

机器人操作空间加速度信号应用研究*

李杰 韦庆 常文森 张彭

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 机器人力控制存在着动力学不稳定性问题,即系统响应速度和稳定性之间的矛盾。在操作空间一级引入加速度正反馈,既能使系统的响应频带变宽,又能提高系统阻尼。这种方法能有效地提高机器人对高刚度环境的适应性,使力控制的动力学不稳定性问题得到明显地缓和;另外本文研究了用加速度积分信号代替位置差分速度信号来消除差分噪声,提高力控制精度方法的应用前景。

关键词 加速度反馈,力/位置混合控制,动力学不稳定性

分类号 TP242.6

Research on the Use of Acceleration Signal for Task Space of Robot Manipulator

Li Jie Wei Qing Chang Wensen Zhang Peng

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

Abstract The dynamic instability problem exists in, the force control of robot manipulator, which is the contradiction between response speed and stability. For the sampling control system, the accelerations positive feedback in task space can broaden the system frequency band and raise the system damping. This approach can enhance the robot manipulator's ability to adapt itself to the stiff environment and relax the dynamec instability problem in force control obviously. In addition, this article discusses the prospective application in using the integration of the filtered integral signal of the accelerator and the encodes' signal to replace the velocity coming form the position defference to remove the difference noise and improve the precision in force control of robot manipulator.

Key words accelerator feedback, hybrid force and position control, dynamic instability.

力控制功能是智能机器人必须具备的能力,有了力控制功能,有时可以把位置控制精度降到次要地位。但是,在力/位置混合控制中,力控制算法普遍存在着响应速度和系统稳定性之间的矛盾,要么系统响应是不稳定的,要么由于低增益防止不稳定而使系统响应非常缓慢,控制精度降低。因此提高机器人力控制响应速度和防止系统不稳定是力控制中急待解决的问题之一。目前,机器人控制中普遍采用PID控制方法,这种方法经过许多学者理论和实验验证是在刚性环境和顺应性环境中应用的较好的控制策略。但由于高刚度环境下几个因素的影响,使得系统的阻尼系数不能太大,这样为保证稳定不得不降低系统自身的刚度,这就大大地限制了机械手对各种应用环境的适应能力。

加速度反馈是改善机器人系统稳定性的有效途径。主要方法有:用机械手末端加速度信号与码盘信号综合后代替原来的速度信号,能减小差分噪声,提高系统阻尼,有效的抑制高阶动态和未建模因素的影响^[1,2];关节加速度反馈控制可以有效地抑制机器人连杆柔性和动力学耦合效应,从而提高独立关节伺服控制的鲁棒性和跟踪性能。国内沈阳自动化所研究了基于加速度计获得阻尼的方法^[6],他们对两关节直接驱动机械手的连续控制实验取得了较好的效果,但仅限于连续信号反馈。本文提出一种多

* 国家 863 计划基金资助

1997年5月21日修订

第一作者:李杰,男,1971年生,博士生

关节机器人操作空间加速度采样控制方法。

1 控制算法和加速度反馈的引入

1.1 力/位混合控制算法

机械手操作空间力/位混合控制动力学方程为（详细说明及符号定义见文 [8, 9]）：

$$\mathbf{H}(\theta)\ddot{\mathbf{X}} + \boldsymbol{\mu}(\theta, \dot{\theta}) + \boldsymbol{\rho}(\theta) = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_e \quad (1)$$

其中 $\mathbf{H}(\theta)$ 、 $\boldsymbol{\mu}(\theta, \dot{\theta})$ 和 $\boldsymbol{\rho}(\theta)$ 分别是操作空间有关惯性、哥氏离心力矩和重力力矩系数矩阵； $\mathbf{F}_c = \tilde{\boldsymbol{\mu}}(\theta, \dot{\theta}) + \tilde{\boldsymbol{\rho}}(\theta)$ 为补偿力矩； $\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_f$ 为主动控制力矩，位姿控制项 $\mathbf{F}_p = \tilde{\mathbf{H}}(\theta)\boldsymbol{\Omega}(\dot{\mathbf{X}}_d + \mathbf{K}_d\delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_p\delta\mathbf{X})$ ，力（力矩）控制项 $\mathbf{F}_f = \tilde{\boldsymbol{\Omega}}(\mathbf{K}_f\delta\mathbf{F} + \mathbf{K}_v\delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{F}_d)$ ，其中 $\delta\dot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}$ ， $\delta\mathbf{X} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X}$ ， $\delta\mathbf{F} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_e$ ； \mathbf{F}_e 为环境对机械手的作用力（力矩）； $\mathbf{X} = [x, y, z, n, o, a]^T$ 为空间六维位姿； $\boldsymbol{\Omega}$ 为 6×6 位姿选择矩阵， $\tilde{\boldsymbol{\Omega}}$ 为力（力矩）选择矩阵， $\tilde{\boldsymbol{\Omega}} = \mathbf{I} - \boldsymbol{\Omega}$ 。假设补偿与惯量矩阵计算准确，即

$$\tilde{\boldsymbol{\mu}}(\theta, \dot{\theta}) = \boldsymbol{\mu}(\theta, \dot{\theta}); \tilde{\boldsymbol{\rho}}(\theta) = \boldsymbol{\rho}(\theta); \tilde{\mathbf{H}}(\theta) = \mathbf{H}(\theta)$$

则补偿后机械手操作空间闭环控制方程为：

$$\ddot{\mathbf{X}} = \boldsymbol{\Omega}(\mathbf{K}_p\delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_d\delta\mathbf{X} + \dot{\mathbf{X}}_d) + \mathbf{H}^{-1}(\theta)\tilde{\boldsymbol{\Omega}}(\mathbf{K}_f\delta\mathbf{F} + \mathbf{K}_v\delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_e) \quad (2)$$

忽略力控制项对位置控制项的耦合（即假设 $\mathbf{H}^{-1}(\theta)$ 为对角阵），并令 $\boldsymbol{\Omega} = \text{diag}\{1, 1, 0, 1, 1, 1\}$ ，即在 Z 方向上实施力控制，可分别得到解耦的位置控制和力控制闭环方程为：

$$\delta\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_d\delta\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_p\delta\mathbf{X} = 0 \quad (3)$$

$$h_z(\theta)\ddot{z} = k_{fz}\delta f_z + k_{vz}\delta\dot{z} + \delta f_z \quad (4)$$

其中， $h_z(\theta)$ 为 Z 方向上的等效质量， k_{fz} 和 k_{vz} 分别为 \mathbf{K}_f 和 \mathbf{K}_v 在 Z 方向上的比例和微分增益分量。

1.2 加速度反馈的引入

本文只研究力控制中的加速度反馈控制问题。不同于关节空间的加速度反馈方法，我们在操作空间应用加速度反馈。在力控制方向（ Z 方向）引入加速度反馈，即在（4）式中引入加速度项，则带有加速度反馈的力控制闭环方程为：

$$h_z(\theta)\ddot{z} = k_{az}\ddot{z} + k_{fz}\delta f_z + k_{vz}\delta\dot{z} + \delta f_z \quad (5)$$

其中， k_{az} 为 Z 方向加速度反馈增益，这里取正值代表加速度正反馈；右端的 \ddot{z} 为由加速度计测量到的机械手末端加速度。加速度正反馈的作用可以由后续的仿真研究验证。

1.3 计算量分析

机器人控制系统中费时较多的是关于 Jacobian 矩阵的运算。加速度反馈若在关节空间进行，而且象现有的工业机器人只能利用机械手末端的加速度，由关节空间与操作空间加速度的关系式：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\theta} + \mathbf{J}\dot{\theta}$$

可知，要得到关节加速度，必须对 Jacobian 矩阵求导。一般工业机器人都有 5 个以上的自由度，因此求导的运算量很大，使控制周期变长。这样加速度反馈的好处有可能被加大的控制周期引起的性能下降所淹没。而在操作空间，对比式（4）和（5）可以看到，引入加速度反馈后，仅在原先 PD 控制项中增加了一个加速度项。该项的获得只消耗微秒级的 A/D 采样时间，在运算量上也仅增加了一次乘法和一次加法，这个代价相对于整个控制周期的运算量来说是微不足道的。这样，引入加速度反馈后，就不用考虑它对系统控制周期的影响而只把注意力放到如何提高加速度反馈的效果上。

2 仿真研究

2.1 仿真模型

由公式（4）看到，如果 θ 的变化范围很小，就可以将 $h_z(\theta)$ 在 θ 附近泰勒展开，取其线性项。在力控制中，机械手由于受环境的约束， θ 的变化范围一般情况下不大。于是，我们取 $h_z(\theta)$ 的线性项

h_z 作为机械手在 Z 方向的等效质量。这样机械手力控制闭环方程变成了如下的线性二阶微分方程:

$$h_z \ddot{x} = k_{fx} \delta f_x + k_{vx} \delta \dot{x} + \delta f_x \quad (6)$$

根据式(6), 可将机械手与环境的接触模型简化为一个质量弹簧系统^[5,7], 如图1所示。该系统的传递函数描述为:

$$G_2(s) = \frac{F(s)}{F_c(s)} = \frac{k_r}{ms^2 + bs + k_r} \quad (7)$$

其中, $F(s)$, $F_c(s)$ 分别是系统对环境作用力 $f = k_r x$ 和系统输入量 f_c 的拉氏变换; $b = b_1 + b_2$ 为系统阻尼。式(7)即为机械手力控制二阶模型

在对机械手的研究中, 常常将驱动电机的延迟考虑在内, 建立机械手控制系统的三阶模型, 如下式:

$$G_3(s) = \frac{k_r}{mT^3 s^3 + (m + bT)s^2 + (k_r T + b)s + k_r} \quad (8)$$

其中 T 为电机的时间常数。

很多文献把机械手腕力传感器的动态也考虑在机械手的接触模型中, 但由于它对机械手的稳定性影响不大^[3,7], 这里不再建立包括传感器动态的机械手五阶模型。

2.2 模型离散化

整个控制系统的离散化方程表达为:

$$F(z) = G(z)U(z) \quad (9)$$

$G(z)$ 为机械手的脉冲传递函数, 可以是二阶、三阶或五阶^[7], $U(z)$ 为离散控制输入, $F(z)$ 为系统输出。

没有加速度反馈时, 考虑采样延迟, 输入差分方程是:

$$u(n+1) = k_p e(n) + k_d / Ts (e(n) - e(n-1)) + f_d(n) \quad (10)$$

其中 $e(n) = F_d(n) - F(n)$ 为力控制误差, Ts 为采样周期。将该式的 Z 变换 (令 $F_d(n) = F_d(n-1)$) 代入式(9)得到系统的脉冲传递函数为:

$$H(z) = \frac{(k_p + 1)z}{G^{-1}(z)[z^2 + z(k_p + k_d/Ts)G(z) - k_d/TsG(z)]} \quad (11)$$

同样方法得到有加速度反馈系统的脉冲传递函数为:

$$H_a(z) = \frac{(k_p + 1)z}{z^3 G^{-1}(z) + z^2(k_p + k_d/Ts + k_a/Ts^2) + z(k_d/Ts + 2k_a/Ts^2) + k_a/Ts^2} \quad (12)$$

由 Z 变换的稳定性判据, 若式(11)和式(12)的分母的零点全落在单位圆内, 则这两个控制系统都是渐近稳定的。

2.3 离散仿真结果

在满足临界阻尼比的情况下, 使系统稳定的最大控制增益能反映系统的稳定性能。下面是在阻尼比 ζ 和 ζ_a 都为 1 的条件下, 仿真得到一定环境刚度和一定采样周期下系统稳定的最大力反馈增益, 从中取出时采样周期分别为 2ms、5ms 和 10ms、有无加速度反馈时的数据绘制成稳定区域比较图如图 2 和图 3 所示。图中, 实线代表有加速度反馈控制 (AFC) 的稳定区域边界, 虚线代表无加速度反馈时的稳定区域边界。从上述分析和数据曲线可以得到如下结论:

- 1) 加速度反馈能提高系统的稳定性, 使高刚度环境下的动态不稳定问题得到缓和;
- 2) 加速度反馈系数不同对系统性能的改善程度也不同。选择适当的反馈增益可以使加速度反馈对感兴趣的系统更有利;
- 3) 加速度反馈对采样控制系统也适用。一般采样控制周期越短, 效果越明显, 增益提高的越大;
- 4) 加速度反馈的效能与环境刚度和采样周期都有关系。在一定刚度下, 采样周期大于某个值, 加

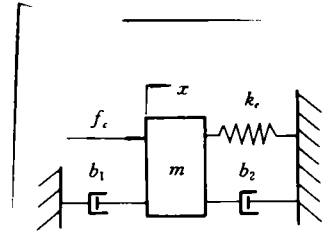


图1 机械手与环境接触模型

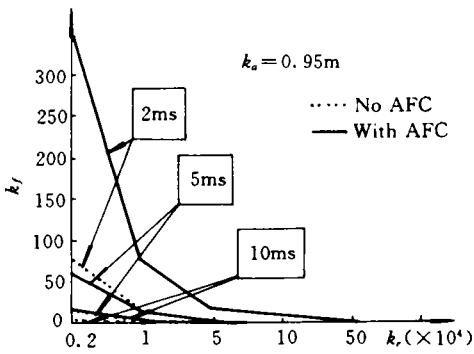


图2 二阶模型稳定区域比较

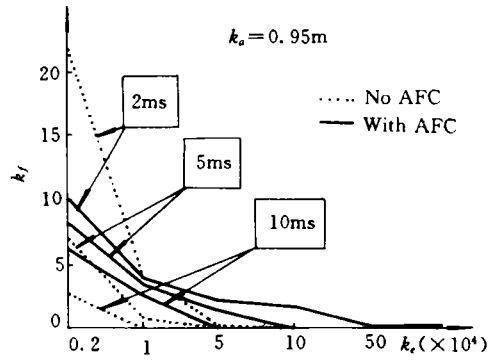


图3 三阶模型稳定区域比较

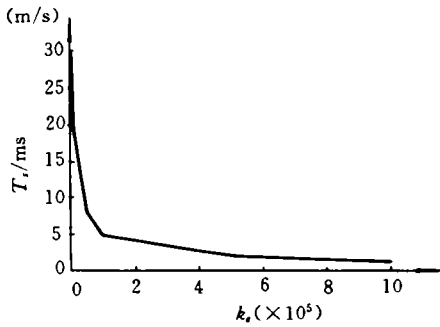


图4 加速度反馈有效采样周期曲线

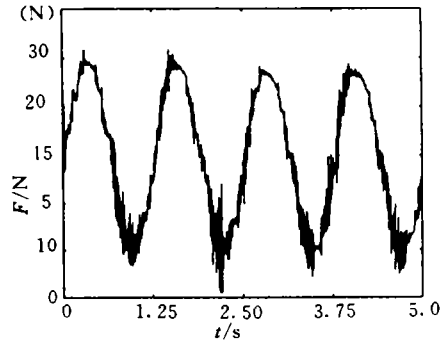


图5 码盘差分信号反馈时力跟踪曲线

速度反馈将不起作用。其大致的对应关系如图4。

3 机械手与环境接触作业过程系统阻尼信号的分析

机械手力控制中，常用 $k_r x$ 代替 f 。但当机械手与环境接触时，机械手力控制方向的速度往往很小，这种情况下，由于机械手的柔性、间隙和摩擦等因素的存在，再加上量化误差，使得由关节码盘计算出的速度噪声很大，限制了反馈信号的有效性^[2]；若阻尼系数较大，在某些情况下就会引起系统不稳定^[4]。如果能减小码盘信号的差分噪声，提高反馈信号的信噪比，系统的控制性能将会有较大的提高。下面的实验证明了这一点：

本实验是在 PUMA560 机械手上进行的。下列各图是使机械手与刚度环境（刚度约为 5×10^5 ）接触跟踪一条力正弦曲线时实时采集的数据，其中图5~7是用码盘差分信号反馈得到的数据，图8~10是对差分信号进行一次滤波后作为反馈得到的数据。

由图5看到，码盘差分信号反馈时，实际接触力曲线的噪声很大；图6中相邻时间段（横轴是采样点数）内，正负速度切换很频繁，由此导致了图7中力变化率曲线的抖动，两者相互耦合，形成了稳定条件下的恶性循性。若能降低速度的切换频率，直观上可以想象力的抖动会变慢。实际上也正是如此。

从图8~10可以看到这一点，它们是用差分信号的一次软件滤波作为反馈在相同的控制参数条件

下采集的力跟踪曲线。由图9可以看出,这时的速度正负切换频率明显降低,速度的幅值也小了,从而图10中力变化率曲线的幅值除开始段外,从图7的2500N/s减小到了250N/s左右。力跟踪曲线也比图5中的曲线平滑的多。

当然,由于软件滤波存在延迟和相位滞后,它对系统的稳定性是一种削弱。但是,通过此实验可以看到,由于削弱了反馈信号中的噪声,提高了信噪比,使得系统的控制精度得到了明显的改善。如果用安装在机械手末端的加速度信号的积分与码盘信号的综合代替原来的码盘差分信号,可以消除单纯滤波的延迟和相位滞后^[2],消除差分噪声,这样既可以保证系统的稳定,又提高了系统的力控制精度,有较好的应用价值。

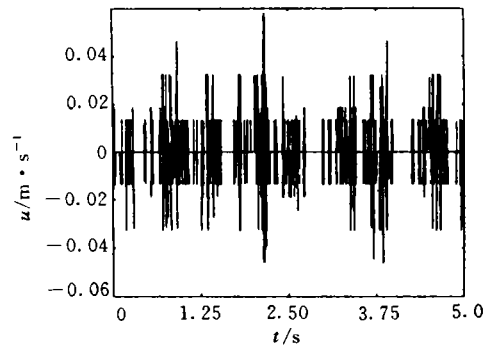


图6 码盘差分信号反馈时速度响应曲线

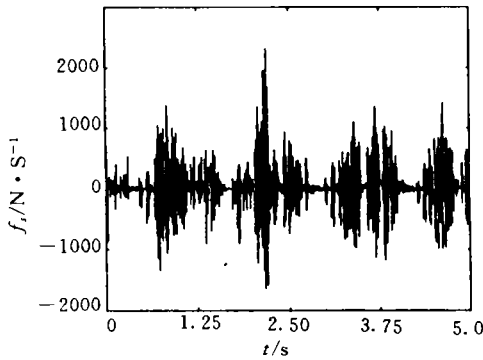


图7 码盘差分信号反馈时力变化率曲线

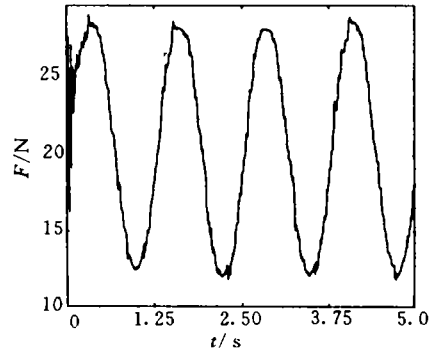


图8 滤波信号反馈时力跟踪曲线

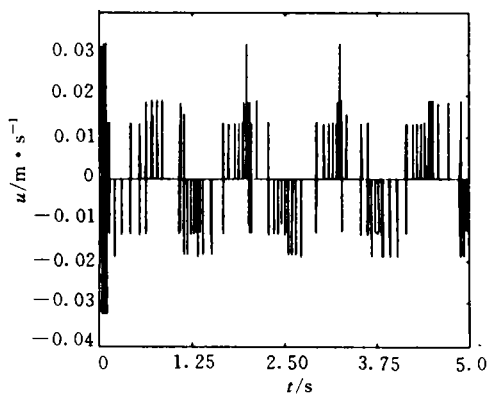


图9 滤波信号反馈时速度响应曲线

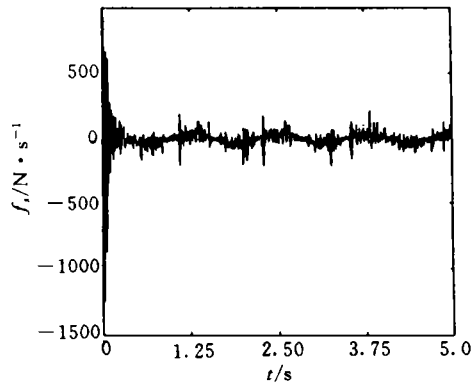


图10 滤波信号反馈时力变化率曲线

4 结论

机器人关节空间直接加速度反馈对连续控制系统和快速采样控制系统具有提高系统响应速度和增加系统阻尼的双重作用；加速度反馈能改善系统的动态特性，对改善机器人的动态力控制精度和稳定性有很好的效果；由理论和仿真结果证明了加速度反馈的有效性。用加速度信号积分与码盘信号综合代替码盘差分得到的速度，能提高系统的阻尼和抗干扰能力，增强系统的稳定性，两种方法可以容易地在一个控制系统上实现。它们的成功应用将使机器人力控制技术向实用化迈出新的一步。

参考文献

- 1 Youfu F Li. On the use of velocity feedback for robot impact control. *Robotics and Autonomous Systems*, 1994 13: 297~305
- 2 Li Y F. and Daniel R W. Robot tip velocity measurement for direct end effector position control. *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, 1992: 998~1103
- 3 Eppinger S and Seering W. Understanding bandwidth limitations on robot force control. In *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, N. C., 1987
- 4 Daniel R W and Sharkey P M. Chaos in high performance digital robot force controllers. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Decision and Control*, December, 1990
- 5 Eppinger S and Seering W. On dynamic models of robot force control. In *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1986
- 6 韩建达, 谈大龙, 蒋新松. 机器人关节加速度反馈控制方法的实验研究. *机器人*, 1996, 18 (增刊): 607~612
- 7 韦庆, 常文森, 张彭. 机器人操作器力控制稳定性分析. *机器人*, 1996, 18 (3): 173~178.
- 8 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 (7 增刊): 1
- 9 常文森等. 操作器力和位置混合控制: 数学模型和实验研究中的几个问题. *机器人*, 1993, 15 (1): 1