

文章编号: 1001-0920(2004)11-1255-04

基于指尖力传感器的 H II 机器人灵巧手笛卡尔阻抗控制

杨磊¹, 高晓辉¹, 刘宏^{1,2}, 蔡鹤皋¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 德国宇航中心, 慕尼黑)

摘要: 介绍了基于 5 维指尖力/力矩传感器的 H II 机器人灵巧手的笛卡尔阻抗控制。当手指与障碍物接触时, 呈现出 2 阶机械阻抗特性。在阻抗控制算法中, 不需直接计算加速度, 从而避免了因大加速度误差给控制带来的不利因素。结合期望轨迹和实际位置及速度, 产生一个参考轨迹, 手指跟踪此参考轨迹即可自动获得期望阻抗特性。

关键词: 机器人灵巧手; 轨迹跟踪; 笛卡尔阻抗控制

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Cartesian impedance control for H II dexterous robot hand based on fingertip force sensor

YANG Lei¹, GAO Xiao-hui¹, LIU Hong^{1,2}, CAI He-gao¹

(1. Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. German Space Center, Munich, German. Correspondent: YANG Lei, E-mail: jeremyang 2001@yahoo.com.cn)

Abstract: A Cartesian impedance control for the H II dexterous robot hand based on 5-dimension fingertip force/torque sensor is presented. The finger appears as 2 orders mechanical impedance when it contacts with an obstacle. The impedance arithmetic does not need to calculate actual acceleration directly and avoids the disadvantage caused by big acceleration error. In the impedance arithmetic, desired trajectory is combined with actual position and velocity of the finger to produce reference trajectory. By the reference trajectory, the finger can obtain desired impedance automatically.

Key words: dexterous robot hand; tracking; Cartesian impedance control

1 引言

机器人灵巧手手指的底层控制对其实现良好的抓取等操作十分重要。在一些典型的操作中, 希望灵巧手手指在不同的方向呈现出不同的机械阻抗, 如在与物体接触的法线方向“软”, 而在切线方向“硬”。文献[1]介绍了基于指尖力传感器的笛卡尔刚度控制, 刚度控制不能完全控制系统的动力学特性, 特别是系统的阻尼参数; 文献[2]在[3]的基础上介绍了基于关节力矩传感器的阻抗控制策略, 手指的动力学特性由惯量 M 、阻尼 B 、刚度 K 决定, 克服了力/

位混合控制中从自由空间到约束空间的控制切换问题, 使机器人灵巧手的运行更为平稳。在实际机器人灵巧手系统中, 速度和加速度都利用位置信号微分得到。由于传感器本身精度和环境噪声等影响, 使得加速度误差很大, 如果将其直接用于阻抗控制算法中, 可能会导致系统的不稳定, 因此, 许多文献在实际控制中都把 M 置为零, 忽略加速度的影响。

本文采用的阻抗控制算法, 避免了直接由位置信号运算加速度, 但同时将加速度的影响包含在了实际的控制中。

收稿日期: 2003-12-16; 修回日期: 2004-02-18

基金项目: 国家 863 计划资助项目(863-512-9924-03)。

作者简介: 杨磊(1976—), 男, 辽宁营口人, 博士生, 从事机器人灵巧手传感、控制的研究; 刘宏(1966—), 男, 安徽合肥人, 教授, 从事机器人灵巧手等研究。

2 H II 灵巧手运动学

H II 灵巧手的每个手指有 4 个关节, 最后两个关节运动 1-1 耦合, 用一个直线驱动器驱动. 图中坐标系 $\{O_0-X_0Y_0Z_0\}$ 和 $\{O_i-X_iY_iZ_i\}$ 分别为基坐标系和指尖坐标系. 手指的 D-H 参数见表 1, 可得到相邻连杆之间的变换矩阵

$$\begin{aligned}
 {}^0_1T &= \begin{bmatrix} s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^1_2T &= \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^2_3T &= \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^3_4T &= \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 {}^4_iT &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{1}
 \end{aligned}$$

其中: $c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i, s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), c_{ij} =$

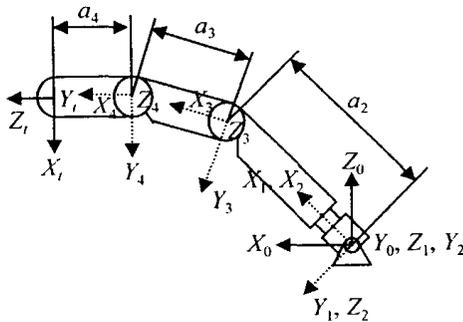


图 1 H II 灵巧手手指坐标系

表 1 H II 灵巧手手指 D-H 参数

	θ	α_{i-1}	a_{i-1}	d
L_1	$\theta_1 - \pi/2$	$-\pi/2$	0	0
L_2	θ_2	$-\pi/2$	0	0
L_3	θ_3	$\pi/2$	a_2	0
L_4	θ_4	0	a_3	0

$\cos(\theta_i + \theta_j)$.

利用式(1), 根据 Craig^[4], 可推导出 H II 灵巧手指的雅可比为

$$J = \begin{bmatrix} c_2(a_2c_{34} + a_3c_4 + a_4) & 0 & a_3c_4 + a_4 & a_4 \\ -s_2(a_3s_3 + a_4s_{34}) & -(a_2 + a_3c_3 + a_4c_{34}) & 0 & 0 \\ c_2(a_2s_{34} + a_3s_4) & 0 & a_3s_4 & 0 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

由于 H II 灵巧手手指第 3, 4 两关节运动耦合, 只采用 1 个驱动器驱动, 将式(2)的 3, 4 两列相加, 可得到速度雅可比为

$$J_v = \begin{bmatrix} c_2(a_2c_{34} + a_3c_4 + 2a_4) & 0 & a_3c_4 + 2a_4 \\ -s_2(a_3s_3 + a_4s_{34}) & -(a_2 + a_3c_3 + a_4c_{34}) & 0 \\ c_2(a_2s_{34} + a_3s_4) & 0 & a_3s_4 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

设 $\det(J_v)$ 表示速度雅可比的行列式, $\det(J_v) = 0$ 的唯一解是 $\theta_i = 0$, 即完全伸直状态是手指的唯一奇异位置. 当 $\theta_i \neq 0$ 时, $\det(J_v) \neq 0$, 此时 J_v^{-1} 存在.

$$J_v^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{J_{33}}{J_{11}J_{33} - J_{31}J_{13}} & 0 & -\frac{J_{13}}{J_{11}J_{33} - J_{31}J_{13}} \\ -\frac{J_{21}J_{33}}{J_{22}(J_{11}J_{33} - J_{31}J_{13})} & \frac{1}{J_{22}} & \frac{J_{21}J_{13}}{J_{22}(J_{11}J_{33} - J_{31}J_{13})} \\ -\frac{J_{31}}{J_{11}J_{33} - J_{31}J_{13}} & 0 & \frac{J_{11}}{J_{11}J_{33} - J_{31}J_{13}} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

式中

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= c_2(a_2c_{34} + a_3c_4 + a_4), \\
 J_{13} &= a_3c_4 + 2a_4, J_{21} = -s_2(a_3s_3 + a_4s_{34}), \\
 J_{22} &= -(a_2 + a_3c_3 + a_4c_{34}), \\
 J_{31} &= c_2(a_2s_{34} + a_3s_4), J_{33} = a_3s_4
 \end{aligned}$$

3 位置控制

滑模控制以其精度高、动态响应快、稳定性好、设计及操作简单和鲁棒特性等优点在控制领域得到广泛应用. 尤其是它对控制对象模型精度要求不高的鲁棒特性使其在难于精确建模的机器人控制领域得到应用. 本文用滑模控制器控制 H II 灵巧手指

关节的位置,取得了良好的效果

设 $X_d = [X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d]$ 为手指指尖的期望向量,其中 $X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d$ 分别为指尖位置、速度和加速度 定义误差向量

$$E(t) = [X_d - X, \dot{X}_d - \dot{X}, \ddot{X}_d - \ddot{X}] = [e_1, e_2, e_3]^T \quad (5)$$

式中 X, \dot{X}, \ddot{X} 分别为指尖的实际位置、速度和加速度

本文的切换函数选为

$$s(E) = C \cdot E(t) \quad (6)$$

其中: $C = [c_1 \ c_2 \ c_3]$, $E(t) = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$, 不失一般性,取 $c_3 = 1$ 采用等效控制的方法求得系统的滑模运动方程为

$$\ddot{e}_1 + c_2 \dot{e}_1 + c_1 e_1 = 0 \quad (7)$$

为了保证滑动模态渐近稳定,将 Routh-Hurwitz 判据应用于式(7)对应的特征方程

$$p^2 + c_2 p + c_1 = 0, \quad (8)$$

得到

$$c_1 > 0, c_2 > 0 \quad (9)$$

为了保证系统无超调,可将处于滑模的系统设计成一个过阻尼临界系统,即

$$c_2^2 = 4c_1 \quad (10)$$

控制函数的形式为

$$u_c = \psi_1 e_1 + \psi_2 e_2 + d \operatorname{sgn}(s) \quad (11)$$

式中: ψ_1 和 ψ_2 分别为 e_1 和 e_2 的反馈增益; d 为正常数,可消除静态误差,提高系统的抗干扰能力;系数 ψ_1, ψ_2, d 的选取和确定,详见文献[5],本文不再赘述

4 笛卡尔阻抗控制

阻抗控制的实质是调节机器人手指末端作用力与位置之间的动力学关系,从而达到使机器人手指获得目标阻抗的目的 目标阻抗模型通常采用二阶线性微分方程描述如下:

$$M_d(\ddot{X}_d - \ddot{X}_t) + B_d(\dot{X}_d - \dot{X}_t) + K_d(X_d - X_t) = F_d \quad (12)$$

式中: M_d, B_d, K_d 分别为目标惯性、目标阻尼和目标刚度,都是 3×3 的对角阵; F_d 为目标阻抗力; $X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d$ 分别为手指尖的期望位置、速度和加速度; $X_t, \dot{X}_t, \ddot{X}_t$ 分别为手指尖的实际位置、速度和加速度 $F_d, X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d, X_t, \dot{X}_t, \ddot{X}_t$ 都是 3×1 的向量

实现阻抗控制的方法有两种:基于位置的阻抗控制^[3,5]和基于力的阻抗控制^[4] 无论是哪种方法,都涉及到实际加速度 \ddot{X}_t 的计算问题 在实际机器人

控制系统中,加速度往往通过实测的位置信号经两次微分运算得到 由于传感器的精度和环境噪声等原因,造成加速度的误差很大,当计算得到的加速度用于实际控制算法时,往往使机器人运动跳跃甚至不稳定 因此,许多文献在实际实验时,目标惯性 M_d 设为零^[2],避开加速度的影响,使目标阻抗由二阶线性模型变为一阶线性模型 本文针对这个问题,采用一种新的控制算法,既避开了直接计算加速度,又实现了二阶模型的阻抗特性

假设手指的位置控制很精确,则指尖力传感器实测力 $F_t = F_d$ 由式(12)得

$$\ddot{X} = \ddot{X}_d - \frac{F_t}{M_d} + \frac{B_d}{M_d}(\dot{X}_d - \dot{X}) + \frac{K_d}{M_d}(X_d - X) \quad (13)$$

手指的参考速度和参考位置分别为

$$\dot{X}_f = \int_0^t \ddot{X} dt, X_f = \int_0^t \dot{X}_f dt \quad (14)$$

将积分得到的参考位置和参考速度作为位置控制器的期望输入 从式(13)和式(14)可看出,该控制算法的参考位置和参考速度由式(12)推导而来,如果手指的位置控制环精确,则手指自然实现式(12)所示的阻抗特性 H II 灵巧手笛卡尔阻抗控制框图如图 2 所示

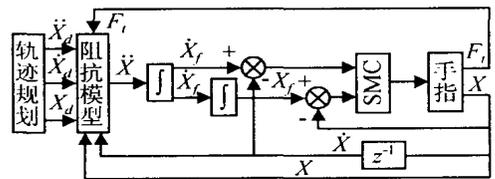


图 2 H II 灵巧手手指笛卡尔阻抗控制框图

5 实验结果分析

为验证控制方法的有效性,建立了基于 TM S320C40 的控制采集板 DS1103 的实验平台 在实验中,采样周期为 0.2 ms 指尖沿着手指基坐标系的 X_0 轴从起始点 a 向终止点 b 作直线运动,在 a 与 b 之间放置障碍物 a 和 b 在基坐标系中的坐标分别为 (60, 0, 80) 和 (90, 0, 80),单位 mm. 如图 3 所示,指尖以 20 mm/s 的速度与障碍物碰撞,结果如图 4 所示 目标阻抗参数分别为: $K_{dii} = 1000 \text{ N/m}$, $B_{dii} = 4.5 \text{ N/m s}$, $M_{dii} = 0.001 \text{ kg}$, $i = x, y, z$. 图 4(a) 为手指在 x 方向上的位置响应曲线,从图中可以看出,在自由空间中,因为指尖力传感器噪声存在,输出不为零, x_d 与 x_f 不相等,因此自由空间中的参考轨迹跟踪也有一定的误差 当手指与障碍物接

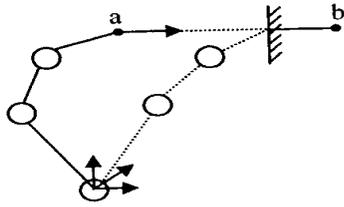


图 3 笛卡尔阻抗控制示意图

触后,指尖力传感器 x 方向的输出力迅速变大,力修正的位置量 Δx 迅速变小, x_f 也随着 Δx 的变小而小于 x_d ,当 $x_r = 90\text{ mm}$ 后保持在这个位置,手指与障碍接触逐渐稳定,满足 $K_{dxx}(x_d - x) = F_x$,此时手指与障碍物的接触力达到最大 $F_x = 9\text{ N}$. 随着时间的推移, x_d 按原轨迹返回,值逐渐减小, x_f 逐渐变小,手指位置跟踪 x_f ,逐渐由约束空间运动转为自由空间的运动

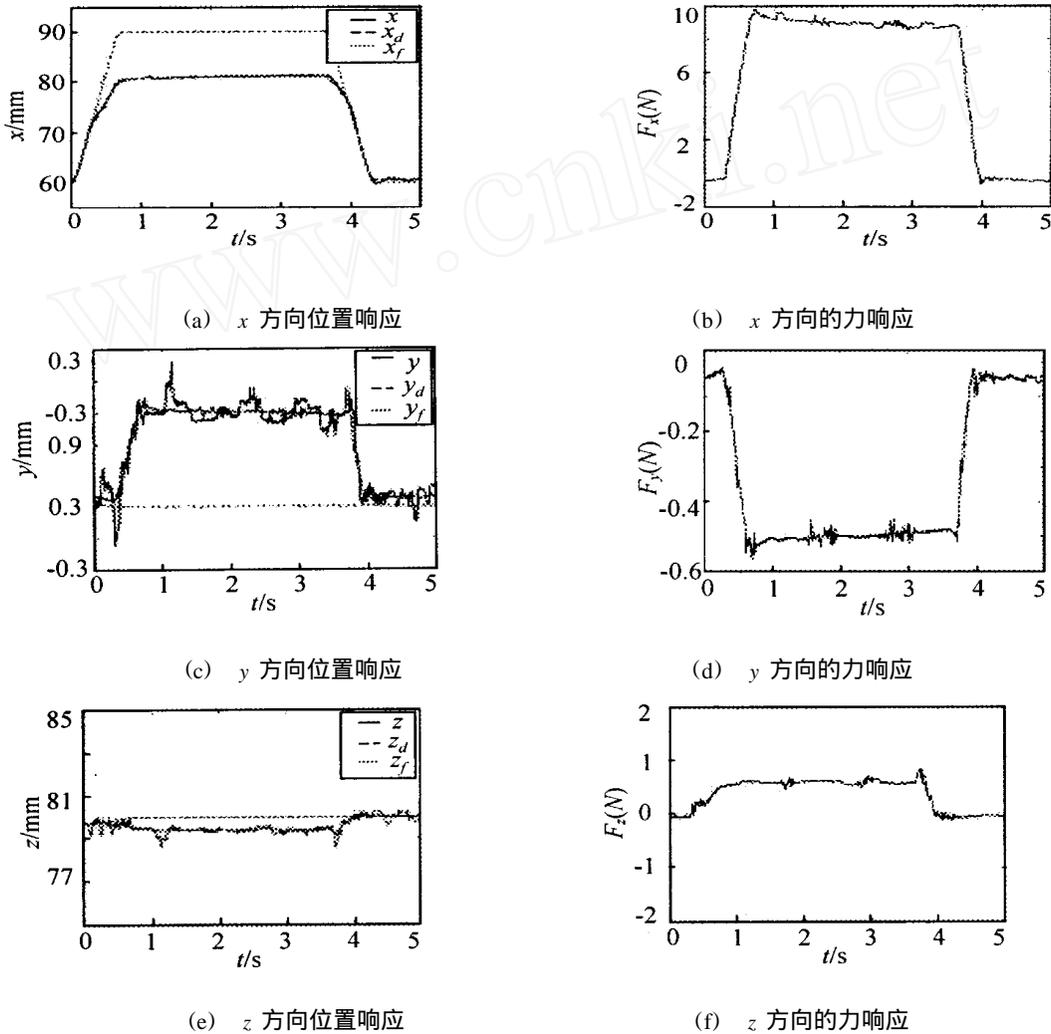


图 4 指尖与障碍碰撞结果曲线

6 结 论

本文介绍了基于 5 维指尖力/力矩传感器的 H II 机器人灵巧手的笛卡尔阻抗控制方法,得到了良好的控制效果,但没有涉及到精确力控制的问题,这将是进一步的研究方向

参考文献(References):

[1] Salisbury J K, Craig J J. Articulated hands: Force control and kinematics issues[J]. *Robot*, 1982, 1(2): 4-17.
 [2] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulator: Part I-III[J]. *Dyn Syst Meas Contr*, 1985, 10

(7): 1-24

[3] Liu H, Hirzinger G. Cartesian impedance control for the DLR hand[J]. *Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 1999, 1(3): 118-123
 [4] Liu H, Butterfass J, Grebenstein M. DLR multisensory articulated hand I and II[A]. *Proc of the 2001 Int Workshop on Bio-Robotics and Teleoperation* [C]. Beijing, 2001. 5-75.
 [5] 姜力. 具有力感知功能的机器人灵巧手指及其控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.