

基于加速度反馈的机械手位置控制*

李杰 韦庆 常文森

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 本文首先分析了影响机器人位置控制性能的几个因素。然后针对这些不利因素分析了加速度正反馈和负反馈对它们的不同作用,提出了一种用综合加速度反馈来提高机器人位置控制性能的控制方法。该方法能较大程度地改善机器人阻尼不足的现象,是实现机器人高速高精度控制的一条有效途径。机械手上的实验结果验证了本方法的有效性。

关键词 加速度反馈, 机器人控制, 位置控制

分类号 TP242.6

The Study of Manipulators Position Control Based on Acceleration Feedback

LI Jie WEI Qing CHANG Wensen

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract This paper analyses several factors that cut down the control performance of robot position control at first. Then it investigates the different effect of acceleration positive and negative feedback on these disadvantageous factors, and presents a method of integration acceleration feedback to improve the control performance of robot position. This method, which can supply the lack of the damping of the system prodigiously, is the effective approach to the high speed and high precision position control of the robot. And the effectiveness of this approach is verified by both simulation and experiments on the PUMA 560 manipulator.

Key words acceleration feedback, robot control, position control

高速高精度的位置跟踪能力是拓宽机器人的应用范围,提高工作效率的有力保证。目前的大多数机器人控制器是建立在位置和速度反馈基础上的,速度信号由增量码盘信号的差分获得,信噪比不高,致使机器人在高速和大负载时出现超调抖动和爬行现象。加速度反馈是改善机器人控制性能的一种方法。20世纪80年代初 Studenny^[1]等人首先提出用高的加速度反馈增益实现机器人的控制解耦,但只进行了理论推导工作,没有有效的实验结论报导;文献[2]研究了基于加速度计获得阻尼和关节解耦的方法^[2],对两关节直接驱动机械手的控制实验取得了较好的效果,但加速度环是连续。对于减速驱动、数字控制的机器人系统中采用加速度反馈的问题,国内有人做过这方面的研究,但没有取得什么效果。

1 传统算法存在的问题

机械手操作空间力/位混合控制动力学方程为

$$H(\theta)\ddot{X} + \mu(\theta, \dot{\theta}) + \rho(\theta) = F_c + F_a + F_e \quad (1)$$

其中各符号含义详见文[4]。位置控制采用PD控制律,则主动控制项为:

$$F_a = \dot{H}(\theta) \left(\dot{X}_d + K_d \delta X + K_p \delta X \right) \quad (2)$$

假设补偿与惯量矩阵计算准确,则机械手操作空间位置控制闭环方程为:

$$\delta \ddot{X} + K_d \delta \dot{X} + K_p \delta X = 0 \quad (3)$$

其中位置误差. $\delta X = X_d - X$ 为保证系统有一定的刚度, k_p 不能取得太小;再按阻尼比 $\xi = 1$ 选择速

* 国家自然科学基金和863基础研究经费资助项目
1998年10月30日收稿
第一作者:李杰,男,1971年生,博士生

度反馈增益, 有 $K_d = 2 K_p$ 。此时系统可以无超调、无静差地实现位置跟踪。

但是存在两个问题: 首先, 在(2)式的主动控制项 F_a 中含有速度反馈项 X 。该项是由位置信号的差分而得, 即 $X(k) = [X(k) - X(k-1)] / T_s$, 其中, T_s 为采样周期。在实际运行中, 由于差分使噪声放大, 所以获得的速度信号信噪比不高。这样, 当 K_d 加大到一定程度后, 已起不到增加阻尼的作用, 也就是说 K_d 达到理想的 $2 K_p$ 是做不到的。系统处于欠阻尼状态使得它有较大的超调抖动现象。

其次, 由于测量和量化误差等原因, 使得补偿与惯量矩阵计算不准确。此时系统在某方向的静态误差为: $e_{ss} = e_{com} / k_p \tilde{h}$, 中 e_{com} 包括机械手在该方向上的补偿误差和摩擦等未建模因素, k_p 和 \tilde{h} 分别为该方向的位置反馈增益和估计惯性质量。从而看出, k_p 的增加能减小静态误差。而且从动态性能和系统刚度来讲, 大的 k_p 也是必须的。但是, 由于阻尼有限, k_p 的增加会使系统稳定性变差。

由于上述两个原因, 机器人在负载较大和速度较高时的位置控制性能很差, 限制了机器人的应用范围。

2 加速度反馈分析

2.1 机器人位置控制模型

考虑到机器人驱动单元的延迟, 将机器人在操作空间某方向的位置控制建模为图1所示的三阶系统^[5]。其中 m 为机械手的等效质量, t 为电机的时间常数, b 为阻尼系数, f 为控制力。

如前所述, 采用 PD 控制律, 即取

$$f = \tilde{m} \left(x_d + k_d \delta x + k_p \delta x \right) \tag{4}$$

\tilde{m} 为 m 的近似, 则系统的闭环传递函数为:

$$G_{pd}(s) = \frac{\tilde{m} \left(s^2 + k_d s + k_p \right)}{m t s^3 + \left(t b + m \right) s^2 + \left(b + k_d \tilde{m} \right) s + k_p \tilde{m}} \tag{5}$$

对各参数取适当的值, 得到波特图如图2中的虚线所示。

在控制项 f 中引入加速度反馈, 令 $G_a(s)$ 为加速度反馈环上的增益传递函数。则含有加速度反馈环的系统传递函数为:

$$G_{pda}(s) = \frac{\tilde{m} \left(k_d s + k_p \right)}{m t s^3 + \left(t b + m + G_a(s) \right) s^2 + \left(b + k_d \tilde{m} \right) s + k_p \tilde{m}} \tag{6}$$

上式中参考加速度项 x_d 取为了0, 因为通常很多轨迹无法求出指令加速度(或加速度项恒为0)。

2.2 频率加权加速度反馈

我们先看一下原始加速度负反馈的情况, 即取:

$$G_a(s) = k_v \tag{7}$$

为常数。将(7)式中 k_v 取一适当常数代入(6), 做出它的波特图如图2实线所示。对比两曲线可以看到, 直接加速度负反馈的引入使系统的幅值裕度增加了, 但频带变窄了。这对于抑制高频干扰有利, 却使动态品质变差。而且实际中, 由于机械手谐振和连杆柔性的影响, 加速度负反馈的增益稍大就会使系统发生严重震荡。因此直接加速度负反馈对改善系统性能作用不大。

针对加速度反馈对系统谐振敏感的特点, Studenny^[11]等提出了加速度反馈增益应是系统频率加权的思想, 即使 k_v 具有 $k_v(j\omega)$ 的形式。这样能在一定程度上减小谐振对加速度反馈的影响。但是他对位置、速度和加速度三项反馈都进行了频率加权, 这不但引入了不必要的相位滞后, 而且压缩了系统带宽。如果只对加速度反馈项进行频率加权, 作出的波特图与图2是相似的, 也没有改善系统的动态性能。

2.3 近似积分加速度反馈

对于(5)式的传递函数, 提高速度反馈增益能在不减小系统带宽的情况下提高系统的相位裕度, 减小系统谐振峰。而速度是加速度的积分, 对加速度积分之后应该具有与速度反馈同样的效果, 直观想象和仿真结果都能证明这一点。但是, 积分在低频和常值干扰下很容易饱和, 而且实际中加速度信号也确实含有较大的零漂和低频干扰。为解决此问题, 我们用一阶惯性环节来代替积分环节。于是取

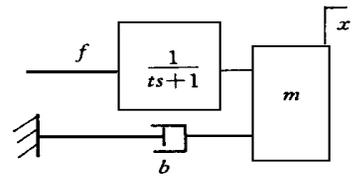


图1 机械手位置控制模型
Fig. 1 Robot position control model

$$G_{an}(s) = \frac{k_v}{\tau s + 1} \quad (8)$$

的形式, 这里取 τ 为为惯性环节的时间常数。从形式上看, Studenny 的低通滤波器取为一阶与我们的一阶惯性环节是一样的, 但两者的设计指导思想是不同的。Studenny 滤波器的转折频率在系统谐振附近, 而我们的转折频率越小越好。将 τ 取一定值 (比如2) 代入 (6) 式代替 $G_a(s)$ 得到近似积分加速度负反馈的波特图如图3所示。从图中看出, 采用近似加速度积分反馈后, 在系统的带宽稍低于原系统带宽的情况下, 使相位裕度提高了50左右, 且抑制了系统的谐振峰, 达到了与速度反馈几乎一样的效果。这对于用差分速度作为阻尼信号的机器人来讲是很有意义的。

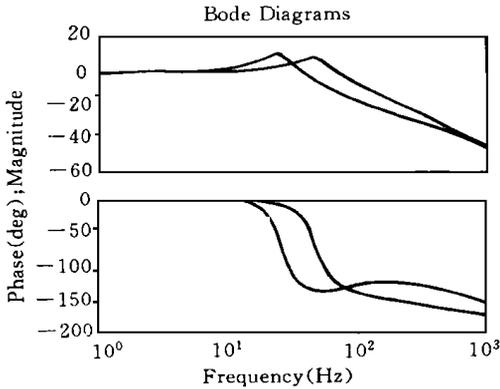


图2 直接加速度负反馈波特图

Fig. 2 Raw acceleration negative feedback bode plot

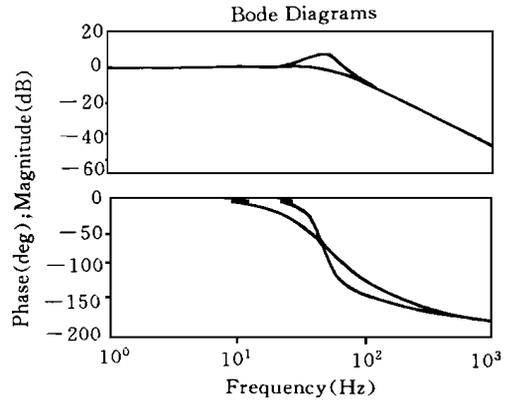


图3 近似积分加速度负反馈波特图

Fig. 3 Approximate integral acceleration negative feedback bode plot

2.4 加速度正反馈

从图2中看到, 直接加速度负反馈压缩了系统的频带。而加速度正反馈能拓宽系统的频带, 但是对系统的谐振和干扰具有放大的作用, 必须在正反馈通道上加低通滤波环节。这个环节转折频率选择的原则是既保证在系统谐振峰处有 $|G_{ap}(j\omega)| \ll 1$, 又不能给加速度信号引进太大的相位滞后。这里 $G_{ap}(s)$ 是加速度正反馈通路的滤波传递函数。为充分抑制谐振和干扰, 这里取为二阶的形式, 即取:

$$G_{ap}(s) = \frac{k_a \omega_h^2}{s^2 + 2\zeta \omega_h s + \omega_h^2} \quad (9)$$

其中 k_a 是常值增益; ζ 为阻尼比, 取为 $\sqrt{2}/2$; ω_h 是滤波器转折频率。这里我们按 $20 \lg |G_{ap}(j\omega)| / k_a = -20 \text{ dB}$ 的标准选取 ω_h , ω 是系统的固有谐振频率。于是得出

$$\omega_h = 0.32\omega \quad (10)$$

按上面的标准取值, 将 (9) 代入 (6) 式代替 $G_a(s)$ 得到 $G_{pda}(s)$ 的波特图如图4所示。从图中看到, 加速度正反馈确实拓宽了系统的频带, 但是相位裕度变小, 也就是说系统的稳定性变差了。但是, 这个相位裕度可以有前面的加速度负反馈来弥补。所以, 我们只取加速度正反馈拓宽系统频带的优点。

2.5 综合加速度反馈

加速度积分负反馈可以提高系统阻尼, 提高稳定裕度; 加速度正反馈可以拓宽系统的频带。要取两者的优点, 必须将它们结合起来。因为两者在频率上是错开的, 只要将两个滤波器并联即可。于是我们得到综合加速度反馈环的传递函数为:

$$G_a(s) = G_{an}(s) + G_{ap}(s) = (k_v + k_a) \frac{\frac{k_v}{k_v + k_a} s^2 + \frac{2\zeta \omega_h + k_a \tau \omega_h^2}{k_v + k_a} s + \omega_h^2}{(\tau s + 1)(s^2 + 2\zeta \omega_h s + \omega_h^2)} \quad (11)$$

保持前面各参数取值不变, 得到综合加速度反馈的波特图如图5所示。对比图3与图5我们看出, 综合加速度反馈不仅抑制了系统的谐振峰, 提高了系统的稳定裕度, 还使带宽有了一定的提高, 这是前面的两种加速度反馈方法单独无法具有的! 在这个前提下, 机器人的位置反馈增益就可以取得更大, 这对于提高机器人的刚度, 抑制关节摩擦, 减小控制误差都是有利的。

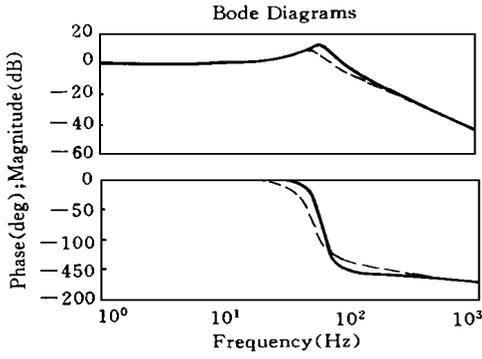


图4 加速度正反馈的波特图

Fig. 4 Acceleration positive feedback bode plot

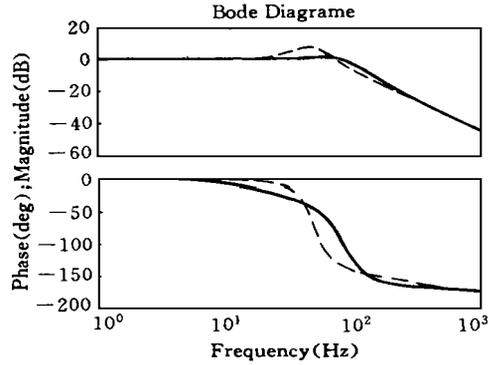


图5 综合加速度反馈波特图

Fig. 5 Integration acceleration feedback bode plot

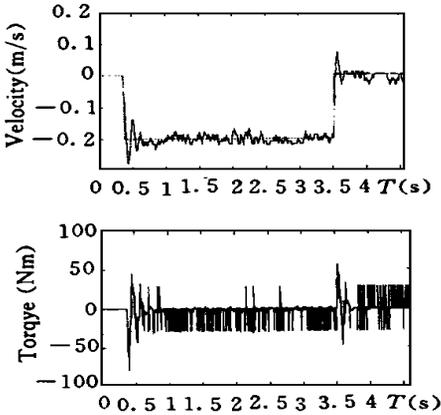


图6 无加速度反馈的速度与控制力矩

Fig. 6 Velocity and torque without AF

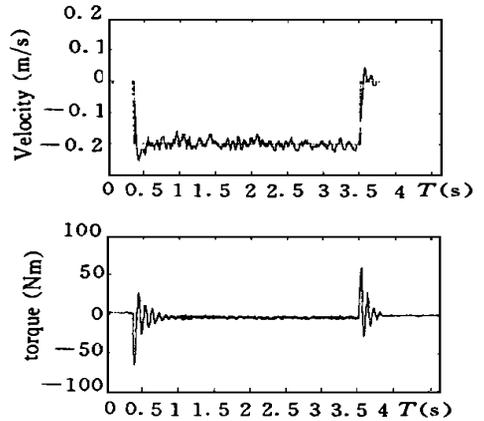


图7 有加速度反馈的速度与控制力矩

Fig. 7 Velocity and torque with AF

3 实验

实验是在 PUMA 560 机械手及其控制器上实现的。将加速度计安装在末端执行器和六维腕力传感器的衔接处。算法用模拟电路实现，放在采样环节之前。操作空间6自由度位置控制周期约为2.5ms，单关节位置控制周期在1ms左右。

3.1 单关节实验

让机械手第一关节跟踪一条方波速度轨迹，看其对速度的跟踪能力并对比有无加速度反馈时的控制力矩情况。图6是 $G^a(s) = 0$, $k_p = 4500$, $k_d = 50$ 时的速度和控制力矩曲线；图7是 $G^a(s) = 4/(0.1s + 1)$, $k_p = 6500$, $k_d = 0$ ，即只有位置和积分加速度反馈的控制曲线。对比两图看出，无加速度反馈时，控制力矩噪声很大；而用近似积分加速度反馈后，即使位置反馈增益增加到了6500，而且控制力矩也比 PD 控制时平滑的多，机械手完成跟踪任务时基本上没有声音。经实验验证，引入加速度反馈能使控制增益比 PD 控制时增加几倍。

3.2 操作空间实验

在操作空间 Z 方向做了三组实验。第一组是使机械手在大负载下跟踪一条正弦轨迹，验证加速度反馈在抑制低速爬行现象方面的作用。图8(a)是 $k_p = 10^3$, $k_d = 10$, $k_v = 0$, $k_a = 0$ ，图中虚线为参

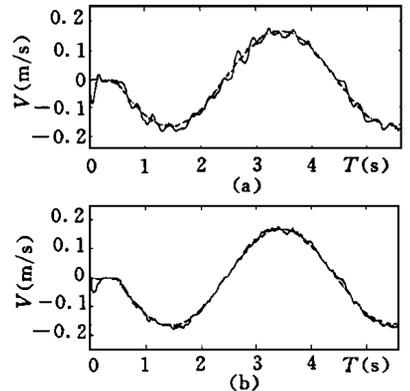


图8 大负载下对正弦轨迹的跟踪速度

Fig. 8 Velocity trajectory with large load

(a) Without AF. (b) With integrative AF

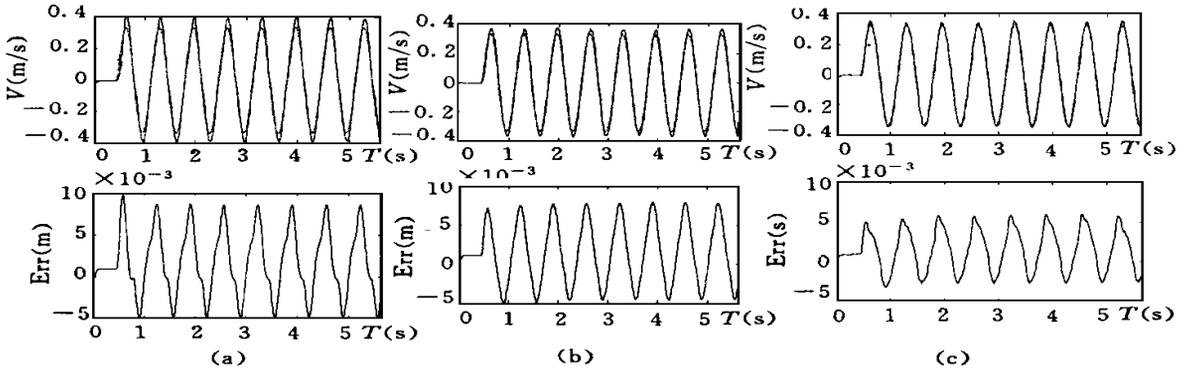


图9 连续轨迹跟踪曲线: (上: 速度; 下: 误差) (a) 无加速度反馈 (b) 加速度负反馈 (c) 综合加速度反馈

Fig. 9 Sine velocity trajectory and track error. (a) Without AF. (b) With ANF. (c) With integrative AF

考速度。图8(b)是 $k_p = 1000$, $k_d = 10$, $k_v = 350$, $\tau_v = 1.2$, $k_a = 0$, $\omega = 40 * 2\tau_0$ 对比两图看出, 综合加速度反馈的加入使机械手的爬行抖动现象明显减弱。

第二组是让机械手跟踪一条加速度连续的正弦轨迹, 主要用动态跟踪误差来验证系统频带的增加情况。图9显示了有无加速度反馈的跟踪情况。其中(a)的控制参数为 $k_p = 10^3$, $k_d = 20$, $k_v = 0$, $k_a = 0$; (b)为 $k_p = 10^3$, $k_d = 20$, $k_v = 300$, $k_a = 0$; (c)为 $k_p = 10^3$, $k_d = 20$, $k_v = 300$, $k_a = 0.3$ 。从图中看到, 有近似积分加速度反馈以后, 跟踪精度变化不大, 但速度超调明显减小; 而综合加速度反馈的加入在进一步减小了速度超调的基础上, 还使跟踪误差减小到了原来的一半以下。这说明综合加速度反馈确实提高了系统的频带。

第三组是跟踪一条方波速度轨迹, 看其对速度不连续的轨迹跟踪情况。图10是在 $k_p = 1200$, $k_d = 15$ 的情况下改变加速度反馈参数得到的。(a)中 $k_v = 0$, $k_a = 0$; (b)中 $k_v = 280$, $k_a = 0$; (c)中 $k_v = 280$, $k_a = 0.1$ 。对比三幅图看出, 综合加速度反馈使得系统阻尼明显增加, 不仅抑制了系统的超调震荡, 而且提高了收敛速度。上述的实验结果与仿真结论是一致的, 这同时验证了加速度反馈和仿真模型的有效性。

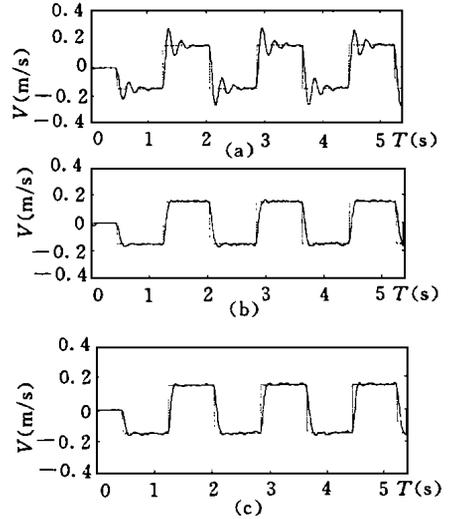


图10 方波速度跟踪曲线: (a) 无加速度反馈, (b) 加速度负反馈, (c) 综合加速度反馈

Fig. 10 Square wave velocity trajectory.

(a) Without AF. (b) With ANF. (c) Integrative AF

4 结论

本文的加速度反馈控制方法将轻巧的加速度计安装在机械手的末端, 对机械手的结构及动力学特性基本没有影响; 它能给机械手提供比原系统大得多的阻尼, 更能充分的发挥机械臂的设计潜能; 阻尼有了保障, 控制增益就可以提高, 这对于提高控制精度和抑制摩擦等非线性因素都有好处。对于计算机采样控制的机器人, 用加速度反馈来提高位置控制阻尼的方法是实用的, 也是可行的。对于机械臂与环境形成闭合链的力控制, 情况要复杂一些, 尚有待于进一步研究。

参考文献

- 1 Studenny J, Belanger P. Robot manipulator control by acceleration feedback: Stability. Design and Performance Issues. IEEE Proc. 25th on Decision and Control. 1986: 80
- 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
- 3 李杰, 韦庆, 常文森, 张彭. 机器人操作空间加速度信号应用研究. 国防科技大学学报, 1998, 20(1): 36
- 4 常文森, 张曲光, 朱晓峰. 操作器力和位置混合控制——算法与系统行为分析. 机器人, 1991, 13(增刊): 1
- 5 Steven D E, Warren P S. Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control. Proc. 1992 IEEE Con. On Robot and Automation, 1987: 904