

基于物体目标阻抗的多指手协调混合阻抗控制的研究

王洪瑞

(燕山大学电气工程学院·秦皇岛, 066004) (浙江大学工业控制技术研究所·杭州, 310027)

吕应权

宋维公

(燕山大学电气工程学院·秦皇岛, 066004)

摘要: 本文在多指手协调控制的基础上, 提出了协调混合阻抗控制方法. 在不同方向引入位置或力控制的物体目标阻抗, 根据多指手协调控制的动力学方程设计计算力矩控制器, 并对 BH-1 手抓持物体在自由空间和受限空间运动进行了仿真研究. 结果表明, 采用协调混合阻抗控制可使物体在被抓持过程中按期望的位置和力轨迹运动, 且具有较好的动态性能.

关键词: 协调控制; 混合阻抗控制; BH-1 灵巧手

Coordinated Hybrid Impedance Control of Multifingered Hand Based on Object Impedance

Wang Hongrui

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University·Qinhuangdao, 066004, P. R. China)

Lu Yingquan

(Institute of Industrial Processing Control, Zhejiang University·Hangzhou, 310027, P. R. China)

Song Weigong

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University·Qinhuangdao, 066004, P. R. China)

Abstract: Based on coordinated control of multifingered hand, this paper presents coordinated hybrid impedance control. It proposes the desired impedance of object along different dimension. According to the coordinated control dynamics equation of the hand it designs the computer-torque controller. Finally, the simulation of the object's motion in free and constrained space are given. The result indicates that the object's position and force can be controlled at the same time by this method, and its dynamic property is verified to be desirable.

Key words: coordinated control; hybrid impedance control; BH-1 dextrous hand

1 引言(Introduction)

近年来国际上对多指手灵巧手的研究越来越活跃. 在国内, 北京航空航天大学先后研制成功了 BH-1 和 BH-2 灵巧手. 本文针对 BH-1 多指手提出了基于物体目标阻抗的协调混合阻抗控制方法.

机器人在约束空间运动时, 我们不仅希望控制其位置轨迹, 还希望能控制机器人与环境的作用力. 目前在约束环境下的控制大部分可归结为两种类型: 位置/力混合控制和阻抗控制. 位置/力混合控制首先由 Raibert 和 Craig^[1] 提出, 其方法是将任务空间分解为两个正交的子空间: 位置空间和力空间, 分别建立不同的控制器. 这种方法使得控制系统的设计和稳定性分析复杂化, 而且很难推广到多维情况. 阻抗控制由 Hogan^[2] 提出, 他认为可利用机器人与环

境接触时位置和力的动态关系, 通过调节给定位置或目标阻抗来达到控制作用力的目的, 但这种方法并不能控制作用力跟随期望的轨迹. 混合阻抗控制^[3] 结合了上述两种方法的特点, 提出用对偶性原理选取目标阻抗, 在不同方向采用不同的机械手阻抗实现位置控制和力控制.

多指手的操作要求手指与物体、各手指之间满足一定的约束关系, 这就需要协调控制^[5]. 文献[9] 提出了协调阻抗控制方法, 在其基础上本文结合混合阻抗控制概念, 解决了灵巧手抓取物体运动的协调控制问题. 控制算法由以下几部分组成: 根据被抓持物体期望的运动轨迹和动态性能选取物体的混合目标阻抗、根据物体的动态方程确定手指应对物体施加的作用力、由手指与物体的约束关系求各关节

加速度、计算反馈补偿项,最后根据灵巧手的动力学方程计算驱动力矩。

2 物体的动态方程 (Dynamics equation of the object)

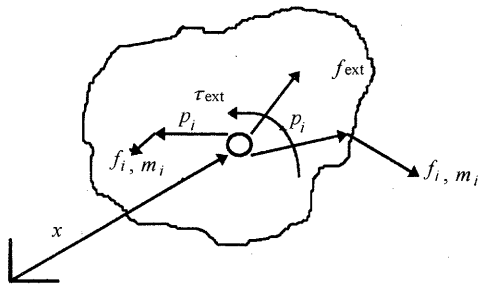


图 1 物体受力示意图
Fig. 1 The forced object

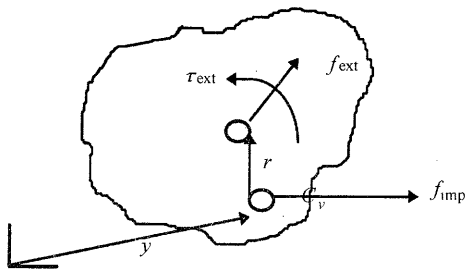


图 2 物体目标特性图
Fig. 2 The object characteristic

引用[4],[5]对物体的动态受力分析.设物体受力如图 1 所示,物体重心位于惯性系 x 点,共有 N 个机械手指作用于物体, f_i, f_j, m_i, m_j 为第 i, j 手指在偏离重心 p_i, p_j 位置施加的力和力矩, $f_{\text{ext}}, \tau_{\text{ext}}$ 为外界力和力矩, I 为物体的转动惯量, m 为物体质量,则物体的动态方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f_{\text{ext}} + \sum f_i + mg, \\ I\dot{w} + w \times Iw = \tau_{\text{ext}} + \sum p_i \times f_i + \sum m_i. \end{cases} \quad (1)$$

物体在任一点 $y = x + r$ (图 2 中的 C_r 点) 的运动方程由 $\dot{y} = \dot{x} + \dot{w} \times r + w \times (w \times r)$ 可写成

$$\begin{bmatrix} mI_3 & mR \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mg - m(w \times (w \times r)) \\ w \times Iw \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{\text{ext}} \\ \tau_{\text{ext}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f_i \\ \sum p_i \times f_i + \sum m_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

记为

$$I_0 \ddot{Y} + B_0 = F_{\text{ext}} + WF. \quad (3)$$

其中

$$\ddot{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{w} \end{bmatrix}; \quad I_0 = \begin{bmatrix} mI_3 & mR \\ 0 & I \end{bmatrix};$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} -mg & mR \\ 0 & I \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -r_3 & r_2 \\ r_3 & 0 & -r_1 \\ r_2 & r_1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$W = \begin{bmatrix} I_3 & 0 & I_3 & 0 & \cdots & I_3 & 0 \\ p_1 & I_3 & p_2 & I_3 & \cdots & p_N & I_3 \end{bmatrix};$$

$$p_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{i3} & p_{i2} \\ p_{i3} & 0 & -p_{i1} \\ -p_{i2} & p_{i1} & 0 \end{bmatrix}; \quad F_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} f_{\text{ext}} \\ \tau_{\text{ext}} \end{bmatrix};$$

$$F = [f_1 \quad m_1 \quad \cdots \quad f_N \quad m_N]^T,$$

W 为抓取矩阵, I_3 为 3×3 单位矩阵, $r_1, r_2, r_3; p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}$ 为 r, p_i 在惯性系中沿三个方向的分量。

3 物体混合目标阻抗的选取 (Choose the object impedance)

与物体的动态方程相似,考虑到物体的转动时,物体的目标阻抗形式^[4]为:

$$\begin{cases} m_d \dot{y} = f_{\text{ext}} + f_{\text{imp}}, \\ I_d \dot{w} + w \times I_d w = \tau_{\text{ext}} + \tau_{\text{imp}} - r \times f_{\text{ext}}. \end{cases} \quad (4)$$

写为

$$I_{0d} \ddot{Y} + B_{0d} = \tilde{F}_{\text{ext}} + F_{\text{imp}}. \quad (5)$$

这里

$$I_{0d} = \begin{bmatrix} m_d & 0 \\ 0 & I_d \end{bmatrix}; \quad \ddot{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{w} \end{bmatrix};$$

$$B_{0d} = \begin{bmatrix} 0 \\ w \times I_d w \end{bmatrix}; \quad \tilde{F}_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} f_{\text{ext}} \\ \tau_{\text{ext}} - r \times f_{\text{ext}} \end{bmatrix};$$

$$F_{\text{imp}} = \begin{bmatrix} f_{\text{imp}} \\ \tau_{\text{imp}} \end{bmatrix}.$$

m_d, I_d 为物体理想质量和惯量, $\ddot{y}, \ddot{w}$ 为物体理想加速度, $f_{\text{ext}}, \tau_{\text{ext}}$ 为外界对物体的作用力和作用力矩, $f_{\text{imp}}, \tau_{\text{imp}}$ 为物体的阻抗力和阻抗力矩, r 为阻抗力作用点与物体重心的位移。

根据系统稳定性要求, Anderson 和 Spong^[3]提出了对偶性原理选取机械手阻抗,即:容性环境选取非容性机械手阻抗进行力控制,惯性环境选取非惯性机械手阻抗进行位置控制.我们将此原理用于选取物体的目标阻抗,则这样的选取可以保证接触时的稳定性.考虑一种简单情况,物体被抓住后在 x 方向期望位置轨迹为 x_d ,在 z 方向期望手指对其作用力为 f_{dz} 用以克服外力 $f_{\text{ext}z}$,则设物体 x 方向的目标阻抗为容性, z 方向的目标阻抗为惯性,其阻抗力分别为:

$$f_{\text{imp}x} = m_d \ddot{x}_d + k_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_p(x_d - x), \quad (6)$$

$$f_{\text{imp}z} = f_{dz}. \quad (7)$$

其中, $\ddot{x}_d, \dot{x}_d, x_d$ 为物体期望加速度、速度和位置, k_v, k_p 的选取决定了系统的动态性能及稳定性, f_{dz} 为期望作用力, 在自由空间为 0.

4 计算力矩控制器的设计 (Design of the torque controller)

对多指灵巧手, 协调控制的动力学方程^[5]为:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau - J_h^T F, \quad (8)$$

$M(\theta)$ 为惯性矩阵, $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 为哥氏力和离心力矢量, $N(\theta, \dot{\theta})$ 为重力和摩擦力矢量, τ 为手指的关节力矩矢量. J_h 为手指的雅克比矩阵, F 为手指对物体的作用力.

根据式(8)我们将控制器的设计分成两部分.

4.1 求手指对物体的作用力 (The force applied to the object by the fingers)

由物体的目标阻抗式(5)可求物体期望加速度

$$\ddot{Y}_d = I_{0d}^{-1}(\tilde{F}_{\text{ext}} + F_{\text{imp}} - B_{0d}), \quad (9)$$

代入式(3)中可求此时手指对物体的作用力应为:

5 系统的控制框图 (The diagram of the controlled system)

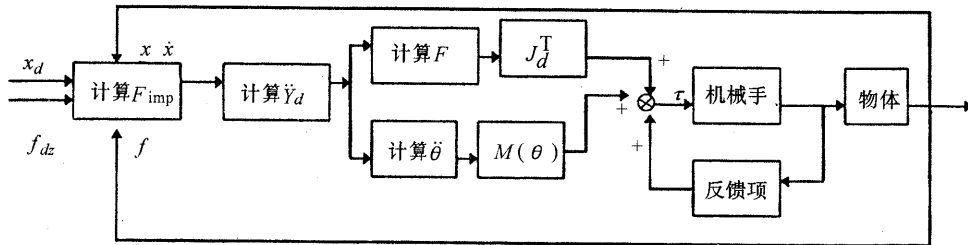


图 3 协调混合阻抗控制框图

Fig. 3 The diagram of the system controlled by coordinate hybrid impedance controller

根据以上分析, 得到整个系统的控制框图如图 3 所示. 其实现过程为: 由测量值及期望轨迹根据给定的阻抗关系求得 F_{imp} , 然后由(10)计算 F , (12) 计算 $\ddot{\theta}$, 同时计算补偿项 $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta})$, 最后由(9)得到驱动力矩 τ . 理想情况时, 图 3 得到的闭环系统为一、二阶系统.

6 仿真研究 (Simulation)

我们考虑 BH-1 灵巧手抓住物体运动情况. 设手指与物体间为摩擦点接触, 手指与物体没有相对运动. 已知 BH-1 手的动力学方程, 见[8]. 我们对灵巧手抓住物体在自由空间和受限空间分别进行仿真研究.

6.1 自由空间 (Free space)

如图 4, 设物体初始位置为 (0.072, 0, 0.165),

$$F = W^+ \{ B_0 - F_{\text{ext}} + I_0(I_{0d}^{-1}[\tilde{F}_{\text{ext}} + F_{\text{imp}} - B_{0d}]) \} + (1 - W^+ W)\xi. \quad (10)$$

其中 $W^+ = Q^{-1}W^T(WQ^{-1}W^T)^{-1}$ 为 W 的伪逆, Q 为权值矩阵, 与各手指的承载能力有关, ξ 为任意向量. (10) 前一项表示手指对物体的操作力, 后一项为抓取物体所需的内力. [6], [7] 讨论了内力的选取. 简单的方法是取其为充分大常值以保证运动中手指对物体的作用力在摩擦锥内^[5].

4.2 求关节加速度及反馈补偿项 (The acceleration of the joints and the compensation term)

在实际控制中, 一般加速度项难以检测, 我们通过手指与物体的约束关系求得, 其它 $x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}$ 设由检测得到.

在多指手操作中, 手指与物体有约束关系^[5]:

$$\lambda = w^T \dot{x}; \quad \lambda = J_h^T \dot{\theta}, \quad (11)$$

λ 为手指速度, $\dot{x}$ 为物体速度, $\dot{\theta}$ 为关节速度, 由上式可得:

$$\ddot{\theta} = J_h^+ (\dot{w}^T \dot{x} + w^T \ddot{x}) - J_h^T \ddot{\theta}. \quad (12)$$

其中, $\ddot{x}$ 为物体加速度, 即 $\ddot{Y}_d$, J_h^+ 为 J_h 伪逆.

由测量值及已知的动力学方程, 计算 $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta})$ 作为反馈项进行补偿.

期望物体在 x 方向沿轨迹 $x_d = 0.070 + 0.005t$ 运动 (不考虑运动范围), 在 z 方向保持 $z_d = 0.16$ 位置. 因为在 x, z 方向都采用位置控制, 则设 x, z 方向的目标阻抗分别为:

$$m_d(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + k_{vx}(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_{px}(x_d - x) = 0;$$

$$m_d(\ddot{z}_d - \ddot{z}) + k_{vz}(\dot{z}_d - \dot{z}) + k_{pz}(z_d - z) = 0;$$

取 $m_d = 1; k_{vx} = 2; k_{px} = 4; k_{vz} = 3; k_{pz} = 5$, 仿真得响应曲线为图 5, 图 6.

6.2 受限空间 (Constrained space)

如图 7, 物体初始位置为 (0.070, 0, 0.165), 期望物体在 x 方向与木板保持一定的作用力 $f_d = 2N$, z 方向沿轨迹 $z_d = 0.016 + 0.005t$ 运动 (不考虑运动范围). 由于在 x 方向为力控制, 我们取目标阻抗为惯性: $f_d - m_d \ddot{x} = f_{\text{ext}x}$; z 方向为位置控制, 则取物体

目标阻抗为容性: $m_d(\ddot{z}_d - \ddot{z}) + k_{vz}(\dot{z}_d - \dot{z}) + k_{pz}(z_d - z) = f_{extz}$. 取 $m_d = 1, k_{vz} = 7, k_{pz} = 10$, 仿真响应曲线如图 8, 图 9 所示. 从 z 方向的响应曲线看, 在启动时, 有稍微的振荡现象, 这与物体在该方向所受摩擦力的变化有关.

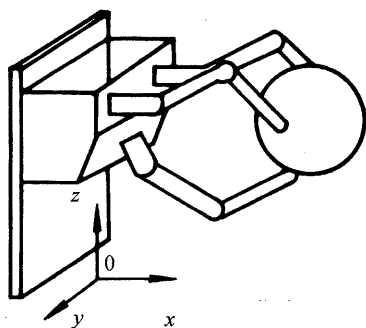


图 4 自由空间仿真系统
Fig. 4 The simulation system in free space

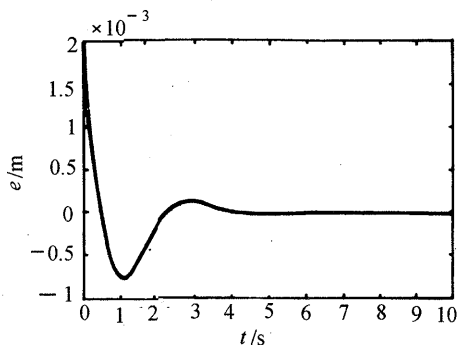


图 5 x 方向物体位置误差曲线
Fig. 5 The position error at x -direction

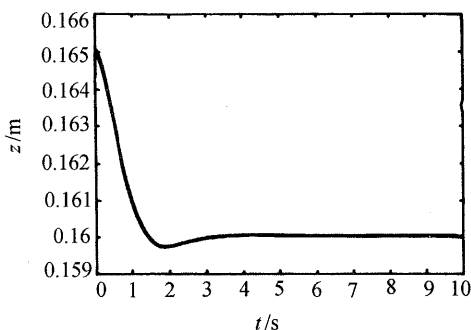


图 6 z 方向的位置变化曲线
Fig. 6 The position at z -direction

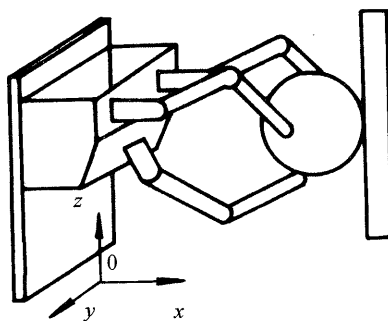


图 7 受限空间仿真系统
Fig. 7 The simulation system in constrained space

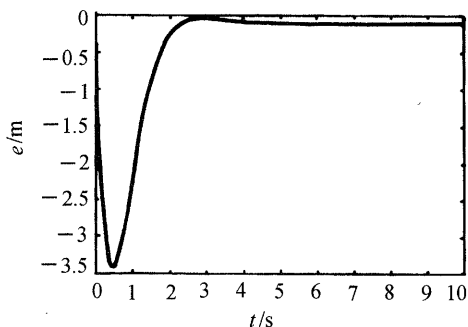


图 8 z 方向位置误差曲线
Fig. 8 The position error at z -direction

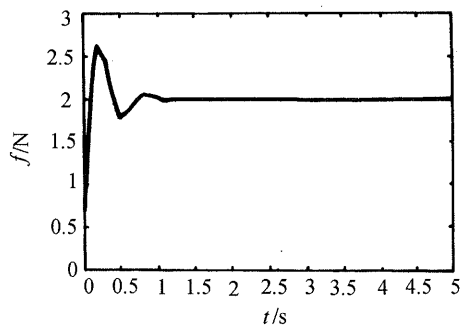


图 9 x 方向手指对物体作用力曲线
Fig. 9 The force applied by fingers at x -direction

7 结论(Conclusions)

本文将混合阻抗控制应用于多指手抓取物体的协调运动中. 这种控制具有以下优点: 1) 考虑了手指与物体及各手指之间的协调运动, 计算力矩控制器的设计包含了手指与物体稳定接触的约束条件. 2)

应用物体的目标阻抗可使控制器直接根据实际物体的运动进行调节控制. 3) 可同时对物体在不同方向实现位置控制和力控制, 这在受限空间时尤其有效.

应用协调混合阻抗控制可以很好地解决如擦玻璃、去毛刺、写字等在受限空间机械手的运动控制问

(下转第 610 页)