DOI: 10.3901/JME.2020.05.039

桁架式可展开抓取机构展开动力学 建模及其自适应鲁棒控制*

李国涛^{1,2} 李 兵^{1,2} 郭宏伟¹ 黄海林^{1,2}

(1. 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学) 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院 深圳 518055)

摘要: 针对一种新型桁架式可展开抓捕机构的展开运动, 提出该机构的动力学建模方法并设计考虑过约束等非线性因素的控制策略以提高其运动性能。对该桁架式可展开抓取机构进行简要描述, 利用拉格朗日力学并通过递归的方法建立该机构展开运动的动力学模型。利用动力学模型的已知信息, 设计扩张状态观测器以估计机构中的过约束等非线性因素引起的动力学项。使用扩张状态观测器作为补偿项, 提出改进型的自适应鲁棒控制器, 其中, 通过设计非连续映射自适应控制律来估计机构的惯性参数, 通过设计自适应滑模控制律来克服传统自适应鲁棒控制器中的问题。搭建可展开抓取机构的试验平台, 通过与现有的不同控制器的比较试验来验证提出的控制器的有效性。

关键词: 展开机构; 过约束; 动力学建模; 扩张状态观测器; 自适应鲁棒控制

中图分类号: TH113

Deployment Dynamic Modelling and Adaptive Robust Control of Truss-shaped Deployable Grasping Mechanism

LI Guotao^{1,2} LI Bing^{1,2} GUO Hongwei¹ HUANG Hailin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics and System(HIT), Harbin 150001

2. Department of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

Abstract: A dynamic modeling method for the deployment motion of a new type of truss-shaped deployable grasping mechanism is proposed, and a control strategy considering nonlinear factors, such as over-constraints, is designed to improve the motion performance. The truss-shaped deployable grasping mechanism is briefly introduced, and the dynamic model of the deployment motion of the mechanism is established by using Lagrangian mechanics and the recursive method. Using the known information of the dynamic model, an extended state observer is designed to estimate the dynamic part caused by the over-constraints in the mechanism. An improved adaptive robust controller based on extended state observer is proposed, where the inertia parameter of the mechanism is estimated by a discontinuous-projection-based adaptive control law, and the problem of the traditional adaptive robust controller is overcome by proposing an adaptive sliding mode control law. The experimental platform of deployable grasping mechanism is built, and the effectiveness of the proposed controller is verified in comparison with the existing state-of-the-art controllers.

Key words: deployable mechanism; over-constraint; dynamic modelling; extended state observer; adaptive robust control

0 前言

机器人抓取是一项非常重要且具有挑战性的研究方向, 目前已有许多不同的机器人抓取设计方案以满足不同的任务需求^[1-3]。但是, 由于大尺寸目标

抓取需要大尺度的抓取机构, 而大尺度的机构的运输是个亟待解决的问题, 目前为止适用于大尺寸目标抓取的机构方案还比较少。由于可展开的功能可以使得机构具有收缩和展开运动, 因此它可以在运输时处于收紧状态从而减小运输空间。因此, 研究一种方便运输的大型可展开抓取机构显得非常重要。当前机构领域比较热门的研究方向有并联机构^[4]、展开机构^[5]和串并联机构^[6]。但是这三种机构

* 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1613201)。20190115 收到初稿, 20190524 收到修改稿

的任何一种都很难直接用于可展开抓取机构的设计。串并联机构是最接近可展开抓取机构的一种,但是传统的串并联机构由于驱动较多且不具有展开功能也不能直接予以使用。结合这三种机构各自的优点并提出新型可展开抓取机构成为一种解决问题的思路。于是, JIA 等^[7]提出了一种适用于大尺度目标抓取的空间可展开抓取机构的机构综合方法,但该方法综合出来的机构非常复杂且工程化的难度较大,文献中也没有给出试验样机。另外, JIA 的方法是在一定假设的基础上提出来的,只能综合出一类的展开运动和抓取运动运动学耦合的可展开抓取机构。从展开运动和抓取运动解耦的角度出发,结合可展开机构和串并联机构的优点, LI 等^[8-9]提出了一种新型的可展开抓取机构并制作了试验样机,该可展开抓取机构可以实现解耦的展开运动和抓取弯曲运动,并且其多闭环桁架式的结构可以保障该机构在抓取时具有较高的刚度。在假设机构中杆件是刚性和质量均匀分布的情况下,文献[8]中给出了该可展开抓取机构的动力学模型,并基于该模型设计了运动控制器。但在设计该机构时,为了尽可能消除机构关节间隙、变形和震动等因素的影响,在多闭环桁架式结构中引入了过约束机构。过约束的引入将给该机构的静力学分析和动力学建模带来了极大的难度^[10-13]。当前解决过约束问题的方法主要有伪逆方法、考虑变形协调条件的方法、权重广义逆方法等,这些方法非常复杂,并且并没有考虑机构的摩擦、间隙、刚度等特性^[10],因此很难直接应用到机构的控制上面。这使得直接将过约束相关的动力学部分反馈到实时控制中变得非常困难。因此,完全基于模型的控制方法很难考虑到机构中存在的过约束问题。为了解决这个问题,本文将在已知动力学模型的基础上使用扩张状态观测器^[14-16]来估计系统其他动力学,即使用扩张状态观测器降低过约束等因素对机构控制的影响,从而改善该机构的运动性能。针对扩张状态观测器存在的估计误差,本文则采用改进的自适应鲁棒控制技术来解决。不同于传统的自适应鲁棒控制方法^[17-19],本文设计新的自适应滑模控制律降低观测误差对控制性能的影响。结合扩张状态观测器和改进的自适应鲁棒控制方法,可以对可展开抓取机构的过约束等未知因素引起的动力学项进行补偿,从而提高该机构的运动控制效果。

1 展开动力学模型

1.1 可展开抓取机构描述

如图 1 所示,本文给出了可展开抓捕机构的三维设计模型,该机构具有三个基本展开单元,具有

展开运动和抓取运动功能。该机构使用三个电动机进行驱动,其中电动机 1 用来驱动整个机构的展开运动,电动机 2 和 3 用来驱动机构的抓取运动。LI 等^[9]给出了该机构基本展开单元和连接机构的详细描述,这里不再重复。展开功能作为可展开机构的一种基本功能,研究其展开运动与控制对于推广该类机构的应用具有很高的理论和工程参考价值。因此,本文将重点对该机构的展开运动进行动力学建模和控制策略两个方面进行研究。

该可展开抓取机构的展开运动是通过电动机 1 驱动多级剪叉机构来完成的,因此它只需要一个电动机(电动机 1)即可完成整个机构的展开运动的驱动。除非有特殊说明,本文后面内容中的电动机均指电动机 1。图 1 给出了该机构的展开和收缩两个状态。为了保障该机构的刚度和可靠性,在设计该机构的基本展开单元时采用了两个双平行四边形机构来交错布置。但是这也使得其基本展开单元中引入了过约束。过约束的引入具有消除机构关节间隙、变形和震动等效果,但是这也给该机构的静力学分析和动力学建模带来了极大的难度和不确定性因素^[10-13]。

图 1 三基本单元空间可展开抓取机构

1.2 展开运动动力学建模与分析

假设机构中杆件是刚性的、质量均匀分布,在面向空间应用并假设重力影响比较微小的情况下,根据多体动力学,可得该可展开抓取机构的第 i 个基本展开单元的动力学模型如下^[8]

$$M(i, y) \ddot{y} + C(i, y, \dot{y}) \dot{y} + D_1 + D_2 + D_3 + F_{i,2y} = F_{i,1y} \quad (1)$$

式中, $M(i, y)$ 和 $C(i, y, \dot{y})$ 由其所处的基本展开单元的位次 i 、驱动距离 y 和速度 $\dot{y}$ 所决定; D_1 、 D_2 和 D_3 是关于速度 $\dot{y}$ 的函数; $F_{i,1y}$ 是第 i 个基本展开单元的主动驱动力, $F_{i,2y}$ 是第 i 个基本展开单元来自第 $i+1$ 个基本展开单元被动力(详见文献[8])。

式(1)中并没有考虑机构中过约束等因素引起的动力学项, 本文将予以考虑。由于过约束对基本展开单元的展开动力学的影响的精确建模难度很大, 本文中设过约束引起的未知动力学项为 f_{over} , 则第 i 个基本展开单元的动力学模型可以转化为

$$M(i, y)\ddot{y} + C(i, y, \dot{y})\dot{y} + D_1 + D_2 + D_3 + f_{over} + F_{i,2y} = F_{i,1y} \quad (2)$$

由于基本展开单元的主动驱动力和被动力之间是作用力和反作用力关系, 它们的绝对值之间的关系为

$$F_{i-1,2y} = F_{i,1y}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

由于本文中的可展开抓捕机构具有三个基本展开单元, 那么其第 3 个基本展开单元的被动力 $F_{3,2y}$ 为 $F_{3,2y} = 0$, 通过递归的方法可得该机构的展开动力学模型为

$$M_0\ddot{y} + C_0\dot{y} + 3D_1 + 3D_2 + 3D_3 + 3f_{over} = F_{1,1y} \quad (4)$$

M_0 和 C_0 为

$$M_0 = M(1, y) + M(2, y) + M(3, y) \quad (5)$$

$$C_0 = C(1, y, \dot{y}) + C(2, y, \dot{y}) + C(3, y, \dot{y}) \quad (6)$$

设电动机 1 驱动的螺母丝杠的导程为 P , 可得

$$\Delta l = \frac{\Delta\theta_m}{2\pi} P \quad (7)$$

式中, Δl 为相应螺母丝杠驱动长度的微变, $\Delta\theta_m$ 为电动机转动角度的微变。令 η 为螺母丝杠的传递效率, 根据虚功原理可得

$$F_{1,1y}\Delta l = \eta\tau_m\Delta\theta_m \quad (8)$$

式中, τ_m 为电动机的驱动力矩。因此, 可得电动机的驱动力矩为

$$\tau_m = \frac{F_{1,1y}\Delta l}{\eta\Delta\theta_m} = \frac{F_{1,1y}P}{\eta 2\pi} \quad (9)$$

由式(4)、(9)可得

$$\tau_m = M \cdot \ddot{y} + C \cdot \dot{y} + D + f \quad (10)$$

$$M = \frac{M_0 P}{2\eta\pi}$$

$$C = \frac{C_0 P}{2\eta\pi}$$

$$D = \frac{3P}{2\eta\pi} (D_1 + D_2 + D_3)$$

$$f = \frac{3P}{2\eta\pi} f_{over} \quad (11)$$

令 $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$, $u = \tau_m$, 则式(11)可以转化为状态空间方程的形式

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M}u + C \cdot \dot{y} + D + f \end{cases} \quad (12)$$

由于惯性参数 M 对扩张状态观测器的性能具有较大影响, 而 M 本身的计算是在机构系统的名义值的基础上得到的且随着展开运动而变化, 很难得到的其时变真实值。因此, 在本文我们令 $\theta = 1/M$ 并将设计自适应率来逼近其真实值, 以改善扩张状态观测器性能和控制性能, 这样式(12)可以转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \theta u + F_0 + d \end{cases} \quad (13)$$

式中, $F_0 = C \cdot \dot{y} + D$ 为已知的名义动力学项; $d = f$ 为未知动力学项, 主要包括过约束、摩擦和质量不均匀分布等因素引起的动力学。

2 扩张状态观测器

2.1 扩张状态观测器的设计

由于 HAN 等^[14]提出的扩张状态观测器设计方法仅仅需要很少的系统动力学信息, 且实施难度低, 简单实用, 本文将设计线性扩张状态观测器来估计系统中的未知动力学项 d 。不失一般性, 在设计该扩张状态观测器之前, 我们对系统给出如下的假设。

假设 1: 系统中的未知动力学项的导数是有界的, 即 $|\dot{d}| \leq \delta$, δ 为已知常数; 且参数 θ 的取值范围如下

$$\theta \in \Omega_\theta \triangleq \{\theta : \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}\} \quad (14)$$

式中, $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 均为已知常数。

为了设计扩张状态观测器, 定义一个新的变量 $x_3 = d$, 并将式(13)转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \theta u + F_0 + x_3 \\ \dot{x}_3 = \dot{d} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)可以整理为矩阵形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{\Phi} + \mathbf{G}u + \mathbf{\Lambda}(t) \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (16)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{\Lambda}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

根据式(16), 可以将扩张状态观测器设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \Phi + G(\theta)u + L(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\hat{x} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_3]^T$ 是矢量 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 的估计值; $G(\hat{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\theta} & 0 \end{bmatrix}^T$, 其中 $\hat{\theta}$ 可由后面设计的非连续映射自适应控制律式 (19) 得到; $L = \begin{bmatrix} 3\omega_0 & 3\omega_0^2 & \omega_0^3 \end{bmatrix}^T$ 是扩张状态观测器的增益矩阵, 其中 ω_0 是扩张状态观测器唯一的增益参数, 通过调节 ω_0 可以调节扩张状态观测器的性能。

2.2 扩张状态观测器的稳定性证明

定理 1: 在满足假设 1 的情况下, 存在正增益参数 ω_0 使得不等式 $|\tilde{x}_i| = |\hat{x}_i - x_i| \leq \iota, i=1,2,3$ 在有限时间内成立, 其中 ι 表示最大的估计误差。

证明: ZHENG 等^[20]在假设未知动力学项导数有界的情况下给出了传统线性扩张状态观测器的稳定性和收敛性证明, 本文仅有已知动力学项 Φ 与之不同, 根据文献[20]可以很方便地证明定理 1, 在此不再给出详细证明过程。

3 展开运动控制器设计

3.1 非连续映射自适应控制律

根据 XU 等^[21-22]的工作, 定义参数 θ 的估计值为 $\hat{\theta}$, 并定义参数 θ 的估计误差为 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$, 那么, 非连续映射 $\text{Proj}_{\hat{\theta}}(a)$ 可以写为如下的形式

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}}(a) = \begin{cases} 0 & \hat{\theta} = \theta_{\max} & a > 0 \\ 0 & \hat{\theta} = \theta_{\min} & a < 0 \\ a & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中, a 表示相应的参数。因此, 非连续映射自适应控制律可以设计为

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau) \quad (19)$$

式中, $\hat{\theta}$ 满足 $\theta_{\min} \leq \hat{\theta} \leq \theta_{\max}$, $\Gamma > 0$ 是增益参数, τ 是待设计的自适应函数, 后面将给出。对于任意自适应函数 τ , 下面的性质都成立^[22]

$$\hat{\theta} \in \Omega_{\hat{\theta}} \triangleq \{\hat{\theta} : \theta_{\min} \leq \hat{\theta} \leq \theta_{\max}\}$$

$$\tilde{\theta}^T (\Gamma^{-1} \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau) - \tau) \leq 0 \quad \forall \tau$$

3.2 改进型自适应鲁棒控制器设计

自适应鲁棒控制方法可以用于同时处理参数不确定性和非结构不确定性, 其中, 自适应控制律可以用来降低参数不确定性引起的影响, 鲁棒反馈项可以用来处理非结构不确定性^[21]。但是, 现有的自适应鲁棒控制方法鲁棒反馈项只是简单的线性形

式^[18]。因此, 本文将为可展开抓取机构的展开运动提出改进的自适应鲁棒控制方法, 并利用扩张状态观测器补偿系统未知动力学项, 提高机构的展开运动控制性能。定义位置跟踪误差变量为

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (20)$$

为控制器设计需要, 定义一个新的跟踪误差变量为

$$z_2 = \dot{z}_1 + k_1 z_1 = x_2 - x_{eq} \quad (21)$$

式中, $x_{eq} = \dot{x}_{1d} - k_1 z_1$, k_1 是一个正增益参数。

设计控制器的目的是使机构的位置跟踪误差 z_1 在一定时间内收敛到零或一个很小的区域。由于 $G(s) = z_1(s)/z_2(s) = 1/(s + k_1)$ 是位置跟踪误差变量 z_1 和 z_2 之间的传递函数, 使得 z_2 收敛到零也会使 z_1 收敛到零成立。因此, 本文的设计目的可以转化为使得 z_2 尽可能收敛到零。

对变量 z_2 进行微分, 可得

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{eq} = \theta\varphi + F_0 + x_3 - \dot{x}_{eq} \quad (22)$$

式中, φ 定义为 $\varphi = u$ 。

使用动力学模型中已知的名义动力学项 F_0 , 设计扩张状态观测器来估计得到 $\hat{x}_3$ 并用于补偿系统中的未知动力学项; 为了处理机构系统中的存在参数不确定性和非参数化不确定性因素, 基于扩张状态观测器, 本文提出的改进型的自适应鲁棒控制器为

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{\hat{\theta}}(u_a + u_s) \\ u_a &= \dot{x}_{eq} - F_0 - \hat{x}_3 \\ u_s &= u_{s1} + u_{s2} \\ u_{s1} &= -k_2 z_2 \end{aligned} \quad (23)$$

式中, u_a 项包含了已知的动力学项 F_0 和扩张状态观测器估计得到的动力学项 $\hat{x}_3$; 参数不确定性可通过 $\hat{\theta}$ 项来处理; u_{s1} 用于对名义系统进行镇定; u_{s2} 是新设计的自适应滑模控制项, 可以用于减小观测器误差和非结构不确定性对控制性能的影响。

将式(23)代入式(22)可得

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \theta\varphi + F_0 + x_3 - \dot{x}_{eq} = \\ &= -\tilde{\theta}u + \hat{\theta}u + F_0 + x_3 - \dot{x}_{eq} = \\ &= -\tilde{\theta}u - k_2 z_2 + u_{s2} + \tilde{x}_3 = \\ &= -k_2 z_2 + u_{s2} - \tilde{\theta}\varphi + \tilde{x}_3 \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $\tilde{x}_3 = x_3 - \hat{x}_3$ 为观测器估计误差; $\varphi = u$ 是将在自适应控制律中使用的回归函数。

根据定理 1, 在选择合适增益参数 ω_0 的情况下

扩张状态观测器存在一定的估计误差。与传统的基于观测器的自适应鲁棒控制方法^[18]不同, 为了减小扩张状态观测器的估计误差对控制系统带来的影响, 本文提出了一种自适应滑模控制律来设计控制项 u_{s2} , 其具体形式如下

$$u_{s2} = -k_s \operatorname{sgn}(z_2) \quad (25)$$

$$\dot{k}_s = \alpha |z_2| \operatorname{sgn} \left(|z_2| - \frac{k_s^2}{\beta} \right) \quad (26)$$

注 1: 与 YAO 等^[18]提出的基于扩张状态观测器的自适应鲁棒控制方法相比, 本文提出了一种自适应滑模控制律 u_{s2} 来代替原来的鲁棒项。自适应滑模控制律具有更好的收敛和调节性能, 从而保障更好的控制效果。

由于自适应滑模控制律 u_{s2} 中存在 $\operatorname{sgn}(z_2)$ 项, 控制输入信号可能会出现震颤现象。为了避免震颤现象的出现, 在实际实施过程中可以使用边界层 $\operatorname{sat}(z_2, \Phi)$ 来替换不连续函数 $\operatorname{sgn}(z_2)$

$$\operatorname{sat}(z_2, \Phi) = \begin{cases} \frac{z_2}{|z_2|} & |z_2| > \Phi \\ \frac{z_2}{\Phi} & |z_2| < \Phi \end{cases} \quad (27)$$

式中, Φ 是调节参数。

3.3 控制器稳定性证明

定理 2: 在满足假设 1 的情况下, 若设计张观测器为式(17), 设计自适应控制律为式(19)且令 $\tau = \varphi z_2$, 并设计改进型自适应鲁棒控制器为式(23)和式(25)、(26), 那么在通过选择合理增益参数使得 $\|z_2\|_\infty \beta < |\tilde{x}_3^+ - \tilde{x}_3|^2$ 成立的情况下, 本文所设计的控制器是最终一致有界的。

证明: 首先, 选择正定的李亚普诺夫函数 V 为

$$V = \frac{z_2^2}{2} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \frac{1}{2\alpha} (k_s - \tilde{x}_3^+)^2 \quad (28)$$

式中, $\tilde{x}_3^+$ 表示观测器估计误差 $\tilde{x}_3$ 的最大值。

接下来, 本文对所设计的自适应鲁棒控制律进行分析。如果滑模面参数 z_2 满足条件 $|z_2| \leq \frac{k_s^2}{\beta}$, 那么 z_2 自然而然地就是最终一致有界的, 所以下面重点讨论滑模面 z_2 是处于范围 $|z_2| > \frac{k_s^2}{\beta}$ 之中的情况。

如果 $|z_2| > \frac{k_s^2}{\beta}$, 可得 $k_s < \sqrt{|z_2| \beta}$ 。根据式(26), 可知参数 k_s 是以 $\dot{k}_s = \alpha |z_2|$ 的速度的递增的。参数 k_s 可达的最大值为 $k_s^+ = \sqrt{\|z_2\|_\infty \beta}$, 其中 $\|z_2\|_\infty$ 是变量 z_2 的无穷范数。

根据式(24), 可知变量 z_2 的一阶导数为

$$\dot{z}_2 = -k_2 z_2 + u_{s2} - \tilde{\theta} \varphi + \tilde{x}_3 \quad (29)$$

根据性质 $\tilde{\theta}^T (\Gamma^{-1} \operatorname{Proj}_\theta (\Gamma \tau) - \tau) \leq 0$, 可得李亚普诺夫函数 V 的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & z_2 \dot{z}_2 + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{\alpha} (k_s - \tilde{x}_3^+) \dot{k}_s = \\ & -k_2 z_2^2 + z_2 (u_{s2} - \tilde{\theta} \varphi + \tilde{x}_3) + \\ & \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{\alpha} (k_s - \tilde{x}_3^+) \dot{k}_s \end{aligned} \quad (30)$$

对式(30)进一步处理可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_2 z_2^2 + z_2 (-k_s \operatorname{sgn}(z_2) + \tilde{x}_3) + \\ & \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (\dot{\tilde{\theta}} - \Gamma \tau) + |z_2| (k_s - \tilde{x}_3^+) \leq \\ & -k_2 z_2^2 - k_s |z_2| + |z_2| (k_s - (\tilde{x}_3^+ - \tilde{x}_3)) \leq \\ & -k_2 z_2^2 - k_s |z_2| + |z_2| (k_s - |\tilde{x}_3^+ - \tilde{x}_3|) \end{aligned} \quad (31)$$

如果选择合理的参数 β 得到它满足不等式

$$\|z_2\|_\infty \beta < |\tilde{x}_3^+ - \tilde{x}_3|^2, \text{ 则可以得到}$$

$$k_s < k_s^+ = \sqrt{\|z_2\|_\infty \beta} < |\tilde{x}_3^+ - \tilde{x}_3| \quad (32)$$

将式(32)代入式(31)可得

$$\dot{V} < -k_2 z_2^2 - k_s |z_2| < 0 \quad (33)$$

综上, 可以证明本文所设计的控制器是最终一致有界的。

4 试验

4.1 试验台搭建

为了验证本文所提出的控制器及其在可展开抓取机构上的应用, 我们设计并制作了一个具有三个基本展开单元的可展开抓取机构。为了验证该可展开抓取机构在空间应用中的性能, 我们通过设计万向轮使得可展开抓取机构在平行地面的平面范围内运动, 从而降低重力对机构操作控制的影响。另外, 我们设计了可展开抓取机构的控制系统, 使用主控计算机控制 dSPACE 控制器, 并使用 dSPACE 控制器通过差分模拟量的形式来控制 Copley 电动机驱动器, Copley 电动机驱动器采集到的电动机编码器的位置信号通过四线的方式反馈到 dSPACE 控制器以实现闭环控制, 最终通过电动机 1 驱动机构完成整个机构的展开和收回运动。可展开抓取机构试验台如图 2 所示。在本文试验中, 我们设置控制周期信号为 $T = 1 \text{ ms}$ 。另外, 图 3 给出了试验中可展开抓取机构拥有的最大收紧状态和最大展开状态, 并给出了相应的尺寸。

图2 可展开抓取机构试验台

(a) 收缩状态

(b) 展开状态

图3 可展开抓取机构展开过程

4.2 试验验证

为了验证本文所提出的控制器性能，本文将它和现有同类的控制器和无扩张状态观测器作为反馈的控制器进行对比，以说明所提出的控制器的有效性和相对的控制性能。这三种控制器的设计和增益参数的设置具体如下。

(1) 控制器 1：我们将本文提出的控制器定义为控制器 1。设置扩张状态观测器式(17)的增益为 $\omega_0 = 20$ ；设置自适应控制律式(19)的增益为 $\Gamma = 1.5$ ，参数 θ 的最大值为 $\theta_{\max} = 0.045$ ，最小值 $\theta_{\min} = 0.005$ ，初始值 $\theta_{\text{initial}} = 0.025$ ；设置自适应鲁棒控制器式(23)的增益为 $k_1 = 1$ 和 $k_2 = 0.0029$ ，其自适应滑模控制律式(25)、(26)的增益为 $\alpha = 0.008$ 和 $\beta = 0.001$ 。

(2) 控制器 2^[18]：我们将 YAO 等^[18]提出的使用观测器作为补偿的自适应鲁棒控制器定义为控制器 2。该控制器中不含本文提出的自适应滑模控制律式(25)、(26)，控制器中的其他部分(包括扩张状态观测器)的设计和增益参数设置都与控制器 1 的相同。

(3) 控制器 3：该控制器除了无扩张状态观测器式(17)作为反馈之外，其他部分的设计和增益参数

设置与控制器 1 的设置完全相同。

为了定量地评价所设计的控制器的性能，并与其他控制器相比较，我们现给出如下的三个控制性能评价指标^[23]。

(1) 平均绝对误差值：即绝对误差的平均值，其计算公式为 $\frac{1}{n} \int |e(t)| dt$ ，式中 n 为采集的误差值的个数。

(2) 绝对误差积分：即绝对误差的积分值，其计算公式为 $\int |e(t)| dt$ 。

(3) 平方误差积分：即平方误差的积分值，其计算公式为 $\int (e(t) - e_0)^2 dt$ ，式中 e_0 表示误差的平均值。

设置电动机 1 的参考轨迹为 $x_{d1} = 8\pi + 8\pi \sin(\pi t/30 - \pi/2)$ ，单位为 rad。在该参考轨迹下，该可展开抓取机构的展开运动过程和收回过程均为 30 s。图 4 给出了在三种不同的控制策略下可展开抓取机构的展开运动驱动电动机的角度轨迹跟踪误差 $\Delta\theta$ ，单位为 $^\circ$ 。从图 4 的结果可以看出本文提出的改进型自适应鲁棒控制器(控制器式(1))获得的跟踪误差是三种控制器中最小的，这说明了本文所设计的控制器的有效性。为了说明控制器性能对比的合理性，图 5 给出了三种控制器的控制输入信号，我们可以看到这三种控制器的控制输入信号都是稳定有界的，并且三种控制输入具有差不多的高频信号，这说明三种控制器是在控制输入能量消耗差不多的情况下进行比较的。

图4 不同控制器下的跟踪误差情况

图5 不同控制器下的控制输入情况

为了进一步说明所设计的控制器在驱动桁架式可展开抓取机构的展开运动时的控制性能, 表 1 给出了三种控制器的不同控制性能评价指标的试验结果, 其中包括平均绝对误差值、绝对误差积分和平方误差积分。从这些试验数据可以看出本文所设计的控制器在三种控制性能评价指标中都是最好的, 这一定程度地说明了所设计的控制器在轨迹跟踪精度和稳定性等方面均有一定的优越性。

表 1 控制性能评价

评价指标	平均绝对 误差	绝对误差 积分	平方误差 积分
控制器 1	0.312 9	1.9×10^4	6.3×10^3
控制器 2	0.624 1	3.8×10^4	2.5×10^4
控制器 3	1.246 0	7.7×10^4	1.0×10^5

5 结论

(1) 针对一种新型桁架式可展开抓捕机构, 利用拉格朗日力学并通过递归的方式建立了该机构展开运动的动力学模型。机构的过约束等非线性因素引起的动力学部分也在建模时给予了考虑, 以便设计合理的控制策略。

(2) 利用建立的展开动力学模型信息, 设计了扩张状态观测器来估计机构中的过约束和其他因素引起的动力学部分, 从而降低了系统建模的难度。

(3) 利用扩张状态观测器作为补偿工具, 提出了一种改进型的自适应鲁棒控制器, 其中, 设计了非连续映射自适应控制律来估计机构的惯性参数, 设计了自适应滑模控制律改善传统的自适应鲁棒控制器的鲁棒控制项, 并完成了试验验证。本文的研究将机构动力学模型、扩张状态观测器、自适应鲁棒控制和滑模控制等方法进行了深度融合, 对复杂机械系统的动力学建模和控制系统设计具有一定的理论参考和工程指导意义。

参 考 文 献

[1] GREBENSTEIN M, CHALON M, FRIEDL W, et al. The hand of the DLR hand arm system: Designed for interaction[J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 31(13): 1531-1555.

[2] LI Changsheng, GU Xiaoyi, REN Hongliang. A cable driven flexible robotic grasper with lego-like modular and reconfigurable joints[J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2017, 22(6): 2757-2767.

[3] FIROUZEH A, PAIK J. Grasp mode and compliance control of an under-actuated origami gripper using adjustable stiffness joints[J]. IEEE/ASME Transaction on

Mechatronics, 2017, 22(5): 2165-2773.

[4] WANG Congzhe, FANG Yuefa, GUO Sheng. Multi-objective optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified differential evolution algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(4): 702-715.

[5] QI Xiaozhi, HUANG Hailin, MIAO Zhihui, et al. Design and mobility analysis of large deployable mechanisms based on plane-symmetric bricard linkage[J]. Transactions of the ASME: Journal of Mechanical Design, 2016, 139(2): 022302.

[6] ZENG Qiang, FANG Yuefa. Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 49(3): 198-215.

[7] JIA Guanglu, HUANG Hailin, LI Bing, et al. Synthesis of a novel type of metamorphic mechanism module for large scale deployable grasping manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 128: 544-559.

[8] LI Guotao, HUANG Hailin, GUO Hongwei, et al. Dynamic modeling and control for a deployable grasping manipulator[J]. IEEE Access, 2019, 7: 23000-23011.

[9] LI Guotao, HUANG Hailin, GUO Hongwei, et al. Design, analysis and control of a novel deployable grasping manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 138: 182-204.

[10] LIU Wenlan, XU Yundou, YAO Jiantao, et al. Methods for force analysis of overconstrained parallel mechanisms: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1460-1472.

[11] 王向阳, 郭盛, 曲海波, 等. 并联机构驱动力优化配置方法及应用研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 32-41.

WANG Xiangyang, GUO Sheng, QU Haibo, et al. Force analysis of lower-mobility parallel mechanisms with over-constrained couples[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 32-41.

[12] XU Yundou, LIU Wenlan, YAO Jiantao, et al. A method for force analysis of the overconstrained lower mobility parallel mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 88: 31-48.

[13] 赵燕, 黄真. 含过约束力偶的少自由度并联机构的受力分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 15-21.

ZHAO Yan, HUANG Zhen. Force analysis of lower-mobility parallel mechanisms with over-constrained couples[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 15-21.

[14] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics,

- 2009, 56(3): 900-906.
- [15] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.
- [16] LI Guotao, XU Wenfu, ZHAO Jianguo, et al. Precise robust adaptive dynamic surface control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer[J]. IET Science Measurement and Technology, 2017, 11(5): 590-599.
- [17] YAO Bin, BU Fanping, REEDY J, et al. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: Theory and experiments[J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2000, 5(1): 79-91.
- [18] YAO Jianyong, JIAO Zongxia, MA Dawei. Adaptive robust control of DC motors with extended state observer[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3630-3637.
- [19] YAO Jianyong, DENG Wenxiang, JIAO Zongxia. Adaptive control of hydraulic actuators with LuGre model-Based friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6469-6477.
- [20] ZHENG Qing, GAO L Q, GAO Zhiqing. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics[C]// The 46th IEEE Conference on Decision and Control, December 12-14, 2007, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE, 2008: 3501-3506.
- [21] XU Li, YAO Bin. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: Theory and experiments[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(4): 444-452.
- [22] GOODWIN G C, MAYNE D Q. A parameter estimation perspective of continuous time model reference adaptive control[J]. Automatica, 1987, 23(1): 57-70.
- [23] NA Jing, CHEN Qiang, REN Xuemei, et al. Adaptive prescribed performance motion control of servo mechanisms with friction compensation[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 486-494.
-
- 作者简介: 李国涛, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为可展开抓取机构设计、动力学建模与分析、自适应鲁棒控制和自抗扰控制等运动控制方法。
E-mail: lghitsz@163.com
- 李兵(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人学、并联机床和并联隔振平台、空间可展开抓取机构、护理机器人等。
E-mail: libing.sgs@hit.edu.cn