

# 基于加速度传感器反馈的丝杠传动系统 接触力控制\*

邱志成

(华南理工大学机械学院, 广州 510641)

**摘要** 针对丝杠传动系统从自由空间运动过渡到约束空间力控制过程中,接触不同环境刚度时接触力的动态特性是不同的,并且存在冲击、高频振动甚至不稳定,以及稳态力跟踪阶段的扰动引起的不稳定问题,提出用加速度传感器反馈来增加系统力控制的阻尼,抑制在力控制的接触过渡过程和力维持跟踪过程中因为碰撞和外部扰动等原因产生的高频振动,克服单纯速度反馈控制带宽比较窄的局限性,增加系统的稳定性.建立了基于多传感器的实验平台,进行了接触力控制的实验比较研究,实验结果表明该方法是可行的.

**关键词** 丝杠传动, 接触力控制, 加速度反馈, 主动阻尼, 振动控制

## 引言

机器人的接触力控制比位置控制复杂,机器人从自由空间到约束空间因为接触速度不为零,动力学存在不连续性,会导致过大的冲击力,在接触点/面的力控制可能使一个稳定的系统出现振荡(即高频振动)现象,甚至导致系统的不稳定,接触力特性取决于初始接触速度及环境刚度<sup>[1-4]</sup>.

机器人基本的力控制中为了抑制力接触过程以及稳定地力跟踪过程由于外部扰动引起的高频振动,主要采用主动阻尼策略和被动阻尼策略来稳定系统.虽然无源阻尼手段有助于有源阻尼发挥作用,但也会降低机器人的位置控制刚度,影响位置精度. Mills<sup>[5]</sup>提出采用不连续控制策略,实验研究表明,由于在发生接触时控制策略存在跃变,引起闭环系统性质的不连续变化,表现在接触过渡过程阶段出现了严重的振荡.因此,在接触过渡过程实现从自由空间运动状态到力控制状态的平滑、稳定的过渡,避免振荡现象及大的力冲撞;尽量减小力的从接触开始到稳定接触过渡过程时间.由于机器人接触的多样性,及动力学建模过程中不可避免的建模误差或不确定性的影响,在对其进行控制时,必须恰当设计控制器,使系统具有较好的鲁棒性.机器人力控制方法主要有<sup>[6]</sup>:刚度控制、阻抗控制、混合位置/力控制、积分直接力控制等方法,共

同特点是在“过渡过程”中主要是依靠速度及力反馈信息,稳定控制系统,改善力控制性能.但其缺点是速度环的带宽窄,导致以速度反馈作为阻尼时接触力控制的能量消耗慢,系统将震荡.先进的力控制算法<sup>[7]</sup>,如鲁棒力控制和自适应力控制以及力控制学习算法等,由于算法相对复杂,会带来实时计算问题.

近年来,随着传感器技术的发展以及加速度反馈在其它控制领域的成功应用,加速度反馈在机器人控制中的应用逐渐受到了人们的重视. Studen-ny<sup>[10]</sup>将加速度反馈与 LQ 控制及前馈补偿策略相结合,提出了基于加速度反馈的鲁棒控制策略,利用加速度的敏感性和加速度闭环的高反馈增益来抑制扰动和关节耦合. W. L. Xu, J. D. Han<sup>[2-3]</sup>提出加速度反馈控制增加直接驱动手的接触力控制的主动阻尼,抑制接触力过渡过程及稳态力跟踪过程的震荡.本文针对丝杠驱动系统的接触力控制,提出利用较宽频带的加速度传感器反馈控制增加系统的主动阻尼,吸收掉接触冲撞的所有能量,实现由自由运动状态到力控制状态的平滑、稳定的过渡,避免高频振动现象及大的力冲击,尽量减小力的接触过渡过程时间.进行的理论分析和实验研究,结果表明提出方法的可行性.

## 1 丝杠传动系统接触力控制建模与控制分析

本小节对丝杠传动系统接触力控制进行建模,

2007-03-04 收到第1稿,2007-04-27 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金(60404020)、国家自然科学基金空天飞行器重大研究计划(90505014)和广东省自然科学基金(05006499)资助项目

并分析了控制中单纯速度反馈以及引入加速度反馈对系统主动阻尼的提高,利用加速的敏感性和较高的带宽,在较宽的带宽内增加主动阻尼,从而抑制高频振动.本节还给出了加速度在控制算法中如何实现.

对环境特性最完整的描述是所谓的质量、阻尼、刚度模型.在丝杠与环境之间是力传感器,但力传感器的刚度比较大,通常可以忽略其动力学特性;如果要考虑力传感器的影响,可以等效地用机器人与环境之间的弹簧及阻尼器来模拟.基于文献[8]对机械臂中的驱动器、传感器和环境系统的建模思想,建立了丝杠传动系统、传感器和环境的系统模型,为加速度反馈控制分析提供模型.

$$\frac{F_e}{F_a} = \frac{(b_2s + k_2)(m_b s^2 + b_3s + k_3)}{(m_b s^2 + (b_2 + b_3)s + (k_2 + k_3))(m_a s^2 + b_1s + k_1) + (m_b s^2 + b_3s + k_3)(b_2s + k_2)} \quad (1)$$

如果忽略机器人的传动动力学参数  $\{k_1, b_1\}$ 、传感器动力学参数  $\{k_2, b_2\}$  及环境质量(机器人向环境施加力时,不考虑环境的运动),则上述模型变为:

$$\frac{F_e}{F_a} = \frac{b_3s + k_3}{m_a s^2 + b_3s + k_3} \quad (2)$$

由控制理论可知式(2)系统的谐振频率和谐振峰值分别为:  $\omega_p = \frac{1}{m_a} \sqrt{k_3 m_a - b_3^2/2}$ ,  $M_r = \frac{2m_a k_3}{b_3 \sqrt{4m_a k_3 - b_3^2}}$ ; 可见系统的谐振频率和机器人的质量、环境阻尼和环境刚度有关,环境刚度越大、环境阻尼和机器人质量越小,谐振峰值和谐振频率就越大.当环境刚度  $k_3$  较大时,比如接触钢板等,此时环境的阻尼系数  $b_3$  很小,当机器人的质量  $m_a$  在完成同类力控制动作时基本上一致,因此将产生高频振动.如果接触刚度较小的环境,比如泡沫时,引起振动的频率相对较低.分析可知,丝杠传动系统在接触软环境(如泡沫)产生的振动相对容易控制;而对于硬环境(如钢板)产生的振动频率很高,控制起来比较困难,这是与速度闭环控制的有限带宽有关.

如果考虑外部扰动力  $\tau_n$  的影响,则机器人力控制的开环模型式(2)变成:

$$f_e(s) = \frac{b_3s + k_3}{m_a s^2 + b_3s + k_3} (f_a(s) + \tau_n(s)) \quad (3)$$

式中,  $f_a$ 、 $f_e$ 、 $\tau_n$  分别是机器人的输出力矩、与实际作用力及扰动力矩.

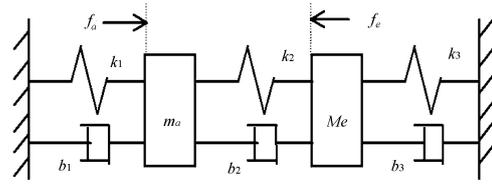


图1 丝杠传动系统/传感器/环境模型

Fig. 1 Ball screw system/sensor/environment model

图1给出了机器人/传感器/环境在一个方向上(一维)的模型.  $m_a$ 、 $m_b$  分别是机器人及环境质量,  $\{k_1, b_1\}$ 、 $\{k_2, b_2\}$ 、 $\{k_3, b_3\}$  分别是机器人、传感器和环境的刚度及阻尼系数.  $f_a$ 、 $f_e$  分别是机器人的输出力及力传感器的测量力,且:  $f_e = k_3 x_3 + b_3 \dot{x}$  则  $f_a$ 、 $f_e$  之间的关系可以表示为式(1)所示.

积分力控制策略自身的鲁棒性,体现在对于高频不确定因素的强滤波作用<sup>[13]</sup>;除此之外,积分策略对于接触力的测量滞后、稳态误差等都具有很强的抑制作用<sup>[14]</sup>.采用积分力控制:

$$f_a(s) = \frac{k_u}{s} (f_d(s) - f_e(s)) \quad (4)$$

式中,  $f_d(S)$  为期望力,  $k_u$  为积分增益.

将(4)代入(3)得到闭环模型为:

$$f_e(s) = \frac{k_u(b_3s + k_3)f_d(s) + s(b_3s + k_3)\tau_n(s)}{m_a s^3 + b_3s^2 + (k_3 + k_u b_3)s + k_u k_3} \quad (5)$$

其特征方程中起阻尼作用的是  $s^2$  的系数,它只与环境阻尼有关.因此,力响应的动态指标,如阶跃响应的上升时间、超调量、调整时间等,将严重依赖环境参数.

根据劳斯判据,得到系统的稳定性条件为:

$$k_u < \frac{k_3 b_3}{m_a k_3 - b_3^2}, \text{ 并且还应该满足: } m_a > \frac{b_3^2}{k_3} \quad (6)$$

但是,积分力控制策略对于环境参数的鲁棒性很差.对于非(弱)弹性环境,积分控制可以获得很好的接触过渡过程;但对于强弹性环境,由于力的建立过程相对比较长,如果积分算子出现饱和,那么将引发严重的振荡,甚至造成系统不稳定<sup>[13]</sup>.当存在电机端速度反馈时,

$$f_a(s) = \frac{k_u}{s} (f_d(s) - f_e(s)) - \frac{K_v s X(s)}{N}$$

$$f_e(s) = (b_3s + k_3)X(s), \text{ 有 } X(s) = \frac{f_e(s)}{(b_3s + k_3)},$$

则:

$$f_e(s) = \frac{k_u(b_3s + k_3)f_d(s) + s(b_3s + k_3)\tau_n(s)}{m_a s^3 + (b_3 + K_v/N)s^2 + (k_3 + k_u b_3)s + k_u k_3} \quad (7)$$

从(7)可知,存在速度反馈时起阻尼作用的是  $s^2$  的系数要比不存在运动状态增加了:  $K_v/N$ . 可知,速度反馈增加了丝杠传动系统力控制的阻尼.

采用速度反馈主动阻尼控制策略可以有效抑制柔软接触过程中出现的低频振荡;但对于刚性接触,由于振荡的振幅小、频率高,这种方法几乎无能为力. 这是因为: a) 这种小振幅、高频率的振荡将远远超出速度反馈的响应频带; b) 为了克服速度传感器测量噪声以及系统高频不确定因素而必须采取的低通滤波和/或增益频率加权算法将限制速度反馈的响应频带; c) 如果速度反馈是来自位置编码器的微分,那么其带宽除了上述限制外,还有位置传感器的分辨率限制,当振幅小于一个码位时,速度反馈就处于开环状态. 这表明了速度主动阻尼控制策略的适用局限.

为了克服该缺点,本文提出的采用加速度反馈和电机端速度反馈时,并且加速度环位于速度环内,利用加速度的带宽较宽,可以克服速度阻尼的局限,加速度传感器信号经过一阶低通滤波处理,可以滤掉加速度传感器信号检测到的高频噪声,便于闭环控制系统的稳定性.

$$f_a(s) = \frac{k_u}{s}(f_d(s) - f_e(s)) - \frac{K_a \cdot a}{(s+a)}(s^2 X(s) + \frac{K_v s X(s)}{N}) \quad (8)$$

得闭环模型:

$$f_e(s) = \frac{k_u(b_3s^2 + (k_3 + b_3a)s + k_3a)f_d(s) + s(s+a)(b_3s + k_3)\tau_n(s)}{B_1s^4 + B_2s^3 + B_3s^2 + B_4s + B_5} \quad (9)$$

其中:

$$B_1 = m_a, \quad B_2 = b_3 + m_a a + k_u a,$$

$$B_3 = (k_u + a)b_3 + k_3 + k_u a \frac{K_v}{N},$$

$$B_4 = k_3 a + k_u k_3 + k_u b_3 a, \quad B_5 = k_u k_3 a.$$

从式(9)可知,如果力控制增益和加速度反馈控制增益足够大时,丝杠传动系统存在加速度反馈时起阻尼作用的  $s^2$  系数要比存在速度反馈时增加很多,这样加速度反馈可以大大增加了丝杠传动系统力控制的阻尼. 从上述的分析可知,在接触力

控制策略中引入速度反馈来消耗初始动能是增强力控制对环境参数变化鲁棒性的有效手段,但当接触大刚度环境时,产生高频率振动,速度环的有限带宽很难对这种振动做出反应;加速度环的带宽远大于速度环,在接触力控制中引入加速度反馈,可以弥补单纯依靠速度反馈的不足,对高频振动起到抑制作用.

## 2 实验研究

本节详细的介绍了建立的丝杠传动系统的组成各部件,进行了丝杠传动系统的接触力控制实验研究,结果表明加速度反馈控制能够有效的增加了系统的主动阻尼,增强控制系统的鲁棒性.

### 2.1 丝杠传动实验系统建立

图2为建立的丝杠传动系统实验平台实物照片,该平台集成加速度传感器、力传感器、线性光栅尺和装有码盘的交流伺服电机驱动丝杠导轨副. 该实验台采用德国 METRONIX 公司生产的交流伺服电机,型号: SBL4-0200,电机本身集成作为转子位置传感器的旋转变压器,并经过驱动器后转化为 4096 codes/round 编码器输出. 电机的技术参数如下:额定转矩 1.9 N·m,额定转速 3000 round/min,最大转矩 8 N·m.

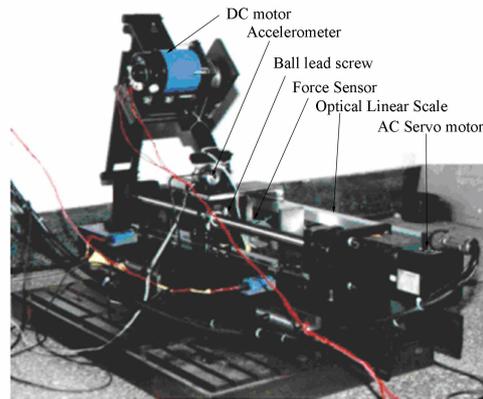


图2 丝杠传动系统的实验台照片

Fig. 2 Photograph of the ball screw experimental set-up

加速度传感器采用航天工业总公司 702 所生产的 5511B 型伺服加速度计,技术指标为:量程  $0 \sim \pm 3g$  (这里  $g$  为重力加速度),分辨率为  $1 \times 10^{-5} g$ ,响应频带宽为  $0 \sim 200Hz$ ,供电电压为  $\pm 15V$  直流电压. 力传感器为采用中国科学院合肥智能所研制生产的力传感器(一维),技术指标为:量程  $0 \sim \pm 10 kg$ ,重复性 0.05% FS,非线性 0.1% FS,供电

电压 ±15V 直流电压. 线性光栅位移传感器由中国科学院长春光机所生产;

计算机控制系统, A/D 采集卡和 D/A 输出控制卡组成开放结构伺服控制单元, 基于一台 Pentium PC 工控计算机建立. 接触力控制功能; 控制结构、策略、参数可设定. 动态信号分析仪型号为 HP3562A, 自身配有绘图仪, 可以将测量得到的频率响应特性曲线绘制.

丝杠和导轨为汉江机床厂生产, 导程为 4mm, 丝杠型号为 HC<sub>1</sub>B - 25 × 4 - 2.5 - 4R, 导轨型号为: HJG - D 25 AA 1 H<sub>1</sub> 1 × 640 E. 行程开关为正泰公司生产, 型号为: ME8104.

### 2.2 接触力控制实验研究

机器人的接触力控制远比位置控制复杂, 比如采样频率低、连杆柔性大以及驱动电机时间常数大等因素在位置控制中的影响并不象力控制中那样明显, 它们是制约加速度反馈应用效果的主要因素. 进行丝杠传动系统的接触力控制实验研究时采用如图 3 所示的力控制方框图, 这里结合了 Mills<sup>[9]</sup> 提出采用不连续控制策略, 并引入本文提出的控制方法. 丝杠滑块在自由空间按某一设定的恒定速度运动, 当运动到与环境接触时, 通过检测到力传感器的输出大于事先设定的阈值判断出机器人和环境发生接触, 就将系统由自由空间运动阶段切换到约束空间的力控制阶段, 此时的期望速度设定为 0.

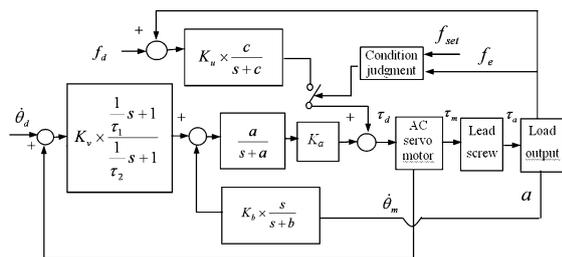


图3 带有主动阻尼的力控制方框图

Fig. 3 Control block of active damping force control

丝杠系统的实际速度和加速度作为系统的主动阻尼加入到系统的控制中, 用来确保力控制在接触过渡过程中超调小, 调整时间短, 实现平滑稳定的过渡; 在稳态力跟踪阶段, 确保对扰动不敏感, 用来避免因突发扰动使机械手与环境脱离接触, 并再次接触时产生高频振动. 在力控制策略采用一阶惯性环节取代积分力控制策略以避免由于加速度、速

度传感器零点漂移造成积分的饱和. 保证丝杠传动系统实现平稳的力接触过渡过程和稳态力跟踪控制. 实验过程中分别进行了仅有速度环作为主动阻尼和速度环结合加速度反馈作为主动阻尼的力控制研究.

在对丝杠传动系统进行接触力控制之前, 先用动态信号分析仪 3562A 测量了有主动阻尼时接触不同环境时丝杠传动系统的力控制闭环带宽. 图 4, 图 5 分别接触泡沫和钢板时的力控制闭环频率响应特性. 从幅频特性中读取 -3dB 时的频率可知, 接触泡沫的带宽为 4.4 Hz, 接触钢板的带宽为 6.1Hz. 可见, 带有主动阻尼的系统闭环力控制带宽较窄, 在实际应用的力控制场合, 比如机器人手爪抓取物体时, 基本上需要恒力控制, 不需要频率较高的力跟踪, 故不需要力控制的带宽很宽, 恰恰相反, 需要对高频的扰动不做出快速反应(不敏感), 避免突发扰动时机器人和环境脱离接触, 闭环控制输出量很大, 引起再次接触后的冲击高频振动.

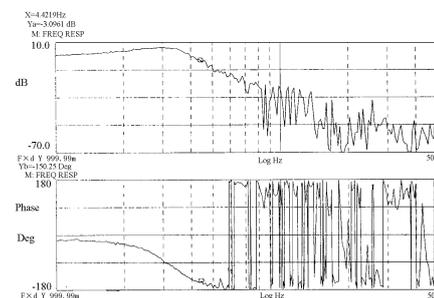


图4 接触泡沫时力闭环频率特性

Fig. 4 Dynamic characteristics of contacting foam

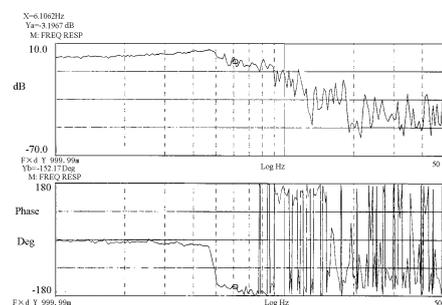


图5 接触钢板时力闭环频率特性

Fig. 5 Dynamic characteristics of contacting steel

图 6 与图 7 分别为丝杠传动系统接触软(泡沫)、刚性(钢板)环境时, 有无加速度反馈系统的力控制实验结果, 每个实验结果中的三幅图分别表示为期望的跟踪力、实际控制的接触力、力控制跟踪偏差. 这里力控制增益一致, 使得控制算法的刚

度很高.从两种情况的比较来看,相同的力控制策略,接触不同的环境,力的接触过渡过程不一样,力的接触过程对环境接触刚度具有很强的依赖性.图6为丝杠驱动系统接触软(泡沫)环境时,有无加速度控制策略系统的力控制的实验结果,其中每项实验中有3条实验曲线,分别为期望的接触力,实际的接触力和接触力跟中偏差.这里的期望接触力为10牛顿,纵坐标为力传感器检测到的信号转换为力的大小,横坐标为时间,共8秒钟.力控制的过程是系统由自由空间过渡到约束空间,即由最开始时力传感器和环境没有接触,滑块以一恒定的速度前进,当接触时,力传感器信号检测到和环境接触时,切换为力控制,控制策略如方框图3所示.

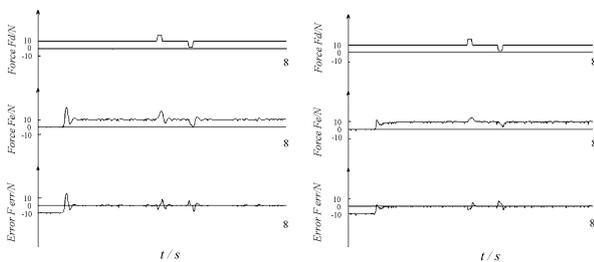


图6 接触泡沫时力控制

Fig. 6 Force control of contacting foam

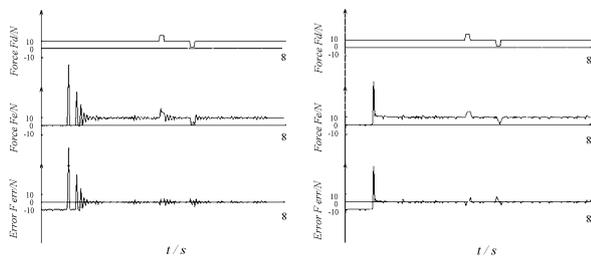


图7 接触钢板时力控制

Fig. 7 Force control of contacting steel

当仅存在速度反馈作为系统的主动阻尼时,可以使系统的力控制稳定.接触软环境时,由于振动的频率较低,速度阻尼对低频振动有强抑制作用,并且通过速度反馈控制策略消耗初始接触能量.但接触刚性环境(钢板)时,如图7所示,由于刚度大,接触时因环境变形而产生的位移及速度非常小,速度阻尼的抑制作用相对降低,导致系统的超调很大.并且在过渡过程期间系统与环境脱离接触,力闭环使其恢复接触,经过频率较高几次振动后系统稳定.环境的刚度越大,振动频率越高,速度反馈控制的抑制作用越小,这主要是因为速度环的带宽窄,远低于此时振动的频率.

当存在加速度反馈结合速度反馈控制作为接触力控制中的主动阻尼时,系统的接触过渡过程中超调相对小,调整时间相对短.在接触刚性环境时,振动被完全抑制.这表明,宽响应频带的加速度反馈控制可以增强丝杠传动系统的接触力控制过程的阻尼,增强丝杠系统接触力对环境参数变化的鲁棒性.当系统实现了从自由运动状态到约束状态的稳定过渡之后,便进入稳态力控制阶段,在稳态力控制中,在期望力中叠加150ms脉冲模拟突发扰动,比较有无加速度反馈控制对突发扰动的响应实验结果可知,仅速度阻尼接触刚性环境时会导致接触点的振动,有加速度控制可以抑制振动.这表明加速度反馈控制在稳态力跟踪时可以避免突发扰动使其与环境脱离接触.

### 3 结论

本文对丝杠传动系统从自由运动状态到接触力控制的过渡过程以及稳定的力跟踪的鲁棒控制进行了研究,丝杠传动系统的接触力响应对于接触的环境刚度具有较大的依赖性.针对丝杠传动系统的接触力及力跟踪过程外部扰动及环境刚度等因素导致系统的高频振动,指出速度反馈的低响应频带影响接触力控制时阻尼的作用,提出利用加速度环的宽频带来增加系统阻尼的带宽,实现力控制时接触过渡过程平滑稳定的控制,抑制高频振动.由于加速度环的频带宽,基于加速度传感器的反馈控制成功的应用到丝杠传动系统的接触力控制中增加阻尼,在接触力控制中吸收动能使系统实现平滑稳定的过渡,在稳态力跟踪控制中对扰动的弱敏感性.通过理论分析和实验研究结果表明,加速度反馈明显的增大了力控制阻尼的响应频带,增强力控制对环境参数变化及扰动的鲁棒性.

### 参 考 文 献

- 1 殷跃红,尉忠信,黄晓曦.智能机器人系统力觉及力控制技术.北京:国防工业出版社.2001(Yin Yuehong, Zhu Jianying, Wei Zhongxin. Force sensing and force control technique for intelligent robot. Beijing: National Defence Industry Press. 2001(in Chinese))
- 2 韩建达,成海,谈大龙.一种基于运动状态反馈的机器人接触力控制.机器人,1997,19(6):412~419(Han Jian-

- da, Cheng Hai, Tan Dalong. Robot transition control based on states feedback. *Robot*, 1997, 19 (6): 412 ~ 419 (in Chinese) )
- 3 W. L. Xu, J. D. Han, S. K. Tso, and Y. C. Wang. Contact transition control via joint acceleration feedback. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(1): 150 ~ 158
- 4 邱志成, 谈大龙. 基于加速度反馈的柔性关节机械臂接触力控制研究. *机械工程学报*, 2002, 38(10): 37 ~ 41 (Qiu Zhicheng, Tan Dalong. Study on acceleration sensor based contact force control for flexible joint manipulator. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(10): 37 ~ 41 (in Chinese) )
- 5 Mills, J. K. and Lokhorst, D. M. Experimental results in manipulator contact task control. *IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 1991: 1645 ~ 1651
- 6 李杰, 韦庆, 常文森. 机器人控制中应用加速度反馈的几个问题讨论. *自动化学报*, 2001, 27(3): 318 ~ 325 (Li Jie, Wei Qing, Chang WenSen. Discussion on several problems using acceleration feedback in robot controller. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 318 ~ 325 (in Chinese) )
- 7 Ganwen Zeng and Ahmad Hemami. An overview of robot force control. *Robotica*, 1997, 15: 473 ~ 482
- 8 Volpe, R. and Khosla, P. A theoretical and experimental investigation of impact control for manipulators. *International Journal of Robotic Research*, 1993, 12(4): 351 ~ 365
- 9 Tan Dalong, Qiu Zhicheng. Study on sensor - based control method for harmonic drive system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 23(3): 234 ~ 240
- 10 Studenny J, Belanger P R. Robot manipulator control by acceleration feedback: stability, design and performance issues. *IEEE Conference on Decision and Control*, 1986: 80 ~ 85

## ACCELERATION SENSOR FEEDBACK BASED CONTACT FORCE CONTROL FOR BALL SCREW TRANSMISSION SYSTEM\*

Qiu Zhicheng

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract** When ball screw transmission system contacts with different environment stiffness, the dynamic characteristics of the contact force are different. In addition, when the end effectors move from free space to constraint space stable force tracking process, there occur impact, vibration and even instability due to external disturbance. Acceleration sensor based feedback control method was proposed for contacting force control. By using this method, the damping can be enhanced and the oscillations can be damped out. And the narrow bandwidth weakness of speed feedback was overcome. The experimental setup was built up and the experimental researches were conducted. The experimental results prove the effectiveness of the presented method.

**Key words** ball screw transmission, contact force control, acceleration feedback, active damping, vibration control