

约束环境中多指手操作的鲁棒控制¹⁾

陈刚 王树青

(浙江大学先进控制研究所工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)
(E-mail: gchen@iipc.zju.edu.cn)

摘要 针对约束环境中的多指手操作系统, 在考虑其动态模型的不确定性以及存在外界干扰的情况下, 提出了一种鲁棒操作算法. 对于模型的不确定性, 该算法能够保证物体的位置误差、速度误差以及与环境之间的作用力误差具有全局指数收敛的特性. 在存在外界干扰的情况下, 系统满足给定的干扰抑制性能指标. 同时, 通过对多指手操作系统的内力进行鲁棒优化, 进一步增强了系统的鲁棒干扰抑制性能.

关键词 多指手, 操作, 不确定性, 干扰抑制
中图分类号 TP24

Robust Control for Multi-fingered Hand Manipulation in a Constrained Environment

CHEN Gang WANG Shu-Qing

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Advanced Process Control,
Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(E-mail: gchen@iipc.zju.edu.cn)

Abstract A robust manipulation algorithm is proposed for multi-fingered hand in a constrained environment when uncertainties in the dynamic models and external disturbances are considered. The algorithm can guarantee the position tracking error, both velocity error and the force error between object and environment have the property of globally exponential convergence when the parametric uncertainties are considered. If the system is subject to external disturbances, it satisfies a given performance criterion of disturbance rejection. Furthermore, the robustness of the system rejecting external disturbance is improved by the robust optimization algorithm for the internal forces.

Key words Multi-fingered hand, manipulation, uncertainty, disturbance rejection

1 引言

相对于传统工业机器人末端夹持器, 多指机器人手能够大大提高机器人操作的灵巧性和柔性, 具有诱人的应用前景, 因此多指机器人手的研究受到了国内外机器人学者的重视^[1~7]. 在多指手操作的研究领域, 已有的研究成果大多是在被操作的物体和多指手的精确模型已知的前提下得到的. 然而, 由于多指手操作系统的复杂性, 要得到精确的模型往

1) 国家自然科学基金 (60174035) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China(60174035)
收稿日期 2003-12-9 收修改稿日期 2004-12-28
Received December 9, 2003; in revised form December 28, 2004

往是很困难的. 因此, 放宽上面的前提条件将具有极其重要的现实意义. 对于具有模型参数不确定性的单机器人鲁棒控制问题已经得到广泛而深入的研究^[8,9]. 在考虑多机器人系统模型存在不确定性的条件下, 文献 [2,3] 较早地提出了一种自适应算法. 近来, 文献 [4] 针对这类问题又提出了一种新的模糊自适应控制算法. 对于一个实际的多机器人操作系统, 当环境对系统产生约束作用时, 问题就变得更加复杂. 文献 [5,6] 较早地研究了这类问题. 然而, 这些研究都没有考虑动态模型的不确定性以及外界干扰.

在考虑约束环境中多指手操作系统模型具有不确定性以及存在外界干扰的情况下, 本文提出了一种鲁棒操作算法. 与已有的操作算法相比, 本文的算法具有更强的实用价值.

2 多指手操作系统的数学模型

首先, 假设手指与物体之间为有摩擦的点接触, 建立一个具有 k 个三关节手指的操作系统. $\{C_b\}$, $\{C_o\}$ 分别表示基坐标系和物体坐标系. 系 $\{C_o\}$ 相对于系 $\{C_b\}$ 的位置和姿态分别用坐标 $(x \ y \ z)^T$ 和欧拉角 $(\phi \ \theta \ \psi)^T$ 来表示. 定义 \mathbf{r} 为: $\mathbf{r} = (x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi)^T$. 系 $\{C_o\}$ 相对于系 $\{C_b\}$ 的速度 \mathbf{v}_{bo} 可表示为:

$$\mathbf{v}_{bo} = T\dot{\mathbf{r}} \quad (1)$$

$$\text{式中, } T = \begin{bmatrix} I_3 & T_o \\ 0 & T_r \end{bmatrix}, T_o = \begin{bmatrix} y & -c_\phi z & c_\theta y - s_\phi s_\theta z \\ -x & -s_\phi z & -c_\theta x + c_\phi s_\theta z \\ 0 & c_\phi x + s_\phi y & s_\phi s_\theta x - c_\phi s_\theta y \end{bmatrix}, T_r = \begin{bmatrix} 0 & -s_\phi & c_\phi s_\theta \\ 0 & c_\phi & s_\phi s_\theta \\ 1 & 0 & c_\theta \end{bmatrix}.$$

里, c_ϕ 和 s_ϕ 分别表示 $\cos \phi$ 和 $\sin \phi$, 其它表示类似.

定义 \mathbf{x}_c :

$$\dot{\mathbf{x}}_c = E\mathbf{v}_{bo} \quad (2)$$

$$\text{式中, } E = \begin{bmatrix} R^T & -R^T \hat{X} \\ 0 & R^T \end{bmatrix}, \hat{X} = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}.$$

根据牛顿-欧拉方程, 被操作物体的动力学方程可表示为:

$$I_o E^{-1} \ddot{\mathbf{x}}_c + \mathbf{q}_0 = \mathbf{f} - E^T \mathbf{f}_c \quad (3)$$

式中, $I_o \in R^{6 \times 6}$ 表示物体的惯性矩阵. \mathbf{q}_0 表示重力、哥氏力和离心力. \mathbf{f} 表示多指手对物体的作用力. \mathbf{f}_c 为约束环境对物体的作用力在物体坐标系中的表示.

多指手的动力学方程可表示为:

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} - J^T(G^+ \mathbf{f} + \mathbf{f}_i + \Delta \mathbf{f}) \quad (4)$$

式中, $M(\mathbf{q}) = \text{diag}(M_1, \dots, M_k) \in R^{3k \times 3k}$ 为多指手的惯性矩阵. $\mathbf{g}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = (g_1^T, \dots, g_k^T)^T \in R^{3k}$ 表示重力、哥氏力、离心力和摩擦力项. $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1^T, \dots, \tau_k^T)^T \in R^{3k}$ 为关节的驱动力矩. $J = \text{diag}(J_1, \dots, J_k) \in R^{3k \times 3k}$ 为多指手的雅可比矩阵. $G^+ = G^T(GG^T)^{-1}$, G 为抓取矩阵. \mathbf{f}_i 表示内力项. $\Delta \mathbf{f}$ 为外界干扰.

手指关节角速度与物体速度之间的关系为:

$$J\dot{\mathbf{q}} = G^T E^{-1} \dot{\mathbf{x}}_c \quad (5)$$

由 (3)~(5) 式, 可得到约束环境中多指手操作系统的动态模型:

$$(M_f G^T E^{-1} + G^+ I_o E^{-1}) \ddot{\mathbf{x}}_c + \mathbf{h}_f + G^+ (\mathbf{q}_0 + E^T \mathbf{f}_c) + \mathbf{f}_i + \Delta \mathbf{f} = J^{-T} \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

式中, $M_f = J^{-T} M(\mathbf{q}) J^{-1}$, $\mathbf{h}_f = J^{-T} M(\mathbf{q}) J^{-1} [G^T \frac{dE^{-1}}{dt} \dot{\mathbf{x}}_c - j\dot{\mathbf{q}}] + J^{-T} \mathbf{g}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$.

3 约束环境中多指手的鲁棒操作

设物体在工作空间中有 c 个自由度受到环境的约束. 用 R^C 表示约束子空间. 定义一个正交矩阵 P , 它能将物体坐标系中的任一矢量 $\mathbf{x} \in R^6$ 进行分解, 即 $P\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1^T \ \mathbf{x}_2^T)^T$, 同时要求满足关系: $\mathbf{x}_1 \in R^{6-c}$, $\mathbf{x}_2 \in R^c$. 定义两个选择矩阵 Γ 和 $\bar{\Gamma}$, 其中 $\Gamma = \text{diag}(I_{(6-c) \times (6-c)} \ 0_{c \times c})$, $\bar{\Gamma} = \text{diag}(0 \ I_{c \times c})$. 设 $M_f, \mathbf{h}_f, I_o, \mathbf{q}_o$ 的估计值分别用 $\tilde{M}_f, \tilde{\mathbf{h}}_f, \tilde{I}_o, \tilde{\mathbf{q}}_o$ 表示, 它们之间的关系为 $M_f = \tilde{M}_f + \Delta M_f$, $\mathbf{h}_f = \tilde{\mathbf{h}}_f + \Delta \mathbf{h}_f$, $I_o = \tilde{I}_o + \Delta I_o$, $\mathbf{q}_o = \tilde{\mathbf{q}}_o + \Delta \mathbf{q}_o$. 考虑如下的控制律:

$$J^{-T} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}_l + \mathbf{f}_n + \mathbf{f}_i \quad (7)$$

式中, $\mathbf{f}_l = (\tilde{M}_f G^T E^{-1} + G^+ \tilde{I}_o E^{-1}) P^T \Gamma [\ddot{\mathbf{x}}_{cb}^d + K_v(\dot{\mathbf{x}}_{cb}^d - \dot{\mathbf{x}}_{cb}) + K_p(\mathbf{x}_{cb}^d - \mathbf{x}_{cb})] + \tilde{\mathbf{h}}_f + G^+ \tilde{\mathbf{q}}_o + \mathbf{v}_{R1}$. 这里, \mathbf{x}_{cb}^d 表示经过正交分解后的物体期望运动轨迹, \mathbf{x}_{cb} 表示经过正交分解后的物体实际运动轨迹. K_v, K_p 分别表示物体运动速度和位置误差的反馈增益矩阵. \mathbf{v}_{R1} 项用于补偿由于系统动态模型参数不确定性以及外界干扰造成的对物体运动的影响. $\mathbf{f}_n = G^+ E^T P^T \bar{\Gamma} [\mathbf{f}_{cb}^d + K_d(\dot{\mathbf{f}}_{cb}^d - \dot{\mathbf{f}}_{cb}) + K_g(\mathbf{f}_{cb}^d - \mathbf{f}_{cb}) + K_i \int (\mathbf{f}_{cb}^d - \mathbf{f}_{cb}) dt] + \mathbf{v}_{R2}$, 这里, \mathbf{f}_{cb}^d 表示经过正交分解后的物体与环境之间的期望作用力, \mathbf{f}_{cb} 表示经过正交分解后的物体与环境之间的实际作用力. K_d, K_g, K_i 分别表示力误差信号的微分、比例、积分反馈增益矩阵. \mathbf{v}_{R2} 项用于补偿由于系统模型参数不确定性以及外界干扰造成的对作用力的影响.

根据 (6)、(7) 式, 并假设约束方向上物体加速度约等于 0, 可得:

$$\begin{aligned} & (PE)^{-T} G (\tilde{M}_f G^T E^{-1} + G^+ \tilde{I}_o E^{-1}) P^T \Gamma (\ddot{\mathbf{e}}_x + K_v \dot{\mathbf{e}}_x + K_p \mathbf{e}_x) + \\ & \bar{\Gamma} [(I + K_g) \mathbf{e}_f + K_d \dot{\mathbf{e}}_f + K_i \int \mathbf{e}_f dt] = (PE)^{-T} G (\Delta \mathbf{w} + \Delta \mathbf{f} - \mathbf{v}_R) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{e}_x = \mathbf{x}_{cb}^d - \mathbf{x}_{cb}$, $\mathbf{e}_f = \mathbf{f}_{cb}^d - \mathbf{f}_{cb}$, $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_{R1} + \mathbf{v}_{R2}$, $\Delta \mathbf{w} = (\Delta M_f G^T E^{-1} + G^+ \Delta I_o E^{-1}) P^T \Gamma \ddot{\mathbf{x}}_{cb} + \Delta \mathbf{h}_f + G^+ \Delta \mathbf{q}_o$.

将 (8) 式改写为:

$$\dot{\mathbf{e}} = D\mathbf{e} + U(\Delta \mathbf{w} + \Delta \mathbf{f} - \mathbf{v}_R) \quad (9)$$

式中,

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= ((\mathbf{e}_{x1})^T \ (\int \mathbf{e}_{f2} dt)^T \ (\dot{\mathbf{e}}_{x1})^T \ (\mathbf{e}_{f2})^T)^T, \mathbf{e}_x = (\mathbf{e}_{x1}^T \ \mathbf{e}_{x2}^T)^T, \mathbf{e}_f = (\mathbf{e}_{f1}^T \ \mathbf{e}_{f2}^T)^T \\ K_v &= \text{diag}(K_{v1} \ K_{v2}), K_p = \text{diag}(K_{p1} \ K_{p2}), K_g = \text{diag}(K_{g1} \ K_{g2}) \\ K_d &= \text{diag}(K_{d1} \ K_{d2}), K_i = \text{diag}(K_{i1} \ K_{i2}), (PE)^{-T} G = [P_1^T \ P_2^T]^T \\ D &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ B & A \end{bmatrix}, C = [[(P_1 M_1)^{-1} P_1]^T \ [(K_{d2})^{-1} (P_2 - P_2 M_1 (P_1 M_1)^{-1} P_1)]^T]^T \\ U &= [0^T \ C^T]^T, A = \text{diag}(-K_{v1} \ -(K_{d2})^{-1} (I + K_{g2})) \\ B &= \text{diag}(-K_{p1} \ -(K_{d2})^{-1} K_{i2}), (\tilde{M}_f G^T E^{-1} + G^+ \tilde{I}_o E^{-1}) P^T = [M_1 \ M_2] \end{aligned}$$

引理 1^[10]. 设 $V(\mathbf{x}, t)$ 为连续系统 $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, t)$ 的一个光滑函数, 并且具有以下性质: $\gamma_1 \|\mathbf{x}\|^2 \leq V(\mathbf{x}, t) \leq \gamma_2 \|\mathbf{x}\|^2$, $\dot{V}(\mathbf{x}, t) \leq -\gamma_3 \|\mathbf{x}\|^2 + \varepsilon_1 e^{-\varsigma t}$, $\gamma_i (i = 1, 2, 3)$, ε_1 和 $\varsigma (\varsigma > \gamma_3/\gamma_2)$ 为正常数. 那么系统状态是全局指数收敛的, 收敛率为 $\alpha = \gamma_3/(2\gamma_2)$.

通过选择增益矩阵 K_v, K_p, K_g, K_d, K_i , 可使矩阵 D 为赫尔维茨矩阵. 对于系统 $\dot{\mathbf{e}} = D\mathbf{e}$, 选择一个正定实对称矩阵 Q , 解李雅普诺夫方程: $D^T H + HD = -Q$, 可以得到正定实对称矩阵 H . 考虑系统 (9), 假设模型的不确定性是范数有界的, 即: $\Delta \mathbf{w} \in \mathbf{o} = \{\Delta \mathbf{w} : \|\Delta \mathbf{w}\| \leq$

$\rho(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{x}}_c, \dot{\mathbf{x}}_e)$. 同时, 干扰信号 $\Delta \mathbf{f} \in L_2[0, \infty)$, 这里 $L_2[0, \infty)$ 表示 $[0, \infty)$ 上的平方可积范数空间. 用 $\mathbf{s}(t)$ 表示评价信号, $\mathbf{s}(t) = \text{diag}(\eta_1, \dots, \eta_{12})\mathbf{e}$, $\eta_i (i = 1, \dots, 12)$ 为给定的正常数.

令 $\eta_0 = \max(\eta_1, \dots, \eta_{12})$, 对于任意时刻 $t (t > t_0)$, 定义闭环系统性能指标:

$$\int_{t_0}^t \|\mathbf{s}(\tau)\|^2 d\tau \leq \sigma^2 \int_{t_0}^t \|\Delta \mathbf{f}\|^2 d\tau + (\mathbf{e}(t_0))^T \mathbf{H} \mathbf{e}(t_0) / 2 + \varepsilon_0 \quad (10)$$

其中, $\sigma > 0$ 为衡量干扰抑制性能的正常数, $\varepsilon_0 > 0$ 为充分小值.

当控制量 \mathbf{v}_R 取为:

$$\mathbf{v}_R = \left(\frac{\rho^2}{\|U^T \mathbf{H} \mathbf{e}\|_\rho + \varepsilon e^{-\xi t}} + \frac{1}{4\sigma^2} \right) U^T \mathbf{H} \mathbf{e} \quad (11)$$

其中, ε, ξ 为给定的正常数 $\xi > (\lambda_{\min}(Q) - 2\eta_0^2) / \lambda_{\max}(H)$, $\lambda_{\max}(\bullet)$ 和 $\lambda_{\min}(\bullet)$ 分别表示矩阵 (\bullet) 的最大最小特征值. 则有以下定理.

定理 1. 在满足 $\lambda_{\min}(Q)/2 > \eta_0^2$ 的条件下, 对于系统 (9), 在控制律 (11) 的作用下, 当 $\Delta \mathbf{f} = 0$ 时, 系统误差为全局指数收敛. 当 $\Delta \mathbf{f} \neq 0$ 时, 系统满足指标 (10).

证明. 选择正定函数 $V(\mathbf{e}) = \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{e} / 2$, 若取 $\lambda_1 = \lambda_{\min}(H)/2$, $\lambda_2 = \lambda_{\max}(H)/2$, $\lambda_3 = \lambda_{\min}(Q)/2$, 则有 $\lambda_1 \|\mathbf{e}\|^2 \leq V(\mathbf{e}) \leq \lambda_2 \|\mathbf{e}\|^2$. 同时,

$$\begin{aligned} \dot{V}(\mathbf{e}) + \|\mathbf{s}(t)\|^2 - \sigma^2 \|\Delta \mathbf{f}\|^2 &= -\frac{\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}}{2} + \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{U} (\Delta \mathbf{w} - \mathbf{v}_R) + \frac{\|\mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{U}\|^2}{4\sigma^2} - \left\| \sigma \Delta \mathbf{f} - \frac{U^T \mathbf{H} \mathbf{e}}{2\sigma} \right\|^2 + \\ \|\mathbf{s}(t)\|^2 &\leq -(\lambda_3 - \eta_0^2) \|\mathbf{e}\|^2 + \|\mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{U}\| \rho - \frac{\|U^T \mathbf{H} \mathbf{e}\|^2 \rho^2}{\|U^T \mathbf{H} \mathbf{e}\|_\rho + \varepsilon e^{-\xi t}} \leq -(\lambda_3 - \eta_0^2) \|\mathbf{e}\|^2 + \varepsilon e^{-\xi t} \end{aligned}$$

当 $\Delta \mathbf{f} = \mathbf{0}$ 时, $\dot{V}(\mathbf{e}) \leq -(\lambda_3 - \eta_0^2) \|\mathbf{e}\|^2 + \varepsilon e^{-\xi t}$, 根据前提条件 $\lambda_3 > \eta_0^2$ 和引理 1 可知系统误差是全局指数收敛的.

当 $\Delta \mathbf{f} \neq \mathbf{0}$ 时, $\dot{V}(\mathbf{e}) + \|\mathbf{s}(t)\|^2 \leq \sigma^2 \|\Delta \mathbf{f}\|^2 + \varepsilon e^{-\xi t}$, 两边同时积分可得: $\int_{t_0}^t \|\mathbf{s}(\tau)\|^2 d\tau \leq \sigma^2 \int_{t_0}^t \|\Delta \mathbf{f}\|^2 d\tau + (\mathbf{e}(t_0))^T \mathbf{H} \mathbf{e}(t_0) / 2 + \varepsilon \int_{t_0}^t e^{-\xi \tau} d\tau$. 对于给定的 ε_0 , 可以取充分小的 ε , 使得指标 (10) 得到满足. 证毕.

4 多指手操作系统内力的优化

将系统内力表示成如下的形式:

$$\mathbf{f}_i = \varphi \Omega \mathbf{z} \quad (12)$$

这里, $\Omega \in R^{3k \times l}$, $l = 3k - \text{rank}(G)$, 矩阵 Ω 的列向量构成矩阵 G 的零空间正交基. $\mathbf{z} \in R^l$, $\|\mathbf{z}\| \leq 1$, φ 为正实数. 将矩阵 Ω 按行均匀分解成 k 个 $3 \times l$ 矩阵, 即有: $\Omega = [\Omega_1^T, \dots, \Omega_k^T]^T$. 将矩阵 G^+ 分解成 k 个 $3 \times \text{rank}(G)$ 的矩阵, 即有: $G^+ = [G_1^T, \dots, G_k^T]^T$.

从内力的角度考虑系统的鲁棒性, 很显然在每个接触点处内力方向与物体表面法向量的夹角越小, 多指手操作的鲁棒性越好^[7]. 于是, 内力的优化问题可描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \beta \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \frac{\|(I_3 - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T) \Omega_i \mathbf{z}\|}{\mathbf{n}_i^T \Omega_i \mathbf{z}} \leq \beta \quad i = 1, \dots, k \\ & \|\mathbf{z}\| \leq 1 \\ & \beta \leq \mu \end{aligned}$$

\mathbf{n}_i 表示第 i 个接触点处的单位法向量, μ 为静摩擦系数. 通过离线求解 \mathbf{z}^* , 可以求得优化解 \mathbf{z}^* . 为了确定 (12) 式中的 φ 值, 可采用下面的算法进行实时求解.

$$\|(I_3 - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T) G_i \mathbf{f}\| \leq \mu' \{ \varphi_i [\mathbf{n}_i^T \Omega_i \mathbf{z}^* - \|(I_3 - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T) \Omega_i \mathbf{z}^*\|/\mu] + \mathbf{n}_i^T G_i \mathbf{f} \}, i = 1, \dots, k$$

其中, μ' ($\mu' < \mu$) 为考虑到外界的干扰而选定的一个保守值. 最后, φ 值取为:

$$\varphi = |\max\{\min(\varphi_1), \dots, \min(\varphi_k)\}|$$

5 仿真算例

假设用一个具有 9 个关节的三指手抓取一个球状的物体在约束平面内按期望轨迹运动, 同时对约束平面的法向方向作用力进行控制 (示意图见图 1). 物体的半径为 r_1 , 三个手指与物体接触点的坐标在物体坐标系中的表示分别为: $f_3(\sqrt{3}/2r_1, -0.5r_1, 0)$, $f_1(0, r_1, 0)$, $f_2(-\sqrt{3}/2r_1, -0.5r_1, 0)$. 设物体初始位置为 $x = 0, y = 0$, 期望运动轨迹为 $x = 0.01 \sin(\pi t/10)$, $y = 0.01 \cos(\pi t/10)$, 同时保持物体与约束平面之间作用力为 3N. 仿真中各设计参数分别取为 $K_v = 3I, K_p = 2I, K_g = 0.3I, K_d = 0.01I, K_i = 0.01I, \varepsilon = 0.01, \xi = 1, H = \begin{bmatrix} 16I_3 & 0 & 2I_3 & 0 \\ 0 & 33.5I_3 & 0 & 0.25I_3 \\ 2I_3 & 0 & 4I_3 & 0 \\ 0 & 0.25I_3 & 0 & I_3 \end{bmatrix}$. 在三指手操作系统中, 物体半径、物体质量、手指连杆质量、手指连杆长度分别设计为 0.01m, 0.25kg, 0.15kg, 0.05m. 仿真中参数大约摄动 40%. 离线求得优化解: $\mathbf{z}^* = (0.0087 \quad -0.0087 \quad -0.0123)^T$. 位置跟踪曲线和力误差曲线分别见图 2 和图 3(图 2 中实点表示期望轨迹, 实线表示跟踪轨迹). 可见, 位置和力都能满足期望的要求.

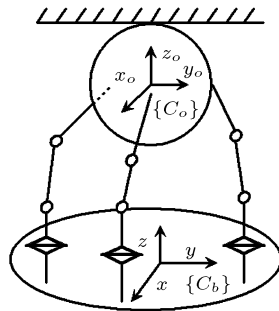


图 1 三指手操作示意图

Fig. 1 Diagram of three-fingered hand manipulation

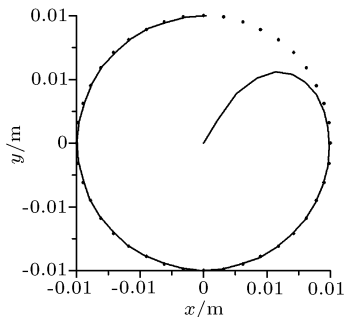


图 2 位置跟踪曲线

Fig. 2 Position tracking

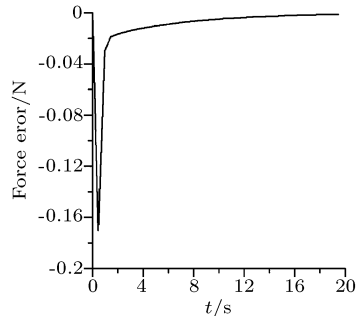


图 3 力误差曲线

Fig. 3 Force error

6 结论

要得到约束环境中多指手操作系统的精确模型一般是很困难的. 本文放宽了这一苛刻的条件, 在考虑其模型的不确定性以及存在外界干扰的情况下, 提出了一种鲁棒控制算法. 算法保证了系统期望的性能要求. 同时, 在力封闭抓取的情况下, 通过对内力进行鲁棒优化, 使得系统干扰抑制性能进一步增强. 算法为实用型多指手控制系统的开发提供了一种新的方法.

References

- 1 Li Jian-Feng, Zhang Yu-Ru, Zhang Qi-Xian. The kinematics and its algorithm for multi-fingered hand manipulation with rolling contacts. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(2): 238~243
- 2 Hu Y R, Goldenberg A A. An adaptive approach to motion and force control of multiple coordinated robot arms. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ, 1989. 1091~1096
- 3 Hu Y R, Goldenberg A A, Zhou C. Motion and force control of cooperated robots during constrained motion tasks. *The International Journal of Robotics Research*, 1995, **14**(4): 351~365
- 4 Lian K Y, Chiu C S, Liu P. Semi-decentralized adaptive fuzzy control for cooperative multirobot systems with H_∞ motion/internal force tracking performance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2002, **32**(3): 269~280
- 5 Hayati S. Hybrid position/force control for multi-arm cooperating robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA: IEEE Press, 1986. 82~89
- 6 Yoshikawa T, Zheng X. Coordinated dynamic hybrid position/force control for multiple robot manipulators handling one constrained object. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, OH: IEEE Press, 1990. 1178~1183
- 7 Aicardi M, Casalino G, Cannata G. Contact force canonical decomposition and the role of internal forces in robust grasp planning problems. *The International Journal of Robotics Research*, 1996, **15**(4): 351~364
- 8 Dawson D M, Qu Z, Lewis F L, Dorsey J F. Robust control for the tracking of robot motion. *International Journal of Control*, 1990, **52**(3): 581~595
- 9 Shen Tie-Long. Introduction to Robot Robust Control. Beijing: Tsinghua University Press, 2000
- 10 Sun Y J, Lien C H, Hsieh J G. Global exponential stabilization for a class of uncertain nonlinear systems with control constraint. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, **43**(5): 674~677
- 11 Murray R M, Li Z, Sastry S S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Boca Raton: CRC Press, 1994

陈刚 博士研究生. 主要研究方向为机器人技术和非线性控制理论.

(CHEN Gang Ph. D. candidate. His research interests include robotics and nonlinear control theory.)

王树青 教授, 博士生导师. 主要研究方向为过程控制, 智能控制以及计算机控制技术.

(WANG Shu-Qing Professor. His research interests include process control, intelligent control, and computer control technology.)