

# 三自由度欠驱动机器人抓握目标杆运动控制

吴伟国, 席宝时

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:**为解决 Acrobot 等一类欠驱动机器人依靠励振与其他控制方法相结合不能实现可靠抓握目标杆运动控制的问题. 提出欠驱动机器人 大阻尼非完整约束概念, 研究稳定抓握目标杆的控制策略与方法. 设计专用于此类机器人的手爪, 该手爪可抓紧支撑杆构成大阻尼非完整约束状态; 提出利用快速摇起阶段的励振控制与大阻尼状态下退转反馈控制相结合实现欠驱动机器人稳定抓握目标杆的控制策略, 并进行控制器设计; 利用 ADAMS 与 MATLAB 软件建立三自由度欠驱动机器人联合仿真控制系统模型. 仿真结果表明, 该方法可实现可靠的抓握目标杆运动控制, 验证了该机器人各关节的驱动能力以及所提出控制策略的有效性.

**关键词:** 欠驱动机器人; 运动控制; 参数激励; 大阻尼非完整约束

**中图分类号:** TP242      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)11-0026-06

## Motion control for 3-DOF underactuated robot to grasp objective rod

WU Weiguo, XI Baoshi

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** To solve the problem of Acrobot that an underactuated robot relying on excitation combined with other control methods can not achieve complete the action of catching the target rod, we firstly propose concept of research of big damping nonholonomic constraint in underactuated robot and control strategy of stably grasping target rod, design the gripper dedicated to this kind of robot, which can grasp the rod constitutes a big damping nonholonomic constraint state, and propose the control strategy of using rapidly swing up combined with turn back feedback control for the underactuated robot stable grasping rod motion. The corresponding controller is designed, and the robot simulation model is established using ADAMS and MATLAB software. The simulation achieves reliable grasping rod motion control of the robot, and the experimental results verify the driving ability of each joint of the robot and the effectiveness of the proposed control strategy.

**Key words:** underactuated robot; motion control; parametric excitation; big damping nonholonomic constraint

灵长类动物如长臂猿等的生活环境在森林里, 其在树间的运动多是靠双臂交替摆动轮次抓握树枝完成前进动作. 鉴于其特殊的运动形式, 一些学者将长臂猿简化为两杆欠驱动移动机器人, 其简化模型如图 1 所示, 该结构与体操机器人 Acrobot 是一致的. Fukuda 等<sup>[1-2]</sup>设计了一台两杆欠驱动机器人(BMR), 该机器人的自适应控制器

能使机器人实现从静止平衡状态摇起, 在水平放置的梯子上交替抓握目标杆, 但在实验过程中会发生抓握失败, 需要多次摇起过程, 并不能做到可靠的抓握目标杆运动. Nishimurai 等<sup>[3]</sup>采用基于误差的智能学习方法, Toshio 等<sup>[4]</sup>采用视觉伺服方法, Hideki 等<sup>[5]</sup>与 Xin X 等<sup>[6-7]</sup>采用基于能量的控制方法实现了对此类机器人的实际控制. 近两年来, Xu C 等<sup>[8]</sup>和 Nakannishi 等<sup>[9]</sup>分别采用最优轨道生成方法以及变刚度驱动控制的方法对此类机器人进行了研究, 但以上研究都无法使得该机器人做到可靠抓握目标杆运动. 国内一些高校对此类机器人也进行了研究<sup>[10-12]</sup>, 研究方向集中

收稿日期: 2013-05-24.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z201, 2012AA041601).

作者简介: 吴伟国(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 吴伟国, wuwg@hit.edu.cn.

于控制算法的研究, 缺少此类机器人结构与控制策略的创新研究.

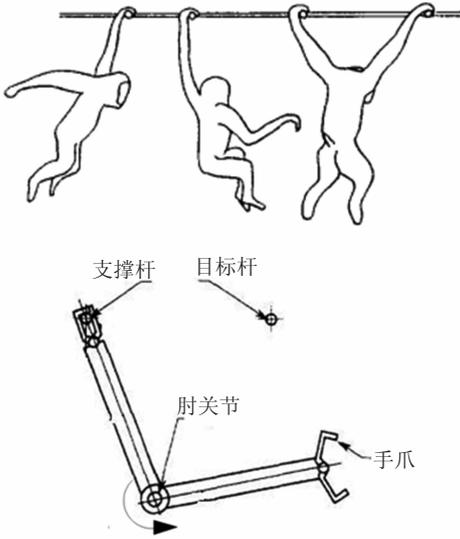


图 1 BMR 机器人模型

本文设计了一种专用于此类机器人的手爪, 并提出了一种新的控制策略, 抓取过程中欠驱动手爪会抓紧支撑杆使得机器人成大阻尼非完整约束状态, 并在手爪内设置了摩擦轮机构, 测量其围绕支撑杆退转位移, 驱动肘关节与腕关节伺服补偿欠驱动手爪退转位移, 使得机器人能够准确可靠的抓握目标杆.

### 1 三自由度欠驱动机器人机构设计

机器人采用双臂手对称设计, 单臂包括手爪与腕关节, 两臂之间用肘关节相连, 机器人共有 3 个自由度, 其机构简图如图 2 所示.

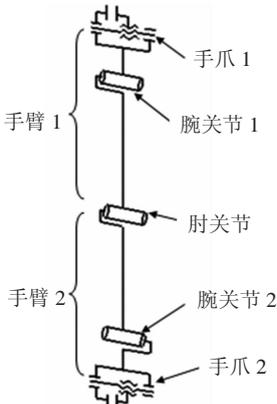


图 2 机器人机构简图

由于机器人靠双臂移动, 手爪承担基座和末端执行器的作用, 故要求其质量轻, 刚度高. 本实验室发明手爪结构图如图 3 所示, 该手爪采用平移型夹持手爪结构, 电机通过齿轮传动与滚珠丝杠, 将电机驱动力矩转化为手爪开合的直线推力, 该结构能实现精准定位也能提供较大夹紧力<sup>[13]</sup>.

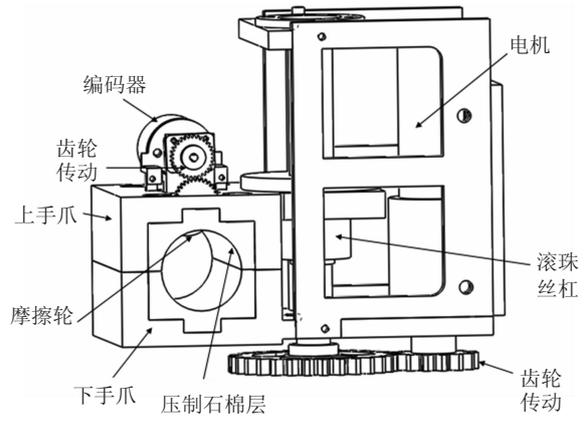


图 3 手爪结构图

实验研究中发现, 当手爪抓握住支撑杆形成较大卡紧力以获得大摩擦力矩阻止手爪绕支撑杆轴线转动状态时, 也会发生手爪绕支撑杆轴线缓慢退转现象, 因此, 在手爪中增加了测量其围绕支撑杆转动位移的摩擦轮机构, 并将其镶嵌在手爪中. 手爪闭合后摩擦轮与支撑杆之间产生压紧力, 从而当手爪相对于支撑杆相对转动时, 摩擦轮亦同时转动, 并通过齿轮传动机构传递给光电编码器, 测得手爪围绕支撑杆转动角位移. 为增加手爪与支撑杆间摩擦力, 在与支撑杆表面接触的手爪内表面设置可获得大摩擦力的阻尼材料以阻止退转或减缓退转速度 (即加大阻尼系数), 称为大阻尼欠驱动非完整约束状态.

肘关节与腕关节的驱动部分均采用直流伺服电机加同步带谐波减速器结构, 肘关节最大力矩可达  $49 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 最大速度为  $3.33 \text{ rad/s}$ . 腕关节力矩可达  $32 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 速度可达  $1.25 \text{ rad/s}$ . 机器人总长  $1.4 \text{ m}$ , 质量为  $10.39 \text{ kg}$ , 机器人机构参数与物理参数详见图 4 与表 1, 且将抓握支撑杆的手爪与支撑杆间接合关系简化成回转关节, 按抓握程度不同分为松握下自由回转欠驱动关节和紧握下大阻尼欠驱动关节.

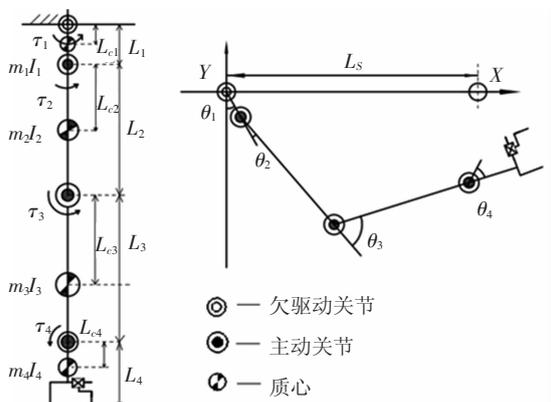


图 4 机器人机构参数及抓握目标杆运动机构模型

表1 机器人物理参数

杆件序号	质量/kg	杆长/m	质心长度/m	$I/(kg \cdot m^2)$
1	2.46	0.16	0.09	0.09
2	3.13	0.54	0.29	0.46
3	2.34	0.54	0.30	0.52
4	2.46	0.16	0.08	0.02

## 2 动力学分析

将三自由度欠驱动机器人抓握目标杆运动过程划分为摇起阶段和抓握阶段. 应用 Euler-Lagrange 方法对机器人建立动力学方程:

$$\mathbf{D}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \boldsymbol{\tau}.$$

式中:  $\mathbf{D}(\theta) = [D_{ij}]$  为惯性矩阵,  $\mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) = [V_i]$  为科式力与离心力项,  $\mathbf{G}(\theta) = [G_i]$  为重力项,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_i]$  为加载各杆件驱动力矩,  $i, j = 1, 2, 3, 4$ .

### 2.1 摇起阶段动力学分析

摇起阶段, 机器人腕关节皆呈保持力矩状态, 即  $\theta_2 = \theta_4 = 0$ . 手爪 1 虚握支撑杆呈自由回转状态, 因无驱动力矩形成欠驱动关节, 即  $\tau_1 = 0$ , 机器人驱动关节仅为肘关节, 构成了二阶倒立摆 Acrobot 模型, 其动力学方程如下:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{13} \\ D_{31} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_3 \end{bmatrix}.$$

式中:

$$D_{11} = m_{12}l_{c1}^2 + m_{34}L_{12}^2 + m_{34}l_{c2}^2 + 2m_{34}L_{12}l_{c2}\cos\theta_3 + J_1 + J_2,$$

$$D_{33} = m_{34}l_{c2}^2 + J_2,$$

$$D_{13} = D_{31} = m_{34}l_{c2}^2 + m_{34}L_{12}l_{c2}\cos\theta_3 + J_2;$$

$$V_1 = -m_{34}L_{12}l_{c2}\sin\theta_3\dot{\theta}_3^2 - 2m_{34}L_{12}l_{c2}\sin\theta_3\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1,$$

$$V_3 = m_{34}L_{12}l_{c2}\sin\theta_3\dot{\theta}_1^2;$$

$$G_1 = (m_{12}l_{c1} + m_{34}l_1)g\sin\theta_1 + m_{34}l_{c2}g\sin(\theta_1 + \theta_3),$$

$$G_3 = m_{34}l_{c2}g\sin(\theta_1 + \theta_3).$$

$$\text{其中: } l_{c1} = \frac{m_1L_{c1} + m_2(L_1 + L_{c2})}{m_1 + m_2},$$

$$l_{c2} = \frac{m_3L_{c3} + m_4(L_3 + L_{c4})}{m_3 + m_4};$$

$$J_1 = I_1 + I_2 + m_2(L_1 + L_{c2})^2,$$

$$J_2 = I_3 + I_4 + m_2(L_3 + L_{c4})^2.$$

### 2.2 抓握阶段动力学分析

抓握阶段, 手爪 1 与支撑杆处于大阻尼非完整约束状态, 腕关节 1 呈保持力矩状态, 即  $\theta_2 = 0$ , 手臂 1 可看作为 1 个杆件, 系统可看作为垂直平面的 3 自由度机器人. 建立动力学方程如下:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{13} & D_{14} \\ D_{31} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中:

$$D_{11} = C_1 + C_2 + C_4 + 2C_3\cos\theta + 2C_5\cos\theta_{34} + 2C_6\cos\theta_4,$$

$$D_{13} = D_{31} = C_2 + C_4 + C_3\cos\theta_3 + C_5\cos\theta_{34} + 2C_6\cos\theta_4,$$

$$D_{14} = D_{41} = C_4 + C_5\cos\theta_{34} + C_6\cos\theta_4,$$

$$D_{33} = C_2 + C_4 + 2C_6\cos\theta_4,$$

$$D_{34} = D_{43} = C_4 + 2C_6\cos\theta_4,$$

$$D_{44} = C_4;$$

$$V_1 = -C_3(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_3\sin\theta_3 - C_5(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)(\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)\sin\theta_{34} - C_6(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)\dot{\theta}_4\sin\theta_4,$$

$$V_2 = C_3\dot{\theta}_1^2\sin\theta_3 + C_5\dot{\theta}_1^2\sin\theta_{34} - C_6(2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_3\sin\theta_4,$$

$$V_3 = C_5\dot{\theta}_1^2\sin\theta_{34} + C_6(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2\sin\theta_4;$$

$$G_1 = \beta_1\sin\theta_1 + \beta_2\sin\theta_{13} + \beta_3\sin\theta_{134},$$

$$G_2 = \beta_2\sin\theta_{13} + \beta_3\sin\theta_{134},$$

$$G_3 = \beta_3\sin\theta_{134};$$

$$C_1 = m_{12}l_{c1}^2 + m_{34}L_{12}^2 + J_1,$$

$$C_2 = m_3L_{c3}^2 + m_4L_2^2 + I_3,$$

$$C_3 = (m_3L_{c3} + m_4L_4)L_{12},$$

$$C_4 = m_4L_{c4}^2 + I_4,$$

$$C_5 = m_4L_{12}L_{c4}, C_6 = m_4L_3L_{c4};$$

$$\beta_1 = (m_{12}l_{c1} + m_3L_{12} + m_4L_{12})g,$$

$$\beta_3 = (m_3L_{c3} + m_4L_3)g, \beta_4 = m_4L_{c4}g.$$

其中:  $\theta_{\psi\gamma\zeta} = \theta_\psi + \theta_\gamma + \theta_\zeta$  (下标  $\psi, \gamma, \zeta$  取 1, 3, 4; 且可任取其二、三个下标);  $L_{12} = L_1 + L_2$ .

式(1)中  $\tau_1$  为抓握阶段紧握支撑杆的手爪与支撑杆间构成欠驱动关节的摩擦力矩, 该力矩是不稳定的且受卡紧力和摩擦系数限制. 实验表明, 即使卡紧力达到最大卡紧能力, 摩擦力矩依然不稳定且不再增加;  $\tau_3, \tau_4$  分别为抓握阶段肘、腕关节主驱动力矩.

## 3 抓握目标杆运动控制器设计

### 3.1 摇起阶段控制策略

参照人荡秋千过程, 将参数激励方法用于机器人的摇起, 摇起 1 个周期可分为 4 个阶段, 如图 5 所示, (a) 与 (c) 阶段摇起手臂 2 至期望角度  $a$ , 使得动能最大转化为势能, (b) 与 (d) 阶段则将手臂 2 放下, 使势能最大转化为动能. 即在驱动力矩与重力的双重激励下, 不断提升和降低系统质心, 增加机器人的总能量. 本文采用正弦曲线作为肘关节的参考输入, 即

$$\theta_3^d = a\sin((2\pi/T)t).$$

式中  $a$  为摇起振幅,  $T$  为激励周期.

理想的肘关节轨迹应满足以下条件: 1) 摇起

过程中应减小输入能量, 最大利用重力作用实现摇起. 即所输入的总能量应尽量低. 2) 摇起阶段末尾末端手爪中心与目标杆之间距离尽可能小. 3) 满足切换条件的摇起阶段时间应尽可能少. 为满足以上要求, 定义评价函数  $C$  如下<sup>[14]</sup>:

$$C = f(C_E) + f(C_D) + f(C_T).$$

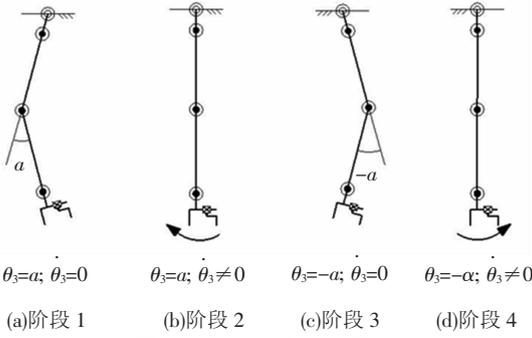


图 5 摇起阶段单个周期

其中:

- 1) 能量评价函数  $C_E = \int_0^{nT} \tau_3 \dot{\theta}_3 dt$ , 其中  $nT$  为满足切换条件的时间;
- 2) 距离评价函数  $C_D = |r_d - r|$ , 其中  $r_d$  为目标杆中心至原点距离,  $r$  为末端手爪至原点距离. 即为末端手爪与目标杆中心之间的距离;
- 3) 时间评价函数  $C_T = nT$ , 其中  $n$  为激励周期次数;
- 4) 为使得以上评价函数权重一致, 需进行归一化处理, 本文采用线性函数归一化方法. 以能量评价函数为例, 如式(2)(对于  $C_D, C_T$ , 式(2)可相应换成  $C_D, C_{Dmax}, C_{Dmin}, C_T, C_{Tmax}, C_{Tmin}$ ):

$$f(C_E) = \frac{C_E - C_{Emin}}{C_{Emax} - C_{Emin}}. \quad (2)$$

摇起运动结束后, 机器人将进入到抓握运动控制阶段, 为减小切换到抓握阶段所带来的震荡, 机器人还应满足两个基本条件: 1) 位置条件, 设杆件之间间隔长  $L_s$ , 应满足机器人的质心在  $x$  轴的投影  $X_g$  至少等于  $L_s/2$ ; 2) 速度条件, 机器人的质心速度  $V_g$  应为零, 即

$$\begin{cases} X_g = \sum_{i=1}^4 m_i \left( \sum_{j=i-3}^{i-1} L_j \sin\left(\sum_{j=i-3}^{i-1} \theta_j\right) + L_{ci} \sin\left(\sum_{i=1}^4 \theta_i\right) \right) / \\ \sum_{i=1}^4 m_i \geq \frac{L_s}{2}, \\ V_g = \sum_{i=1}^4 m_i L_i \dot{\theta}_i / \sum_{i=1}^4 m_i = 0. \end{cases} \quad (3)$$

### 3.2 摇起阶段控制律的推导

机器人在摇起过程中, 由于欠驱动系统的非

线性与强耦合性的特点, 无法像完整约束系统实现完全反馈线性化, 可由部分反馈线性化方法解决该问题<sup>[15]</sup>.

将  $\ddot{\theta}_1 = -D_{11}^{-1}(D_{13}\ddot{\theta}_3 + V_1 + G_1)$  导入主动肘关节驱动方程, 得

$$\tau = \overline{\overline{D}}_3 \ddot{\theta}_3 + \overline{\overline{V}}_3 + \overline{\overline{G}}_3.$$

式中:

$$\overline{\overline{D}}_3 = D_{33} - \frac{D_{13}^2}{D_{11}}; \overline{\overline{V}}_3 = V_3 - \frac{D_{13}V_1}{D_{11}}; \overline{\overline{G}}_3 = G_3 - \frac{D_{13}G_1}{D_{11}}.$$

设  $\dot{\theta}_3 = u$  作为控制输入, 并引入 PD 控制器, 选择控制输入为

$$u = k_p(\theta_3^d - \theta_3) - k_d\dot{\theta}_3,$$

从而得到系统的输入:

$$\tau = \overline{\overline{D}}_3(k_p(\theta_3^d - \theta_3) - k_d\dot{\theta}_3) + \overline{\overline{V}}_3 + \overline{\overline{G}}_3.$$

### 3.3 抓握阶段控制策略

当机器人满足切换位置和速度条件后, 切换为抓握阶段, 欠驱动手爪电机进给以压缩石棉层使其抓紧支撑杆构成大阻尼非完整约束状态, 此时, 机器人在重力作用下会因大阻尼欠驱动关节阻力矩不足以及靠摩擦传力的不稳定性而产生缓慢退转, 需要驱动肘关节与腕关节进行位置伺服快速补偿退转角位移. 为实现末端手爪以期望的速度和姿态实现抓握目标杆, 将抓握过程分为手臂对准、手爪伸入、手爪抓握 3 个运动阶段, 如图 6 所示.

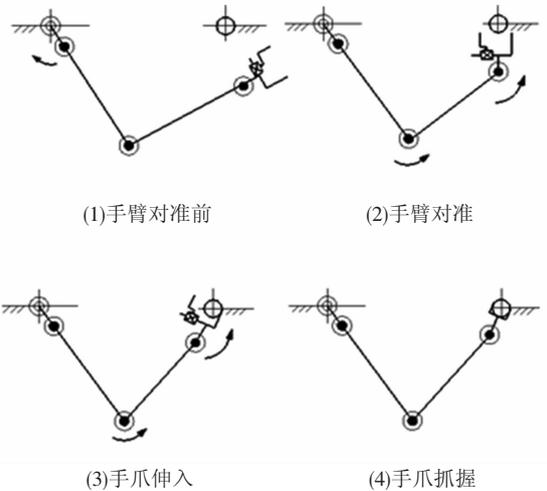


图 6 抓握阶段运动过程

抓握阶段中由于机器人处于大阻尼非完整约束状态, 且手爪内置摩擦轮机构可测得欠驱动手爪围绕支撑杆转动角位移  $\theta_1$ , 可依据逆运动学规划好各关节的轨迹, 采用基于轨迹跟踪控制方法控制机器人. 逆运动学为已知末端位置  $(x, y)$  和  $\theta_1$ , 求到达目标位置肘关节与腕关节分别需转



出控制策略的有效性。

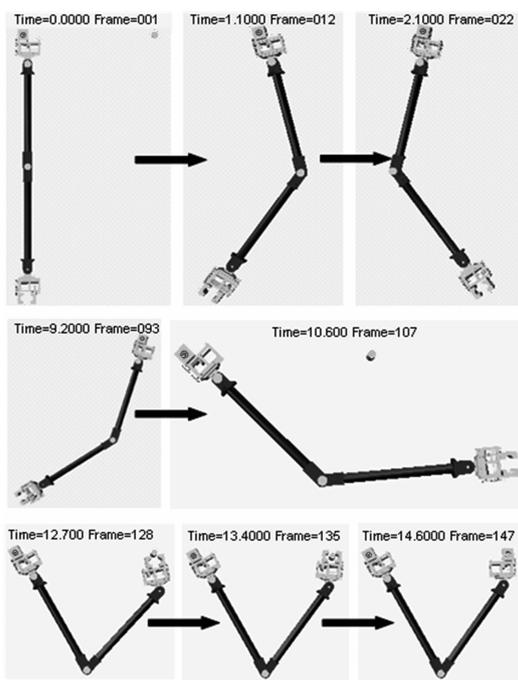


图 10 仿真视频截图

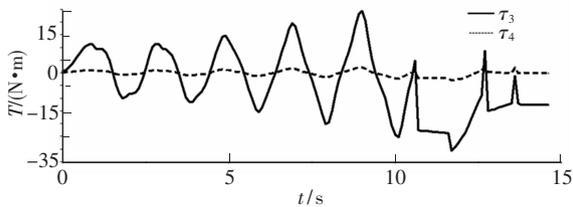


图 11 机器人抓握目标杆运动的主动关节驱动力矩曲线图

## 5 结 论

1) 首次提出研究欠驱动机器人 大阻尼非完整约束、稳定抓握目标杆运动控制策略的问题。

2) 提出并设计了专用于欠驱动机器人抓握目标杆运动控制的手爪, 该手爪可在运动过程中可抓紧支撑杆构成大阻尼非完整约束状态, 并在手爪内增设了可检测手爪围绕支撑杆转动位移的摩擦轮机构。

3) 提出了一种新的控制策略, 即摇起阶段的快速励振控制与抓握阶段中机器人在大阻尼非完整约束状态下退转反馈控制相结合的控制策略, 并进行了控制器的设计。

4) 仿真实验验证了所提出的控制策略能够使得三自由度欠驱动机器人实现可靠抓握目标杆运动, 同时为后续连续移动理论与实验研究提供了基础。

## 参考文献

[1] NAKANISHI J, FUKUDA T, KODITSCHKEK D. A brachiating robot controller[J]. IEEE Transactions on

- Robotics and Automation, 2000, 16(2): 109 – 123.
- [2] NAKANISHI J, FUKUDA T, KODITSCHKEK D E. Brachiation on a ladder with irregular intervals [J]. Advanced Robotics, 2002, 16(2): 147 – 160.
- [3] NISHIMURA H, FUNAKI K. Motion control of three-link brachiation robot by using final-state control with error learning [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1998, 3(2): 120 – 128.
- [4] TOSHIO F, KEIICHI I, SEKIYAMA K. Vision based real time trajectory adjustment for brachiation robot [J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers, part C, 2007, 73(5): 1508 – 1513.
- [5] KAJIMA H, HASEGAWA Y, FUKUDA T. Energy based swing-back control for continuous brachiation of a multilocomotion robot [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2006, 21(9): 1025 – 1043.
- [6] XIN X, YAMASAKI T. Energy-based swing-up control for a remotely driven acrobot: theoretical and experimental results[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 1048 – 1056.
- [7] XIN X, JUURI K. Existence and design of strongly stabilizing controller for the Acrobot[C]//2012 31st Chinese Control Conference (CCC). Hefei: IEEE, 2012: 1446 – 1451.
- [8] XU C, YANG Z, MING A. Motion planning of a golf swing robot[J]. Mechatronics, 2012, 22(1): 13 – 23.
- [9] NAKANISHI J, RAWLIK K, VIJAYAKUMAR S. Stiffness and temporal optimization in periodic movements: An optimal control approach [C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Francisco: IEEE, 2011: 718 – 724.
- [10] 程红太, 张晓华. 一类欠驱动机械系统的虚约束动态伺服控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(8): 818 – 824.
- [11] 赵旖旎, 程红太, 张晓华. 基于动态伺服的欠驱动双摆机器人仿生悬摆控制[J]. 机器人, 2009, 31(4): 289 – 295.
- [12] 赖旭芝, 潘昌忠, 吴敏. 一类欠驱动机械系统的全局鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 1023 – 1027.
- [13] 吴伟国, 梁风. 地面移动及空间桁架攀爬两用双臂手移动机器人: 中国, CN101434268A. [P]. 2009. 05. 20 [2013. 04. 28]. <http://www.patentics.com/html/20328/7958.htm>.
- [14] SAITO F, FUKUDA T, ARAI F. Swing and locomotion control for a two-link brachiation. robot [J] Control Systems, IEEE, 1994, 14(1): 5 – 12.
- [15] NOZOMU A, MICHITO O, YASUO K. Parameter identification and swing-up control of an acrobot system [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. HongKong: IEEE, 2005: 1040 – 1045.

(编辑 杨波)