

基于模型偏差补偿原理的机器人双臂协调控制

顾新兴 叶 桦 冯纯伯

(东南大学自动化研究所·南京, 210018)

吴镇炜

(中国科学院机器人学开放实验室·沈阳, 110015)

摘要: 本文讨论双臂协调操作物体的问题, 在操作空间中给出双臂耦合动力学模型, 基于这一模型, 针对系统的未建模动态, 利用模型偏差补偿原理, 设计出一种双臂协调控制算法, 并证明当未建模动态满足一定条件下控制系统的全局渐近稳定性. 本文还通过仿真研究了为完成协调任务对物体柔性的要求, 物体质量、刚度对动力学耦合程度的影响, 规划轨迹速度、加速度对协调控制的影响.

关键词: 操作空间; 耦合动力学模型; 模型偏差补偿控制; 双臂协调

1 引言

目前机器人双臂协调控制方法主要可分为两大类: 1) 运动学协调控制; 2) 动力学协调控制. [1]提出运动学协调控制方案, 采用一种主从模式, 这种方法由于没有考虑因依从偏差所产生的相互作用力干扰对系统动力学的影响, 必会产生较大的控制误差. [2]提出一种基于闭链模型的精确线性化的动力学控制, 由于模型本身存在一些不合理因素以及方案中转换环节过多、未考虑模型偏差的影响而使它离实用还有一定距离. [3]提出操作空间概念, 这一概念揭示了协调的本质, 为在状态空间上实现各种协调控制方案打下了基础. [4]基于操作空间概念提出了混合力位控制方案, 由于未考虑对模型偏差进行补偿, 不易做到力控制的稳定.

以往机械臂的各种控制方案很少考虑结构未建模动态的影响. [5, 7]提出一种具有模型偏差补偿能力的控制方案, 针对机械臂的 Lagrange-Euler 方程

$$H(q)\ddot{q} + D(q, \dot{q}) = M, \quad (1.1)$$

当状态满足一定条件, 并且 H, D 相对于采样周期分段慢时变时, 根据偏差的慢时变性对它进行估计, 从而得出相应的补偿控制量, 最后得到类似滑模控制的方案, [5, 7]就 D 项存在偏差的情形给出稳定性分析. 本文讨论了 [5, 7]中的补偿控制方案在双臂协调控制中的应用, 并讨论了在 H, D 都存在偏差的情形下的稳定性问题, 得出较量化的能实现补偿的先决条件:

i) 状态及其一阶导数能控能观,

$$\text{ii) } \|\hat{H}^{-1}\Delta H\|_2 < \infty, \quad \|\hat{H}^{-1}\Delta D\|_2 < \infty, \quad \|\hat{H}^{-1}\Delta D\|_2 < \infty. \quad (1.2)$$

若满足以上条件, 并限制控制增益在一定范围, 利用反馈系统的小增益定理证明了补偿控制系统的全局渐近稳定.

本文在操作空间上讨论协调问题,将双臂“虚棒”(virtual sticks)末端的相对位置和绝对位置定义为系统的状态空间向量,通过利用内力和相对位置之间的关系,在两臂及物体动力学方程中消去作用力项,从而合并得到操作空间上的与(1.1)形式相同的耦合动力学方程,该模型由于其状态直接反映协调的“内”,“外”二重性,使其比主从模式或闭链模型都更科学,且当物体具有一定柔性(或末端腕具有一定柔性,例如装有 RCC,此时可将被操作刚体与两臂末端视为具有柔性的整体)时,可说明系统满足条件(1.2),因此可针对它设计模型偏差补偿控制. 为了下面的讨论方便,约定某些记号: $\|\cdot\|_2: L^2$ 中函数向量的范数; $\|\cdot\|: l^2$ 中向量的范数; $\gamma(\cdot)$: 算子增益; $\lambda_i(\cdot)$: 矩阵第 i 个特征值; 角标: “ i ”指“internal”, “ e ”指“external”, “ d ”指期望值; 上标: “ $\hat{\cdot}$ ”指估计量, “ \sim ”记任意三维向量 $a = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ 的“坐标方阵”为 $a = [b_1 \ b_2 \ b_3]$, 其中 $b_1 = [0 \ a_3 \ -a_2]^T$, $b_2 = [-a_3 \ 0 \ a_1]^T$, $b_3 = [a_2 \ -a_1 \ 0]^T$; $(\cdot)_T$: 表示函数矩阵的截尾. $h_i(\cdot)$, $i=1, 2$ 为脉冲响应, $\hat{h}_1(s) = 1/(s + \bar{k}_s)$, $\hat{h}_2(s) = (s + \bar{k}_s)/(s^2 + \bar{k}_s s + \bar{k}_t)$.

2 双臂协调系统动力学模型

2.1 双臂系统操作空间描述

本节引用文献[3]关于操作空间描述的主要结果,如图1所示,臂 a 和臂 b 共同抓住一个物体,在两端 O_a, O_b 分别产生了作用力和力矩: F_a, N_a 和 F_b, N_b . O_c 是物体的中心点,我们定义两个虚棒(分别固定在两个末端上)stick a , stick b 为两个向量 $I_a = \overrightarrow{O_a O_{aa}}$, $I_b = \overrightarrow{O_b O_{bb}}$, O_{aa} 和

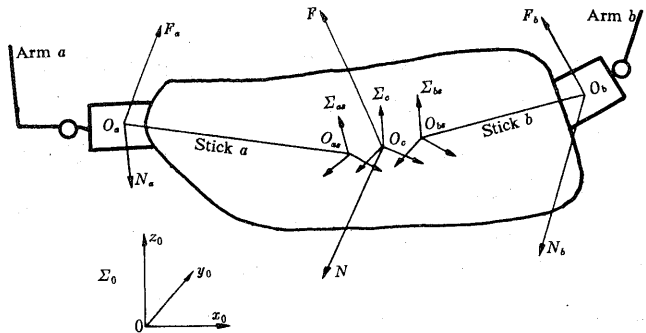


图1 双臂操作空间描述

O_{bb} 分别是两棒的尖端点. 分别定义尖端坐标系为 Σ_{aa} 和 Σ_{bb} , 重心点坐标系为 Σ_o , 以 P_a, P_b 记 Σ_{aa}, Σ_{bb} 在 Σ_o 中的笛卡尔位置和姿态向量, 定义系统在操作空间上的状态向量为: X_o (外部的绝对位置), X_r (内部的相对位置), 和 X (位置空间向量)

$$\begin{cases} X_o = \frac{1}{2}(P_a + P_b), \\ X_r = P_a - P_b, \\ X = [X_r^T \ X_o^T]^T. \end{cases} \quad (2.1)$$

当物体无变形时, O_{aa}, O_{bb} 与 O_c 重合, 有变形时不重合, 我们假定这种变形比较小, 并且因内力只与相对位置有关, 因此物体的外力(矩) f_o , 内力(矩) f_i , 可分别列写为(参见[3])

$$\begin{cases} f_o = R_1 f_a + R_2 f_b, \\ f_i = \frac{1}{2}(R_1 f_a - R_2 f_b) = h(X_r), \\ f = [f_i^T \ f_o^T]^T. \end{cases} \quad (2.2)$$

其中 $f_o = [F_o^T, N_o^T]^T$, $f_a = [F_a^T, N_a^T]^T$, $f_b = [F_b^T, N_b^T]^T$, R_1, R_2 为构力矩的几何参量阵.

2.2 耦合动力学方程

考虑双臂共同抓一物体(如图 1),可分别列写出各臂及物体的动力学方程

$$\begin{cases} H_a \ddot{X}_a + D_a = M_a - J_a^T f_a, \\ H_b \ddot{X}_b + D_b = M_b - J_b^T f_b, \end{cases} \quad (2.3)$$

$$H_o X_o + D_o = R_1 f_a + R_2 f_b. \quad (2.4)$$

式中 H 代表惯量矩阵, D 代表 Coriolis, Centrifugal 及重力, 摩擦力向量之和, 角标“ a ”, “ b ”指 a, b 臂, “ o ”指操作物体, $X_i, i=a, b$ 为臂的关节角向量, X_o 为物体重心点坐标系在 Σ_o 中位置和姿态坐标向量, M 为臂的关节驱动转矩向量, $J_i, i=a, b$ 为臂的雅可比矩阵.

定义 $\bar{J}_a = \partial P_a / \partial X_a^T, \bar{J}_b = \partial P_b / \partial X_b^T,$

由(2.1)得

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \ddot{X}_r + \ddot{X}_o = \bar{J}_a \ddot{X}_a + \bar{J}_b \ddot{X}_b, \\ -\frac{1}{2} \ddot{X}_r + \ddot{X}_o = \bar{J}_b \ddot{X}_b + \bar{J}_a \ddot{X}_a. \end{cases} \quad (2.5)$$

联立(2.2), (2.4)得

$$\begin{cases} f_a = \frac{1}{2} R_1^{-1} (H_o \ddot{X}_o + D_o + 2h(X_r)), \\ f_b = \frac{1}{2} R_2^{-1} (H_o \ddot{X}_o + D_o - 2h(X_r)). \end{cases} \quad (2.6)$$

将(2.3), (2.6)代入(2.5)最后得

$$H(X) \ddot{X} + D(X, \dot{X}) = M. \quad (2.7)$$

其中

$$M = [M_a^T \quad M_b^T]^T,$$

$$\begin{cases} H = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} H_a \bar{J}_a^{-1} & H_a \bar{J}_a^{-1} + \frac{1}{2} J_a^T R_1^{-1} H_o \\ -\frac{1}{2} H_b \bar{J}_b^{-1} & H_b \bar{J}_b^{-1} + \frac{1}{2} J_b^T R_2^{-1} H_o \end{bmatrix}, \\ D = \begin{bmatrix} D_a + \frac{1}{2} J_a^T R_1^{-1} (D_o + 2h) - \bar{J}_a \dot{X}_a \\ D_b + \frac{1}{2} J_b^T R_2^{-1} (D_o - 2h) - \bar{J}_b \dot{X}_b \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (2.8)$$

以上我们推得了双臂协调系统的耦合动力学方程, 由(2.8)知, (2.7)比之于(1.1)除在 H, D 中分别新增物体惯量项和弹性力项外形式完全相同. 如果物体具有一定柔性(弹性系数不太大), D 中函数 h 不会发生突变, 意即 $\|h\|_2 < \infty$, 并假定在给定的工作空间中(不含奇异点)规划运动轨迹, 确保 H, D 中雅可比矩阵非奇异, 而且 H, D 中其它项均为正, 余弦函数线性乘积和, 因此, 可确保模型(2.7)满足(1.2)的条件.

3 模型偏差补偿控制

3.1 控制方案

§ 2.2 中已说明双臂系统耦合动力学方程与(1.1)形式完全相同, 故我们可参照[5, 7]给出双臂协调系统的模型偏差补偿控制方案. 定义

$$E_r = X_r - X_{rd}, \quad E_o = X_o - X_{od},$$

$$E = [E_r^T \quad E_o^T]^T = [(X_r - X_{rd})^T, (X_o - X_{od})^T]^T = X - X_d.$$

其中

$$X_{rd} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad x_{rd}(4) \quad x_{rd}(5) \quad x_{rd}(6)]^T, \quad X_d = [X_{rd}^T \quad X_{od}^T]^T.$$

X_{rd} 为期望的相对位置向量(坐标系 Σ_{aa}, Σ_{ba} 的原点 O_{aa}, O_{ba} 重合, 而姿态相对不变, 用常量 $x_{rd}(i), i=4, 5, 6$ 表示); X_{ad} 为期望绝对位置姿态向量(在笛卡尔空间); X_d 为期望状态向量.

定义滑模误差

$$\begin{aligned} U_r &= \dot{E}_r + C^r E_r, \quad U_o = \dot{E}_o + C^o E_o, \\ U &= [U_r^T, U_o^T]^T = \dot{E} + CE. \end{aligned} \tag{3.1}$$

其中 $C = \text{diag}\{C^r, C^o\}, C^r = \text{diag}\{c_1, \dots, c_6\},$
 $C^o = \text{diag}\{c_7, \dots, c_{12}\}, c_i = \text{const} > 0, i = 1, \dots, 12.$

我们提出如下控制规律

$$M = \hat{D} + \hat{H}[\ddot{X}_d - C(\dot{X} - \dot{X}_d)] - \bar{k}_s \hat{H}U - \bar{k}_d \int_0^t \hat{H}U d\tau. \tag{3.2}$$

该控制方案([5, 7]所提控制算法的连续形式)由等价控制, 状态误差修正项, 模型偏差补偿项三项之和构成, \bar{k}_s, \bar{k}_d 是增益.

3.2 稳定性分析

记模型偏差量 $H - \hat{H} = \Delta H, D - \hat{D} = \Delta D = \Delta D_1 \dot{X} + \Delta D_2,$

联合(2.7)与(3.2)得

$$-\hat{H}^{-1}[\Delta H \ddot{X} + \Delta H \ddot{X} + \Delta D] - \hat{H}^{-1} \hat{H}(\dot{U} + \bar{k}_d U) = \dot{U} + \bar{k}_s U + \bar{k}_d U.$$

对上式两边进行 $h_2(\cdot)$ 褶积映射

$$-\int_0^t h_2(t-\tau) \hat{H}^{-1}[\Delta H \ddot{X} + \Delta H \ddot{X} + \Delta D] d\tau - \int_0^t h_2(t-\tau) \hat{H}^{-1} \hat{H}(\dot{U} + \bar{k}_d U) d\tau = \dot{U} + \bar{k}_d U. \tag{3.3}$$

记 $e_1 = \dot{U} + \bar{k}_d U, e_2 = \hat{H}^{-1} \hat{H}(\dot{U} + \bar{k}_d U) + \hat{H}^{-1} \Delta D,$
 $H_1: e_1 \rightarrow H_1 e_1 \triangleq (\hat{H}^{-1} \hat{H}) e_1, H_2: e_2 \rightarrow H_2 e_2 \triangleq \int_0^t h_2(t-\tau) e_2(\tau) d\tau,$
 $u_1 = -H_2[\hat{H}^{-1}[\Delta H \ddot{X} + \Delta H \ddot{X}]], u_2 = \hat{H}^{-1} \Delta D,$
 $y_1 = \hat{H}^{-1} \hat{H}(\dot{U} + \bar{k}_d U), y_2 = \int_0^t h_2(t-\tau) [\hat{H}^{-1} \hat{H}(\dot{U} + \bar{k}_d U) + \hat{H}^{-1} \Delta D] d\tau.$

根据等式(3.3), 控制系统(2.7)~(3.2)可等价地用图2所示框图来表示(图中 $\hat{H}^{-1} \hat{H}$ 用 H_1 表示, $\hat{h}_2(s)I$ 用 H_2 表示). 因 \hat{H} 中内容为形如 $a \sin^m X \cos^n X$ 的线性和, 因此存在常数 $\gamma_1 \geq 0,$ 使得 $\|(\hat{H}^{-1} \hat{H})_T\| \leq \gamma_2, T \in [0, \infty),$ 易知 $\gamma(H_1) = \gamma_1.$

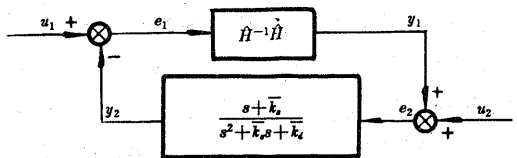


图2 控制系统(2.7)~(3.2)的等价框图

定理 对于图2所示系统, 如果

i) $\|\hat{H}^{-1} \Delta H\|_2 < \infty, \|\hat{H}^{-1} \Delta \hat{H}\|_2 < \infty, \|\hat{H}^{-1} \Delta D_1\|_2 < \infty, \|\hat{H}^{-1} \Delta \dot{D}_1\|_2 < \infty,$
 $\|\hat{H}^{-1} \Delta \dot{D}_2\|_2 < \infty;$

ii) $\bar{k}_s > (1 + \sqrt{2}) \gamma_1, \gamma_1 \bar{k}_s < \bar{k}_d < \frac{1}{1 + \sqrt{2}} \bar{k}_s^2,$

则 i) 对任意 $\epsilon > 0,$ 存在 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5 > 0.$ 当

$$\begin{aligned} \|\hat{H}^{-1}\Delta H\|_2 < \delta_1, \quad \|\hat{H}^{-1}\Delta \dot{H}\|_2 < \delta_2, \quad \|\hat{H}^{-1}\Delta D_1\|_2 < \delta_3, \\ \|\hat{H}^{-1}\Delta \dot{D}_1\|_2 < \delta_4, \quad \|\hat{H}^{-1}\Delta \dot{D}_2\|_2 < \delta_5 \end{aligned}$$

时 $\|U\|_2 < \varepsilon$.

iii) $U(t) \rightarrow 0$, 当 $t \rightarrow \infty$, 系统是全局渐近稳定的.

证 我们用小增益定理^[7]来证明此定理.

由附录知 $\gamma_2 = \bar{k}_s/\bar{k}_d$, 又由条件 ii) $\bar{k}_d/\bar{k}_s > \gamma_1$, 故 $\gamma_1\gamma_2 < 1$.

因而根据反馈系统小增益定理(参见[7])得

$$\|e_{1T}\|_2 \leq (1 - \gamma_1\gamma_2)^{-1} (\|u_{1T}\|_2 + \gamma_2 \|u_{2T}\|_2). \quad (3.4)$$

$$\text{又} \quad \|u_1\|_2 \leq \gamma_2 (\|\hat{H}^{-1}\Delta \dot{H}\|_2 \|\dot{X}\|_2 + \|\hat{H}^{-1}\Delta H\|_2 \|\ddot{X}\|_2), \quad (3.5)$$

$$\|u_2\|_2 \leq \|\hat{H}^{-1}\Delta \dot{D}_1\|_2 \|\dot{X}\|_2 + \|\hat{H}^{-1}\Delta D_1\|_2 \|\ddot{X}\|_2 + \|\hat{H}^{-1}\Delta D_2\|_2. \quad (3.6)$$

由于施加在物体上力受到驱动饱和的限制, 故存在 $m_1, m_2, m_3 > 0$, 使

$$\|\dot{X}\|_2 < m_1, \quad \|\ddot{X}\|_2 < m_2, \quad \|\ddot{X}\|_2 < m_3. \quad (3.7)$$

若条件 i) 满足, 则由(3.5), (3.6), (3.7)知 $u_1, u_2 \in L^2$, 因此令(3.4)式两边 $T \rightarrow \infty$ 得

$$\|e_1\|_2 \leq (1 - \gamma_1\gamma_2)^{-1} (\|u_1\|_2 + \gamma_2 \|u_2\|_2). \quad (3.8)$$

$$\text{因而} \quad \|U\|_2 = \|h_1 * e_1\|_2 \leq \frac{1}{\bar{k}_s} (1 - \gamma_1\gamma_2)^{-1} (\|u_1\|_2 + \gamma_2 \|u_2\|_2). \quad (3.9)$$

令 $m_4 = \bar{k}_s(1 - \gamma_1\gamma_2)/5\gamma_2$, 综合(3.5), (3.6), (3.7), (3.9)知, 对任意 $\varepsilon > 0$, 存在以下偏差上限使结论 ii) 满足

$$\delta_1 = \frac{m_4}{m_3}\varepsilon, \quad \delta_2 = \frac{m_4}{m_2}\varepsilon, \quad \delta_3 = \frac{m_4}{m_2}\varepsilon, \quad \delta_4 = \frac{m_4}{m_1}\varepsilon, \quad \delta_5 = m_4\varepsilon, \quad \delta_i > 0, \quad i = 1, \dots, 5.$$

易知

$$U(t) = \int_{t/2}^t e^{-\bar{k}_s(t-\tau)} e_1(t-\tau) d\tau + \int_{t/2}^t e^{-\bar{k}_s(1-\tau)} e_1(\tau) d\tau,$$

由此得

$$\|U(t)\| \leq \int_{t/2}^t e^{-\bar{k}_s\tau} \|e_1(t-\tau)\| d\tau + \int_{t/2}^t e^{-\bar{k}_s(1-\tau)} \|e_1(\tau)\| d\tau.$$

根据 Schwarz 不等式可得

$$\begin{aligned} \|U(t)\| &\leq \left[\int_{t/2}^t (e^{-\bar{k}_s\tau})^2 d\tau \right]^{1/2} \left[\int_{t/2}^t \|e_1(t-\tau)\|^2 d\tau \right]^{1/2} \\ &\quad + \left[\int_{t/2}^t (e^{-\bar{k}_s(1-\tau)})^2 d\tau \right]^{1/2} \left[\int_{t/2}^t \|e_1(\tau)\|^2 d\tau \right]^{1/2} \\ &\leq \left[\int_{t/2}^\infty (e^{-\bar{k}_s\tau})^2 d\tau \right]^{1/2} \left[\int_0^\infty \|e_1(\tau)\|^2 d\tau \right]^{1/2} \\ &\quad + \left[\int_0^\infty (e^{-\bar{k}_s(1-\tau)})^2 d\tau \right]^{1/2} \left[\int_{t/2}^\infty \|e_1(\tau)\|^2 d\tau \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

由(3.8)知 $e_1(\cdot) \in L^2$ 故 $\int_t^\infty \|e_1(\tau)\|^2 dt \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$.

因此由上式得当 $t \rightarrow \infty$ 时 $U(t) \rightarrow 0$, 系统是全局渐近稳定的. 证毕.

有两点须注意: 1) 当无模型偏差, 即 $\Delta H = \Delta D = 0$ 时, 由(3.4), (3.5), (3.6)得 $\|e_{1T}\|_2 = 0$, 即 $\dot{U} + \bar{k}_s U = 0$, 系统满足滑模运动产生的充分条件. 2) 由于实际控制中误差 $\|U\|_2$ 不能超过某一最大允许值 ε_{\max} , 由定理结论 ii) 知必须限制模型偏差及其导数在一定限度之内.

3) 当操作物为完全刚性时, 弹性系数为无穷大, 由 D 表达式(2.8)可知不能保证定理条件

i) 中的后三个范数有限, 因而协调操作对物体柔性的要求就成为必要的了。

4 仿真研究

仿真采用的模型由一个 PUMA-562 (“a”臂) 和一个 PUMA-760 (“b”臂) 组成, 将 a 臂的基坐标系 Σ_a 定义为系统绝对坐标系 Σ_0 , b 臂相对 a 臂的基坐标系转换除在 x, z 方向分别有偏移 2.2m 和 -0.372m 外, 其它坐标及姿态均一致, 在协调运动中冻结两臂的第 1, 4, 5, 6 关节角为: $x_i(1) = 90^\circ, x_i(4) = x_i(5) = x_i(6) = 0^\circ, i = a, b$, 即在运动中双臂均只有 2, 3 关节可动。这种设定把协调任务简化为在 y, z 两方向的位置协调。两臂的 2, 3 关节初始角度分别为: $x_a(2) = -43.2784^\circ; x_a(3) = 187.1566^\circ; x_b(2) = -93.4965^\circ; x_b(3) = 216.3033^\circ$ 。我们在笛卡尔空间中规划两臂抓棒垂直上升一段距离, 圆滑地转向 y 方向, 然后再向 y 方向平推一段距离停止, 运动中始终保持棒的姿态不变, 运行时间为 2s。各臂的动力学模型及估计模型都取自 [5, 6], \hat{H} 相对于 H 有 20~40% 的建模误差, \hat{D} 和 D 之间有相当大的差异。a, b 臂最大负载能力分别为 2.27kg 和 10kg, a, b 臂第 2, 3 关节的最大驱动转矩分别为 $FMA2 = 270\text{Nm}, FMA3 = 70\text{Nm}; FMB2 = 2000\text{Nm}, FMB3 = 210\text{Nm}$ 。以下我们讨论两种情形:

1) 取采样周期 $T = 5\text{ms}$, 最大速度 $V_{\max} = 0.065\text{m/s}$, 物体质量 $m = 11\text{kg}$, 弹性系数 $K2 = K3 = 10^5\text{N/m}$, 滑动线斜率 $C_i = 30 (i = 2, 3)$, 此时采用控制 (3.2) 是稳定的, 结果见图 3 (a), 可见加速度对双臂相对误差有轻微的影响, 在转向处有瞬间抖动, 当取 $K2 = K3 = 1.5 \times 10^5\text{N/m}$, (取 $\hat{h} = K(X_r - X_{r,d}) + \bar{K}(\dot{X}_r - \dot{X}_{r,d}), K = \text{diag}\{K2, K3\}, \bar{K} = 0$) 其它条件不变, 图 3 (b) 为 b 臂关节 2 的驱动转矩曲线, 表明很快达到饱和, 这说明采用以上控制在 $T = 5\text{ms}$ 时所允许的最大弹性系数大约为 10^5N/m 。

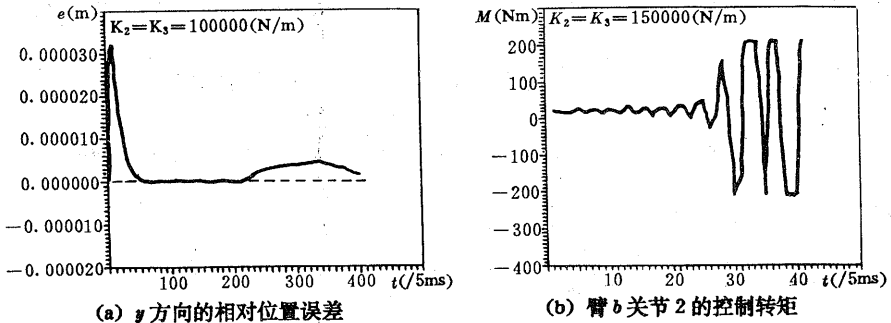


图 3 双臂协调搬运物体跟踪路径

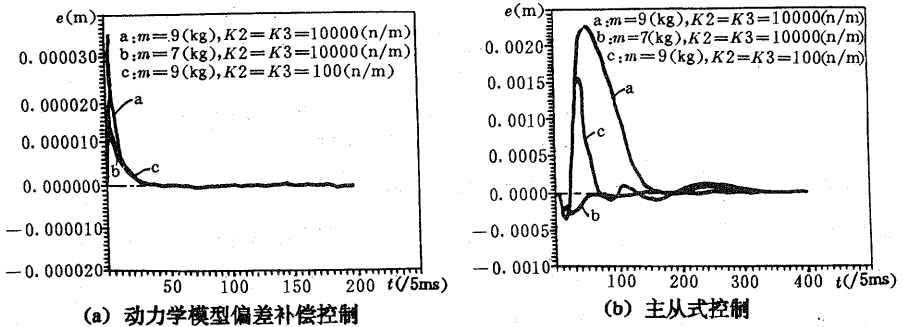


图 4 两种方法的比较

2) 图 4(a) 为采用控制 (3.2) 时对物体质量、弹性系数取不同值时的仿真结果, 图 4(b)

为采用主从控制方法时(主臂 a 跟踪期望轨迹, 从臂 b 根据约束跟踪主臂运动, 它们各自控制器均采用[5, 7]中的模型偏差补偿方案)对不同质量、弹性系数的结果。

5 结 论

本文在操作空间上得到了双臂协调系统的耦合动力学模型, 尽管其形式与单臂方程(1.1)完全一致, 但由于模型的 D 项包含操作物的刚性系数, 由此我们得到的完成协调任务的先决条件必须考虑这一因素, 当偏差限制在一定范围并且动力学模型相关项满足慢时变条件时我们所设计的模型偏差补偿控制方案具有较好的鲁棒性和动态特性, 双臂之所以不能协调操作完全刚性的物体(实际应用中, 装有 RCC 柔性腕的双臂操作刚体, 若把两末端与刚体视为整体时相当于柔性体), 有两个原因, 首先, 对完全刚体来说 $\|h\|_2 = \infty$, 先决条件(1.2)不能满足, 其次是因为弹性系数过大(\hat{D} 很大)造成驱动转矩 M 很快变大达到饱和, 结果因此而趋于发散。仿真表明, 针对确定的采样周期和规划速度, 系统须具有一定柔顺性时控制才能完成。协调控制在初始阶段以及轨迹转向时都存在较大的误差, 这是由于在初始阶段存在较大的未建模误差, 该误差很快就被近似修正到零, 而在轨迹转向处, 由于加速度较大, 由(3.5), (3.6), (3.9)可知此时的误差也较大。物体的质量或刚度越大, 双臂的耦合程度越强, 此时考虑耦合因素的控制(3.2)显然要比主从方式的控制效果要好。

参 考 文 献

- [1] Luh, J. Y. S.. Constrained Relation between Two Coordinated Industrial Robots for Motion Control. *Inte. Journal of Robotics Research*, 1987, 6(3), 60-70
- [2] Tarn, T. J.. Design of Dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms; Closed Chain Formulation. *Inte. Confe. Robotics and Automation*, 1987, 7-13
- [3] Masaru Uchiyama. A Symmetric Hybrid Position/Force Control Scheme for the Coordination of Two Robots. *IEEE Inte. Confe. Robotics and Automation*, 1988, 350-356
- [4] Carl D. Kopf. Experimental Comparison of Master/Slave and Hybrid Two Arm Position/Force Control. *IEEE Inte. Confe. Robotics and Automation*, 1988, 1633-1637
- [5] 叶桦, 冯纯伯, 史维. 一种新的机械手变结构控制方案. *控制理论与应用*, 1990, 7(2): 11-17
- [6] 叶桦. 机器人轨迹规划与跟踪控制. 南京: 东南大学博士论文, 1990
- [7] 冯纯伯. 非线性控制系统分析与设计. 南京: 东南大学出版社, 1990, 325-328

附 录

线性时不变算子的增益可由其频域特性来计算(参见[7]), 任意脉冲响应算子 $h(\cdot)$ 的增益可由下式给出

$$\gamma = \max_{\omega} |\hat{h}(j\omega)|.$$

易知

$$|\hat{h}_2(j\omega)| = \frac{\sqrt{\omega^2 + \bar{k}_2^2}}{\sqrt{\omega^4 + (\bar{k}_2^2 - 2\bar{k}_2)\omega^2 + \bar{k}_2^2}}.$$

由定理条件ii)有

$$\frac{\bar{k}_2}{\bar{k}_2^2} < \frac{1}{1 + \sqrt{2}},$$

可保证上式导数在域 $\omega \in [0, \infty)$ 中常负. 所以

$$\gamma_2 = |\dot{h}_2(0)| = \bar{k}_2/\bar{k}_2.$$

按以上公式很容易计算出算子 $\hat{h}_1(\cdot)$ 的增益为 $1/\bar{k}_2$.

Robot Dual-Arm Coordination Control Based on Modeled Deviation Compensating Principle

GU Xinxin, YE Hua and FENG Chunbo

(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing, 210018, PRC)

WU Zhenwei

(Robotics Laboratory, Academia Sinica, Shenyang, 110015, PRC)

Abstract: The control strategy of two manipulators handling a common object is studied in this paper. The dynamic model of two coupled manipulators is first derived. Based on the principle of compensating the model deviation a dual-arm coordination control algorithm is proposed. The global asymptotic stability of the proposed control scheme can be guaranteed if the unmodelled dynamics satisfies certain condition. The effect of the stiffness of the object on the compliant operation of the two coupled manipulators is studied. The effect of the trajectory velocity and acceleration on the coordinated control is also discussed.

Key words: dual-arm coordination; dynamics of coupled manipulators; tracking control of manipulators; model deviation compensation

本文作者简介

顾新兴 1965年生. 1986年和1989年在南开大学计算机与系统科学系分别获得学士和硕士学位, 现在东南大学自动化所攻读博士学位. 目前主要从事多机器人协调, 多变量控制系统理论的研究.

叶 桦 1961年生. 1989年12月毕业于东南大学自动化所, 并获博士学位, 现为该所讲师, 智能研究室主任. 目前主要研究兴趣为非线性控制系统, 机器人及其控制, 控制理论在工业生产中的应用.

冯纯伯 1928年生. 博士生导师. 1950年毕业于浙江大学电机系, 1953年毕业于哈尔滨工业大学研究生班, 1958年获苏联技术科学副博士学位. 现任东南大学研究生院副院长. 中国自动化学会常务理事. 目前主要从事系统建模方法, 自适应鲁棒及智能化控制理论及其应用, 机器人控制等研究工作.

吴镇坤 1962年生. 1983年毕业于山东大学控制理论专业. 1989年在中国科学院沈阳自动化研究所获“模式识别与智能控制”专业的硕士学位. 主要从事机器人协调控制, 机器人离线编程及控制系统CAD的研究工作.