

2-DOF 绳索驱动并联机构轨迹跟踪控制

姜雷杰[†], 高丙团, 刘传德, 朱振宇

(东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

摘要: 基于PD控制和前馈控制方法,对2-DOF的绳索驱动并联机构的空间运动控制问题进行研究. 首先,基于拉格朗日方程建立系统的空间运动数学模型. 为了保证所有绳索在机构的工作空间范围内始终处于张紧状态,绳索内力原则被应用于所提的控制方法中. 然后,基于李雅普诺夫稳定性理论,给出闭环系统的稳定性证明. 最后,为了检验所提控制策略的正确性,给出仿真和实验结果. 仿真和实验结果的近似一致性证明了所提控制策略的有效性和合理性.

关键词: 绳索驱动; 拉格朗日方程; PD控制; 前馈控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Trajectory tracking control of a 2-DOF cable-driven parallel mechanism

JIANG Lei-jie[†], GAO Bing-tuan, LIU Chuan-de, ZHU Zhen-yu

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The space motion control problem of a 2-DOF cable-driven parallel mechanism is studied based on PD control and feed-forward control method. Firstly, the space motion mathematical model of the system is formulated based on the Lagrange's equation. In order to ensure that all the cables have always remained in tension in the workspace of the mechanism, the cable internal force principle is applied to the proposed control method. Then, based on the Lyapunov stability theory, the stability of the closed-loop system is proved. Finally, to test the correctness of the proposed control strategy, simulation and experiment results are given. Approximate consistency between simulation and experimental results proves the validity and the rationality of the proposed control strategy.

Keywords: cable-driven; Lagrange's equation; PD control; feed-forward control; trajectory tracking

0 引言

绳索驱动并联机构是一类利用绳索代替刚性杆驱动的并联机构. 在绳索驱动机构中,末端执行器使用数根绳索连接到定平台上,通过调节绳索长度或绳索拉力去驱动末端执行器向期望的位置和方向运动. 这种结构特性决定了绳索驱动并联机构相较于常规驱动机构具有操纵性快^[1]、工作空间大^[2-3]、负载/质量比高^[4]等许多优点. 鉴于这些优点,起源于起重机系统的绳索驱动机构技术已经成为机器人领域的一个研究热点^[5-6]. 绳索驱动并联机构包括绳索驱动平面机构和绳索驱动空间机构,然而绳索驱动空间机构中大多是绳索悬吊并联机构. 本文提出能够实现横滚和俯仰两个自由度运动的绳索驱动

并联机构,其属于绳索驱动空间机构中带有支撑物的绳索驱动并联机构. 绳索驱动并联机构已经有成功的应用,例如用于电视广播行业的RoboCrane^[7]和SkyCam^[3]. 500-m口径球面望远镜(FAST)通过6根驱动绳索实现位置的粗调,通过相关研究,研究者获得了一系列研究成果^[8-9]. 因为绳索软而轻且能够传输强有力的驱动力,所以绳索通常被用于驱动软体仿生机构^[10],例如仿生象鼻^[11]和仿生头足类动物^[12]等.

绳索代替刚性杆使得绳索驱动并联机构相较于传统并联机构在动力学控制方面具有了新的挑战. 与刚性杆不同,绳索只能提供拉力,因此绳索在机构的工作空间内应该始终保持张紧状态,一旦绳索松弛,机构的结构就会瓦解^[13]. 鉴于以上特点,很

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2018-01-25.

基金项目: 东南大学优秀青年教师科研计划项目(2242015R30024); 江苏省“六大人才高峰”第十一批高层次人才计划项目(2014-ZBZZ-001).

责任编委: 程龙.

作者简介: 姜雷杰(1988—),男,博士生,从事电机驱动、智能控制和系统的研究; 高丙团(1981—),男,教授,博士生导师,从事非线性系统的建模与控制、机器人与自动化、新能源发电与电力需求侧管理等研究.

[†]通讯作者. E-mail: 756519909@qq.com.

多成熟的控制方法不能直接应用于绳索驱动并联机构中,它们必须被修改以保证绳索能够始终提供拉力.在并联机构领域,有很多关于动力学和控制方面的研究^[14-16].然而,相较于传统并联机构控制方面的大量研究而言,很少有关于绳索驱动并联机构的控制研究.

本文所提的2-DOF绳索驱动并联机构来源于以前的研究^[17].针对此研究对象,首先基于拉格朗日方程建立系统的动力学模型;然后设计系统的PD加前馈控制器,同时引入绳索内力原则保证绳索拉力始终为正值;接着基于李雅普诺夫稳定性理论对闭环系统的稳定性进行分析;最后通过仿真和实验验证所提控制方法的可行性.

本文的主要贡献总结如下:在忽略绳索和弹簧的柔性条件下,基于拉格朗日方程建立了关于给定空间轨迹跟踪控制的系统动力学模型;基于绳索内力原则,采用PD及前馈控制方法设计了系统的轨迹跟踪控制器;给出了关于系统轨迹跟踪控制的仿真和实验结果.

1 系统动力学模型

1.1 系统描述

本文研究的系统基本组成如图1所示,其组成主要包括动平台、定平台、绳索和弹簧4个部分^[17].点 o' 为点 o 在平面 OXY 内的投影,定平台的半径为 a ,动平台的半径为 b , S 轴与 X 轴之间的夹角为 θ_s ,动平台平面与水平面的夹角为 θ_p .

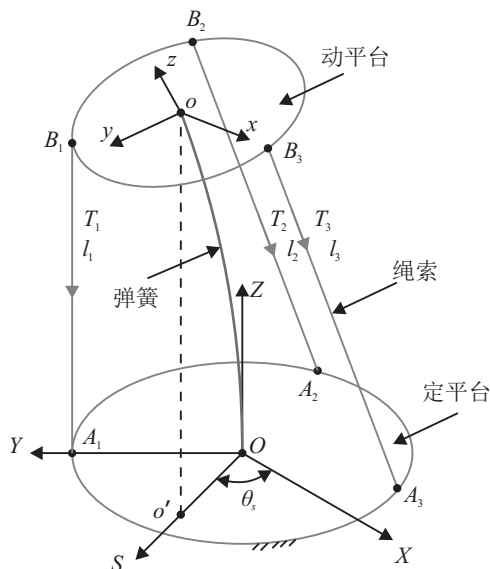


图1 2-DOF绳索驱动并联机构

在全局坐标系 $OXYZ$ 下,定平台上点 A_i (${}^O\mathbf{a}_1$, ${}^O\mathbf{a}_2$, ${}^O\mathbf{a}_3$)($i = 1, 2, 3$)的齐次坐标为

$$\begin{cases} {}^O\mathbf{a}_1 = (0, a, 0, 1)^T, \\ {}^O\mathbf{a}_2 = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}a, -\frac{1}{2}a, 0, 1\right)^T, \\ {}^O\mathbf{a}_3 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}a, -\frac{1}{2}a, 0, 1\right)^T. \end{cases} \quad (1)$$

在局部坐标系 xyz 下,动平台上点 B_i (${}^o\mathbf{b}_1$, ${}^o\mathbf{b}_2$, ${}^o\mathbf{b}_3$)($i = 1, 2, 3$)的齐次坐标为

$$\begin{cases} {}^o\mathbf{b}_1 = (0, b, 0, 1)^T, \\ {}^o\mathbf{b}_2 = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}b, -\frac{1}{2}b, 0, 1\right)^T, \\ {}^o\mathbf{b}_3 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}b, -\frac{1}{2}b, 0, 1\right)^T. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 系统运动学

在全局坐标系中,动平台的位姿可通过5个参数来描述: $(x_o, y_o, z_o, \alpha, \beta)$. (x_o, y_o, z_o) 为点 o 在全局坐标系 $OXYZ$ 中的三维坐标,角 α 和 β 分别为关于 X 轴和 Y 轴的旋转角,然而角 α 和 β 由三维坐标 (x_o, y_o, z_o) 决定.因此,动平台的位姿可通过3个独立参数 x_o 、 y_o 和 z_o 来表示.

角 θ_s 和 θ_p 可分别表示为

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{y_o}{x_o}\right), \quad (3)$$

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}}{z_o}\right). \quad (4)$$

角 α 和 β 与角 θ_s 和 θ_p 的关系可表示为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\cot\theta_p}{\sin\theta_s}\right), \quad (5)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\cot\theta_p}{\cos\theta_s}\right). \quad (6)$$

从局部坐标系 xyz 到全局坐标系 $OXYZ$ 的齐次坐标变换矩阵可表示为

$$T_t = \begin{bmatrix} c\beta & sas\beta & cas\beta & x_o \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & y_o \\ -s\beta & sac\beta & cac\beta & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中: $s\alpha = \sin\alpha$, $c\alpha = \cos\alpha$, $s\beta = \sin\beta$, $c\beta = \cos\beta$.因此,绳长可表示为

$$l_i = |{}^O\mathbf{a}_i - T_t {}^o\mathbf{b}_i|, \quad (8)$$

其中 i 表示绳索个数.

系统的雅可比矩阵 \mathbf{J} 被定义为动平台速度与驱动绳索速度之间的关系.定义绳索速度向量为 $\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1 \ \dot{l}_2 \ \dot{l}_3]^T$,向量 $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x}_o \ \dot{y}_o \ \dot{z}_o]^T$ 用来表示动平台质心的速度,则它们之间关系可表达为

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{r}}. \quad (9)$$

1.3 系统动力学

文献[18]给出了引起系统柔性振动的来源: 柔性绳索和柔性弹簧. 鉴于绳索长度较短、质量较轻和直径较小等因素, 绳索被假定为只能工作在张紧状态的线性单元, 而绳索的动力学特征诸如振动和伸长可被忽略^[9]. 因此, 所提系统的振动源主要是柔性弹簧, 而考虑弹簧柔性形变因素的系统柔性振动控制的问题已经在文献[18]中被研究. 本文主要聚焦于系统对于给定空间圆轨迹的跟踪控制问题, 忽略了系统中柔性体的振动因素.

选择系统的广义坐标为 $\boldsymbol{\eta} = [x_o \ y_o \ z_o]^T$, 则动平台的动能可表示为

$$T_d = \frac{1}{2}m(\dot{x}_o^2 + \dot{y}_o^2 + \dot{z}_o^2) + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{R} \mathbf{I}_d \mathbf{R}^T \boldsymbol{\omega}. \quad (10)$$

其中: m 为动平台的质量; $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ 0]^T$; \mathbf{R} 为局部坐标系关于全局坐标系的旋转变换矩阵, \mathbf{I}_d 为动平台的惯性矩, \mathbf{R} 和 \mathbf{I}_d 可分别表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\beta & s\alpha s\beta & c\alpha s\beta \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{I}_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}mb^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}mb^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}mb^2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

在系统动力学建模过程中, 每根绳索被假定为一个力元素, 因此系统的势能只有动平台的势能和弹簧的势能.

动平台的势能可表示为

$$V_d = mgz_o, \quad (13)$$

其中 g 为重力加速度, 这里取值为 9.8 m/s^2 .

不考虑弹簧的动能, 基于文献[20], 弹簧的弯曲势能可近似表示为

$$V_s \approx \frac{EI\theta_p^2}{2L'}. \quad (14)$$

其中: E 为弹簧弹性模量, I 为弹簧截面惯性矩, L' 为弹簧原长.

弹簧的压缩势能可近似表示为

$$V_c \approx \frac{1}{2}k(L' - z_o)^2, \quad (15)$$

其中 k 为弹簧刚度系数.

综上所述, 系统的拉格朗日函数可表示为

$$\begin{aligned} L = T_d - V_d - V_s - V_c = & \\ & \frac{1}{2}m(\dot{x}_o^2 + \dot{y}_o^2 + \dot{z}_o^2) + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{R} \mathbf{I}_d \mathbf{R}^T \boldsymbol{\omega} - \\ & mgz_o - \frac{EI\theta_p^2}{2L'} - \frac{1}{2}k(L' - z_o)^2. \end{aligned} \quad (16)$$

拉格朗日方程可表示为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\eta}} = \mathbf{Q}. \quad (17)$$

其中: \mathbf{Q} 为系统的广义力, 结合前文推导出的系统雅可比矩阵 \mathbf{J} , 系统的广义力 \mathbf{Q} 可表示为

$$\mathbf{Q} = -\mathbf{J}^T \mathbf{T}, \quad (18)$$

\mathbf{T} 为绳索拉力向量, 可表示为

$$\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ T_3]^T. \quad (19)$$

由式(16)和(17)可得系统的动力学模型为

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{H} + \mathbf{K}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{G} = \mathbf{Q}. \quad (20)$$

其中: \mathbf{M} 为广义质量矩阵, \mathbf{H} 为科氏力和向心力条款, \mathbf{K} 为广义刚度矩阵, \mathbf{G} 为重力条款.

2 系统控制器设计

2.1 绳索张力求解

采用PD加前馈控制方法对系统进行运动控制, 取控制律为

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d + \mathbf{H} + \mathbf{K}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{G}. \quad (21)$$

其中: \mathbf{K}_p 和 \mathbf{K}_d 分别为比例和微分系数; 位置误差向量 $\mathbf{e} = \boldsymbol{\eta}_d - \boldsymbol{\eta}$, $\boldsymbol{\eta}_d = [x_{od} \ y_{od} \ z_{od}]^T$.

因为绳索拉力值必须始终为正, 所以PD加前馈控制策略不能直接应用于绳索驱动并联机构中. 为此, 需要用绳索内力原则去修改此控制策略.

对于动平台质心轨迹为空间 Z 方向上是定值的轨迹, 在某一特定的位置时绳索拉力^[21]可表示为

$$\mathbf{T} = (-\hat{\mathbf{J}}^T)^+ \hat{\mathbf{Q}} + [\mathbf{I}_{3 \times 3} - (-\hat{\mathbf{J}}^T)^+ (-\hat{\mathbf{J}}^T)] \boldsymbol{\lambda}. \quad (22)$$

其中: 雅可比矩阵 $\hat{\mathbf{J}}$ 可表示为

$$\hat{\mathbf{J}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_i}{\partial x_o} & \frac{\partial l_i}{\partial y_o} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (23)$$

x_o 和 y_o 方向上的广义力向量 $\hat{\mathbf{Q}}$ 可表示为

$$\hat{\mathbf{Q}} = [Q_{x_o} \ Q_{y_o}]^T; \quad (24)$$

$\mathbf{I}_{3 \times 3}$ 为单位矩阵; $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^3$ 为一个任意的列向量, $(-\hat{\mathbf{J}}^T)^+ \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$ 为矩阵 $-\hat{\mathbf{J}}^T$ 的伪逆, $[\mathbf{I}_{3 \times 3} - (-\hat{\mathbf{J}}^T)^+ (-\hat{\mathbf{J}}^T)]$ 为零空间投影矩阵.

式(22)右边第一项为抵抗外力矩的最小绳索驱动力 \mathbf{T}_e , 可表示为

$$\mathbf{T}_e = -\hat{\mathbf{J}}(\hat{\mathbf{J}}^T \hat{\mathbf{J}})^{-1} \hat{\mathbf{Q}}. \quad (25)$$

式(22)右边第二项为矩阵 $-\hat{\mathbf{J}}^T$ 零空间中的齐次解或绳索的内力向量. 通过合理地选取列向量 $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^3$ 以得到合适的绳索内力向量以维持绳索拉力始终为正. 由式(22)可知, 绳索的内力向量与系统的雅可比矩阵及列向量 $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^3$ 有关. 合理选取列向量 $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^3$ 的原则有3个: 一是保证所有绳索的拉力均为正值;

二是从驱动成本和能耗出发,保证所有绳索拉力尽可能小;三是保证与实验中通过传感器测得的绳索拉力值尽可能吻合。

2.2 闭环系统稳定性

考虑到所提系统的冗余驱动特性,矩阵 $-\hat{\mathbf{J}}^T$ 不是一个方阵,因此不存在逆矩阵. 如果矩阵 $-\hat{\mathbf{J}}^T$ 满秩,矩阵 $-\hat{\mathbf{J}}^T$ 将存在伪逆. 式(18)将存在广义逆^[22], 即式(22)将存在. 因此式(22)本质上是式(18)的解, 它的作用是保证所有绳索时刻处于张紧状态,对闭环系统的稳定性分析没有影响,即闭环系统的稳定性只与矩阵 \mathbf{Q} 的选取有关.

将式(21)代入(20)可得

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e} = \mathbf{0}, \quad (26)$$

即

$$\ddot{\mathbf{e}} = -\frac{\mathbf{K}_d}{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{e}} - \frac{\mathbf{K}_p}{\mathbf{M}}\mathbf{e}. \quad (27)$$

令 $\mathbf{x} = [\mathbf{e} \ \dot{\mathbf{e}}]^T$, 则式(27)可表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \quad (28)$$

其中矩阵 \mathbf{A} 可表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ -\frac{\mathbf{K}_p}{\mathbf{M}} & -\frac{\mathbf{K}_d}{\mathbf{M}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

定义Lyapunov函数

$$V(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x}. \quad (30)$$

由于 \mathbf{A} 为稳定矩阵,对于任意给定的正定矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$,存在正定解 \mathbf{P} ,满足以下Lyapunov方程:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} = -\tilde{\mathbf{Q}}. \quad (31)$$

由矩阵 \mathbf{P} 的正定性可知 $V(\mathbf{x})$ 是全局正定的. 对式(30)求关于时间的一阶导数,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2}\dot{\mathbf{x}}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\dot{\mathbf{x}} = \\ &= \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{x} + \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x} = \\ &= \frac{1}{2}\mathbf{x}^T(\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A})\mathbf{x} = \\ &= -\frac{1}{2}\mathbf{x}^T\tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{x} \leq 0. \end{aligned} \quad (32)$$

由于 $\dot{V}(\mathbf{x})$ 是半负定的,且 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 为正定,则当 $\dot{V}(\mathbf{x}) \equiv 0$ 时,有 $\mathbf{x} \equiv 0$, 即 $\mathbf{e} \equiv 0, \dot{\mathbf{e}} \equiv 0$. 由拉塞尔定理可知, $(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}})^T = (\mathbf{0}, \mathbf{0})^T$ 是被控对象全局渐近稳定的平衡点. 因此,如果被控对象从任意初始条件 $(\boldsymbol{\eta}_0, \dot{\boldsymbol{\eta}}_0)$ 出发,均有 $\boldsymbol{\eta} \rightarrow \boldsymbol{\eta}_d, \dot{\boldsymbol{\eta}} \rightarrow \dot{\boldsymbol{\eta}}_d$.

3 仿真和实验结果

针对所建立的系统动力学模型和设计的控制器,需要用仿真和实验结果对其合理性进行验证. 仿真

平台是基于S函数的SIMULINK软件,实验装置及控制系统结构详见文献[18]. 动平台质心的实时坐标 $\boldsymbol{\eta} = [x_o \ y_o \ z_o]^T$ 是通过增量式编码器测得的绳长基于系统正运动学模型求出. 仿真和实验参数如下: $a = 0.09 \text{ m}, b = 0.09 \text{ m}, m = 0.43 \text{ kg}, L' = 0.1016 \text{ m}, E = 1.965 \times 10^{11} \text{ Pa}, I = 9.811 \times 10^{-12} \text{ m}^4, k = 5060 \text{ N/m}$.

动平台质心的空间理想运动轨迹选择为

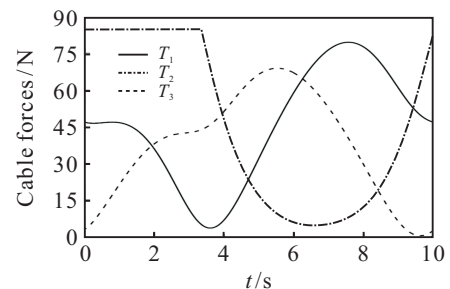
$$\begin{cases} x_{od} = 0.02 \cos(0.628t) (\text{m}), \\ y_{od} = 0.02 \sin(0.628t) (\text{m}), \\ z_{od} = 0.09 (\text{m}). \end{cases} \quad (33)$$

选择

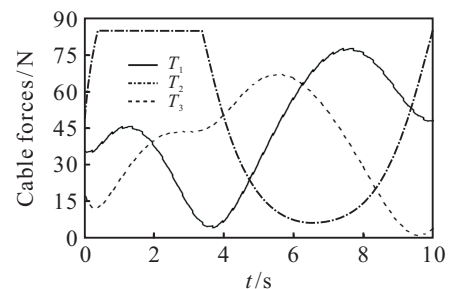
$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

$$\mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

绳索拉力变化曲线如图2所示. 从图2(a)可以看出,基于绳索内力原则,所提的PD加前馈控制器能够保证动平台在作轨迹跟踪运动时所有绳索拉力始终为正值. 因为测力传感器的量程为20kg,所以求解绳索拉力时需要合理的限幅. 因此,图2(a)中 T_2 的超出部分被限幅在85N(基于绳索拉力测量原理合理选择的值). 图2(b)为实验绳索拉力变化曲线图,可以看出,绳索拉力的理论值和实验值比较吻合.



(a) 理论绳索拉力变化曲线



(b) 实验绳索拉力变化曲线

图2 实验拉力变化曲线

图3为动平台质心的实验位移跟踪曲线. 从图3可以看出,动平台质心在X方向、Y方向和Z方向上

均能够较好地跟踪给定的理想轨迹,与此同时全程存在着柔性振动,这主要是由弹簧的柔性振动引起的,一定程度上降低了动平台质心的跟踪精度。

动平台质心的实验速度跟踪曲线如图4所示。从

图4可以看出,动平台在作轨迹跟踪运动的同时存在着柔性振动。其中: X方向和Y方向上的速度跟踪变化较为剧烈,Z方向上的速度跟踪变化较为平缓,但是所有方向上的速度变化曲线都是连续的。

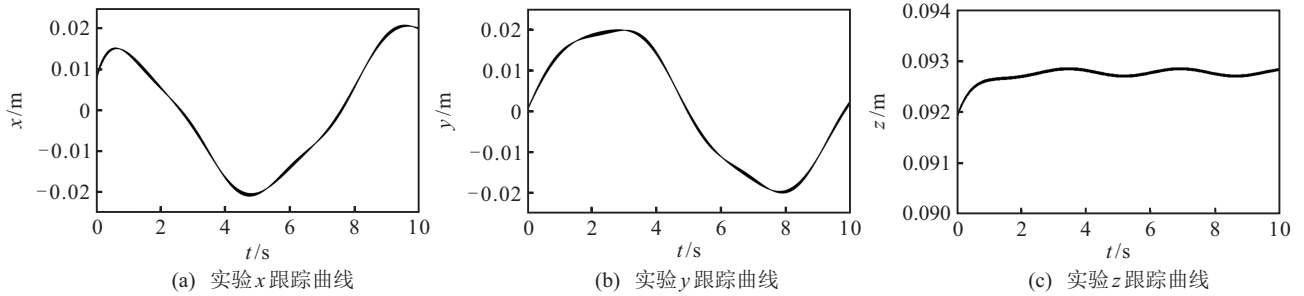


图3 实验位移跟踪曲线

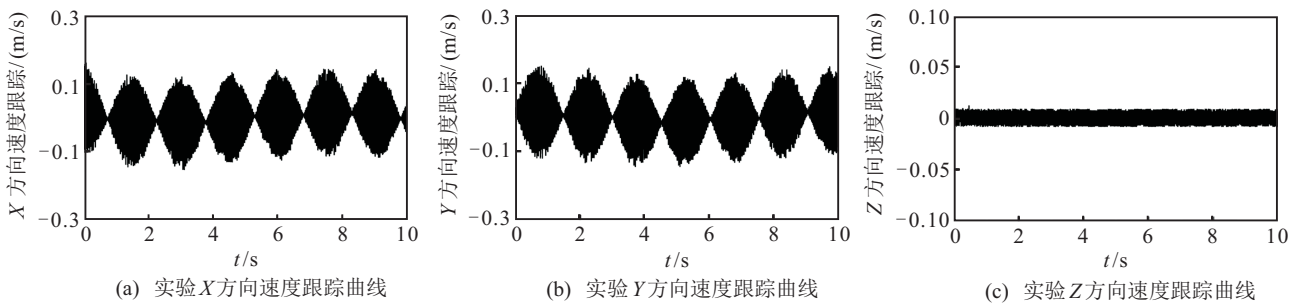


图4 实验速度跟踪曲线

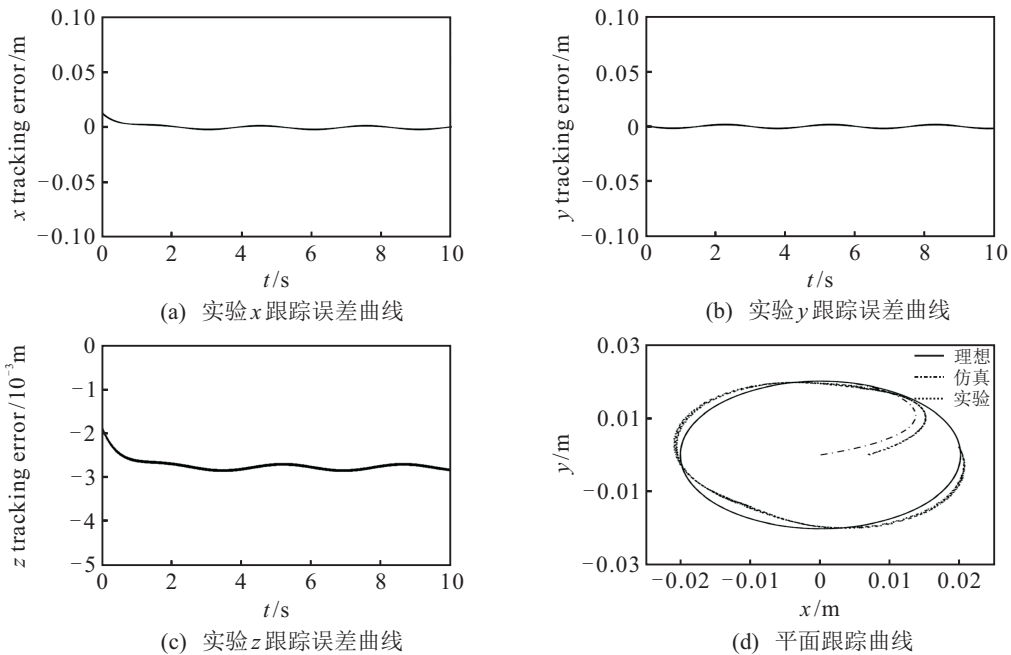


图5 实验位移跟踪误差曲线和平面跟踪曲线

图5为动平台质心的实验位移跟踪误差曲线和平面跟踪曲线。从图5可以看出,动平台质心能够较好地跟踪给定的理想轨迹。图中的实验轨迹跟踪误差来源如下:1)忽略了驱动装置传输系统中的摩擦和反冲作用以及不确定的干扰等因素;2)正如前文所述的那样,动平台质心的实时坐标 $\eta = [x_o \ y_o \ z_o]^T$ 是通过增量式编码器测得的绳长基于系统正运动学

模型间接地求出,而不是通过相应的传感器直接获取的,这会引起动平台质心位置的计算误差;3)在建立系统数学模型的过程中,忽略了绳索和弹簧等柔性体柔性因素。

通过对上述仿真和实验结果的分析可知,基于PD控制和前馈控制方法并结合绳索内力原则所设计的系统控制器能够始终保证所有绳索拉力值为正,

且能够使动平台质心较好地跟踪给定的理想轨迹,从而证明了所提控制策略是有效、合理的。

4 结论

针对2-DOF绳索驱动并联机构,本文首先采用拉格朗日方程建立了系统的动力学模型;然后针对动平台质心在空间 Z 方向上为定值轨迹的情况,基于绳索内力原则,设计了PD加前馈控制器,并证明了闭环系统的稳定性;最后开展了仿真和实验研究,仿真和实验结果表明,所建立的系统动力学模型是正确的,所提出的系统控制策略是合理的。

参考文献(References)

- [1] Kawamura S, Kino H, Won C. High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots[J]. *Robotica*, 2000, 18(1): 13-21.
- [2] Taghirad H D, Nahon M. Kinematic analysis of a macro-micro redundantly actuated parallel manipulator[J]. *Advanced Robotics*, 2008, 22(6/7): 657-687.
- [3] Cone L L. Skycam-an aerial robotic camera system[J]. *Byte*, 1985, 10(10): 122-132.
- [4] Bostelman R, Albus J, Dagalakis N, et al. Applications of the NIST RoboCrane[C]. *Proc of the 5th Int Symposium on Robotics and Manufacturing*. Maui: American Society of Mechanical Engineers, 1994: 14-18.
- [5] Boehler Q, Abdelaziz S, Vedrines M, et al. From modeling to control of a variable stiffness device based on a cable-driven tensegrity mechanism[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 107: 1-12.
- [6] Zhang N, Shang W. Dynamic trajectory planning of a 3-DOF under-constrained cable-driven parallel robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 98: 21-35.
- [7] Albus J, Bostelman R, Dagalakis N. The NIST robocrane[J]. *J of National Institute of Standards and Technology*, 1992, 97(3): 373-385.
- [8] Du J, Bao H, Cui C. Stiffness and dexterous performances optimization of large workspace cable-driven parallel manipulators[J]. *Advanced Robotics*, 2014, 28(3): 187-196.
- [9] Tang X, Shao Z. Trajectory generation and tracking control of a multi-level hybrid support manipulator in FAST[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(8): 1113-1122.
- [10] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [11] Yang Y, Zhang W. An elephant-trunk manipulator with twisting flexional rods[C]. *IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics*. Zhuhai: IEEE, 2015: 13-18.
- [12] Laschi C, Cianchetti M, Mazzolai B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7): 709-727.
- [13] Behzadipour S, Khajepour A. Stiffness of cable-based parallel manipulators with application to stability analysis[J]. *J of mechanical design*, 2006, 128(1): 303-310.
- [14] 张达, 原大宁, 刘宏昭. 3-UPS/PU 并联机构动力学建模及自适应滑模控制[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(2): 232-238.
(Zhang D, Yuan D N, Liu H Z. Dynamic modeling and adaptive sliding mode control of 3-UPS/PU parallel mechanism[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(2): 232-238.)
- [15] Wang J, Wu J, Wang L, et al. Dynamic feed-forward control of a parallel kinematic machine[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(3): 313-324.
- [16] 王跃灵, 沈书坤, 王洪斌. 2-DOF 并联机构动力学建模与迭代学习控制[J]. *计算机工程*, 2009, 35(17): 163-166.
(Wang Y L, Shen S K, Wang H B. Dynamic modeling and iterative learning control of 2-DOF parallel mechanism[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(17): 163-166.)
- [17] 孙黎霞, 宋洪刚, 高丙团, 等. 仿生柔性并联机器人的逆运动学与优化设计[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2013, 43(4): 736-741.
(Sun L X, Song H G, Gao B T, et al. Inverse kinematics and optimal design of bio-inspired flexible parallel robot[J]. *J of Southeast University: Natural Science Edition*, 2013, 43(4): 736-741.)
- [18] Jiang L, Gao B, Zhu Z. Design and nonlinear control of a 2-DOF flexible parallel humanoid arm joint robot[J]. *Shock and Vibration*, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2762169>.
- [19] Du J, Bao H, Cui C, et al. Dynamic analysis of cable-driven parallel manipulators with time-varying cable lengths[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 48(1): 1392-1399.
- [20] Jiang L, Gao B, Zhao J. Kinematic and static analysis of a cable-driven parallel robot with a flexible link spine[C]. *IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics*. Zhuhai: IEEE, 2015: 31-36.
- [21] Lim W B, Yeo S H, Yang G. Optimization of tension distribution for cable-driven manipulators using tension-level index[J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2014, 19(2): 676-683.
- [22] 范伟, 彭光正, 高建英, 等. 气动人工肌肉驱动球面并联机器人的力控制研究[J]. *机器人*, 2004, 26(4): 336-341.
(Fan W, Peng G Z, Gao J Y, et al. Study on the force control of a spherical parallel robot actuated by pneumatic muscle actuators[J]. *Robot*, 2004, 26(4): 336-341.)