum_{i=2}^4 \left(-\frac{z_i^2}{\tau_i}\right) + z_2\delta_1 + z_3\delta_2 + z_4\delta_3\end{aligned}$$

定义 $V = V_0 + V_1$, 所以 $\dot{V} = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 =$
 $\sum_{i=1}^4 (-k_i S_i^2) + S_1S_2 + b_1S_2S_3 + S_3S_4 + S_1z_2 + b_1S_2z_3 +$
 $S_3z_4 + S_2\varepsilon_1 + S_4\varepsilon_2 + \sum_{i=2}^4 \left(-\frac{z_i^2}{\tau_i}\right) + z_2\delta_1 + z_3\delta_2 + z_4\delta_3$
 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 均为连续函数, 且有 $|\delta_i| \leq R_i, i = 2,$
 $3, 4$, 即 δ_i 具有上下界, 根据 $S_i S_{i+1} \leq S_i^2 + \frac{1}{4} S_{i+1}^2$ 及
 $Sz \leq S^2 + \frac{1}{4} z^2$, 上式可写为

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq \sum_{i=1}^4 (-k_i S_i^2) + S_1^2 + \frac{1}{4} S_2^2 + b_1 S_2^2 + \frac{b_1}{4} S_3^2 \\ &\quad + S_3^2 + \frac{1}{4} S_4^2 + S_1^2 + \frac{1}{4} z_2^2 + b_1 S_2^2 + \frac{b_1}{4} z_3^2 + S_3^2 \\ &\quad + \frac{1}{4} z_4^2 + S_2^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_1^2 + S_4^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_2^2 + \sum_{i=2}^4 \left(-\frac{z_i^2}{\tau_i}\right) \\ &\quad + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2 + \frac{1}{4} (R_1^2 + R_2^2 + R_3^2) = -(k_1 - 2) S_1^2 \\ &\quad - \left(k_2 - \frac{5}{4} - 2b_1\right) S_2^2 - \left(k_3 - 2 - \frac{b_1}{4}\right) S_3^2 \\ &\quad - \left(k_4 - \frac{5}{4}\right) S_4^2 - \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{5}{4}\right) z_2^2 - \left(\frac{1}{\tau_3} - 1 - \frac{b_1}{4}\right) z_3^2 \\ &\quad - \left(\frac{1}{\tau_4} - \frac{5}{4}\right) z_4^2 + \frac{1}{4} (R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)\end{aligned}$$

取 $k_1^* = k_1 - 2, k_2^* = k_2 - \frac{5}{4} - 2b_1, k_3^* = k_3 -$

$$2 - \frac{b_1}{4}, k_4^* = k_4 - \frac{5}{4}, \tau_2^* = \frac{1}{\tau_2} - \frac{5}{4}, \tau_3^* = \frac{1}{\tau_3} - 1$$

$$- \frac{b_1}{4}, \tau_4^* = \frac{1}{\tau_4} - \frac{5}{4}, \text{ 则上式可写为}$$

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq \sum_{i=1}^4 (-k_i^* S_i^2) + \sum_{i=2}^4 (-\tau_i^* z_i^2) + \frac{1}{4} (R_1^2 + R_2^2 \\ &\quad + R_3^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) \text{ 其中, } k_i^* > 0, i = 1, 2, 3, 4, \tau_i^* > 0, \\ &\quad i = 2, 3, 4. \text{ 取 } \varphi = \frac{1}{4} (R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2), \text{ 选} \\ &\quad \text{取 } \gamma \text{ 满足 } 0 < \gamma < \min[k_1^*, k_2^*, k_3^*, k_4^*, \tau_2^*, \tau_3^*, \tau_4^*], \\ &\quad \text{则 } \dot{V} \leq -2\gamma V + \varphi.\end{aligned}$$

根据引理^[11], 系统是全局一致最终有界稳定的。

4 数值仿真分析

本文将采用 Matlab 对提出的控制算法进行仿真验证, 为了突出所提出控制算法的鲁棒性, 控制器设计所采用的参数均为系统名义值, 被控对象系统参数采用其真实值, 系统仿真参数如表 1、2 所示。

表 1 柔性关节动力学参数

	转动惯量 J (kg · m ²)		扭转刚度 K_s (N · m/rad)	
	名义值	实际值	名义值	实际值
J_m	1.5×10^{-4}	1.73×10^{-4}	0.55×10^4	0.6×10^4
J_L	2×10^{-2}	2.5×10^{-2}	$N = 100$	$C_m = 0.02$

表 2 Lugre 摩擦仿真参数

F_s	F_c	θ_s	σ_0	σ_1	σ_2
(N · m)	(N · m)	(rad/s)	(N · m/rad)	(N · m · s/rad)	(N · m · s/rad)
1.5	2.5	0.001	300	100	10

仿真系统如图 2 所示, 期望轨迹为 $q_d = 0.01 \sin 1.5t$, 设时变干扰为

$$w_l = \begin{cases} 40 \cos(2\pi t), & 2 < t < 4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

$$w_m = \begin{cases} 2 \sin(2\pi t), & 2 < t < 4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

表 3、4 为仿真控制系统设计参数, 采用所提出的算法, 柔性关节动态曲面控制轨迹跟踪仿真效果如图 3 至图 9 所示。

表 3 扩张状态观测器参数

	α_1	α_2	α_3	a	b	c	$t_{\max}$
ESO1	24	188	480	1000	1000	2000	1
ESO2	6	11	6	100	400	500	1

表 4 控制器参数

k_1	k_2	k_3	k_4	$\tau_i (i = 2, 3, 4)$
300	500	500	500	0.001

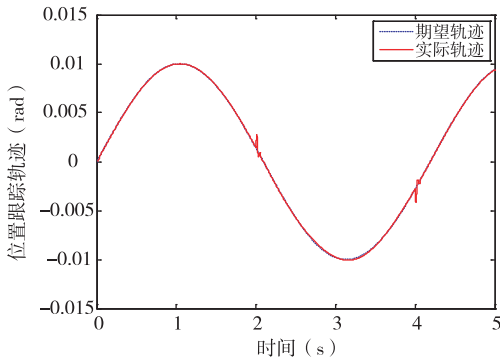


图 3 位置轨迹跟踪

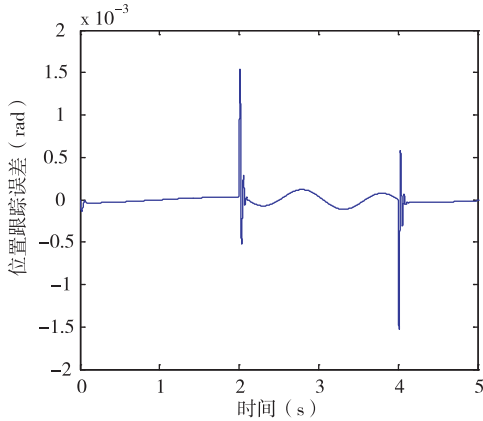


图 4 位置跟踪误差

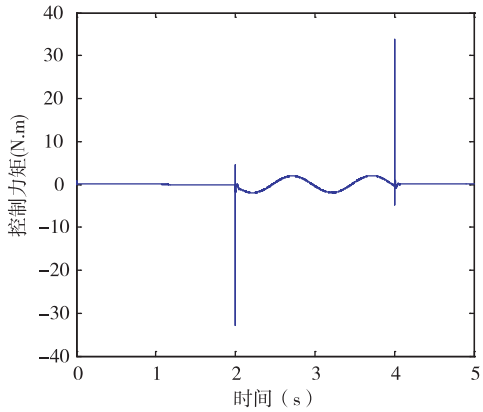


图 5 控制器输出力矩

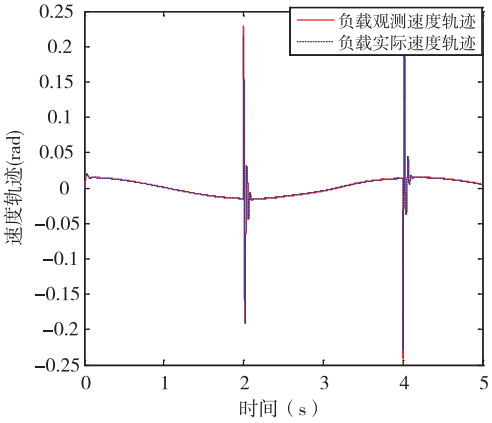


图 6 负载观测速度

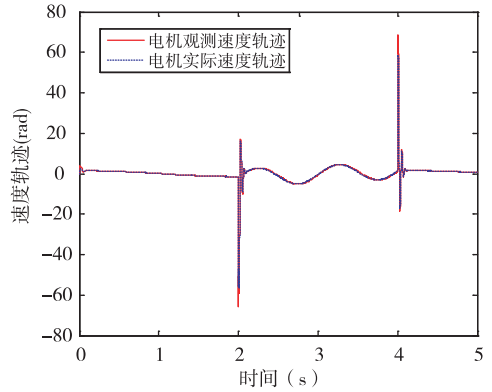


图 7 电机观测速度

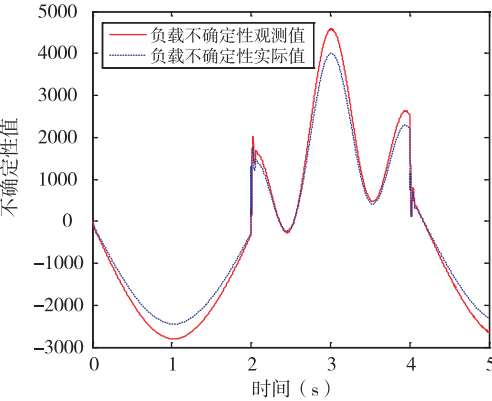


图 8 负载不确定性值

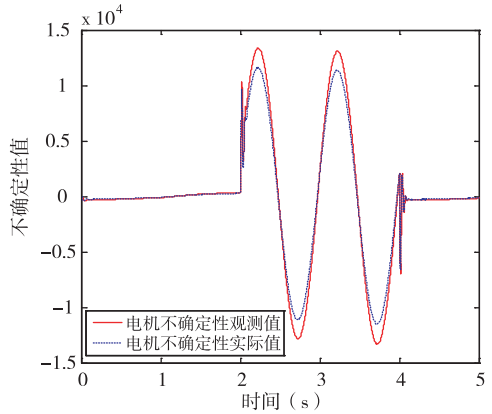


图 9 电机不确定性值

由图3至图5可知,在关节运动前2秒,系统受到扰动较小,控制器能够很好地输出信号,保证关节能够准确地跟踪上期望轨迹,使得跟踪误差收敛于0;在第2秒时,关节受到突然扰动,所设计的控制器能够快速地产生产控制力矩以抑制干扰的影响,并使跟踪误差快速地收敛;第4秒时,系统扰动消失,控制器也能够快速地调整输出控制力矩以便能够精确地跟踪上期望轨迹。由图6和图7也可看到,所设计的ESO在受到扰动影响时,也能很好地估计出所观测的速度状态,保证了系统的跟踪性能;图8与图9为不确定性观测值,由于采用系统名义值设计观测器,使得不确定性观测值与实际值存在偏差,但两者变化趋势一致,再结合DSC方法,可进一步消除不确定性影响,保证了系统的跟踪控制性能。所以,由上图可知,与普通的自适应控制相比较,本方法的自适应过程更快,鲁棒性强,控制器能够灵敏感应出系统的变化并做出相应改变以达到精确跟踪的目的。

5 实验结果与分析

柔性关节的实验平台主要包括伺服电机、驱动器、谐波减速器、圆光栅编码器、光电编码器、PMAC运动控制卡、负载加载盘、计算机等部分,所设计的机械臂柔性关节实验平台如图10所示。圆光栅通过联轴器与关节输出轴相连接,用于测量关节角度;圆光栅的另一端通过联轴器与负载盘相连接,负载盘主要用于负载砝码的加载;谐波减速器与伺服电机集成于一体,光电编码器安装在电机内部,用于测量电机角度信息。

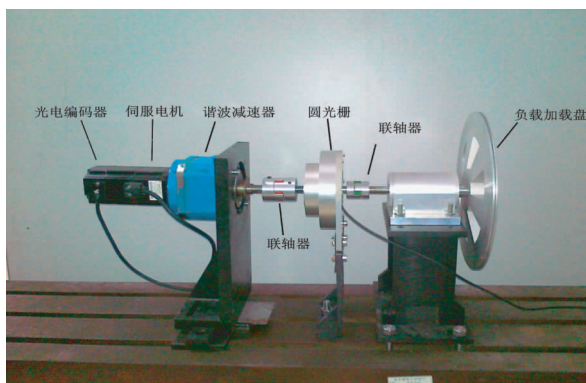


图10 柔性关节实验平台

在该实验系统中,采用既有的硬件及软件完成关节角度、电机角度及速度的获取,实验系统采用上

下位机结构,上位机由计算机和编程软件组成,下位机为PMAC运动控制卡及驱动器,上下位机通过Ethernet进行通讯。现给出实验用到参数如下: $J_L = 1.69 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $J_m = 0.2 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $N = 100$, $K = 7.5 \times 10^3 \text{N} \cdot \text{m/rad}$ 。

令关节期望轨迹为幅值为0.024rad,周期为8s的正弦曲线,则实验效果如图11、图12所示。

由图11和图12可知,关节采用所提出的控制进行正弦轨迹跟踪,最大跟踪误差为 $8 \times 10^{-4} \text{rad}$,跟踪效果较好,能很好地跟踪上期望轨迹,表明所提出算法的有效性。

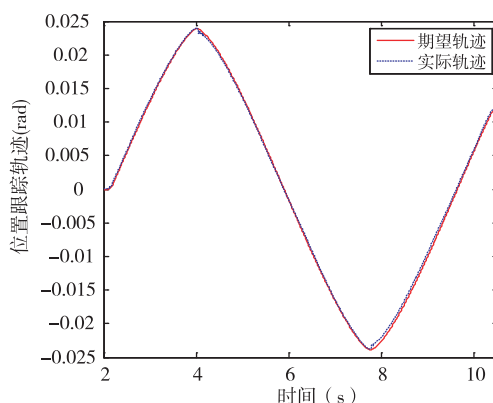


图11 位置轨迹跟踪曲线

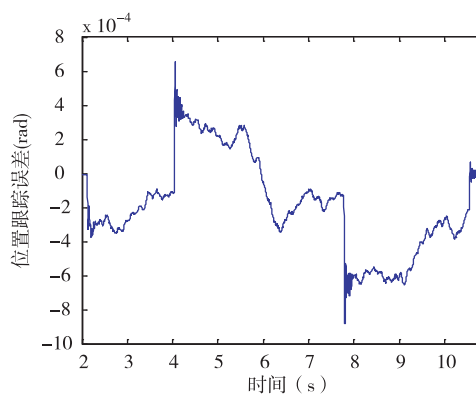


图12 位置轨迹跟踪误差

与文献[1,2,4]采用的自适应反演控制、文献[3]采用的模糊与逆向设计相结合的控制方法相比较,本文提出的算法极大地减少了反演和模糊带来计算量问题,简化了控制器的设计;与文献[5,6,7]采用的神经网络控制方法相比较,本文以ESO替代了神经网络的功能,完成了对系统的扰动补偿及系统速度的测量,结合动态曲面控制技术简化了控制系统的设计,同时保证控制器具有强鲁棒性;与文

献[8]相比较,本文采用在全局 Lyapunov 函数稳定意义下的动态曲面控制方法来逐步进行控制器的设计,较之采用线性反馈控制具有更强的鲁棒性。

6 结 论

本文提出了一种基于扩张状态观测器的动态曲面控制算法,并将该控制算法可应用于机械臂柔性关节的控制,也可扩展应用于一般控制系统。采用所提出的观测器可以观测系统的速度及扰动等状态并用于反馈补偿,避免了速度的测量,简化了控制器设计;将扩张观测器与动态曲面控制结合进行控制器的设计,进一步消除了模型参数漂移、负载及电机扰动等不确定性因素的影响,同时克服了反演控制的“计算膨胀”问题,极大地优化了控制器的设计与实现,稳定性分析和仿真实验结果表明了算法的鲁棒性和有效性。

参考文献

- [1] Lee J Y, Yeon J S, Park J H, et al. Robust back-stepping control for flexible-joint robot manipulator. In: Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, USA, 2007. 183-188
- [2] Khoder M, Wilson W. Golobal. Output tracking control of flexible joint robots via factorization of the manipulator mass matrix. *IEEE Transaction on robotics*, 2009, 25(2): 428-437
- [3] 张晓东,贾庆轩,孙汉旭等. 空间机器人柔性关节轨迹控制研究. *宇航学报*, 2008, 29(6): 1865-1869
- [4] Chang Y C, Yen H M. Design of robust position feedback tracking controller for flexible-joint robots. *IET Control Theory and Applications*, 2011, 5(2): 351-363
- [5] Yoo S J, Park J B, Choi Y H. Adaptive output feedback control of flexible joint robot using neural network; dynamic surface control approach. *IEEE Transaction on Neural Network*, 2008, 19(10): 1712-1726
- [6] 孙汉旭,褚明,贾庆轩. 柔性关节摩擦和不确定补偿的小波神经——鲁棒复合控制. *机械工程学报*, 2010, 46(13): 68-75
- [7] 彭济根,倪元华,乔红. 柔性关节机械手的神经网络控制. *自动化学报*, 2007, 33(2): 175-180
- [8] Sanjay E T, Jayawant P K, Srivijay B P. Extended state observer based control of flexible-joint system with experimental validation. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2010, 57(4): 1411-1419
- [9] Withit C, Peter H M. Backstepping high-order differential neural network control of flexible-joint manipulator. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference, Portland, USA, 2005. 1377-1382
- [10] Khalil H K. Nonlinear System, 3rd edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002
- [11] Zhihua Q, Darren M D, John F D, et al. . A new class of robust control laws for tracking of robots. In: Proceedings of the 31st Conference and Control, Tucson, USA, 1992. 1408-1409.

Dynamic surface control of flexible joints based on extended state observer

Jia Qingxuan, Huang Feijie, Chu Ming, Sun Hanxu

(Automation School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract

For high precision trajectory tracking of flexible joints, a dynamic surface control (DSC) method based on an extended state observer (ESO) was proposed. The method uses an ESO to observe and feed back the states and the total uncertainties of the system, and uses a DSC robust controller designed under the Lyapunov stability to eliminate the uncertainties' influence. The proposed method not only avoids the speed measurement, but eliminates the "calculation explosion" of backstepping, which facilitates the controller design. The stability analysis proved the error boundedness and convergence. Finally, the simulation and experimental results verified the method's validity.

Key words: flexible joint, extended state observer(ESO), dynamic surface control(DSC), robustness