

文章编号: 1001-0920(2009)08-1137-06

基于 DSP/FPGA 的反步法阻抗控制柔性关节机械臂

熊根良¹, 刘伊威¹, 黄剑斌¹, 刘宏^{1,2}, 蒋再男¹, 孙奎¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 德国宇航中心, 韦斯林 82234)

摘要: 针对柔性关节机械臂与环境接触时的柔顺控制问题, 提出一种反步法阻抗控制方法, 并基于李雅普诺夫稳定性理论证明了控制器的稳定性. 该方法是在建立柔性关节机器人模型的基础上, 将李雅普诺夫函数选取与控制器设计相结合的一种回归设计方法. 它从系统的最低阶次微分方程开始, 逐步设计满足要求的虚拟控制, 最终设计出真正的控制器. 轨迹跟踪和阻抗控制实验结果表明, 该方法是有有效而可行的.

关键词: 柔性关节; 阻抗控制; 反步法

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Backstepping impedance control flexible joint manipulators using DSP/FPGA structure

XIONG Gen-liang¹, LIU Yi-wei¹, HUANG Jian-bin¹, LIU Hong^{1,2}, JIANG Zai-nan¹, SUN Kui¹

(1. State Key Laboratory of Robotic Technology and System, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China; 2. German Aerospace Center, Wessling 82234, Germany. Correspondent: XIONG Gen-liang, E-mail: xgl.lijing@yahoo.com.cn)

Abstract: Aiming at the compliant control problem of flexible joint manipulator when it contacts with environment, an impedance control is proposed based on backstepping approach. And the stability of the controller is proven by using Lyapunov stability theory. The approach is on the basis of the model of flexible joint robot manipulator, which combines the choice of a Lyapunov function with the design of controller. The backstepping design technique starts from the differential equation in its smallest order of the system, which designs the satisfied virtual control step by step, then the real controller can be obtained. The experimental results of trajectory tracking and impedance control show the effectiveness and feasibility of the proposed control approach.

Key words: Flexible joint; Impedance control; Backstepping

1 引言

随着科技和工业的日益发展, 人们对机器人性能的要求也越来越高. 有些性能是传统的刚性机器人(工业机器人)无法满足的, 于是柔性关节机器人^[1]便应运而生. 例如空间机器人和灵巧手^[2]的应用, 使得柔性关节机器人成为必需. 近年来, 机器人与人类正在日益分享共同的生活空间(特别是在医疗和家庭自动化领域), 机器人与人以及环境之间的频繁接触, 也必须考虑机器人的柔性问题^[3]. 对于空间机器人、医疗机器人、服务机器人等, 需要在一些未知或危险的环境下工作. 由于操作对象的特殊性,

操作环境时常不能准确建模. 在未知环境中安全操作而不损害自身以及操作对象, 是柔性关节机械臂必须具备的一项功能. 即当机器人在操作过程中与环境接触时, 期望它能表现出一定的柔顺性.

机械臂安全操作在设计上有两种方法: 一种方法是遵循 DLR 轻型机械臂的结构设计, 以减轻机械臂的重量和有效惯性, 并引进一些柔顺元件, 如柔性关节、柔性连杆、机械阻尼调节器等^[4]. 这样, 在机械臂接触环境时能保持一定的柔性, 但不能避免与环境发生碰撞时损坏自身及对象. 另一种方法是实现机械臂的柔顺控制, 即用安装在关节处的力矩传感

收稿日期: 2008-09-10; 修回日期: 2009-01-06.

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA04z228); 教育部“111”创新引智计划项目(B07018); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0423).

作者简介: 熊根良(1978—), 男, 江西高安人, 博士生, 从事机器人位置控制、阻抗控制的研究; 刘宏(1966—), 男, 合肥人, 教授, 博士生导师, 从事机器人灵巧手、空间机器人等研究.

器,快速检测出机器人自身的力状态,并控制它与环境的接触力.笛卡尔阻抗控制是实现柔顺接触控制的有效方法之一.

对于阻抗控制,Hogan^[5]系统地提出了阻抗控制理论;Kazerooni等^[6]将阻抗控制理论应用于实际.Spong等^[7]利用积分流形的概念实现了柔性关节机器人的力控制,并将该方法扩展到柔性关节机器人的阻抗控制.Schaffer等^[8]基于奇异摄动的方法,实现了冗余柔性关节机器人的笛卡尔阻抗控制.Ott等^[9]提出了基于解耦理论的笛卡尔阻抗控制柔性关节机器人,并给出了稳定性分析.其后,Ott等^[10]又基于被动性理论实现了柔性关节机器人的阻抗控制,并证明了控制算法是渐近稳定的.关于柔性关节机器人阻抗控制,已成为机器人控制系统的重要研究课题之一.目前的研究主要是基于奇异摄动、积分流形、被动性理论等方法.

相对于上述方法,反步法既是柔性关节机器人轨迹跟踪常用的方法,又是解决柔性关节机器人阻抗控制问题的完整方案.Nicosia等^[11]提出了只需机器人连杆位置反馈的反步法,用于控制柔性关节机器人.Oh等^[12]提出了基于反步法的柔性关节机器人轨迹跟踪控制器.Lim等^[13]通过积分反步法设计了自适应部分状态反馈控制柔性关节机器人,且不需要测量机器人的速度.Dixon等^[14]利用反步法为柔性关节机器人设计了全局自适应部分状态反馈跟踪控制器.反步法应用于柔性关节机器人阻抗控制,只有文献[15].反步法应用于柔性关节机器人的阻抗控制,还未见文献报道.

本文针对柔性关节机械臂,利用反步法实现柔性关节机械臂的笛卡尔阻抗控制,从而使机械臂在与环境接触时表现出一定的柔顺性.首先提出基于反步法的笛卡尔阻抗控制,在保证系统稳定的同时实现机械臂的柔顺控制;然后简要描述了机械臂系统,包括控制系统的结构;最后通过实验验证了该算法在工程应用上的可行性.

2 基于反步法的笛卡尔阻抗控制

根据Spong^[16]的假设,柔性关节模型可简化为一个刚度系数为 K 的无惯量扭簧.则完整的柔性关节机器人的数学模型可描述为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_{\text{ext}}, \quad (1)$$

$$B\ddot{\theta} + \tau = \tau_m, \quad (2)$$

$$\tau = K(\theta - q). \quad (3)$$

其中: q 和 θ 分别为关节连杆端和电机端的角位置, $M(q)$ 和 B 分别为机器人连杆和电机端的惯量矩阵, K 为关节刚度, τ_m 为控制力矩, τ 是由关节柔性产生的关节力矩, $C(q)$ 和 $g(q)$ 分别为机器人系统的哥

氏力/离心力和重力项.

模型(1)的刚性机器人具有以下基本性质:

1) 惯性矩阵 $M(q)$ 是正定对称且有界的;

2) $\dot{q}^T [M(q) - 2C(q, \dot{q})]\dot{q} = 0$.

类似于状态变换,利用笛卡尔坐标 $x = f(q)$,可得到雅克比矩阵 $J(q) = \partial f(q)/\partial q$,笛卡尔坐标下的速度 $\dot{x} = J(q)\dot{q}$,加速 $\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q}$.在笛卡尔空间,柔性关节机器人模型(1)~(3)可用速度 \dot{x} ,加速度 \ddot{x} ,力矩变量 τ 和 $\dot{\tau}$ 写成如下形式:

$$\Lambda(x)\ddot{x} + \mu(x, \dot{x})\dot{x} + J(q)^{-T}g(q) = J(q)^{-T}(\tau + \tau_{\text{ext}}), \quad (4)$$

$$BK^{-1}\dot{\tau} + \tau = \tau_m - B\ddot{q}. \quad (5)$$

其中矩阵 $\Lambda(x)$ 和 $\mu(x, \dot{x})$ 分别为

$$\Lambda(x) = J(q)^{-T}M(q)J(q)^{-1}, \quad (6)$$

$$\mu(x, \dot{x}) = J(q)^{-T}(C(q, \dot{q}) - M(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q))J(q)^{-1}. \quad (7)$$

需要说明的是,这里研究的只是非冗余和非奇异的情况,因此假设机器人的雅克比矩阵 $J(q)$ 在工作空间是满秩的.

外部力矩 τ_{ext} 和外部力 F_{ext} 通过力雅克比矩阵联系起来,即 $\tau_{\text{ext}} = J(q)^T F_{\text{ext}}$.为了实现期望的阻抗行为,将实际位置 x 与虚拟平衡点位置 x_d 之间的误差定义为 $\tilde{x} = x - x_d$.控制目标是实现 \tilde{x} 与 F_{ext} 之间的动态关系^[15]

$$\Lambda_d \ddot{\tilde{x}} + (\mu(x, \dot{x}) + D_d)\dot{\tilde{x}} + K_d \tilde{x} = F_{\text{ext}}, \quad (8)$$

其中 Λ_d , D_d 和 K_d 分别为期望的惯性、阻尼和刚度,且均为对称正定矩阵.

由经典的阻抗控制^[5]可知,笛卡尔阻抗控制器通过关节力矩 τ 以下列形式实现:

$$\tau = \tau_d = g(q) + J(q)^T(\Lambda(x)\ddot{x}_d + \mu(x, \dot{x})\dot{x}_d - K_d \tilde{x} - D_d \dot{\tilde{x}}). \quad (9)$$

现用反步法逐步设计阻抗控制器.其步骤如下:

第1步 一般而言 $\tau \neq \tau_d$.将力矩 τ 作为虚拟输入向量,并定义力矩误差 $e_1 = \tau - \tau_d$,假设误差 $e_1 = 0$.选择李雅普诺夫函数

$$V_1(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, t) = \frac{1}{2}\dot{\tilde{x}}^T \Lambda(x)\dot{\tilde{x}} + \frac{1}{2}\tilde{x}^T K_d \tilde{x} + \frac{1}{2}e_1^T C_1 e_1, \quad (10)$$

其中 C_1 是对称正定矩阵.式(9)代入式(4),有

$$\Lambda(x)\ddot{\tilde{x}} = J(q)^{-T}(e_1 + \tau_{\text{ext}}) - \mu(x, \dot{x})\dot{\tilde{x}} - D_d \dot{\tilde{x}} - K_d \tilde{x}. \quad (11)$$

将李雅普诺夫函数 $V_1(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, t)$ 对时间微分,有

$$\dot{V}_1(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, t) = \frac{1}{2}\dot{\tilde{x}}^T \dot{\Lambda}(x)\dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T \Lambda(x)\ddot{\tilde{x}} +$$

$$\tilde{x}^T K_d \dot{\tilde{x}} + e_1^T C_1 \dot{e}_1. \quad (12)$$

式(11)代入式(12),得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, t) = & \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T \dot{\Lambda}(x) \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T \Lambda(x) \ddot{\tilde{x}} + \tilde{x}^T K_d \dot{\tilde{x}} + e_1^T C_1 \dot{e}_1 = \\ & \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T \dot{\Lambda}(x) \dot{\tilde{x}} + \tilde{x}^T K_d \dot{\tilde{x}} + e_1^T C_1 \dot{e}_1 + \dot{\tilde{x}}^T (J(q)^{-T} (e_1 + \\ & \tau_{\text{ext}}) - \mu(x, \dot{x}) \dot{\tilde{x}} - D_d \dot{\tilde{x}} - K_d \tilde{x}) = \\ & \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T (\dot{\Lambda}(x) - 2\mu(x, \dot{x})) \dot{\tilde{x}} + \tilde{x}^T K_d \dot{\tilde{x}} - \dot{\tilde{x}}^T K_d \tilde{x} - \\ & \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} (e_1 + \tau_{\text{ext}}) + e_1^T C_1 \dot{e}_1 = \\ & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} e_1 + e_1^T C_1 \dot{e}_1. \end{aligned}$$

利用基本性质 2), 在自由运动 ($\tau_{\text{ext}} = 0$) 时, 若有 $V_1(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, t) < 0$, 则

$$\dot{e}_1 = v_1 = -C_1^{-1} J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}} - C_1^{-1} K_1 e_1, \quad (13)$$

其中 K_1 是正定的控制器增益矩阵.

第 2 步 实际中, $\dot{e}_1 \neq v_1$. 选择 \dot{e}_1 作为虚拟输入, 并定义另一误差变量 $e_2 = \dot{e}_1 - v_1$, 假设误差 $e_2 = 0$. 选择另一李雅普诺夫函数

$$\begin{aligned} V_2(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, e_2, t) = & \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T \Lambda(x) \dot{\tilde{x}} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T K_d \tilde{x} + \\ & \frac{1}{2} e_1^T C_1 e_1 + \frac{1}{2} e_2^T C_2 e_2, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 C_2 是对称正定矩阵. 将李雅普诺夫函数 $V_2(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, e_2, t)$ 对时间微分, 并将式(13)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, e_2, t) = & \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}^T \dot{\Lambda}(x) \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T \Lambda(x) \ddot{\tilde{x}} + \tilde{x}^T K_d \dot{\tilde{x}} + \\ & e_1^T C_1 \dot{e}_1 + e_2^T C_2 \dot{e}_2 = \\ & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} e_1 + \\ & e_1^T C_1 \dot{e}_1 + e_2^T C_2 \dot{e}_2 = \\ & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} e_1 + \\ & e_1^T C_1 (e_2 + v_1^*) + e_2^T C_2 \dot{e}_2 = \\ & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} e_1 + \\ & e_1^T C_1 (e_2 - C_1^{-1} J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}} - C_1^{-1} K_1 e_1) + e_2^T C_2 \dot{e}_2 = \\ & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} - e_1^T K_1 e_1 + \\ & e_1^T C_1 e_2 + e_2^T C_2 \dot{e}_2. \end{aligned} \quad (15)$$

将 $\dot{e}_2 = \dot{e}_1 - v_1 = \dot{\tau} - \ddot{\tau}_d - \dot{v}_1$ 和力矩动力学方程(5)代入式(15), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, e_2, t) = & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} - \\ & e_1^T K_1 e_1 + e_1^T C_1 e_2 + e_2^T C_2 \dot{e}_2 = \\ & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} - e_1^T K_1 e_1 + e_1^T C_1 e_2 + \\ & e_2^T C_2 (K B^{-1} (\tau_m - B \ddot{q} - \tau) - \ddot{\tau}_d - \dot{v}_1). \end{aligned} \quad (16)$$

第 3 步 控制器设计. 通过完整的反步法, 控制器可设计成

$$\begin{aligned} \tau_m = & B \ddot{q} + \tau + B K^{-1} (\ddot{\tau}_d + \dot{v}_1 - \\ & C_2^{-1} C_1 e_1 - C_2^{-1} K_2 e_2), \end{aligned} \quad (17)$$

其中 K_2 是正定矩阵. 式(17)代入式(16), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, e_2, t) = & - \dot{\tilde{x}}^T D_d \dot{\tilde{x}} + \dot{\tilde{x}}^T J(q)^{-T} \tau_{\text{ext}} - e_1^T K_1 e_1 - e_2^T K_2 e_2. \end{aligned} \quad (18)$$

对于自由运动 ($\tau_{\text{ext}} = 0$), $\dot{V}_2(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, e_1, e_2, t)$ 是负半定的, 于是可得出李雅普诺夫函数在平衡点是稳定的. 将 $e_2 = \dot{e}_1 - v_1$ 和 $v_1 = -C_1^{-1} J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}} - C_1^{-1} K_1 e_1$ 代入控制器(17), 可得到简易的表达式

$$\begin{aligned} \tau_m = & B \ddot{q} + \tau + B K^{-1} (\ddot{\tau}_d - (\bar{K}_2 \bar{K}_1 + \\ & C_2^{-1} C_1) e_1 - (\bar{K}_2 + \bar{K}_1) \dot{e}_1) - \\ & B K^{-1} (C_1^{-1} \frac{d}{dt} (J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}}) + \bar{K}_2 C_1^{-1} J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}}), \end{aligned} \quad (19)$$

其中 τ_d 可表示为式(9). 如果定义 $K_P = \bar{K}_2 \bar{K}_1 + C_2^{-1} C_1 - K B^{-1}$, $K_D = \bar{K}_2 + \bar{K}_1$, 并将 $\ddot{q} = M(q)^{-1} (\tau + \tau_{\text{ext}} - C(q, \dot{q}) \dot{q} - g(q))$ 代入控制器(19), 则控制器可改写成

$$\begin{aligned} \tau_m = & \tau_d + B K^{-1} (\ddot{\tau}_d - K_P e_1 - K_D \dot{e}_1) + \\ & \underline{\underline{B M(q)^{-1} (\tau + \tau_{\text{ext}} - C(q, \dot{q}) \dot{q} - g(q))}} - \\ & B K^{-1} (C_1^{-1} \frac{d}{dt} (J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}}) + \bar{K}_2 C_1^{-1} J(q)^{-1} \dot{\tilde{x}}). \end{aligned} \quad (20)$$

将上述自由空间的控制算法应用于受限空间, 如文献[17]所描述的那样, 为使机器人在受到外界施加外力 F_{ext} 时仍能保持稳定, 只需改变受限运动下的运动轨迹, 使 $\dot{x}_d(t) = 0$ 即可.

3 机械臂以及控制系统结构

本文使用的实验平台是卫星在轨自维护机械臂系统, 它由一个四自由度的机械臂和一个末端操作器组成. 4 个关节是模块化关节, 均由无刷直流电机和谐波减速器(减速比 1:160)驱动. 每个关节都装有一个电位计和磁编码器, 用于测量关节和电机的角度; 两个霍尔传感器用于测量相电流; 8 个应变片组成两个全桥, 用来测量关节扭矩. 机械臂系统及坐标系参照文献[18].

为了实现所提出的控制算法, 在控制结构上采用上下位机结构. 每个关节都有一个 FPGA 控制板, 用于下位机电机的控制, 并通过 25 Mbps 的 MLVDS 总线, 与一个基于 PCI 的 DSP/FPGA 板的上位机相连. 机械臂的控制结构如图 1 所示.

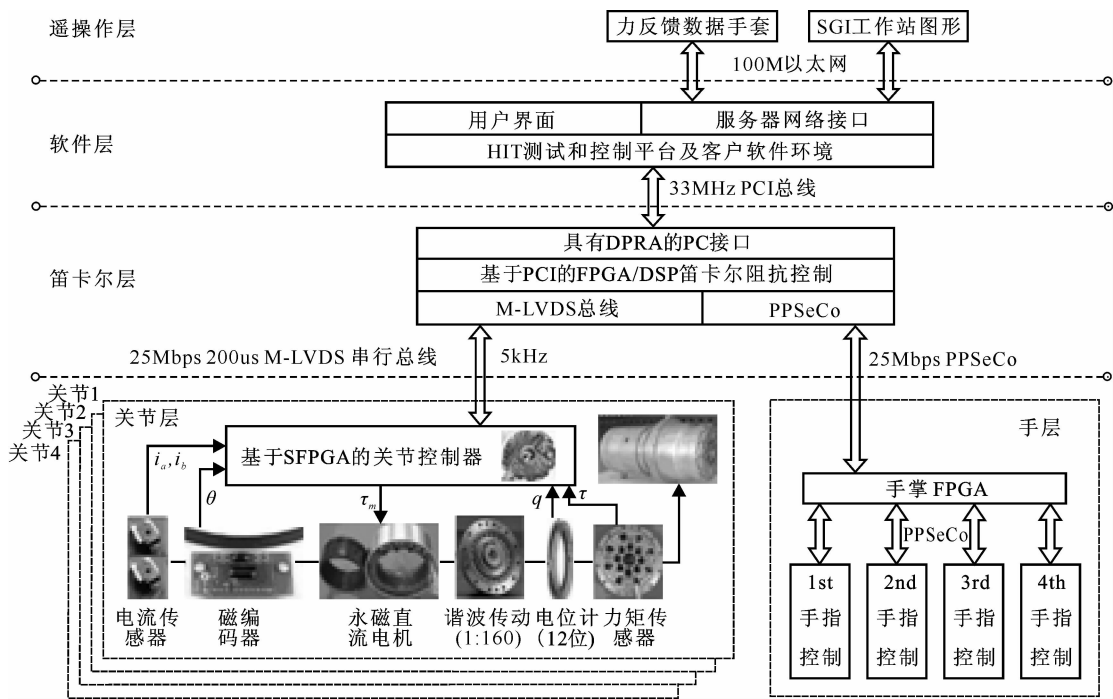


图 1 机械臂的控制结构示意图

上述控制方法集成在机械臂的硬件结构中. 其中:基于反步法的笛卡尔阻抗控制嵌入在上位机具有浮点运算能力的 DSP 中,关节的动态控制和电机的空间矢量控制在关节 FPGA 中实现. M-LVDS 串行总线的通讯周期为 200 us,关节控制层和笛卡尔控制层的控制周期分别为 16.7 和 5 kHz. 机械臂的运动学和动力学参数如表 1 所示.

表 1 机械臂参数

参 数	L_1	L_2	L_3	L_4
a_i/mm	0	530	390	225
$\alpha_i/(\circ)$	-90	0	0	0
$d_i/(\circ)$	0	0	0	0
$\theta_i/(\circ)$	0	0	0	12
Mass/kg	4.229	7.73	6.64	4.02
$B/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.857	1.857	0.15	0.15
$K/(\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad})$	82.175	68.236	68.236	68.236
$K_{P,i}$	33.955	27.354	27.354	27.354
$K_{D,i}$	3.480	2.804	2.257	2.325

4 实验研究

控制器(20)中含有前馈项 $\ddot{\tau}_d$ (单下划线) 以及双下划线项 $B\ddot{q}$. \ddot{q} 在实际应用中一般不能直接测量,因此转而用 q, \dot{q}, τ 和外部力矩 τ_{ext} 来表示,通过测量外部力矩来计算 \ddot{q} . 此外, $\ddot{\tau}_d$ 中含有加速度的微分 $q^{(3)}$. τ_d 是 q 和 \dot{q} (或 x 和 \dot{x}) 的函数,对于关节少(如 1~4 个)的机器人,基于模型方程(1)可计算 \ddot{q} 和 $q^{(3)}$. 即

$$\ddot{q} = M(q)^{-1}(\tau + \tau_{\text{ext}} - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q)),$$

$$q^{(3)} = M(q)^{-1}(\dot{\tau} - \dot{M}(q)\dot{q} + \frac{d}{dt}(\tau_{\text{ext}} - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q))).$$

对于具有 6 个或更多关节的机器人,这种计算将变得非常困难. 另外,也可在机器人上采用加速度传感器或滤波(如卡尔曼滤波)的方法来计算 \ddot{q} 和 $q^{(3)}$. 本文的实验平台是四自由度(4 个关节)机械臂,因此控制器(20)中的高次项 \ddot{q} 和 $q^{(3)}$ 在 DSP 中直接计算.

实验 1 跟踪误差实验,用于验证所提出控制方法的有效性. 在简单 PD 笛卡尔阻抗控制和反步法笛卡尔阻抗控制下,分别让柔性关节机械臂在自由空间运动,机械臂在 X 和 Y 方向跟踪一个正弦曲线,而 Z 方向保持静止. 实验结果如图 2 和图 3 所示. 可以看出,基于简单 PD 笛卡尔阻抗控制方法,机械臂在 X 方向的跟踪误差为 6mm, Y 方向为 3.5mm; 基于反步法阻抗控制方法,机械臂在 X 方向的跟踪误差为 3.5mm, Y 方向为 2.5mm. 实验结果表明,反步法笛卡尔阻抗控制优于简单 PD 笛卡尔阻抗控制.

阻抗控制下的轨迹跟踪精度比纯位置控制下的轨迹跟踪精度低. 这是因为阻抗控制是以牺牲一定的控制精度为代价,尤其是当机械臂关节柔性较大时,跟踪误差较大,甚至无法满足要求. 若将关节柔性定义得很小,则可看成刚性关节. 于是机械臂的轨迹跟踪精度会有提高,但阻抗性能又会降低. 上述

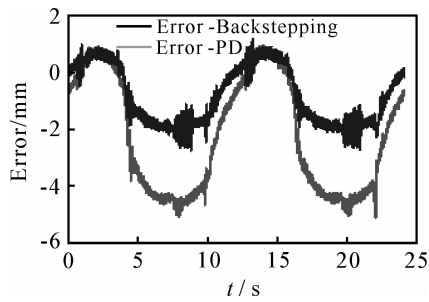


图 2 X 方向的跟踪误差

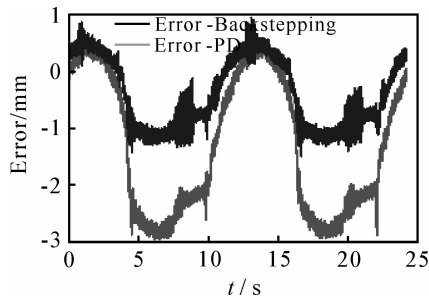


图 3 Y 方向的跟踪误差

实验是在折衷跟踪精度和阻抗性能的前提下进行的,既让机械臂具有较高的跟踪精度,又使其具有一定的阻抗性能。

实验 2 自由空间的笛卡尔阻抗控制,用来验证控制器的性能.将机械臂末端置于设定的位置,抓住机械臂的末端,用力往不同方向推拉到一个新的位置,放手后机械臂在控制器的控制下重新回到初始位置.在阻抗控制过程中,相应的笛卡尔位置和力的变化分别如图 4 和图 5 所示。

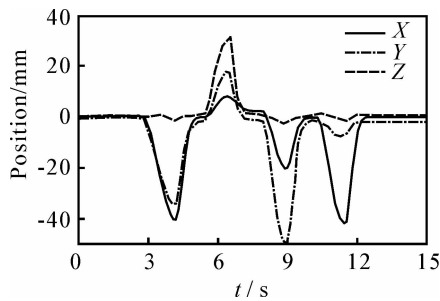


图 4 笛卡尔位置变化

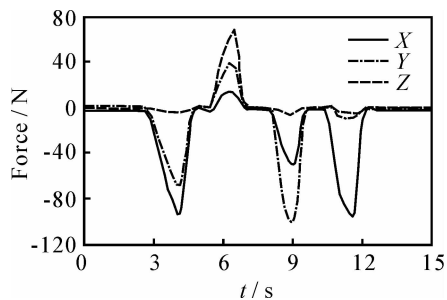


图 5 作用在机械臂上的外力

实验所用的期望刚度和阻尼列于表 2。

期望的阻抗控制刚度可以设置得很小(小于

表 2 实验 2 阻抗控制参数

参 数	X	Y	Z
刚度/(N/m)	2000	2000	500
阻尼/(Ns/m)	682.6	882.6	58.3

20 N/m).这时,机械臂可用很小的力自由地推动(即机械臂变得很软);当去掉外力后,机械臂能稳定地停在最后的位置。

实验 3 约束条件下的笛卡尔阻抗控制,用来验证阻抗控制下机械臂所具有的柔顺行为.实验时,机械臂末端沿着 Z 方向作幅值为 70 mm 的正弦运动.在 Z 轴 23 mm 处放置一块挡板,阻碍机械臂继续向下运动.机械臂的实际运动范围仅有 52 mm.引入忽略惯性项和哥氏力/离心力项的传统阻抗控制^[15],并与基于反步法的阻抗控制进行比较.两种控制方式的阻抗参数都采用表 3 的参数。

表 3 实验 3 阻抗控制参数

参 数	X	Y	Z
刚度/(N/m)	1400	1400	1400
阻尼/(Ns/m)	20	20	20
接触力/N	10	10	10

实验结果如图 6 所示.当机械臂末端离开约束平面时,由于惯性力和哥氏力项未能补偿,采用传统阻抗控制的机械臂出现了较大的位置偏差,并且机械臂在高加速时段出现了一定的抖动现象.这些现象在基于反步法的阻抗控制中并不会发生,因为在控制器(20)中已考虑了惯性项和离心力/哥氏力项。

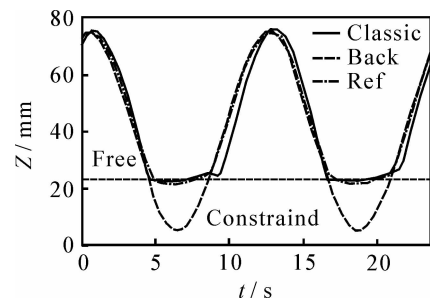


图 6 阻抗控制在约束条件下的位置跟踪

5 结 论

本文利用所提出的反步法阻抗控制柔性关节机械臂的方法,以及基于 DSP/FPGA 的 M-LVDS 串行通讯总线的硬件结构,实现了柔性关节机械臂的阻抗控制.阻抗控制下的位置跟踪比简单 PD 阻抗控制下的位置跟踪表现出更高的跟踪精度.自由空间的阻抗控制实验表明,反步法阻抗控制达到了理论上所描述的笛卡尔阻抗行为.约束条件下的阻抗控制成功地实现了机械臂末端与环境的柔顺接触。

参考文献 (References)

- [1] Ozgoli S. Position control for flexible joint robots in presence of actuator saturation [D]. Tehran: Toosi University of Technology, 2005.
- [2] Liu H, Meusel L, Butterfass J. DLR's multisensory articulated hand — Part II : The parallel torque/position control system [C]. Proc of 1998 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Leuven, 1998; 2081-2086.
- [3] Nakamyr T, Saga N, Nakazawa M, et al. Development of a soft manipulator using a smart flexible joint for safe contact with humans [C]. Proc of 2003 IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, 2003; 441-446.
- [4] Dhujun Lu, Jae H Chung. Collision detection enabled weighted path planning: A wrist and base force/torque sensors approach [C]. Proc of 12th IEEE Int Conf on Advanced Robotics. Seattle, 2005; 165-170.
- [5] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation: Theory (Part 1); Implementation (Part 2); Applications (Part 3) [J]. ASME J of Dynamic System, Measurement and Control, 1985, 107(11): 1-24.
- [6] Kazerooni H, Sheridan T B, Houpt P H. Robust compliant motion for manipulators: The fundamental concepts of compliant motion (Part I); Design method (Part II) [J]. IEEE J of Robotics Automation, 1986, 2 (2): 83-105.
- [7] Mark W Spong. On the force control problem for flexible joint manipulators [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1989, 34(1): 107-111.
- [8] Alin Albu-Schaffer, Christian Ott, Udo Frses, et al. Cartesian impedance control of redundant robots: Recent results with the DLR-light-weight-arms [C]. Proc of 2003 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Taipei, 2003; 3704-3709.
- [9] Christian Ott, Alin Albu-Schaffer, Andreas Kugi. Decoupling based cartesian impedance control of flexible joint robots [C]. Proc of 2003 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Taipei, 2003; 3101-3107.
- [10] Christian Ott, Albu-Schaffer, Andreas Kugi, et al. On the passivity-based impedance control of flexible joint robots [J]. IEEE Trans on Robotics, 2008, 24(2): 416-429.
- [11] Nicosia S, Tomei P. A tracking controller for flexible joint robots using only link position feedback [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(5): 885-890.
- [12] Oh J H, Lee J S. Backstepping control design of flexible joint manipulator using only position measurements [C]. Proc of 37th IEEE Conf on Decision and Control. Tampa, 1998; 931-936.
- [13] Lim S Y, Dawson D M, Hu J. An adaptive link position tracking controller for rigid-link flexible-joint robots without velocity measurements [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1997, 27(3): 412-427.
- [14] Dixon W E, Zergeroglu E, Dawson D M. Global adaptive partial state feedback tracking control of rigid-link flexible-joint robots [J]. Robotica, 2000, 18(3): 325-336.
- [15] Christian Ott. Cartesian impedance control of flexible joint manipulators [D]. Munich: Universitat Des Saarlandes, 2005.
- [16] Mark W Spong. Modeling and control of elastic joint robots [J]. J of Dynamics Systems, Measurement and Control, 1987, 109(5): 310-319.
- [17] 江帆, 冯祖仁, 施仁. 一种机器人自适应阻抗控制算法 [J]. 控制理论与应用, 1993, 10(6): 638-643. (Jiang F, Feng Z R, Shi R. An adaptive impedance control algorithm of robot manipulators [J]. Control Theory and Applications, 1993, 10(6): 638-643.)
- [18] 孙奎, 谢宗武, 刘宏, 等. 梯度投影法多性能准则优化的应用研究 [J]. 控制与决策, 2007, 22(12): 1433-1436. (Sun K, Xie Z W, Liu H, et al. Application of gradient projection method based on multiple performance criteria optimization [J]. Control and Decision, 2007, 22(12): 1433-1436.)