DOI: 10.3901/JME.2020.23.078

3-DOF 索杆桁架式欠驱动机械手运动控制*

乔尚岭¹ 刘荣强¹ 郭宏伟¹ 丁戌辰² 李 兵³ 邓宗全¹

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术及系统国家重点实验室 哈尔滨 150001;

2. 江南大学物联网工程学院 无锡 214122;

3. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院 深圳 518055)

摘要: 索杆桁架式机械手是将绳轮传动系统和平行四边形机构结合而提出的一种新型欠驱动机械手。绳索驱动力同时驱动手指关节耦合运动,而手指关节运动又会直接改变绳拉力在各指节单元的驱动力分布,导致索杆桁架式欠驱动系统具有强非线性和运动耦合特点。针对该问题,利用虚功原理,将绳轮传动系统等效为耦合的关节驱动力矩,并建立 3-DOF 手指准静态运动学模型。根据手指最大运动空间约束条件,确定关节弹簧配置分布并开展手指准静态运动空间分析。采用拉格朗日方程法建立手指一般动力学方程,并转换为“A-P”型等效动力学模型。在此基础上,开展预变形阶段运动控制研究。通过仿真分析和样机试验验证所提分析方法和运动控制策略的有效性。

关键词: 欠驱动机械手; 绳驱动机构; 欠驱动控制; 运动空间; 动力学建模

中图分类号: TP241

Motion Control of 3-DOF Under-actuated Cable-truss Robotic Hand

QIAO Shangling¹ LIU Rongqiang¹ GUO Hongwei¹ DING Shuchen²
LI Bing³ DENG Zongquan¹

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122;

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

Abstract: The cable-truss robotic hand is a novel type of under-actuated hand that is proposed by tendon-pulley transmission and parallel four-linkage mechanism. The joint movements are driven by cable driving force simultaneously and coupled with each other, and which directly changes the distribution of cable driving force in each phalange. Therefore, the cable-truss underactuated system has the characteristics of strong nonlinearity and motion coupling. Then, the finger driven by the TP transmission is translated to the equivalent joint driven mechanism, and a quasi-static kinematic model of a 3-DOF finger is established. On the basis of the constraints of maximum movement space of the finger, the distributions of joint springs are determined and the finger quasi-static movement space is analyzed. The general dynamic equation of the finger is established by using Lagrange's method, and the equivalent dynamic model in "A-P" form is obtained. On the basis of "A-P" dynamic model, research on motion control in the pre-bending stage is carried out. The effectiveness of the proposed analysis method and motion control strategy is verified by simulation analysis and prototype experiment.

Key words: underactuated hand; cable-driven mechanism; underactuated control; motion space; dynamic model

0 前言

欠驱动机械手驱动源数目少于机构的自由度数目,机械手在较少驱动源数目情况下,能够以耦合

形式实现相对确定的运动。20 世纪 70 年代,日本学者 HIROSE 等^[1]首次提出了绳轮式欠驱动机械手设计方案,设计并研制了 Soft Gripper 欠驱动机械手,演示了包络式抓取过程。到目前为止,多种类型的欠驱动机械手被研制,并广泛应用于残疾人辅助抓取^[2]、果蔬采摘^[3]和航天在轨捕获^[4]等领域。

LALIBERTE 等^[5-6]设计并研制了著名的双层连杆式欠驱动手指,主要分析了手指某一指节接触物体之后的形状自适应抓取过程。ZHANG 等^[7-9]针对

* 国家自然科学基金联合基金(U1613201)、深圳基础研究基金(JCYJ20170413104438332)和国家自然科学基金(51275107)资助项目。
20200121 收到初稿,20200423 收到修改稿

研制的齿轮-齿条-滑块式、齿轮-连杆式和耦合连杆式机械手,系统分析了手指的耦合运动特点。WANG 等^[10]开发了一种基于差动齿轮的欠驱动机械臂,并采用单输入双输出行星齿轮系统来分配驱动扭矩,实现指节间的耦合运动。LIU 等^[11]针对绳轮驱动式 HIT 假手,分析手指在关节扭转弹簧的作用下的耦合运动和自适应抓取过程。WANG 等^[12]将绳驱动手指抓取运动过程中接触物体前的运动过程称为抓取预变形阶段,并展示了该阶段手指的耦合运动过程。OZAWA 等^[13]针对研制的由主动绳索和被动绳索协同驱动的二指机器人手结构,分析手指的耦合运动过程。FIROUZEH 等^[14]提出了一种使用可调节刚度关节的肌腱驱动手指,并分析了手指在力量抓取、精确抓取和柔顺抓取时的耦合抓取运动过程。文献[15]针对新颖的仿人单腱弹性欠驱动四指灵巧手开展机械手优化设计,并完成不同形状、不同大小物体的自适应抓取试验。由此可见,针对欠驱动机械手的研究主要围绕欠驱动机械手创新设计、手指抓取功能实现、手指接触物体之后的力或形状自适应运动过程以及手指接触物体后的接触力反馈控制等开展。

针对欠驱动机构的运动控制研究主要以传统串联型机械臂为主,根据不同的主动关节和被动关节分布情况,在模型分析和控制器设计两个方面开展工作,并取得了大量研究成果。SPONG^[16]采用部分反馈线性化的方法研究了 Acrobot 机械臂的控制问题,从系统能量的角度实现机械臂摇起控制。FANTONI 等^[17]基于能量方法提出了一种控制器,用于控制连杆摆动并将其提升到最高的不稳定平衡位置。EOM 等^[18]提出了在动摩擦力作用下采用非线性扰动观测器对 Pendubot 系统进行鲁棒摆动和平衡控制的方法,并通过仿真和试验验证了该方法的性能和有效性。MAHINDRAKAR 等^[19]针对 2-DOF 平面欠驱动机械臂系统实现了分段运动控制。文献[19]表明,欠驱动系统总是以耦合运动或者自由度退化形式运动到平衡点位置。赖旭芝等^[20-22]针对存在无驱动关节的欠驱动串联机械臂控制理论方面展开了深入研究,采用混杂控制法、轨迹规划法等实现欠驱动连杆机械臂位置控制。

但是,用于抓捕的欠驱动机械手所有指节耦合驱动,没有明确的驱动关节和被动关节。以绳轮式和双层桁架式欠驱动机械手为例,系统的实际驱动力不直接作用在某一关节上。针对此类耦合驱动式欠驱动系统的运动控制研究成果较少。

索杆桁架式欠驱动机械手是将绳轮传动系统和

平行四连杆机构相结合而提出的一种新型欠驱动机械手,以在轨捕获空间非合作目标为应用背景,具有结构简单、模块化和可扩展的特点。文献[23-24]分别论述了索杆桁架式欠驱动机械手的构型设计和手指的力自适应抓取运动过程。本文在前期研究的基础上,针对索杆桁架式欠驱动机械手接触物体之前的抓取预变形阶段开展运动控制研究,为解决耦合驱动式欠驱动系统运动控制问题提供一种研究思路。本文主要包括绳传动系统等效与手指准静态模型建立、弹簧配置分布与手指准静态运动空间分析、手指动力学模型建立、抓取预变形阶段控制策略和抓取预变形阶段运动控制试验等五部分内容。

1 绳传动系统等效与手指准静态模型

1.1 绳轮传动系统等效模型建立

索杆桁架式欠驱动机械手是由若干个串联的索杆桁架式模块单元构成。驱动绳索沿平行四边形机构主对角线和换向滑轮布置,最后缠绕在卷筒上。如图 1a 所示。根据平行四边形几何特点,3-DOF 手指的位形描述分为相对关节坐标 $\{q_i\}$ 和绝对关节坐标 $\{\theta_i\}$ 两种。 $\{q_i\}$ 与 $\{\theta_i\}$ 满足

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

在索杆桁架单元之间配置关节弹簧,使欠驱动机械手的各关节避免出现无序运动,并对手指施加回复力。从运动形式上,根据平行四边形桁架单元的运动特点,手指单元可以看作是单连杆定轴转动运动。因此,存在一组假想的等效关节驱动力矩与绳索拉力等效,使得手指能够产生与绳拉力作用相同的运动效果,如图 1b 所示。 ${}^i\tau_{T1}$ 表示绳拉力 T_1 在关节 i 上的等效关节驱动力矩。

图 1 3-DOF 索杆桁架式机械手机构简图

以索杆桁架单元为研究对象, 索杆桁架式机械手的任意一个指节单元的运动过程可以看作是绕前一指节单元的瞬时定轴转动, 如图2所示。假设绳索为理想绳索, 忽略绳索的塑性变形和滑轮的半径。在驱动力 T_1 的作用下, 索杆单元 i 内部绕绳微小长度变化为 $d^i L_1$, 绳索驱动力对该桁架单元做功为 $d^i W_{T1}$

$$d^i W_{T1} = T_1 \cdot d^i L_1 \quad (2)$$

索杆桁架单元 i 在绳索拉力 T_1 作用下 $B_{i-1}B_i$ 连杆做定轴转动。假设存在一个假想的转动力矩 ${}^i M_{T1}$, 使得连杆的微小转动角位移为 $d\theta_i$ 。定义顺时针方向为 ${}^i M_{T1}$ 的正方向, 则转动力矩对该桁架单元做功 $d^i M_{T1}$

$$dW_{M_{T1}} = -{}^i M_{T1} \cdot d\theta_i \quad (3)$$

图2 绳轮传动系统模型简化

由于绳索驱动力 T_1 的作用效果与假想的转动力矩 ${}^i M_{T1}$ 的作用效果相同, 因此有

$$d^i W_{T1} = dW_{M_{T1}} \quad (4)$$

忽略滑轮的半径, 根据几何关系可得

$$d^i L_1 = -\frac{ab_i \sin \theta_i}{\sqrt{a^2 + b_i^2 + 2ab_i \cos \theta_i}} d\theta_i \quad (5)$$

由式(2)~(5), 驱动绳索拉力 T_1 在索杆桁架单元 i 上的转动力矩 ${}^i M_{T1}$ 为

$${}^i M_{T1} = \frac{T_1 ab_i \sin \theta_i}{\sqrt{a^2 + b_i^2 + 2ab_i \cos \theta_i}} = T_1 b_i \sin \alpha_i \quad (6)$$

假设存在一组作用在指关节的等效关节驱动力矩 $\tau_{T1} = ({}^1 \tau_{T1}, {}^2 \tau_{T1}, \dots, {}^n \tau_{T1})^T$, 且 τ_{T1} 与拉力 T_1 作用效果等效。由图2b, 在 T_1 作用下, 单元 i 受到的等效转动力矩 ${}^i M_{T1}$ 与假想的关节驱动力矩之间满足

$${}^i M_{T1} = {}^i \tau_{T1} - {}^{i+1} \tau'_{T1} \quad (7)$$

式中, ${}^{i+1} \tau'_{T1} = {}^{i+1} \tau_{T1}$ 。特别地, 当 $i=n$ 时, 末端指节

等效关节驱动力矩为 ${}^n M_{T1} = {}^n \tau_{T1}$ 。由式(7), 3-DOF 手指各指节单元转动力矩与绳索等效关节驱动力矩满足

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^1 \tau_{T1} \\ {}^2 \tau_{T1} \\ {}^3 \tau_{T1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^1 M_{T1} \\ {}^2 M_{T1} \\ {}^3 M_{T1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

由式(6)和式(8), 绳拉力 T_1 与等效关节驱动力矩 τ_{T1} 之间满足

$$\tau_{T1} = T_1 P S_\alpha \quad (9)$$

$$\tau_{T1} = ({}^1 \tau_{T1}, {}^2 \tau_{T1}, {}^3 \tau_{T1})^T$$

$$S_\alpha = (b_1 \sin \alpha_1, b_2 \sin \alpha_2, b_3 \sin \alpha_3)^T$$

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式(9)建立了绳索驱动力与等效关节驱动力之间的对应关系。索杆桁架式欠驱动机械手可以被看作是一种多指节串联式“全驱动”机械臂, 但是等效关节驱动力矩存在耦合关系。

1.2 手指准静态模型建立

由图1a可知, 在绳索和关节弹簧作用下, 手指在抓取预变形阶段静态平衡时应当满足

$$\tau_{T1} - M_s = 0 \quad (10)$$

式中, $M_s = ({}^1 M_s, {}^2 M_s, {}^3 M_s)^T$, ${}^i M_s = k_i(\theta_i - \theta_{i-1})$ 。 $\theta_0 = 25^\circ$ 为弹簧自然状态时单元初始关节角。在抓取预变形阶段, q_i 不全为零, θ_i 全不为零, 且 $\alpha_i \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$ 。由式(10)可得

$$T_1 I_{3 \times 1} = k q_s^* \quad (11)$$

$$I_{3 \times 1} = (1, 1, 1)^T \quad q_s^* = ({}^1 q_s^*, {}^2 q_s^*, {}^3 q_s^*)$$

$${}^i q_s^* = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{b_i \sin \alpha_i + \dots + b_3 \sin \alpha_3} \quad k = \text{diag}(k_2, k_3)$$

由式(11)可知, 弹簧型欠驱动机械手指的准静态运动过程中, 各手指指关节的运动是耦合运动。以 θ_3 为自变量, 可求得

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1(\theta_3) & q_2 &= q_2(\theta_3) \\ q_3 &= q_3(\theta_3) & T_1 &= T_1(\theta_3) \end{aligned} \quad (12)$$

式(9)表明, 虽然手指的关节自由度数目为3, 但是所有指节间存在耦合运动特点, 对外整体表现为1个自由度。这进一步说明, 索杆桁架式欠驱动机械手是“单输入多输出”系统, 无法像全驱动机械手一样规划各指节运动轨迹, 也无法让各指节在全运动空间内的任意位置保持静平衡状态。

2 弹簧配置与手指准静态运动空间

2.1 弹簧配置分布分析

由式(11), 3-DOF 关节弹簧型欠驱动机械手指的准静态平衡方程为

$$T_1 = \frac{k_3(\theta_3 - \theta_2)}{b_3 \sin \alpha_3} = \frac{k_2(\theta_2 - \theta_1)}{b_2 \sin \alpha_2 + b_3 \sin \alpha_3} = \frac{k_1(\theta_1 - \theta_0)}{b_1 \sin \alpha_1 + b_2 \sin \alpha_2 + b_3 \sin \alpha_3} \quad (13)$$

整理式(13)可得

$$\begin{cases} \frac{k_2}{k_3} = \frac{(b_2 \sin \alpha_2 + b_3 \sin \alpha_3)(\theta_3 - \theta_2)}{b_3 \sin \alpha_3(\theta_2 - \theta_1)} \\ \frac{k_1}{k_3} = \frac{(b_1 \sin \alpha_1 + b_2 \sin \alpha_2 + b_3 \sin \alpha_3)(\theta_3 - \theta_2)}{b_3 \sin \alpha_3(\theta_1 - \theta_0)} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)表明, (k_1, k_2, k_3) 与手指位形空间 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 存在完整映射关系, 并且弹簧参数与手指位形之间是复杂的非线性耦合关系。因此, 无法通过规划期望的手指全空间运动轨迹进行关节弹簧配置设计。此外, 当 $k_1 \rightarrow \infty$ 和 $k_2 \rightarrow \infty$ 时, 有 $\theta_1 \rightarrow \theta_0$ 和 $\theta_2 \rightarrow \theta_1$, 即手指的根部指关节和中间指关节被锁死, 只有末端指关节能够自由运动, 3-DOF 机械手“退化”成 1-DOF 机械手。

由式(6)和绳轮传动系统特点, 当 $\theta_1 = 0^\circ$ 和 180° 时, 等效关节驱动力矩为零, 单元位于奇异位形。因此, 设置手指单元的运动空间 $\theta_1 \in [20^\circ, 160^\circ]$ 。为了使手指具有较大的包络空间, 并避免出现欠驱动手指出现“退化”现象, 当 $\theta_3 = 160^\circ$ 时, 手指的准静态运动空间满足约束 1

$$\theta_1 \geq 90^\circ \quad \theta_2 \geq 120^\circ \quad q_2 \geq 10^\circ \quad q_3 \geq 10^\circ \quad (15)$$

绳索拉力满足约束 2

$$5 \leq T_1 \leq 10 \quad (16)$$

取 $k_3 = 1000 \text{ N} \cdot \text{mm/rad}$, $\theta_0 = 20^\circ$, 手指基本参数 $a = 100 \text{ mm}$, $b_1 = b_2 = b_3 = 360 \text{ mm}$ 。由式(13), 当 $\theta_3 = 160^\circ$, 满足约束 1 时, 手指运动空间与对应的绳索拉力分布如图 3a 所示。由式(14), 当满足约束 2 时, k_1/k_3 和 k_2/k_3 的分布如图 3b 和图 3c 所示。 $\theta_3 = 160^\circ$ 时, 满足约束 1 和约束 2 的手指准静态运动空间近似于一个梯形区域, 且 k_1/k_3 与 k_2/k_3 的最大值和最小值点分别位于该梯形区域的四个角。根据 k_1/k_3 与 k_2/k_3 的分布特点, 关节弹簧配置选择范围应满足 $k_1/k_3 \in [0.459, 1.673]$, $k_2/k_3 \in [0.529, 6.983]$ 。这表明, 在进行弹簧配置时, 为获取较大的准静态运动空间, k_1 取值范围较小, k_2 取值范围相对较大。

图 3 T_1 、 k_1/k_3 与 k_2/k_3 的分布

2.2 手指准静态运动空间分析

关节弹簧配置为 $k_1 = k_2 = k_3 = 1000 \text{ N} \cdot \text{mm/rad}$, 由式(13)和手指的基本杆件参数, 关节弹簧型欠驱动机械手准静态运动过程关节角、绳长变化和主绳索驱动力变化曲线, 如图 4 所示。当关节弹簧配置确定时, 准静态运动过程中, 手指各关节角、绳长与绳索拉力之间存在一一对应关系。由图 4a 可绘制手指的准静态平衡位形。在 $\theta_3 \in [20^\circ, 160^\circ]$ 运动空间内手指准静态平衡位形的集合, 也称作手指的准静态运动包络空间, 如图 5 所示。假设在手指末端指节运动空间内存在一点 P_3 , P_3 的平面位置坐标为 $\vec{\delta}_3 = (60^\circ, 864 \text{ mm})$ 。则在手指准静态运动过程中,

图 4 关节角、绳长、拉力和末端指节到定点的距离曲线

图5 $k_1:k_2:k_3=1:1:1$ 时,手指的准静态运动空间

末端指节到 P_3 点的垂直距离变化曲线如图 4d 所示。这表明,手指存在唯一的一个平衡位形,使末端指节与定点 P_3 重合。

3 手指动力学模型建立

3.1 平行四边形机构简化及动力学模型建立

如图 6 所示,平行四边形机构单元 i 各连杆质心分别为 C_{i1} 、 C_{i2} 和 C_{i3} , 质心位置为 r_{i1} 、 r_{i2} 和 r_{i3} , 连杆绕各自质心的转动惯量为 I_{i1} 、 I_{i2} 和 I_{i3} 。以 B_{i-1} 点为原点建立单元 i 的局部直角坐标系。

图6 平行四边形桁架单元等效模型

由于手指各指节单元只能做平面运动,根据质点系质心求解公式,可得单元 i 的质心运动轨迹

$$\left(x_c - \frac{m_{i1}a + m_{i2}r_{i2}}{m_{i1} + m_{i2} + m_{i3}}\right)^2 + y_c^2 = \left(\frac{m_{i1}r_{i1} + m_{i2}b_i + m_{i3}r_{i3}}{m_{i1} + m_{i2} + m_{i3}}\right)^2 \quad (17)$$

在平行四边形桁架单元内部存在与连杆 $B_{i-1}B_i$ 平行的假想连杆 $C_{i-1}C_i$, 其质心为 C_i 。连杆 $C_{i-1}C_i$ 质心位置和转动惯量分别用 r_i 和 I_i 表示。当连杆 $C_{i-1}C_i$ 的质心位置满足 $x_{C_{i-1}} = \frac{m_{i1}a + m_{i2}r_{i2}}{m_{i1} + m_{i2} + m_{i3}}$ 、 $r_i = \frac{m_{i1}r_{i1} + m_{i2}b_i + m_{i3}r_{i3}}{m_{i1} + m_{i2} + m_{i3}}$ 时,平行四边形桁架单元 i 的质心运动轨迹与连杆 $C_{i-1}C_i$ 的质心运动轨迹相同,均为以 $(x_{C_{i-1}}, 0)$ 为圆心,以 r_i 为半径的圆周运动。

假设机构单元根部节点 B_{i-1} 的运动速度为 v_{i-1} ,

单元 i 绕节点 B_{i-1} 的转动角速度为 w_i , 则单元 i 的总动能为

$$E_i = \frac{1}{2}(m_{i1} + m_{i2} + m_{i3})v_{i-1}^2 + \frac{1}{2}(I_{i1} + I_{i3})w_i^2 + \frac{1}{2}(m_{i1}r_{i1}^2 + m_{i2}b_i^2 + m_{i3}r_{i3}^2)w_i^2 + v_{i-1}w_i \cos \gamma_i (m_{i1}r_{i1} + m_{i2}b_i + m_{i3}r_{i3}) \quad (18)$$

连杆 $C_{i-1}C_i$ 的动能为

$$E_{C_{i-1}C_i} = \frac{1}{2}m_i v_{i-1}^2 + \frac{1}{2}I_i w_i^2 + \frac{1}{2}[m_i r_i^2 w_i^2 + 2v_{i-1}w_i \cos \gamma_i m_i r_i] \quad (19)$$

式中, $m_i = m_{i1} + m_{i2} + m_{i3}$ 。由 $E_i = E_{C_{i-1}C_i}$ 可得

$$I_i = \frac{m_{i1}m_{i2}(r_{i1} - b_i)^2}{m_i} + \frac{m_{i1}m_{i3}(r_{i1} - r_{i3})^2}{m_i} + \frac{m_{i2}m_{i3}(b_i - r_{i3})^2}{m_i} + I_{i1} + I_{i3} \quad (20)$$

当连杆 $C_{i-1}C_i$ 绕质心的转动惯量满足式(20)时,平行四边形桁架单元的系统动能与假想连杆 $C_{i-1}C_i$ 的动能相等。由式(19)可知,连杆 $C_{i-1}C_i$ 沿 x 轴平移不影响该索杆桁架单元的系统动能。因此,在后续分析研究中,基于系统能量相等的方法,将平行四边形桁架单元 i 简化为手指内侧连杆 $B_{i-1}B_i$ 。简化后连杆质量为 m_i , 质心位置为 r_i , 绕质心的转动惯量为 I_i 。根据等效前后系统能量相等,建立 3-DOF 索杆桁架式手指动力学简化模型,如图 7 所示。

图7 3-DOF 索杆桁架式机械手动力学简化模型

根据能量等效法,索杆桁架式机械手可以简化为经典的串联机械臂。而拉格朗日方程法是从动力学普遍方程出发,利用系统动能 $E(q, \dot{q})$ 、势能 $U(q)$ 对广义坐标 q 和广义速度 $\dot{q}$ 的偏导数,建立系统动能 $E(q, \dot{q})$ 、势能 $U(q)$ 与广义力 Q 的关系。

基于拉格朗日法所得系统动力学方程为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = Q_i \quad i=1, 2, \quad (21)$$

式中, $L(q, \dot{q}) = E(q, \dot{q}) - U(q)$ 为拉格朗日函数。对于

索杆桁架式欠驱动机械手, Q_i 为绳索拉力 T_1 在该关节上的等效关节驱动力矩 ${}^i\tau_{T_1}$ 。由于手指在水平面做平面运动, 且手指各杆件看做理性刚性杆, 则手指的势能为弹簧的弹性势能, $U(\mathbf{q}) = \frac{1}{2}k_1(q_1 - q_0)^2 + \frac{1}{2}k_2q_2^2 + \frac{1}{2}k_3q_3^2$ 。 q_0 表示根部指节弹簧的初始平衡位置。

3-DOF 索杆桁架式欠驱动机械手动力学方程为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_s = \boldsymbol{\tau}_{T_1} \quad (22)$$

式中, $\mathbf{M}_f = ({}^1M_f, {}^2M_f, {}^3M_f)^T$ 为关节摩擦阻尼项, 且有 ${}^iM_f = \text{sgn}(\dot{q}_i) {}^iF_s + {}^iF_m\dot{q}_i$, iF_s 为第 i 个关节的等效静摩擦力项($\text{N} \cdot \text{m}$), iF_m 为第 i 个关节的等效动摩擦力项($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$), $\text{sgn}(x)$ 为符号函数, 满足

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}; \quad \mathbf{M}_s = ({}^1M_s, {}^2M_s, {}^3M_s)^T \text{ 为弹簧}$$

势能项, 且有 ${}^iM_s = k_i(\theta_i - \theta_{i-1})$; $\mathbf{M}(\mathbf{q}) =$

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} \text{ 为惯性矩阵; } \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix}$$

为离心力矩阵。式(22)是索杆桁架式欠驱动机械手以绳索拉力 T_1 的等效关节驱动力矩为广义输入形式的动力学方程。

根据动力学方程中 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 和 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 的特点, 将 3-DOF 机械手中的 12 个基本物理参数用符号 $\sigma_1 \sim \sigma_6$ 简化代替。

$$\begin{cases} \sigma_1 = m_1r_1^2 + I_1 + (m_2 + m_3)b_1^2 \\ \sigma_2 = m_2r_2^2 + I_2 + m_3b_2^2 \\ \sigma_3 = (m_2r_2 + m_3b_2)b_1 \\ \sigma_4 = m_3r_3^2 + I_3 \\ \sigma_5 = m_3r_3b_1 \\ \sigma_6 = m_3r_3b_2 \end{cases} \quad (23)$$

由式(23), $\sigma_1 \sim \sigma_6$ 只与手指各杆件基本物理参数有关, 称为平面串联机械臂等效物理参数, 则矩阵 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 和 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 中的各元素可以简化描述为

$$\begin{cases} M_{11} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_4 + 2\sigma_5C_{-q_{2,3}} + 2\sigma_3C_{-q_2} + 2\sigma_6C_{-q_3} \\ M_{12} = \sigma_2 + \sigma_4 + \sigma_5C_{-q_{2,3}} + \sigma_3C_{-q_2} + 2\sigma_6C_{-q_3} \\ M_{13} = \sigma_4 + \sigma_5C_{-q_{2,3}} + \sigma_6C_{-q_3} \\ M_{21} = M_{12} \\ M_{22} = \sigma_2 + \sigma_4 + 2\sigma_6C_{-q_3} \\ M_{23} = \sigma_4 + \sigma_6C_{-q_3} \\ M_{31} = M_{13} \\ M_{32} = M_{23} \\ M_{33} = \sigma_4 + \sigma_6C_{-q_3} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} C_{11} = -\sigma_5(\dot{q}_2 + \dot{q}_3)S_{-q_{2,3}} - \sigma_3\dot{q}_2S_{-q_2} - \sigma_6\dot{q}_3S_{-q_3} \\ C_{12} = -\sigma_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)S_{-q_{2,3}} - \sigma_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)S_{-q_2} - \sigma_6\dot{q}_3S_{-q_3} \\ C_{13} = -(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)(\sigma_5S_{-q_{2,3}} + \sigma_6S_{-q_3}) \\ C_{21} = \sigma_5\dot{q}_1S_{-q_{2,3}} + \sigma_3\dot{q}_1S_{-q_2} - \sigma_6\dot{q}_3S_{-q_3} \\ C_{22} = -\sigma_6\dot{q}_3S_{-q_3} \\ C_{23} = -\sigma_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)S_{-q_3} \\ C_{31} = \sigma_5\dot{q}_1S_{-q_{2,3}} + \sigma_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)S_{-q_3} \\ C_{32} = \sigma_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)S_{-q_3} \\ C_{33} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

对于平面串联连杆机械臂, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 和 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 具有以下性质。

- (1) $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为对称正定矩阵。
- (2) $\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2\dot{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为反对称矩阵。

由于 ${}^i\tau_{T_1} = T_1 \sum_{j=1}^{j=i} b_j \sin \alpha_j$, $s \quad \alpha_j \neq$

$\frac{a \sin \theta_j}{\sqrt{a^2 + b_j^2 + 2ab_j \cos \theta_j}}$, $\theta_j = \sum_{k=1}^{k=j} q_k$, 以及 $T_1 \geq 0$, 使

得式(22)具有更独特、复杂的非线性特征。

(1) 式(22)是基于广义坐标 q_i 建立, 而广义驱动力 ${}^i\tau_{T_1}$ 是关于广义坐标 q_i 和绝对关节坐标 θ_i 的非线性方程。

(2) 广义驱动力 ${}^i\tau_{T_1}$ 之间存在线性相关关系, 系统实际有效主驱动力只有 1 个。

(3) 动力学基本方程不能直观反映索杆桁架式手指的“单输入多输出”特点。

(4) 绳索拉力具有非负性。

以上 4 个特征是索杆桁架式欠驱动机械手的典型特点, 也是分析求解该欠驱动机械手抓捕运动与控制问题的难点。

3.2 “A-P”型等效动力学模型建立

索杆桁架式欠驱动机械手不仅具有等效关节驱动力相互耦合的特点, 还同时耦合了手指各个指节的位形。此外, 绳拉力具有非负性特点。以上问题使得索杆桁架式机械手动力学模型具有强耦合、强非线性特征, 其运动控制研究变得更加复杂。在控制领域, 串联欠驱动机械臂的典型代表为若干关节为被动关节的“A-P”型串联机械臂模型, 如图 8 所示。“A-P”型串联机械臂模型的主驱动关节是由电动机直接驱动, 其理论成果并不适用于索杆桁架式欠驱动系统的运动控制分析。

根据 $\boldsymbol{\tau}_{T_1}$ 的特点, 始终存在变换矩阵 $\tilde{\mathbf{P}}_1$ 使得

$${}^1\tilde{\tau}_T = \tilde{P}_1\tau_T = T_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

图8 “A-P”型串联机械臂模型

由式(1)可得

$$q = \tilde{P}\theta \quad \dot{q} = \tilde{P}\dot{\theta} \quad \ddot{q} = \tilde{P}\ddot{\theta} \quad (27)$$

$S = M_f + M_s$ 。将式(27)代入式(22), 并将式(22)“等号”两边同时左乘 $\tilde{P}_1$ 可得

$$\tilde{P}_1 M(q) \tilde{P} \ddot{\theta} + \tilde{P}_1 C(q, \dot{q}) \tilde{P} \dot{\theta} + \tilde{P}_1 S = {}^1\tilde{\tau}_T \quad (28)$$

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\tilde{P}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{b_1 S_{-\alpha_1}} & -\frac{1}{b_1 S_{-\alpha_1}} & -\frac{1}{b_3 S_{-\alpha_3}} \\ 0 & \frac{1}{b_2 S_{-\alpha_2}} & -\frac{1}{b_2 S_{-\alpha_2}} - \frac{1}{b_3 S_{-\alpha_3}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{b_3 S_{-\alpha_3}} \end{pmatrix}$$

令 $D_1(q) = \tilde{P}_1 M(q) \tilde{P}$ 和 $V_1 = \tilde{P}_1 C(q, \dot{q}) \tilde{P}$ 。由于 $M(q)$ 、 $\tilde{P}_1$ 和 $\tilde{P}$ 均满秩, 且 $|\tilde{P}_1| = \frac{1}{b_1 b_2 b_3 S_{-\alpha_1} S_{-\alpha_2} S_{-\alpha_3}}$, $|\tilde{P}| = 1$, 分析可得 $D_1(q)$ 为非对称矩阵, 但是仍为正定矩阵, 且 $|D_1(q)| = \frac{|M(q)|}{b_1 b_2 b_3 S_{-\alpha_1} S_{-\alpha_2} S_{-\alpha_3}}$ 。

式(28)建立了绳索拉力与指节绝对关节坐标 θ_i 的关系方程, 将绳轮分布驱动式欠驱动系统等效转化为“A-P”型欠驱动系统。式(28)从形式上看对应“PPA”型欠驱动模型, 直观地反映了该3-DOF索杆桁架式机械手为“1输入3输出型”欠驱动系统。事实上, 主驱动绳索拉力是同时作用在每一个指节单元上, 因此式(28)所建立的动力学模型是一种假想的“A-P”型欠驱动模型。但是, 式(28)从理论上表明, 手指的绝对关节坐标 $\ddot{\theta}_3$ 是可以作为控制输入进行直接控制, 其他关节绝对坐标作为被动运动关节实现耦合运动。索杆桁架式欠驱动机械手基本参数如表1所示。

表1 手指动力学基本参数

参数	数值	参数	数值
a/mm	100	$\sigma_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.6698
b_i/mm	360	$\sigma_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.0477
r_i/mm	208	$\sigma_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.9815
m_i/kg	4.8	$\sigma_4/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.4257
$I_i/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.218	$\sigma_5/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.3594
$k_i/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	1.0	$\sigma_6/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.3594

4 抓取预变形阶段控制策略

令 $D = \tilde{P}_1 M(q)$, $V = \tilde{P}_1 C(q, \dot{q}) \tilde{P}$, $\tilde{V} = V \dot{\theta}$, $G = \tilde{P}_1 S$, 式(28)可简写作

$$D \ddot{\theta} + \tilde{V} + G = {}^1\tilde{\tau}_T \quad (29)$$

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \quad V = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix}$$

$$\tilde{V} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{pmatrix} \quad {}^1\tilde{\tau}_T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_1 \end{pmatrix}$$

式(29)可写作

$$\begin{cases} D_{11}\ddot{\theta}_1 + D_{12}\ddot{\theta}_2 + D_{13}\ddot{\theta}_3 + V_1 + G_1 = 0 \\ D_{21}\ddot{\theta}_1 + D_{22}\ddot{\theta}_2 + D_{23}\ddot{\theta}_3 + V_2 + G_2 = 0 \\ D_{31}\ddot{\theta}_1 + D_{32}\ddot{\theta}_2 + D_{33}\ddot{\theta}_3 + V_3 + G_3 = T_1 \end{cases} \quad (30)$$

选择 $\ddot{\theta}_3$ 作为控制输入, 将式(30)整理成以 $\ddot{\theta}_3$ 为自变量的形式

$$\ddot{\theta}_1 = {}^3D_1^* \ddot{\theta}_3 + {}^3V_1^* + {}^3G_1^* \quad (31a)$$

$$\ddot{\theta}_2 = {}^3D_2^* \ddot{\theta}_3 + {}^3V_2^* + {}^3G_2^* \quad (31b)$$

$$T_1 = {}^3D_3^* \ddot{\theta}_3 + {}^3V_3^* + {}^3G_3^* \quad (31c)$$

$${}^3D_1^* = \frac{D_{12}D_{23} - D_{22}D_{13}}{D_{11}D_{22} - D_{21}D_{12}} \quad {}^3V_1^* = \frac{D_{12}V_2 - D_{22}V_1}{D_{11}D_{22} - D_{21}D_{12}}$$

$${}^3G_1^* = \frac{D_{12}G_2 - D_{22}G_1}{D_{11}D_{22} - D_{21}D_{12}} \quad {}^3D_2^* = \frac{D_{21}D_{13} - D_{11}D_{23}}{D_{11}D_{22} - D_{21}D_{12}}$$

$${}^3V_2^* = \frac{D_{21}V_1 - D_{11}V_2}{D_{11}D_{22} - D_{21}D_{12}} \quad {}^3G_2^* = \frac{D_{21}G_1 - D_{11}G_2}{D_{11}D_{22} - D_{21}D_{12}}$$

$${}^3D_3^* = D_{31} {}^3D_1^* + D_{32} {}^3D_2^* + D_{33}$$

$${}^3V_3^* = D_{31} {}^3V_1^* + D_{32} {}^3V_2^* + V_3$$

$${}^3G_3^* = D_{31} {}^3G_1^* + D_{32} {}^3G_2^* + G_3$$

令 $\mu = \ddot{\theta}_3$ 作为控制输入, 由式(31c), 欠驱动手指实际驱动力满足

$$T_1 = {}^3D_3^* \mu + {}^3V_3^* + {}^3G_3^* \quad (32)$$

4.1 基于 θ_3 轨迹规划的运动分析

由式(32), 给定有效的 θ_3 路径, 可以得到对应的 T_1 值。例如, θ_3 从初始位置 $\theta_3^0 = 20^\circ$ 以五次样条

规划的轨迹运动到目标位置 $\theta_3^1 = 120^\circ$ 位形, 运动时间分别设为 10 s、15 s 和 20 s, 手指运动轨迹和绳驱动力变化曲线, 如图 9 所示。

图 9 基于五次样条轨迹规划的关节运动与驱动力

由图 9a 可知, 当 $t=10$ s 时, 存在 $T_1 < 0$ 现象。由于绳索只能提供拉力, 当 $T_1 < 0$ 时, 手指受到的实际驱动力为 $T_1 = 0$ 。这表明, 采用 $t=10$ s 实现快速弯曲运动的轨迹规划在实际中无法实现。当 $t=15$ s 和 $t=20$ s 时, 均存在有效的绳索拉力, 实现期望的运动轨迹。因此, 基于末端指节五次样条规划方法获得末端指节轨迹, 适合于向内弯曲收拢较慢时。

4.2 基于模型的 PD 控制器设计

由于 $\mu = \ddot{\theta}_3$ 为非观测值, 引入 PD 控制器

$$\mu = K_p(\theta_3^d - \theta_3) + K_d(\dot{\theta}_3^d - \dot{\theta}_3) \quad (33)$$

将式(33)代入式(32), 可得控制器为

$$T_1 = {}^3D_3^*[K_p(\theta_3^d - \theta_3) + K_d(\dot{\theta}_3^d - \dot{\theta}_3)] + {}^3V_3^* + {}^3G_3^* \quad (34)$$

考虑到各指节间存在指节间摩擦力, 令 ${}^iF_s = 0.6$, ${}^iF_m = 0.4$ 。在 Matlab/Simulink 进行仿真分析, 实现末端指节由初始位置 $\theta_3^0 = 20^\circ$ 运动到目标位置 $\theta_3^1 = 120^\circ$ 位形。由图 4a)可知, 当 $\theta_3^1 = 120^\circ$ 时, 手指的平衡位形为 $\theta = (68.7^\circ, 103^\circ, 120^\circ)$ 。分别取 $K_p = 15$ 、 $K_d = 60$ 和 $K_p = 30$ 、 $K_d = 60$, 仿真曲线如图 10 和图 11 所示。当 K_p 取值较大时, 手指更快地运动到平衡位形。但是, 在运动过程中存在绳索松弛现象, 如图 11c 所示。在该阶段, 系统依靠弹簧形变产生的回复力进行自适应调整。

图 10 $K_p = 15$ 、 $K_d = 60$, 手指位形与绳索驱动力

图 11 $K_p = 30$ 、 $K_d = 60$, 手指位形与绳索驱动力

5 抓取预变形阶段运动控制试验

机械手试验系统硬件部分由机械手样机本体、电动机及驱动器、传感器及其预处理电路、硬件控制电路和工控机等五部分组成,如图12所示。机械手由两个对称布置的手指组成。本试验中,取手指1为研究对象,手指有3个指节、3个角位移传感器、1个电动机和1个绳拉力传感器组成。

图12 索杆桁架式欠驱动机械手试验系统

机械手试验系统软件系统选用 Windows7 系统平台,选取 Matlab2013b/Simulink Desktop Real-Time 下的 External 模式开展仿真分析。Real-Time Windows Target Kernel 作为实时内核,满足控制的实时性要求。工控机采样周期为 0.005 s。将欠驱动机械手样机与 Matlab/Simulink 仿真平台关联,构成既有数值仿真代码又有部分实物的试验平台被称为半实物仿真^[25]。

在 Matlab/Simulink 平台搭建运动控制试验系统,手指的运动控制框图原理图如图13所示。在试验中,通过调整 K_p 和 K_d 参数,能够使手指快速运动到目标平衡位形,如图14所示。试验结果表明,采用该基于模型的 PD 控制器能够使手指快速运动到 $\theta_3^1 = 120^\circ$ 位型,并保持准静力平衡状态。

图13 欠驱动手指控制框图

手指处于准静态平衡状态时的试验数值与图4分析的理論数值对比,如表2所示。

图14 $K_p = 10$ 、 $K_d = 30$ ，手指位形与绳索驱动力

表2 试验结果分析

参数	理论值	试验值	相对误差(%)
关节角 $\theta_3 / (^\circ)$	120.0	119.6	-0.33
关节角 $\theta_2 / (^\circ)$	103.0	101.5	-1.46
关节角 $\theta_1 / (^\circ)$	68.7	64.7	-5.82
拉力 T_1 / N	4.46	5.23	17.26

由于手指关节具有耦合运动特点,令 $\theta_1 = \theta_1(\theta_3)$ 和 $\theta_2 = \theta_2(\theta_3)$ 。根据仿真分析和试验结果, $\theta_1(\theta_3)$ 、 $\theta_2(\theta_3)$ 的试验值与仿真值变化趋势如图15所示。

指关节间的摩擦力和地面间摩擦力导致手指关节角的试验值比理论值偏小。由于手指处于平衡位形时,摩擦力为静摩擦力,导致绳索拉力实验室比理论值偏差较大。另外,手指运动过程中实际的摩擦因素影响复杂,导致 $\theta_1(\theta_3)$ 、 $\theta_2(\theta_3)$ 的试验曲线与

图15 $K_p = 10$ 、 $K_d = 30$ ，试验与仿真对比

仿真曲线偏差较大。但是, $\theta_1(\theta_3)$ 、 $\theta_2(\theta_3)$ 的试验曲线与仿真曲线变化趋势一致,且最终都收敛到理论值附近。理论分析和试验结果均表明,以 $\ddot{\theta}_3$ 为控制输入,所提分析方法和运动控制策略真实、有效,能够实现绳索驱动式欠驱动手指从初始位置 $\theta_3^0 = 20^\circ$ 运动到目标位置 $\theta_3^1 = 120^\circ$,并保持准静态平衡。

6 结论

(1) 根据虚功原理, 建立了绳轮传动系统等效关节驱动力矩模型, 将绳索耦合式分布驱动转化为耦合的等效关节驱动。

(2) 建立了欠驱动手指准静态模型, 分析了关节弹簧配置分布与手指最大平衡位形的关系, 确定了手指关节耦合运动与关节弹簧配置的对应关系。当关节弹簧配置一定时, 手指具有唯一的准静态运动平衡位形, 确定了欠驱动手指静力平衡时关节间的耦合特点。

(3) 根据能量等效法, 对平行四边形指节单元简化处理。采用拉格朗日方程法, 建立了 3-DOF 串联机械臂一般动力学方程, 并将绳轮分布驱动式欠驱动系统等效转化为“A-P”型欠驱动系统。

(4) 根据准静态平衡位置分布和动力学模型, 分析了机械手抓取预变形阶段运动控制策略。在 Matlab/Simulink 平台开展运动控制仿真和试验。仿真分析和试验结果都验证了所提动力学分析方法和运动控制策略的有效性。

参 考 文 献

- [1] HIROSE S, UMETANI Y. The development of soft gripper for the versatile robot hand[J]. Mechanism and Machine Theory, 1978, 13(3): 351-359.
- [2] CECCARELLI M, CARBONE G. Design considerations for an underactuated robotic finger mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(4): 475-488.
- [3] 金波, 林龙贤. 果蔬采摘欠驱动机械手爪设计及其力控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(19): 1-8.
JIN Bo, LIN Longxian. Design and force control of an underactuated robotic hand for fruit and vegetable picking[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(19): 1-8.
- [4] LALIBERTÉ T, GOSSELIN C M. Underactuation in space robotic hands[C]// International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montréal, Canada. 2001: 18-21.
- [5] LALIBERTÉ T, GOSSELIN C M. Simulation and design of underactuated mechanical hands[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(1-2): 39-57.
- [6] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. On the force capability of underactuated fingers[C]// 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422). IEEE, 2003: 1139-1145.
- [7] LIANG D, SONG J, ZHANG W, et al. PASA Hand: A novel parallel and self-adaptive underactuated hand with gear-link mechanisms[C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer, 2016: 134-146.
- [8] LI G X, ZHANG C, ZHANG W, et al. Coupled and self-adaptive under-actuated finger with a novel s-coupled and secondly self-adaptive mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(4): 041010.
- [9] LUO C, YANG S, ZHANG W, et al. MPJ hand: A self-adaptive underactuated hand with flexible fingers of multiple passive joints[C]// IEEE ICARM 2016 - 2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. 2016: 184-189.
- [10] WANG Q, QUAN Q, DENG Z, et al. An underactuated robotic arm based on differential gears for capturing moving targets: Analysis and design[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8(4): 041012.
- [11] LIU Y, FENG F, GAO Y. HIT prosthetic hand based on tendon-driven mechanism[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(5): 1778-1791.
- [12] WANG L, DELPRETO J, BHATTACHARYYA S, et al. A highly-underactuated robotic hand with force and joint angle sensors[C]// Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2011: 1380-1385.
- [13] OZAWA R, HASHIRII K, YOSHIMURA Y, et al. Design and control of a three-fingered tendon-driven robotic hand with active and passive tendons[J]. Autonomous Robots, 2014, 36(1-2): 67-78.
- [14] FIROUZEH A, PAIK J. Grasp mode and compliance control of an underactuated origami gripper using adjustable stiffness joints[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 2165-2173.
- [15] 刘菲, 何广平, 陆震. 弹性欠驱动四指灵巧手设计与试验[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 53-59.
LIU Fei, HE Guangping, LU Zhen. Research and design of a novel tendon driven underactuated multi-fingered hand[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 53-59.
- [16] SPONG M W. The swing up control problem for the acrobat[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(1): 49-55.
- [17] FANTONI I, LOZANO R, SPONG M W. Energy based control of the pendubot[J]. IEEE Transactions on

- Automatic Control, 2000, 45(4): 725-729.
- [18] EOM M, CHWA D. Robust swing-up and balancing control using a nonlinear disturbance observer for the pendubot system with dynamic friction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2): 331-343.
- [19] MAHINDRAKAR A D, RAO S, BANAVAR R N. Point-to-point control of a 2R planar horizontal underactuated manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(7): 838-844.
- [20] 赖旭芝, 余锦华, 吴敏. 欠驱动机械系统控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LAI Xuzhi, TONG Jinhua, WU Min. Control of underactuated mechanical system[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [21] 黄自鑫, 赖旭芝, 王亚午, 等. 二阶非完整平面 3R 欠驱动机械臂位置控制[J]. 东南大学学报, 2019, 49(2): 245-250.
- HUANG Zixin, LAI Xuzhi, WANG Yawu, et al. Position control for planar 3R underactuated manipulator with second-order non-holonomic constraints [J]. Journal of Southeast University, 2019, 49(2): 245-250.
- [22] 黄自鑫, 赖旭芝, 王亚午, 等. 基于轨迹规划的平面三连杆欠驱动机械臂位置控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 382-388.
- HUANG Zixin, LAI Xuzhi, WANG Yawu, et al. Position control of planar three-link underactuated manipulator based on trajectory planning[J]. Control and Design, 2020, 35(2): 382-388.
- [23] QIAO S, LIU R, GUO H, et al. Configuration design of an under-actuated robotic hand based on maximum grasping space[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 35.
- [24] QIAO S, GUO H, LIU R, et al. Self-adaptive grasp process and equilibrium configuration analysis of a 3-DOF UACT robotic finger[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 133: 250-266.
- [25] SHIAKOLAS P S, SCHENCK S R V, PIYABONGKARN D, et al. Magnetic levitation hardware-in-the-loop and MATLAB-based experiments for reinforcement of neural network control concepts[J]. IEEE Transactions on Education, 2004, 47(1): 33-41.
-
- 作者简介: 乔尚岭, 男, 1990 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为空间抓捕机构, 欠驱动机械手运动控制。
E-mail: qiaosl@hit.edu.cn
- 刘荣强(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空间大型可展开机构与控制。
E-mail: liurq@hit.edu.cn
- 郭宏伟, 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为空间折叠机构, 可变构型机构与结构。
E-mail: guohw@hit.edu.cn
- 丁戊辰, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为欠驱动系统控制, 模糊控制方法。
E-mail: dshch@163.com
- 李兵, 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机构学、宇航折叠机构、并联机器人及并联运动装备。
E-mail: libing.sgs@hit.edu.cn
- 邓宗全, 男, 1956 年出生, 中国工程院院士, 博士研究生导师。主要研究方向为宇航空间机构及控制, 特种机器人。
E-mail: dengzq@hit.edu.cn