

多指手自主抓取控制的研究*

姜力 刘宏

哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001

摘要 研究了时间-事件混合驱动的多指手自主抓取控制。在预抓取阶段, 采用具有摩擦力补偿的比例-积分-微分(PID)位置控制算法实现手指的精确轨迹跟踪, 该算法在传统比例-微分(PD)控制器的基础上, 引入变速积分(RVI)提高系统的轨迹跟踪能力, 引入平滑非线性反馈(SRNF)进行摩擦力补偿。在抓取阶段, 采用基于事件的并行位置/力矩控制算法实现自由运动和约束运动之间的稳定过渡以及约束空间中的力矩控制。该算法采用基于事件的切换器实现控制模式的可靠切换, 基于改进的纯积分力控制算法实现系统的稳定过渡和力控制。实验验证了该抓取控制方法的有效性。

关键词 多指手 自主控制 位置控制 冲击控制

机器人灵巧手是20年来机器人领域的热点研究方向之一。自主操作和遥控操作是两种主要的灵巧操作方式, 目前自主操作大多处于理论研究或者实验室仿真阶段, 少量的自主抓取实验是在抓取对象确定且模型已知的情况下进行的, 多指操作控制的研究尚不能可靠地完成各种灵巧操作任务。这除了硬件因素以外, 缺乏统一的多指操作控制系统和自主抓取策略是一个主要原因。现有的多指手协调控制方法很多, 如单关节控制、力变换控制、广义计算力矩控制^[1]、阻抗控制^[2,3]等, 但是多指手控制系统框架缺少统一的标准、灵活性和通用性, 难于实现控制功能的扩展和实时操作任务的完成^[4]。本文将基于模块化的灵巧操作控制系统研究多指手的自主抓取控制。

多指手操作物体的过程可以分为预抓取、抓取和操作三个阶段。在抓取阶段, 手指与物体发生接触, 手指从自由空间向约束空间运动。由于手指具有一定的初始速度和动能, 与物体发生接触时存在能量的耗散问题, 如何实现稳定快速的过渡是需要解决的关键问题。Hyde和Cutkosky对机器人冲击控制进行了系统的总结^[5], 典型方法包括: Mills提出的非连续冲击控制方法^[6]; Hyde等提出的输入力命令预整形方

法^[5], 根据对象的固有动力学特征对输入力命令进行预整形处理, 从而达到抑制振动的目的; Hogan提出的阻抗控制方法^[7], 使用同一控制框架实现自由运动和约束运动, 通过阻抗参数的合理选择实现系统的稳定过渡, 其优点是不需要控制模式的切换, 但是难于实现精确的位置跟踪和力控制; Volpe等提出的不同阶段采用不同控制策略的机器人运动控制算法^[8]: 在自由空间采用位置控制; 在冲击过程采用负反馈比例控制实现无反弹稳定过渡; 在稳定接触以后的约束运动中采用纯积分控制实现力跟踪。由于过渡阶段和约束运动阶段采用了不同的控制方法, 所以存在稳定性问题。针对这个情况, 本文提出一种时间-事件混合驱动的自主抓取控制: 在预抓取阶段采用具有摩擦力补偿的PID位置控制, 抓取和操作阶段采用相同的力控制方法——改进的纯积分力控制算法实现系统的稳定过渡和力跟踪。

1 时间-事件混合驱动的自主抓取控制策略

1.1 模块化的灵巧操作控制系统

本文借鉴多指操作递阶控制系统结构 CoSAM²

2005-02-01 收稿, 2005-08-03 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60275032)

E-mail: Ljiang98@yahoo.com.cn

的思想^[4], 基于多指操作的位形运动学构成模块化的灵巧操作控制系统, 如图1所示. 该灵巧操作控制系统充分体现了灵巧操作多级多层的特点, 它由抓取规划和协调控制系统、手指控制系统组成. 抓取规划和协调控制系统包括物体运动规划器、协调运动规划器、抓取系统的运动学和静力学、抓取力规划器和柔顺运动规划器等模块, 能够根据操作任务进行物体运动和力的规划、多指手运动和力的规划以及手指的柔顺运动规划. 手指控制系统由 Cartesian 层、关节层和 Cartesian-关节接口层组成. 该灵巧操作控制系统具有通用性、开放性和灵活性, 通过增减和修改模块可以构成多种协调控制算法.

动器等模块, 能够根据操作任务进行物体运动和力的规划、多指手运动和力的规划以及手指的柔顺运动规划. 手指控制系统由 Cartesian 层、关节层和 Cartesian-关节接口层组成. 该灵巧操作控制系统具有通用性、开放性和灵活性, 通过增减和修改模块可以构成多种协调控制算法.

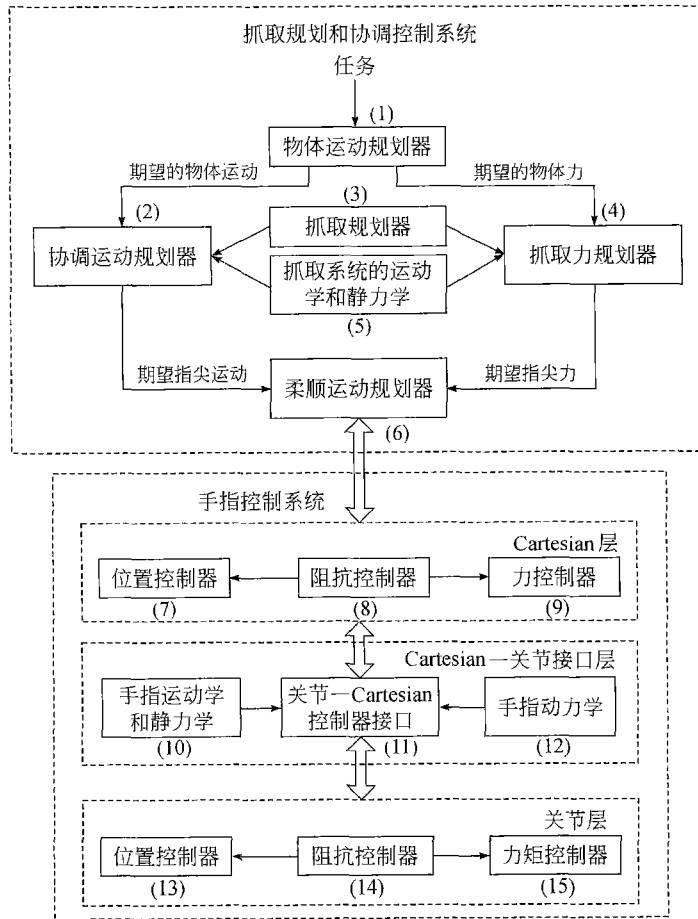


图1 模块化的灵巧操作控制系统

1.2 时间-事件混合驱动的自主抓取策略

为了减少自主抓取对于抓取系统模型和运动规划的依赖性, 本文提出了时间-事件混合驱动的自主抓取策略, 其流程如图2所示. 在预抓取阶段和操作阶段基于时间驱动, 在抓取阶段基于事件驱动.

(1) 预抓取阶段. 在预抓取阶段, 协调运动规划器产生手指运动的位置-时间序列, 各手指以规划速度向物体接近并且发生接触. 根据物体的力平衡条件设定每个手指与物体之间的接触力阈值, 当手

指与物体的接触力达到相应阈值时, 立即停止该手指的运动, 并且保存当前位置. 当所有手指以设定的接触力阈值与物体接触时, 预抓取阶段结束.

(2) 抓取阶段. 在抓取阶段, 物体运动规划器输出的物体期望位置不变, 协调运动规划器输出的手指期望位置不变, 抓取力规划器和柔顺运动规划器中的外环力控制器由非工作状态转为工作状态, 状态的切换基于所有手指与物体发生接触这一事件进行驱动.

(3) 操作阶段. 物体和手指协调运动, 物体跟

踪期望的运动轨迹和力. 在操作阶段, 控制系统的所有模块均处于工作状态, 位置控制内环和力控制外环同时工作.

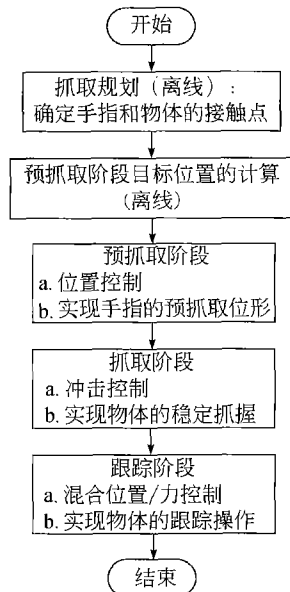


图2 时间-事件混合驱动的自主抓取策略

2 预抓取阶段——具有摩擦力补偿的位置控制

2.1 具有摩擦力补偿的位置控制算法

摩擦力是影响机械系统运动特性的重要因素, 本文提出一种具有摩擦力补偿的 PID 位置控制算法. 该算法在传统 PD 控制器的基础上引入变速积分(RVI)和平滑鲁棒非线性反馈(SRNF), 基于SRNF进行摩擦力补偿, 基于改进的RVI提高轨迹跟踪能力. Cai等证明^[9-11], 具有SRNF的PD控制系统是全局稳定的, 通过补偿器参数的调整在理论上可以实现任意的稳态位置精度, 同时SRNF能够保证系统运动的平滑性. 该算法描述如下:

$$u_c(t) = K_p \theta_e + K_d \dot{\theta}_e + u_{ms} \tanh(a \cdot \theta_e) + u_i(t) + \hat{g}(\theta_d), \quad (1)$$

$$u_{ms} = \begin{cases} u_{ms}^+ = u_s^+ + \varepsilon, & (\dot{\theta}_d \geq 0) \\ u_{ms}^- = u_s^- + \varepsilon, & (\dot{\theta}_d < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$u_i(t) = [u_i(t-T) + K_i \theta_c T] \left(\frac{r}{r + \dot{\theta}_e^2} \right), \quad (3)$$

式中 θ_d 和 $\dot{\theta}_d$ 分别是关节的期望位置和速度; θ_e 和 $\dot{\theta}_e$ 分别是关节的位置误差和速度误差; K_p, K_d 和 K_i 分别是 PID 控制器的比例、微分和积分系数; $u_{ms} \tanh(a \cdot \theta_e)$ 是 SRNF 补偿项, 其中 u_s^+ 和 u_s^- 分别表示正反两个方向上关节最大静摩擦力矩对应的控制量, ε 是小的正数, 用来保证 SRNF 补偿器产生的最大补偿量超过关节的最大静摩擦力矩, u_{ms} 是 SRNF 补偿器的最大输出值, a 是决定双曲正切补偿函数变化曲率的参数; $u_i(t)$ 是 RVI 项, 其中 r 是积分项调整参数, T 是控制周期; $\hat{g}(\theta_d)$ 是重力补偿项; $u_c(t)$ 是位置控制器输出的控制量. 该算法具有以下特点.

(1) 一般情况下, 驱动系统在正反两个方向运动时的摩擦力特性是不同的. 该算法充分考虑了这一现象, 在 SRNF 项中对两个方向分别进行处理. 同时, 为了避免实际速度信号的噪声影响, 以期望速度作为运动方向的判断依据.

(2) 与传统的变速积分方法不同, 根据速度误差 $\dot{\theta}_e$ 对积分项大小进行调整. 在进行给定点调节时, 由于 $\dot{\theta}_d = 0$, $u_i(t)$ 与传统的变速积分方法相同; 在轨迹跟踪, 特别是快速轨迹跟踪时, 可以克服传统 RVI 在快速运动时积分作用变弱的缺点, 以提高系统的轨迹跟踪能力.

(3) 引入了重力补偿项 $\hat{g}(\theta_d)$, 并且以关节期望位置 θ_d 进行计算, 这可以消除实际位置噪声对于重力补偿效果的影响.

2.2 轨迹跟踪实验

轨迹跟踪实验中采用 Paul 提出的四次多项式轨迹插补算法. 控制周期 $T_c = 0.2$ ms, 轨迹段时间 $T_1 = 50$ ms, 加速时间 $T_{acc} = 20$ ms; 控制参数取值为:

$$K_p = 0.1, K_d = 0.008, K_i = 0.0005, \\ u_{ms} = 0.08, a = 10$$

2.2.1 匀速运动的轨迹跟踪实验 在关节期望速度为 2, 4, 10, 20, 40, 100°/s 等 6 种情况下进行了 6 组实验, 每组实验分别采用如下 4 种控制算法: PD 控制、PD+SRNF 控制、PID 控制、PID+SRNF 控制. 与 PD 控制相比, 引入积分项的 PID 控制可以减小轨迹跟踪误差, 这里不再给出 PD 控制和 PID

控制的实验结果. 图3和4分别给出了关节期望速度为 $40^\circ/\text{s}$ 和 $2^\circ/\text{s}$ (相差20倍) 时的轨迹跟踪实验结果, 在每组实验结果中分别给出了采用PID+SRNF控制(控制器1)和PID控制(控制器2)时的位置跟踪、位置误差和速度跟踪曲线.

从图3可以看到, 高速运动情况下PID+SRNF控制的轨迹跟踪精度略优于PID控制. PID+SRNF控制的最大跟踪误差约 0.1° ; 而PID控制的最大跟踪误差在 0.3° 左右, 并且在运动开始

阶段出现1次振荡. 这是因为开始运动时系统处于静摩擦和负摩擦阶段, 摩擦力较大且具有很强的非线性, 由于积分项的存在而使位置跟踪误差出现往复振荡现象. 图4显示, 低速运动情况下PID+SRNF控制的轨迹跟踪精度明显优于PID控制 (PID+SRNF控制的最大跟踪误差约 0.05° , PID控制的最大跟踪误差在 0.2° 左右), 并且关节运动更加平滑, 这是因为SRNF对低速运动情况下的非线性摩擦力具有补偿作用.

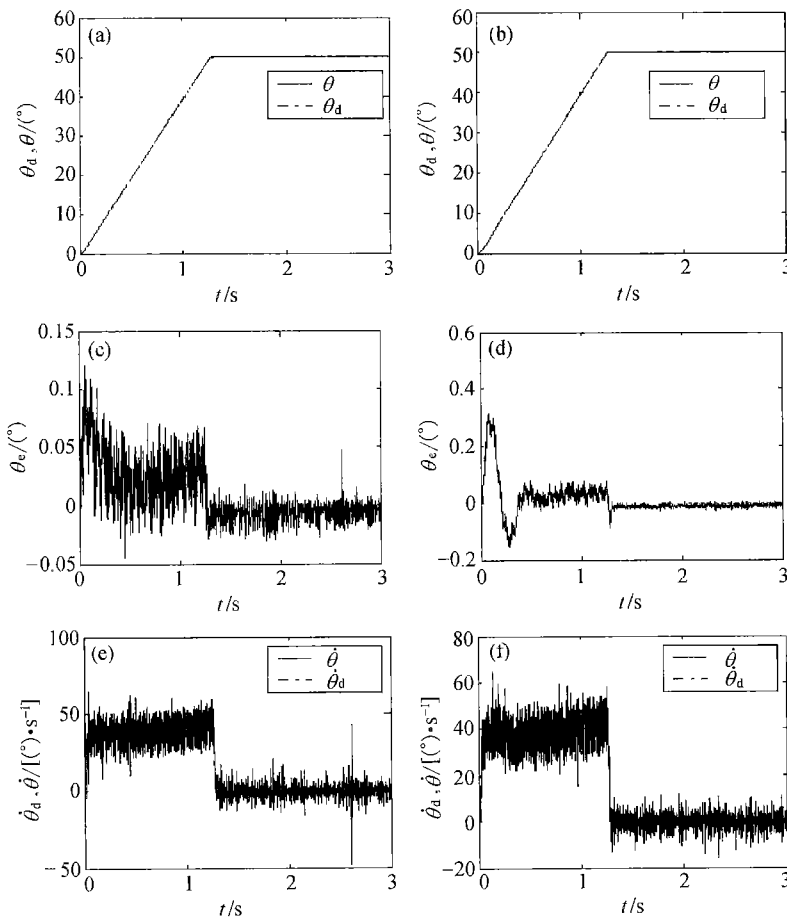


图3 高速时的关节轨迹跟踪实验结果

(a) 控制器1的位置跟踪; (b) 控制器2的位置跟踪; (c) 控制器1的位置误差;
(d) 控制器2的位置误差; (e) 控制器1的速度跟踪; (f) 控制器2的速度跟踪

2.2.2 正弦轨迹跟踪实验 正弦轨迹运动的位置表达式是

$$\theta_d = \theta_{d_0} + \theta_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (4)$$

式中 θ_d , θ_{d_0} 和 θ_m 分别是关节的期望位置、直流分量和交流分量的幅值; ω 和 t 分别是关节运动的角速度和时间. 对(4)式进行离散化, 可以得到

$$\theta_d(k) = \theta_{d_0} + \theta_m \cdot \sin(2\pi f \cdot kT_c), \quad (5)$$

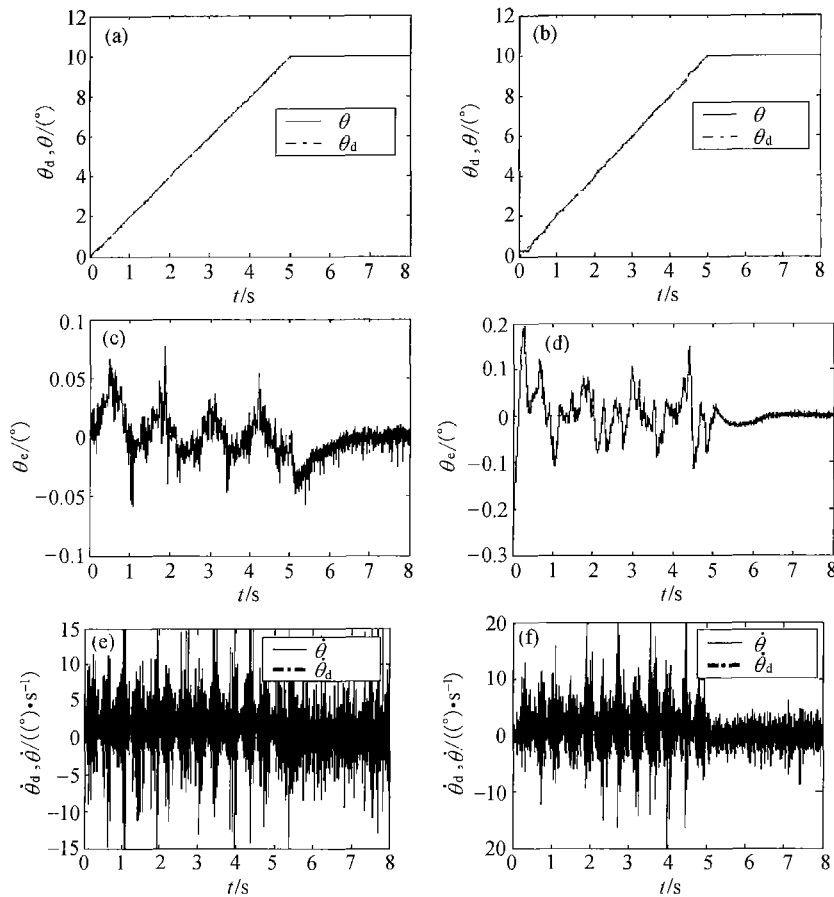


图4 低速时的关节轨迹跟踪实验结果

(a) 控制器1的位置跟踪；(b) 控制器2的位置跟踪；(c) 控制器1的位置误差；
(d) 控制器2的位置误差；(e) 控制器1的速度跟踪；(f) 控制器2的速度跟踪

式中 k 代表采样时刻, f 和 T_c 分别是关节运动的频率和系统的控制周期. 在给定期望的正弦轨迹时, 不仅需要保证关节位置在其运动范围之内, 而且应该使关节的期望速度和加速度符合关节的实际运动能力.

实验中正弦轨迹的参数为: $\theta_{d_0} = 30^\circ$. 实验结果如图5所示. 图5(a)和(b)是 $\theta_m = 10^\circ$, $f = 1$ Hz时的正弦轨迹跟踪情况, 图5(c)和(d)是 $\theta_m = 2^\circ$, $f = 1$ Hz时的正弦轨迹跟踪情况, 图5(e)和(f)是 $\theta_m = 2^\circ$, $f = 6$ Hz时的正弦轨迹跟踪情况. 可以看到, 当 $f = 1$ Hz时系统对大信号和小信号的跟踪能力都很强; 随着频率 f 的增加, 系统的响应幅值变小, 相位延迟, 跟踪效果逐渐变差.

3 抓取阶段——基于事件的并行位置/力矩控制

当手指与物体发生接触时, 关节从自由空间过渡到约束空间并且在约束空间中运动. 由于手指具有一定的初速度和动能, 与物体发生接触时存在能量的耗散问题, 如何实现稳定、快速的过渡是冲击控制需要解决的问题. 本文提出基于事件的并行位置/力矩算法以实现冲击控制和力矩控制, 该方法的基本思想是: 在自由空间中采用纯位置控制实现轨迹跟踪; 与物体接触以后, 采用基于事件的切换器实现控制模式的可靠切换, 基于改进的纯积分力矩控制算法实现系统的稳定过渡和力控制. 该控制系统

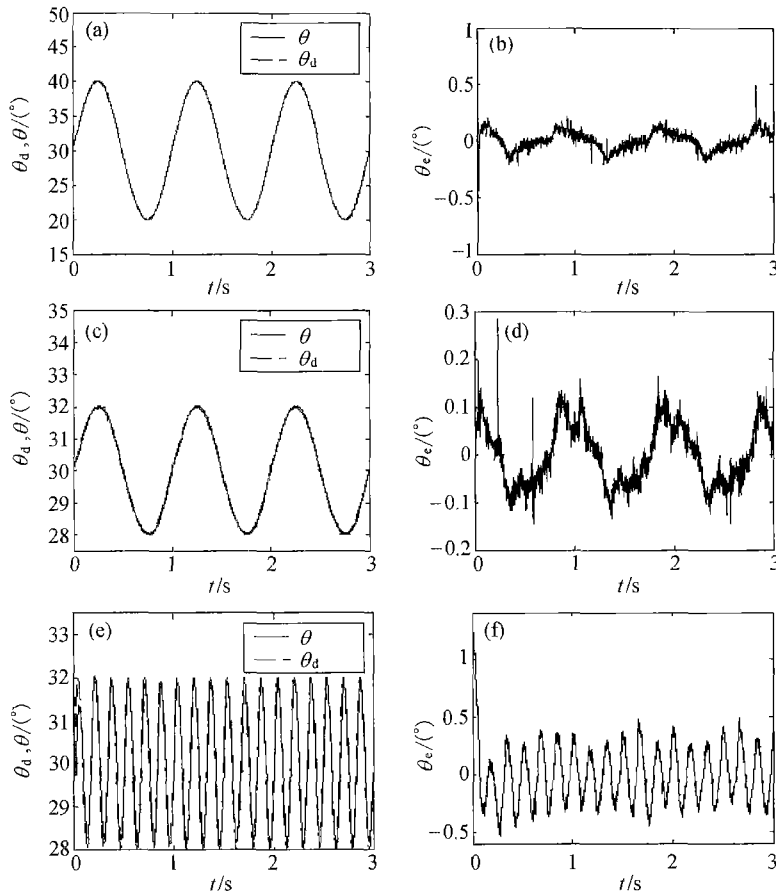


图5 正弦轨迹跟踪实验结果

(a) 位置跟踪($\theta_m=10^\circ, f=1\text{ Hz}$); (b) 位置误差($\theta_m=10^\circ, f=1\text{ Hz}$); (c) 位置跟踪($\theta_m=2^\circ, f=1\text{ Hz}$);
(d) 位置误差($\theta_m=2^\circ, f=1\text{ Hz}$); (e) 位置跟踪($\theta_m=2^\circ, f=6\text{ Hz}$); (f) 位置误差($\theta_m=2^\circ, f=6\text{ Hz}$)

由位置控制器、切换器和改进的纯积分力控制器组成. 与阻抗控制相比, 该算法可以分别实现自由空间和约束空间中的精确位置跟踪和力跟踪; 与Volpe的方法相比^[8], 该算法在过渡过程和约束运动中采用相同的控制策略, 不存在切换问题, 有利于保持系统的稳定.

3.1 基于事件的切换器

基于事件的切换器如图6所示. 输入变量是关节力矩 T , 控制变量是任务模式, 输出变量是控制模式 $CtrlMode$. $CtrlMode=1$ 和 0 分别表示力控制模式和位置控制模式, T_{thr}^- 是位置控制模式切换到力控制模式的力矩阈值, T_{thr}^+ 是力控制模式切换到位置控制模式的力矩阈值, $T_{thr}^+ > T_{thr}^-$, 切换器具有滞回特性, 以避免力信号噪声引起阈值附近控制模式的非期望切

换. 为了适应不同的任务要求, 引入任务模式 $TaskMode$ 作为控制变量. $TaskMode=0$ 和 1 分别表示释放物体和抓取物体. 当关节力矩减小到 T_{thr}^- 时, 如果 $TaskMode=0$, 则从力控制模式切换到位置控制模式; 如果 $TaskMode=1$, 则保持力控制模式. 本文针对 $TaskMode=1$ 的情况进行研究.

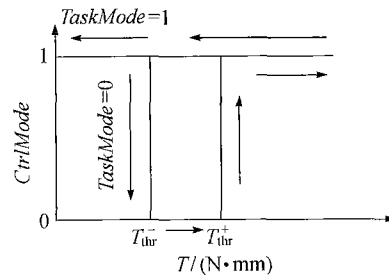


图6 基于事件的切换器

3.2 改进的纯积分力控制器

本文采用改进的纯积分力控制器实现手指与物体的稳定接触和约束环境中的力控制. 纯积分力矩控制的基本形式是

$$u_c = K_{fi} \int (T_d - T) dt, \quad (6)$$

为了使纯积分力控制算法更好地实现过渡过程中的冲击控制, 采用的改进纯积分力控制算法描述如下:

$$u_c = K_{fi} \int (T_d - T) dt + u_{thr} + u_{ms} \tanh(a \cdot T_e). \quad (7)$$

下面对(7)式描述的改进纯积分力控制算法进行说明.

(1) 期望力矩 T_d 的轨迹插补. 如果期望力矩 T_d 不进行轨迹插补(相当于力的阶跃响应), 则积分项将使系统出现较大的冲击和力超调, 在 T_d 附近发生振荡.

(2) 为了保持运动的平滑连续, 在控制量中引入控制模式切换时刻的位置控制器输出量 u_{thr} . 当关节以较慢的速度接近并接触物体时, 根据关节动力学模型, u_{thr} 与切换时刻重力矩、接触力矩、摩擦力矩组成的合力矩相平衡. 于是, u_{thr} 项的引入可以使切换前后的控制量保持连续; 同时由于约束运动情

况下关节的位置变化量很小, 所以不需要在积分力控制器中再引入重力补偿项.

(3) 摩擦力补偿. 关节的约束运动速度很低, 摩擦力对力控制系统的影响很大. 本文基于平滑非线性反馈(SRNf)方法, 在力控制算法中引入摩擦力补偿项 $u_{ms} \tanh(a \cdot T_e)$. 其中, $T_e = T_d - T$ 是力矩误差, a 是形状因子. 当 a 较大时, 从理论上有利于改善摩擦力补偿效果, 但是对信号的噪声更加敏感. 由于力传感器信号的噪声比较大, 所以采用比较小的 a 以保证系统的稳定性.

3.3 实验

采用基于事件和改进纯积分力控制的并行位置/力矩控制算法, 以 HIT/DLR 手的关节 3 为对象进行冲击控制和力矩控制实验, 结果如图 7 所示.

图 7(a)和(b)分别是关节位置和力矩曲线. 实验中, 关节首先在自由空间中以 $20 (^{\circ})/s$ 的速度进行匀速运动, 约 1.3 s 以后与玻璃板发生接触. 实验中设定的关节力矩切换阈值是 $50 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 于是在 1.33 s 进行控制模式的切换, 关节从位置控制状态转换成力矩控制状态. 实验中设定的期望关节力矩是 $200 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 关节在 1.4 s 时达到该期望力矩并很快地进入稳态. 可以看到, 过渡过程中没有发生任何反弹现象, 并且力超调和冲击很小.

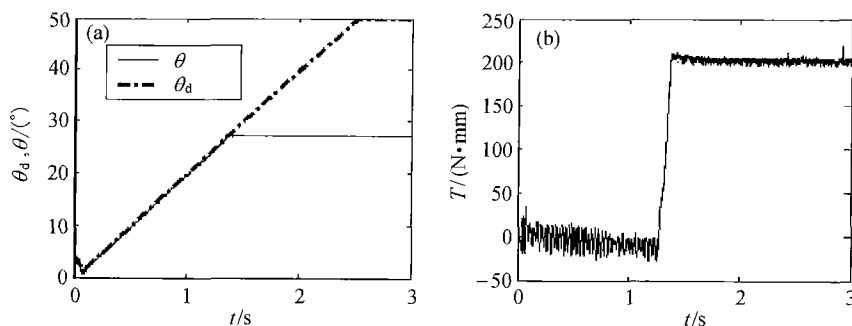


图7 关节冲击控制和力矩控制的实验结果

(a) 关节位置曲线; (b) 关节力矩曲线

4 结论

自主操作和遥操作是两种主要的灵巧操作方

式. 本文基于模块化的灵巧操作控制系统, 提出一种时间-事件混合驱动的自主抓取控制方法. 在预抓取阶段, 采用一种具有摩擦力补偿的位置控制算

法实现手指的精确轨迹跟踪. 该算法在传统 PD 控制器的基础上引入了变速积分(RVI)和平滑非线性反馈(SRNF), 基于 SRNF 实现摩擦力的平滑非线性补偿, 基于改进的 RVI 提高系统的轨迹跟踪能力. 在抓取阶段, 提出基于事件的并行位置/力矩算法以实现关节的冲击控制和力矩控制: 在自由空间中采用纯位置控制实现轨迹跟踪; 与环境接触以后, 采用基于事件的切换器实现控制模式的可靠切换, 基于改进的纯积分力控制算法实现系统的稳定过渡和力控制.

参 考 文 献

- 1 Li Z, Hsu P, Sastry S. Grasping and coordinated manipulation by a multifingered robot hand. *International Journal of Robotics Research*, 1989, 8(4): 33—50
- 2 Schneider S A, Cannon R H. Object impedance control for cooperative manipulation: Theory and experimental results. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(3): 383—393
- 3 Caccavale F, Villani L. An impedance control strategy for cooperative manipulation. *Proceedings IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Como, Italy, 2001, 343—348
- 4 Li Z X, Qin Z, Jiang S, et al. Coordinated motion generation and real-time grasping force control for multi-fingered manipulation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium, 1998, 3631—3638
- 5 Hyde J M, Cutkosky M R. Controlling contact transition. *IEEE Control Systems*, 1994, 14(1): 25—30
- 6 Mills J K, Lokhorst D M. Experimental results in manipulator contact task control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Cincinnati, Ohio, USA, 1991, 1645—1651
- 7 Hogan N. Impedance control: An approach to manipulator; Part I, II, and III. *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1985, 107: 1—24
- 8 Volpe R, Khosla P. A theoretical and experimental investigation of impact control for manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 1993, 12(4): 351—365
- 9 Cai L, Song G. A smooth robust nonlinear controller for robot manipulators with joint stick-slip friction. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Atlanta Georgia, 1993, 449—454
- 10 Song G, Cai L, Wang Y. Robust friction compensation for precise and smooth position regulation. *Proceedings of the I MECH E Part I Journal of Systems and Control Engineering*, 1999, 213: 157—161
- 11 Cai L, Song G. A new smooth robust nonlinear controller for robot manipulators with joint's stick-slip friction. *Journal of Robotic Systems*, 1994, 11(6): 451—470