

## 多指灵巧手的位置/力矩控制

姜力<sup>1,2</sup>, 蔡鹤皋<sup>1</sup>, 刘宏<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 大庆高新技术产业开发区 博士后科研工作站, 黑龙江 大庆 163316)

**摘要:** 提出了一种新的多指手位置/力矩控制策略. 该策略基于滑模位置控制和 PD 力矩控制分别实现自由空间中的轨迹跟踪和约束空间中的力矩跟踪, 利用简单的系统观测器实现灵巧手在过渡过程中的控制模式切换. 该策略具有很好的位置/力矩跟踪能力, 并且可以保证过渡过程的稳定性. 实验结果证明了该控制策略的有效性和可行性.

**关键词:** 灵巧手; 位置控制; 力矩控制

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## Position/torque control of multi-fingered dexterous hand

JIANG Li<sup>1,2</sup>, CAI He-gao<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Robotics Research Institute, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Scientific research workstation for the postdoctor, Daqing Hi-Tech Industry Development Zone, Daqing Heilongjiang 163316, China)

**Abstract:** A new position/torque control strategy for multi-fingered hand is proposed. Both trajectory tracking in free space and torque tracking in constrained space are realized by using sliding mode positioning control and PD torque control, respectively, while the switch of control mode is realized by using a simple system observer. The method has good performance of position tracking and torque tracking, and can assure the transition stability. Experimental results verify the effectiveness and feasibility of this control strategy.

**Key words:** dexterous hand; position control; torque control

### 1 引言 (Introduction)

为了提高机器人的作业水平, 具有多种感知功能的多手指仿人灵巧手成为机器人领域的一个重要研究方向<sup>[1-5]</sup>. 为了完成物体的稳定抓握和灵巧操作, 柔顺性对于灵巧手非常重要. 阻抗控制<sup>[6]</sup>将位置控制和力控制融入到统一的控制框架之中, 是一种通用的无需模式切换的柔顺控制方式, 但是在阻抗控制中接触力的调节是通过位置间接实现的, 因此环境模型(包括位置和刚度)等误差使力跟踪效果受到了很大的影响.

本文提出了一种新的多指手位置/力矩控制策略: 在自由空间中, 利用高阶轨迹插补和滑模位置控制使灵巧手平滑、精确地跟踪操作者手指的运动; 在约束空间中, 采用前馈 PD 控制使手指各关节跟踪期望力矩; 在过渡过程, 即产生或脱离接触的过程中, 利用系统观测器进行控制模式的可靠切换, 实现系统的稳定过渡. 本文以 HIT 四指灵巧手关节为对

象进行了实验, 证明了这种控制方法的有效性和可行性. 该方法可以推广到多关节机器人的力/位置混合控制.

### 2 关节的动力学模型 (Dynamic model of a joint)

HIT 手由 4 个完全相同的手指组成, 大拇指与其它 3 个手指相对放置. 每个手指有 4 个关节, 通过微型直线驱动器进行驱动. 微型直线驱动器将微型无刷直流电机、旋转——直线转换机构和减速机构融为一体, 是光机电一体化集成式微型直线驱动器, 又称“人工肌肉”(artificial muscle). 每个直线驱动器具有电位计式直线位置传感器、电机位置传感器(霍尔传感器)和光电式极限位置传感器. 通过实验比较, 采用直线电位计信号计算关节角位置, 利用霍尔传感器计算电机的速度, 利用光电开关实现驱动器的极限位置保护. HIT 手手指的每个主动关节有关节力矩传感器, 用来感知该关节所受的力矩.

关节的动力学特性如式(1)~(5)所示,参数的含义如表1所示<sup>[7]</sup>.

$$U_a = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + e. \quad (1)$$

$$e = K_e \frac{d\theta_m}{dt}. \quad (2)$$

$$T_{em} = K_T \cdot i. \quad (3)$$

$$\frac{T_{em}}{n} = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \cdot \frac{d\theta}{dt} + T_f + T_g + T. \quad (4)$$

$$n = \theta / \theta_m. \quad (5)$$

表1 关节的动力学参数

Table 1 Dynamic parameters of a joint

$R$	电枢电阻	$n$	减速比
$L$	电枢电感	$K_{PWM}$	PWM常数
$K_T$	力矩常数	$U_a$	电枢电压
$K_e$	反电动势系数	$i$	电枢电流
$J$	转动惯量	$T_{em}$	电磁转矩
$B$	阻尼系数	$T$	接触力矩
$\theta_m$	电机角位置	$T_g$	重力矩
$\theta$	关节角位置	$T_f$	摩擦力矩

本文采用PWM方式调节 $U_a$ ,忽略电路的延时,其传递函数为

$$G_{PWM}(s) = \frac{U_a}{U_c} \approx k_{PWM}. \quad (6)$$

于是,关节的传递函数可以表示为

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U_c(s)} = \frac{(nK_{PWM}K_T) \cdot U_c(s) - n^2(Ls+R) \cdot (T_f(s)+T_g(s)+T(s))}{(n^2JL)s^3 + n^2(JR+BL)s^2 + (n^2BR+K_eK_T)s}. \quad (7)$$

设 $\theta_d(t) = [\theta_d \ \dot{\theta}_d \ \ddot{\theta}_d]^T$ 和 $\theta(t) = [\theta \ \dot{\theta} \ \ddot{\theta}]^T$ 分别为关节的期望轨迹向量和实际轨迹向量,其中: $\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$ 分别为关节的期望位置、速度和加速度; $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 分别为关节的实际位置、速度和加速度.如果定义误差向量为

$$E(t) = \theta_d(t) - \theta(t) = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T,$$

则可以得到状态空间中的误差方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_1 & A_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_3 \end{bmatrix} U_c + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_4 \end{bmatrix} (T_f + T_g + T) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_d \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中

$$U_d = \frac{d^3\theta_e}{dt^3} + \left(\frac{B}{J} + \frac{R}{L}\right) \cdot \frac{d^2\theta_d}{dt^2} + \frac{n^2BR + K_eK_T}{n^2JL} \cdot \frac{d\theta_d}{dt},$$

$$A_1 = -\frac{n^2BR + K_eK_T}{n^2JL}, \quad A_2 = -\left(\frac{B}{J} + \frac{R}{L}\right),$$

$$A_3 = \frac{K_{PWM}K_T}{nJL}, \quad A_4 = \frac{R}{JL}.$$

### 3 位置/力矩控制策略(Position/torque control strategy)

#### 3.1 轨迹插补(Trajectory interpolation)

为了使灵巧手平滑地跟踪目标位置 $\theta_i$ ,根据控制周期 $T_c = 0.2 \text{ ms}$ ,利用轨迹规划器对 $\theta_i$ 进行插补,使所有轨迹点的位置、速度和加速度连续,插补周期 $T = 50 \text{ ms}$ .将插补得到的期望轨迹序列 $(\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d)$ 作为相应控制周期内关节的期望位置、速度和加速度.

本文采用带有过渡域的插补算法<sup>[8]</sup>,原理如图1所示.在过渡域中采用四次多项式描述关节位置, $\theta_d, \dot{\theta}_d$ 和 $\ddot{\theta}_d$ 的表达式如下:

$$\theta_d = \left[ \left( \Delta C \frac{t_{acc}}{T_1} + \Delta B \right) (2-h)h^2 - 2\Delta B \right] h + B + \Delta B, \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_d = \left[ \left( \Delta C \frac{t_{acc}}{T_1} + \Delta B \right) (1.5-h)2h^2 - \Delta B \right] \frac{1}{t_{acc}}, \quad (10)$$

$$\ddot{\theta}_d = \left( \Delta C \frac{t_{acc}}{T_1} + \Delta B \right) (1-h) \frac{3h}{t_{acc}^2}. \quad (11)$$

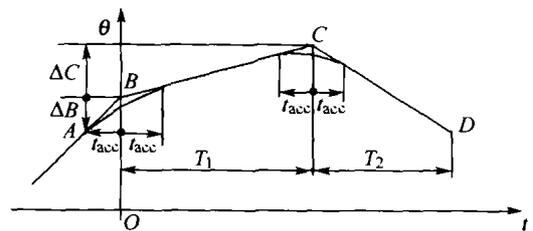


图1 轨迹插补原理

Fig. 1 Principle of trajectory interpolation

式(9)~(11)和图1中, $B, C$ 和 $D$ 是关节的目标位置; $t_{acc}$ 是加速时间,在 $t_{acc}$ 内关节可以从静止加速到最大速度; $T_1$ 和 $T_2$ 分别是轨迹段 $BC$ 和 $CD$ 的时间, $T = T_1 + T_2 = 50 \text{ ms}$ ; $\Delta C = C - B, \Delta B = A - B, h = \frac{t + t_{acc}}{2t_{acc}}$ .在匀速运动段, $\theta_d = \Delta C \cdot h' + B, \dot{\theta}_d = \Delta C / T_1, \ddot{\theta}_d = 0$ ,其中 $h' = t / T_1$ .

#### 3.2 基于动力学模型的滑模位置控制(Sliding mode position control based on dynamics)

滑模控制具有设计简单、鲁棒性强等优点,并且

不需要精确的数学模型,因此本文基于滑模实现位置控制.滑模位置控制器的设计包括两个部分:选择切换函数  $s(E)$ ,使系统的滑动模态渐近稳定并且具有期望的动态品质;求解控制函数  $u_c(E)$ ,以满足滑模的存在条件和到达条件.

本文采用线性切换函数

$$s(E) = C \cdot E(t),$$

其中

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad c_3],$$

$$E(t) = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T, c_3 = 1,$$

不失一般性.则系统的滑模运动方程为

$$\ddot{e}_1 + c_2 \dot{e}_1 + c_1 e_1 = 0,$$

其特征方程为  $p^2 + c_2 p + c_1 = 0$ .为保证系统的渐近稳定性,要求  $c_1 > 0, c_2 > 0$ ;为保证系统无超调,要求  $c_2^2 \geq 4c_1$ .

控制函数为

$$u_c = \Psi_1 e_1 + \Psi_2 e_2 + \delta \operatorname{sgn}(s).$$

式中:  $\Psi_1$  和  $\Psi_2$  分别是  $e_1$  和  $e_2$  的反馈增益;  $\delta$  是一个小的正数,以保证原点处 ( $e_1 = e_2 = e_3 = 0$ ) 满足滑模的存在条件,同时提高系统的抗干扰能力、消除静态误差.

根据广义滑模条件可以得到

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 + \dot{e}_3) s = \\ &(-c_1 c_2 - c_1 A_2 - A_3 \Psi_1) e_1 s + \\ &(c_1 + A_2 - c_2^2 - c_2 A_2 - A_3 \Psi_2) e_2 s + (c_2 + A_2) s^2 + \\ &[A_4(T + T_g + T_f) + U_d] s - A_3 \delta \operatorname{sgn}(s) s < 0. \end{aligned}$$

于是

$$\Psi_1 = \begin{cases} \alpha_1, & e_1 s > 0, \\ \beta_1, & e_1 s < 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\Psi_2 = \begin{cases} \alpha_2, & e_2 s > 0, \\ \beta_2, & e_2 s < 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$c_2 < -A_2 = \frac{B}{J} + \frac{R}{L}; \quad (14)$$

$$\delta > \left| \frac{A_4(T + T_g + T_f) + U_d}{A_3} \right|. \quad (15)$$

这里

$$\alpha_1 \geq \max_i \left( -\frac{c_1 c_2 + c_1 A_2}{A_3} \right), \quad (16)$$

$$\beta_1 \leq \min_i \left( -\frac{c_1 c_2 + c_1 A_2}{A_3} \right), \quad (17)$$

$$\alpha_2 \geq \max_i \left( \frac{c_1 + A_2 - c_2^2 - c_2 A_2}{A_3} \right), \quad (18)$$

$$\beta_2 \leq \min_i \left( \frac{c_1 + A_2 - c_2^2 - c_2 A_2}{A_3} \right). \quad (19)$$

关节滑模位置控制器如图2所示.针对PWM驱动方式的特点,在控制系统中引入饱和函数,即

$$U_c = \operatorname{sat}(u_c) = \begin{cases} u_c, & |u_c| \leq 1, \\ 1, & u_c > 1, \\ -1, & u_c < -1. \end{cases} \quad (20)$$

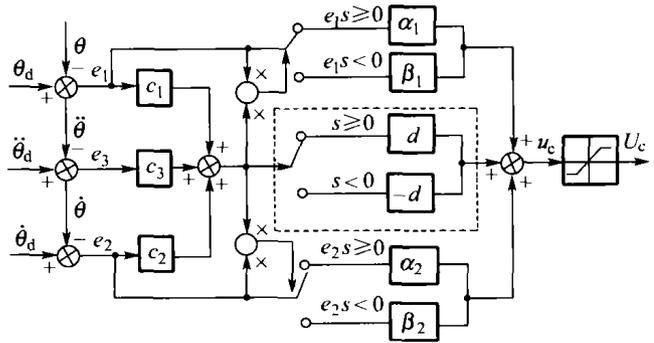


图2 滑模位置控制器

Fig. 2 Sliding mode position controller

### 3.3 关节的力矩控制(Joint torque control)

关节力矩控制的目标是使关节成为一个独立于位置的纯力矩源,能够根据作业要求跟踪期望的力矩.PID控制以其算法的有效性和简易性在机器人力控制领域占据着主导地位.本文采用PD控制和前馈补偿相结合的方法实现关节的力矩控制.控制函数的表达式为

$$u_c = K_p \cdot \Delta T - K_D \cdot \frac{d\theta}{dt} + T_d + T_g.$$

式中:  $T_d$  和  $T$  分别为关节的期望力矩和实际力矩,  $\Delta T = T_d - T$  表示关节力矩误差;  $\theta$  为关节的实际位置;  $K_p$  和  $K_D$  分别为力矩控制器的比例系数和微分系数;  $u_c$  是控制器的输出;  $T_g$  是关节所受的重力矩.为了克服力矩传感器的信号噪声的影响,在反馈环中以关节速度代替力矩的直接微分,速度反馈项可以增加系统的阻尼,有利于增强系统的稳定性和减小力超调.当  $\Delta T = 0$  时,前馈项  $T_d$  提供的偏置力矩可以减小系统的稳态误差并且提高系统的抗干扰能力.

### 3.4 系统观测器(System observer)

系统观测器根据关节力矩信息和上位机的任务指令,计算出系统的状态变量和控制模式变量,以实现控制模式的正确切换,算法如图3所示.系统观测器中有关变量的说明如下:

1) 任务变量 Task: GRASP 表示抓握, RELEASE

表示放开.该变量值由上位机指定.

2) 系统状态变量 State: FREE 表示手指处于自由空间, CONTACT 表示手指处于约束空间.该变量值由系统观测器计算得到.

3) 控制模式变量 mode: POS\_CTRL 和 FORCE\_CTRL 分别表示位置控制和力矩控制.该变量值由系统观测器计算得到.

4) 力矩阈值变量  $T_{th}$ . 在任意时刻,只有一种控制模式处于激活状态.为解决模式切换时控制量的不连续问题,对控制量进行二阶低通滤波,以保证切换过程中控制量的平滑和系统的稳定.

整个位置/力矩控制系统如图4所示.

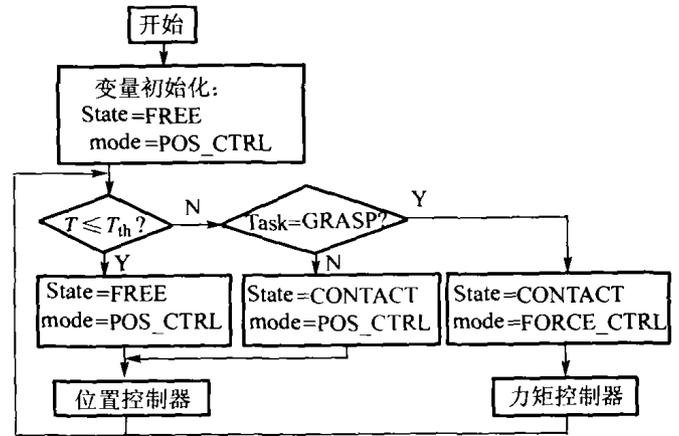


图3 系统观测器算法的框图

Fig. 3 Block diagram of system observer algorithm

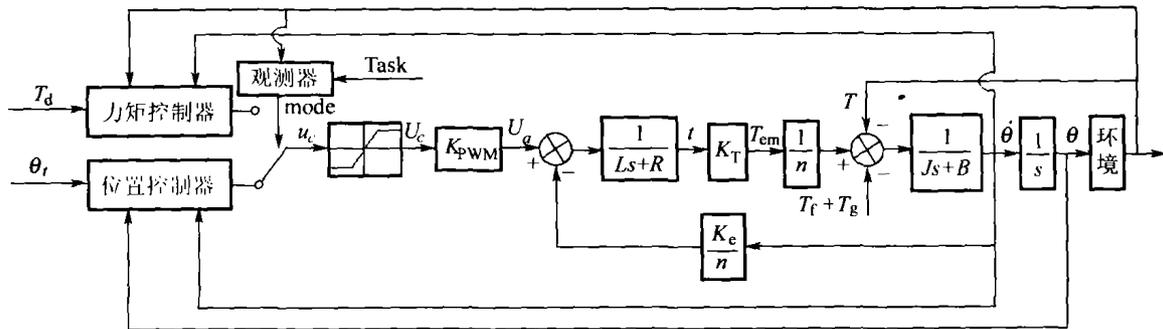


图4 位置/力矩控制系统的框图

Fig. 4 Block diagram of position/torque control system

### 4 实验系统及结果 (Experimental setup and results)

#### 4.1 实验系统 (Experimental setup)

基于 HIT 灵巧手、商用机器人 RX60 和数据手套,本文建立了机器人的主从操作实验平台. HIT 手的控制系统基于 DS1103 板构成,该板的主处理器是 PowerPC 604e, 辅处理器是数字信号处理器 TMS320F240.

本文采用基于局域网和 Matlab-DS1103 接口函数库 MLIB 实现数据手套和灵巧手控制器之间的数据交换,如图5所示.

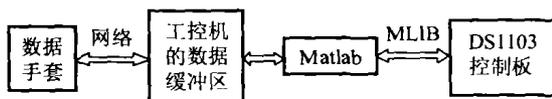


图5 数据手套与控制器的数据交换

Fig. 5 Data exchange between dataglove and controller

MLIB 是 Matlab 与 DS1103 控制板之间进行数据通讯的接口函数库,它支持多种方式的数据读写. 上位机将数据手套的输出数据通过以太网传送到工控机的专用数据缓冲区,然后利用 Matlab 把缓冲区

数据按照数据手套的数据发送周期  $T$  写入 DS1103 控制板上的数据缓冲区,以更新灵巧手关节的目标位置. 同样可以把 DS1103 控制板采集的灵巧手信息,如指尖力、关节力矩和关节位置等传给上位机,从而实现双向通讯.

#### 4.2 实验结果及分析 (Experimental results and analysis)

##### 4.2.1 关节位置控制 (Joint position control)

基于最小二乘对关节动力学参数进行辨识或直接测量,根据公式(12)~(19)计算滑模控制参数的范围,然后通过实验进行调整.

由于控制量的有限性、机械系统的惯性和电气系统的延时等因素,“抖振”成为实际滑模系统的主要问题. 本文采用小控制周期(0.2 ms)和符号函数连续化的方法抑制“抖振”. 将滑模控制函数中的非连续项  $u' = \delta \cdot \text{sgn}(s)$  改成连续函数:  $u' = \delta \cdot \frac{s}{|s| + \Delta}$ . 式中,  $\Delta$  表示边界层厚度,是很小的正常数. 针对  $\Delta$  的选取,学者们提出了许多在线调整  $\Delta$  以适应系统动力学不确定性的自适应控制算法. 本文通过实验对  $\Delta$  进行调整和确定,原则是:在系统不发生明显抖振的前提下,最大限度地减小  $\Delta$  以保持系统的鲁棒性.

关节3的位置阶跃响应如图6所示,图中,  $x$  是驱动关节的直线驱动器的位置. 实验中,期望位置是 2.5 mm, 驱动器经过 50 ms 左右到达期望位置, 响应速度快, 且无超调, 无振荡, 这对于机器人及其灵巧手的抓握和操作非常重要.

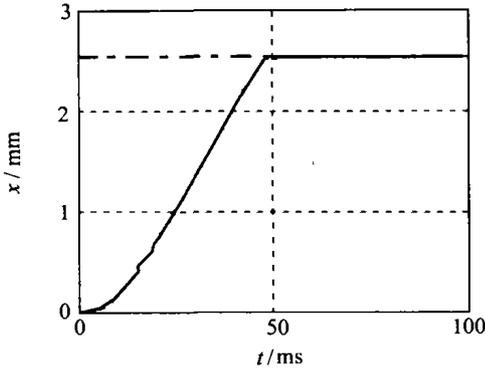


图6 关节位置的阶跃响应  
Fig. 6 Step response of joint position

1#手指3个直线驱动器的轨迹跟踪曲线如图7所示,  $x_1, x_2, x_3$  分别是3个直线驱动器的位置, 图中虚线表示期望轨迹, 实线表示实际轨迹. 可见, 驱动器能够很好地跟踪期望轨迹.

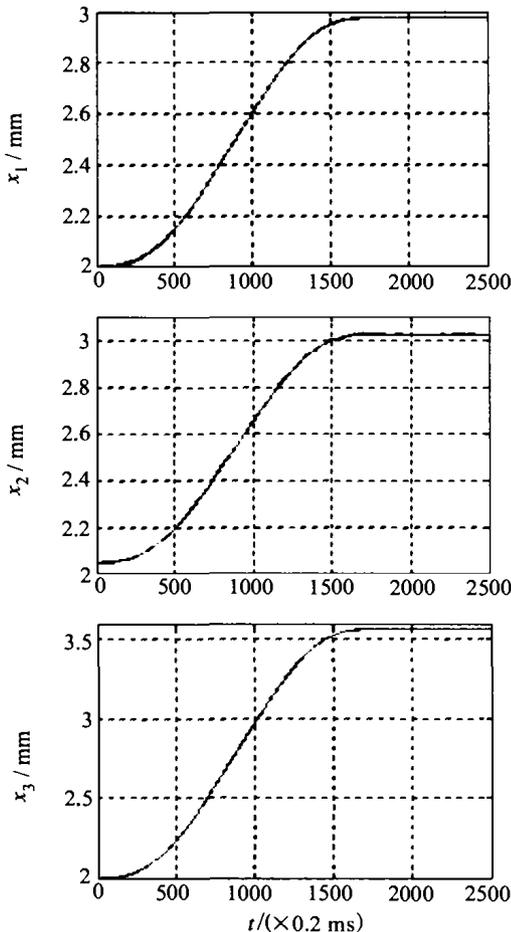


图7 手指的轨迹跟踪  
Fig. 7 Trajectory tracking of a finger

#### 4.2.2 关节力矩控制(Joint torque control)

图8是抓握过程中关节从自由空间到约束空间的力矩曲线. 根据具体的操作任务和关节力矩传感器信号的噪声, 选定力矩阈值为  $T_{th} = 7.5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ . 当关节力矩达到  $T_{th}$  以后, 通过负责抓取规划和运动学计算的上位机设定期望力矩  $T_d$  为:  $15 \text{ N} \cdot \text{mm} \rightarrow 20 \text{ N} \cdot \text{mm} \rightarrow 25 \text{ N} \cdot \text{mm} \rightarrow 20 \text{ N} \cdot \text{mm} \rightarrow 15 \text{ N} \cdot \text{mm}$ , 阶跃变化的时间间隔是 0.5 s. 结果显示, 关节力矩控制系统可以实现快速而准确的力矩跟踪, 切换算法可以保证控制模式的可靠切换和过渡过程的稳定.

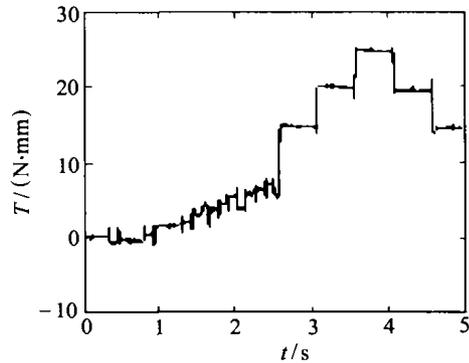


图8 抓握过程的关节力矩  
Fig. 8 Joint torque during grasping phase

### 5 结论(Conclusions)

本文提出了一种基于数据手套的具有局部自主功能的位置/力矩控制策略. 分别采用滑模位置控制和 PID 力矩控制实现自由空间中的轨迹跟踪和约束空间的力矩跟踪, 利用系统观测器实现灵巧手在过渡过程的控制模式切换和稳定过渡. 实验证明了该控制策略的有效性和可行性, 为实现仿人灵巧手的远程遥控作业奠定了坚实的基础. 同时, 该方法可以推广到多关节机器人的力/位置混合控制系统.

#### 参考文献(References):

- [1] JACOBSEN S C, WOOD J E, KNUTTI O F, et al. The UTAH/MIT dextrous hand: work in progress [J]. *Int J of Robotics Research*, 1984, 3(4): 21 - 50.
- [2] SALISBURY J K, CRAIG J J. Articulated hands: force control and kinematic issues [J]. *Int J of Robotics Research*, 1982, 1(1): 4 - 17.
- [3] BUTTERFASS J, HIRZINGER G, KNOCH S, et al. DLR's multisensory articulated hand, part I: hard and software architecture [C] // *Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium: International House, 1998: 2081 - 2086.
- [4] LOVCHIK C S, DIFLER M A. The Robonaut hand: a dextrous robotic hand for space [C] // *Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Detroit, Michigan: International House, 1999: 907 - 912.

(下转第 376 页)

- [7] 王宏,岳红.随机分布系统的输出概率密度函数:建模、控制和应用[J].控制工程,2003,10(3):193-197.  
(WANG Hong, YUE Hong. Output PDF control of stochastic distribution systems: modeling, control and applications [J]. *Control Engineering of China*, 2003, 10(3): 193-197.)
- [8] WANG H. Robust control of the output probability density functions for multivariable stochastic systems with guaranteed stability [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(11): 2103-2107.
- [9] YUE H, WANG H. Minimum entropy control of closed-loop tracking errors for dynamic stochastic systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(1): 118-122.
- [10] WANG H, ZHANG J H. Bounded stochastic distributions control for pseudo-ARMAX stochastic systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(3): 486-490.
- [11] WANG H. Minimum entropy control of non-Gaussian dynamic stochastic systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(2): 398-403.
- [12] WANG H. *Bounded Dynamic Stochastic Systems: Modeling and Control* [M]. London: Springer-Verlag, 2000.
- [13] GIROSI F, POGGIO T. Networks and the best approximation property [J]. *Biological Cybernetics*, 1990, 63(1): 169-176.
- [14] WICHAYA M, REIN L. Optimal control of inequality state constrained systems [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, 36(5): 1686-1694.
- [15] CLARKE F H, LEDYAEV Y, VINTER R B. Regularity properties of solution to linear quadratic optimal control problems with state constraints [J]. *Systems and Control Letters*, 1997, 30(2): 265-272.
- [16] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996.  
(GAO Weibing. *Variable Structure Control Theory and Design Method* [M]. Beijing: Science Press, 1996.)
- [17] 肖雁鸿,葛召炎,周靖林,等.全滑模变结构控制系统[J].电机与控制学报,2002,6(3):233-236.  
(XIAO Yanhong, GE Zhaoyan, ZHOU Jinglin, et al. Global sliding model variable structure control systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2002, 6(3): 233-236.)
- [18] 郑大钟,线性系统理论[M].北京:清华大学出版社,1992.  
(ZHENG Dazhong. *Linear Systems Theory* [M]. Beijing: TsingHua University Press, 1992.)

#### 作者简介:

周靖林 (1976—),男,博士研究生,研究方向为广义随机分布控制的建模及最优控制算法、变结构控制等, E-mail: jinglin.zhou@mail.ia.ac.cn;

王宏 (1960—),男,研究员,中国科学院引进海外杰出人才“百人计划”项目的引进学者,UMIST教授,出版专著多部,研究领域为有界随机分布控制系统的建模、控制与应用,动态系统故障诊断(确定系统与随机系统)等, E-mail: hong.wang@manchester.ac.uk.

#### (上接第368页)

- [5] LIU H, BUTTERFASS J, KNOCH S, et al. A new control strategy for DLR's multisensory articulated hand [J]. *IEEE Control Systems*, 1999, 19(2): 47-54.
- [6] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation [J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1985, 107(1): 1-24.
- [7] 姜力,蔡鹤皋,刘宏.基于滑模位置控制的机器人灵巧手模糊自适应阻抗控制[J].控制与决策,2001,16(5):612-616.  
(JIANG Li, CAI Hegao, LIU Hong. Fuzzy adaptive impedance control for robot dextrous hand based on sliding mode position control [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 612-616.)
- [8] 郑时雄,谢存禧.机器人操作手:数学、编程和控制[M].北京:机械工业出版社,1991:130-134.  
(ZHENG Shixiong, XIE Cunxi. *Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1991: 130-134.)

#### 作者简介:

姜力 (1970—),男,现为大庆高新技术开发区博士后,研究领域为机器人灵巧手的传感和控制, E-mail: Ljiang98@yahoo.com.cn;

蔡鹤皋 (1934—),男,中国工程院院士,研究领域为机电一体化技术,机器人学, E-mail: hgcai@hit.edu.cn;

刘宏 (1966—),男,“长江学者”奖励计划特聘教授,博士生导师,研究领域为仿人机器人灵巧手、机器人宏/微操作器, E-mail: Hliu@robinst.hit.edu.cn.