

两种具有动力学补偿的机器人 位置/力混合控制器

刘美华 常文森

(自动控制系)

摘要 文中提出了采用前馈动力学补偿和实时动力学补偿的两种机器人位置/力混合控制器。仿真结果显示了这两种动力学补偿的有效性。由于动力学补偿的引入,机器人位置/力混合控制系统的性能得到明显改善。

关键词 机器人, 控制器, 位置/力, 顺应运动, 动力学补偿

分类号 TP242.2

引 言

机器人的力控制是一个重要的研究课题,近年来引起人们的广泛重视。一方面,因为在许多应用场合下都要求机器人与环境接触,将机器人的纯位置控制器替换为位置/力控制器可以扩大机器人的应用市场;另一方面,机器人正向着智能化方向发展,而智能机器人的一个重要标志在于它能与环境发生相互作用,能根据环境变化对自身的动作进行决策。到目前为止,机器人力控制主要有两种方式^[1],即基于位置-力正交原理设计的位置/力混合控制方式和通过建立力与位置之间的数学关系提出的阻抗控制方式。作者在文献^[1]中分析了 Raibert和Craig^[2]提出的位置/力混合控制器的稳定性,并由此提出了一种统一形式的机器人位置/力控制结构,实现了以上两种力控制设计方法的统一。然而,文献^[1]中提出的那种位置/力控制器仅仅对重力作用进行了补偿。仿真研究表明,当环境刚度 K_e 很大时(如 $K_e=10^8\text{N/m}$),控制系统的性能随着机器人运动速度的加大而变差。其原因是当 K_e 很大时,控制系统的带宽很窄;机器人的运动速度越大,其哥氏力和向心力作用越显著,并在动力学作用中占主导地位;而文献^[1]中的控制器未对这些动力学作用给予补偿,因而其控制性能会变得很差,甚至不稳定。为此,本文在文献^[1]中的统一形式的控制结构下,通过引入前馈动力学补偿和实时动力学补偿,提出了两种机器人位置/力控制器;并通过大量的仿真考察了这些动力学补偿的有效性。

1 实时动力学补偿

考虑机器人与环境接触，其动力学方程可描述为

$$D(q)\ddot{q} + Q(q, \dot{q}) + G(q) + f_c = \tau + J^T(q)F \quad (1)$$

其中， q 为关节位移向量， $D(q)$ 为惯量矩阵， $Q(q, \dot{q})$ 为由哥氏力、向心力以及粘性摩擦力构成的向量， $G(q)$ 为重力作用向量， τ 为关节力矩向量， $J(q)$ 为 Jacobian 矩阵，上标 T 表示矩阵的转置， F 为机器人与环境之间的作用力， f_c 为干摩擦向量，且其第 i 分量

$$f_{ci} = -K_{ci} \text{sign}(\dot{q}_i) \quad (2)$$

式中， K_{ci} 为常系数。

作者在文献[1]中分析了 Raibert 和 Craig 提出的位置/力混合控制器[2]的不稳定性，并提出了力微分反馈和在力控制方向上引入位置量反馈这两种克服不稳定性的有效方法，而且基于稳定性分析提出了如下位置/力混合控制器

$$\tau = J^T(q) [F_m^* + F_j^* - F] + G(q) + f_c \quad (3)$$

可以看出，该控制器忽略了机器人的惯量耦合和哥氏力、向心力效应。于是，本节采用实时动力学补偿，提出如下位置/力混合控制器：

$$\tau = D(q)J^{-1}(q)F_m^* + J^T(q) [F_j^* - F] + \tilde{Q}(q, \dot{q}) + G(q) + f_c \quad (4)$$

即

$$\tau = J^T(q) [\tilde{D}(q)F_m^* + F_j^* - F] + \tilde{Q}(q, \dot{q}) + G(q) + f_c \quad (5)$$

其中

$$F_m^* = \ddot{X}_d + K_{PD}(\dot{X}_d - \dot{X}) + K_{PP}(X_d - X) + K_{PI} \int (X_d - X) dt \quad (6)$$

$$F_j^* = \ddot{F}_d + K_{FD}(\dot{F}_d - \dot{F}) + K_{FP}(F_d - F) + K_{FI} \int (F_d - F) dt \quad (7)$$

$$\tilde{D}(q) = J^{-T}(q)D(q)J^{-1}(q) \quad (8)$$

$$\tilde{Q}(q, \dot{q}) = Q(q, \dot{q}) - D(q)J^{-1}(q)J(q)\dot{q} \quad (9)$$

以上位置 PID 控制器增益矩阵 K_{PP} 、 K_{PD} 、 K_{PI} 以及力控制器增益矩阵 K_{FP} 、 K_{FD} 、 K_{FI} 均取对角形，如 $K_{PP} = \text{diag}(K_{PP1}, K_{PP2}, \dots, K_{PPn})$ 。

由(5)式给出的位置/力混合控制器的结构如图 1 所示。图中 F_s 为力传感器输出信号。该控制器具有统一的结构形式，现有的两种力控制结构都可归结为该控制器的特殊情形。如取力控制方向的位置比例和积分反馈增益 $K_{PPi} = K_{PIi} = 0$ 、力微积分反馈增益 $K_{FDi} = K_{FIi} = 0$ ，取位置控制方向的所有力反馈增益 $K_{FPi} = K_{FDi} = K_{FIi} = 0$ ，则得到 Khatib 和 Burdick[3]的力控制器；取 $K_{FD} = K_{FI} = 0$ ，则得到 Hogan[4]的阻抗控制器。然而，与这些控制器相比，控制器(5)引入了力微分反馈和力积分反馈，比较充分地补偿了力误差，因此，该控制器具有更好的力跟踪能力和系统稳定性。

正如文献[1]中指出的那样，对于位置控制方向和力控制方向，反馈增益的选取应不相同。

首先，考察机器人在自由空间中运动。这时，采用纯位置控制方式，因而取 $F_j^* = 0$ 。

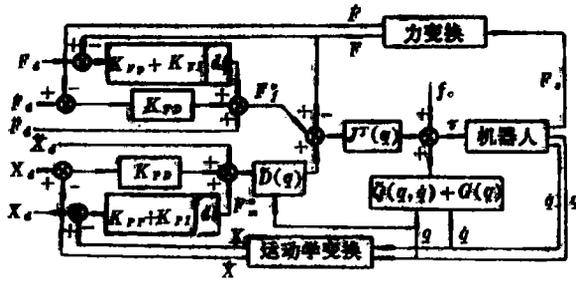


图 1 采用实时动力学补偿的位置/力混合控制器结构图

将控制律(5)代入系统(1)得

$$\bar{D}(q) \dot{X} = \bar{D}(q) F_m^* + F_j^* \tag{10}$$

因此有

$$\dot{X} = F_m^* \tag{11}$$

所以

$$\ddot{e} + K_{PD}\dot{e} + K_{PPI}e + K_{PI} \int e dt = 0 \tag{12}$$

其中 $e = X - X_d$.

因此，只要 $K_{PD}K_{PPI} > K_{PI}$ ，那么闭环系统是稳定的。由于积分作用是消除稳态误差， K_{PI} 通常取得很小，而且实际实现时，往往采用 PD 控制方式，因此该条件总是满足的，所以系统是稳定的。为了保证系统具有良好的控制性能，使系统具有临界阻尼特性，取

$$K_{PDI}^2 = 4K_{PPI} \tag{13}$$

下面再考察机器人作受限运动，也即顺应运动。这时，采用位置/力混合控制方式。在位置控制方向上，取力反馈增益 $K_{FPI} = K_{FDI} = K_{FII} = 0$ ，而位置反馈增益由(13)式给出。在力控制方向上，考虑文献[1]中给出的两种特殊的反馈增益选取方法：

(1) 取 $K_{FPI} = K_{FDI} = 0$ 。由于力反馈可以等效为一个位置反馈^[1]，这时的等效位置比例和微分反馈增益分别为 $K_E K_{FPI}$ 和 $K_E K_{FDI}$ 。为了保持临界阻尼特性，取 $(K_E K_{FDI})^2 = 4(K_E K_{FPI})$ ，即

$$K_{FDI} = 2\sqrt{K_{FPI}/K_E} \tag{14}$$

其中 K_E 为等效环境刚度。如果力传感器和环境的刚度分别为 K_s 和 K_e ，那么

$$K_E = (1/K_s + 1/K_e)^{-1} \tag{15}$$

(2) 取 $K_{FPI} = K_{FDI} = 0$ 。这时，等效的位置比例和微分反馈增益分别为 $K_E K_{FPI}$ 和 $d_i(q) K_{FDI}$ ，因而取 $(d_i(q) K_{FDI})^2 = 4(K_E K_{FPI})$ ，即

$$K_{FDI} = 2\sqrt{K_E K_{FPI}/d_i(q)} \tag{16}$$

其中 $d_i(q)$ 为 $\bar{D}(q)$ 的第 i 行第 j 列元素。

可以看出，使用文献[3]的力方向速度衰减控制时，其速度反馈增益的选取与机器人的运动有关，需要在线选取。

3 前馈动力学补偿

上节在文献[1]的基础上,引入了机器人位置/力混合控制的实时动力学补偿。仿真研究表明,当环境刚度很大时,要求控制系统的采样周期很小(对于 $K_e=10^6\text{N/m}$, T 不能大于 10ms),否则将出现很差的控制性能,甚至不稳定。上节提出的位置/力混合控制器要求实时补偿机器人的动力学作用,具有较大的在线计算量,这必然给减小采样周期带来了一定的负担。然而,机器人的动力学效应是应该给予补偿的。为此,本节兼顾控制性能和在线计算量两项指标,提出了采用前馈动力学补偿的机器人位置/力混合控制器。

该控制器的控制律为

$$\tau = \tau_a + J^T(q) [F_m^* + F_j^*] + f_c \quad (17)$$

其中 τ_a 为前馈动力学补偿向量,由希望轨迹按(1)式求得

$$\tau_a = D(q_a)\dot{q}_a + Q(q_a, \dot{q}_a) + G(q_a) - J^T(q_a)F_a \quad (18)$$

又由机器人的运动学方程

$$X = F(q) \quad (19)$$

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (20)$$

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (21)$$

可将 τ_a 表示为

$$\tau_a = f(X_a, \dot{X}_a, \ddot{X}_a, F_a) \quad (22)$$

于是,控制器(17)的结构如图 2 所示。该控制器实现时, τ_a 的求解可分两步进行,第一步按(19)~(21)式求解关节空间希望运动轨迹 $\{q_a, \dot{q}_a, \ddot{q}_a\}$, 第二步按(18)式求解 τ_a 。

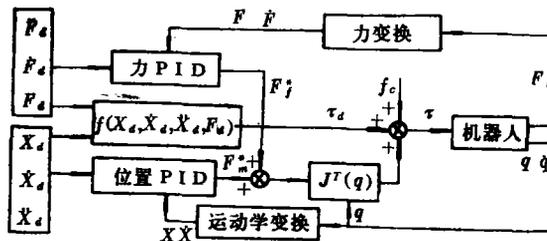


图 2 采用前馈动力学补偿的位置/力混合控制器结构图

可以看出,该控制器仅仅补偿沿希望轨迹的机器人非线性动力学,因而它并未实现机器人系统的完全解耦。然而,考虑到实际轨迹与希望轨迹之间的偏差很小,这种前馈补偿是足够充分的。该控制器的优点在于前馈力矩 τ_a 的计算并不需要任何在线信息,当希望轨迹事先已知时,前馈力矩的计算可以离线进行。因而可以大大减小在线计算量,提高采样频率。

4 仿真结果

针对图3所示的三自由度PUMA式机器人,我们对采用重力补偿的机器人位置/力控制器(GC-PFC)^[1]、采用实时动力学补偿的机器人位置/力控制器(RTDC-PFC)以及采用前馈动力学补偿的机器人位置/力控制器(FDC-PFC)进行了仿真。本节将给出部分仿真结果。以比较这三种控制器的有效性。

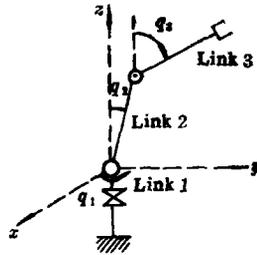


图3 仿真用机器人

图3所示的机器人的结构参数为:杆1的转动惯量 $I_1=0.2\text{Kg}\cdot\text{m}^2$;杆2和杆3的长度 $l_2=l_3=0.5\text{m}$,质量 $m_2=10\text{Kg}$, $m_3=8\text{Kg}$;夹手质量 $m_H=2\text{Kg}$,考虑机器人与环境为 $Z=0$ 的平面接触并产生力相互作用。为此,取 x 和 y 方向为位置控制方向, z 方向为力控制方向。

考虑力传感器的刚度 $K_s=10^5\text{N/m}$,作者就软环境(其刚度 $K_e=10^3\text{N/m}$)和硬环境($K_e=10^8\text{N/m}$)对三种控制器进行了仿真。仿真结果表明,环境刚度、采样周期、机器人运动速度、希望力的变化快慢、以及环境运动速度等对系统的控制性能产生很大的影响^[1]。这里仅给出 $K_e=10^8\text{N/m}$ 、采样周期为 5ms 情形下的仿真结果。仿真针对如下四种典型情形进行:

(1) 夹手在 xoy 平面内作圆周运动(单位为米)

$$x=0.5+0.1\sin\omega_1 t, \quad y=0.1\cos\omega_1 t \quad (23)$$

而 z 方向的希望力为方波;

(2) 夹手在 xoy 平面内作(23)式给出的圆周运动, z 方向采取零力控制方式。即 $F_d=0$;

(3) 夹手的希望位置为 $(0.5, 0.1, 0)$, z 方向的希望作用力为正弦波形(单位为牛顿N)

$$F_d=15+2.5\sin\omega_2 t \quad (24)$$

(4) 夹手的初始位置处于 $(0.5, 0.1, 0)$, 环境发生运动(单位为米)

$$z_e=0.1\sin\omega_3 t \quad (25)$$

且要求夹手对环境的作用力为恒力 10N 。

取控制器增益矩阵

$$K_{PP} = \begin{bmatrix} 400 & & \\ & 400 & \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{FP} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 0 & \\ & & 2.5 \end{bmatrix}$$

$$K_{PI} = K_{FI} = 0$$

$$K_{PD} = \begin{bmatrix} 40 & & \\ & 40 & \\ & & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{FD} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 0 & \\ & & 0.01 \end{bmatrix}$$

三种控制器的方波力跟踪曲线如图 4 至图 6 所示，对应的位置误差曲线如图 7 至图 9 所示，($\omega_1=2\pi$)；三种控制器在环境运动情况下的恒力跟踪曲线如图 10 至图 12 所示，对应的位置误差曲线如图 13 至图 15 所示($\omega_3=\pi$)。

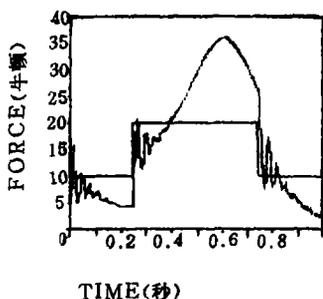


图 4 GC-PFC 方波力跟踪

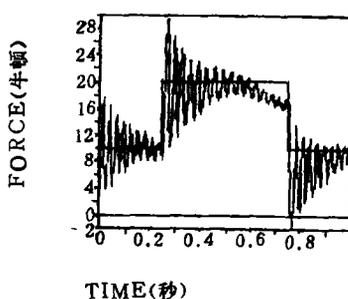


图 5 FDC-PFC 方波力跟踪

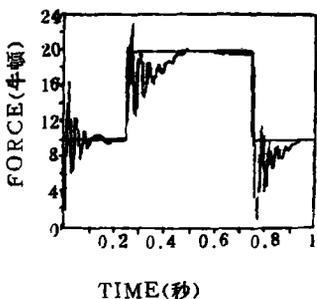


图 6 RTDC-PFC 方波力跟踪

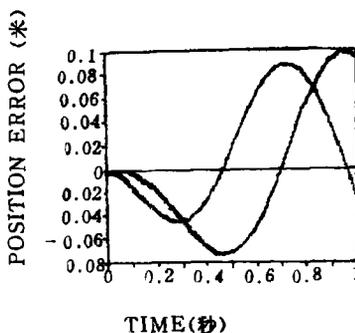


图 7 GC-PFC 位置误差——方波力情形

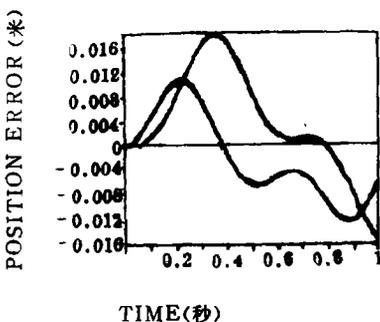


图 8 FDC-PFC 位置误差——方波力情形

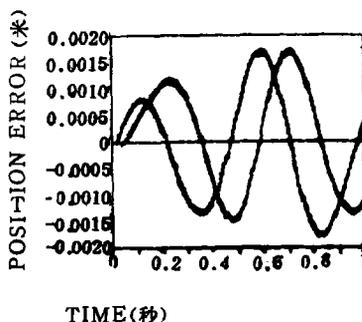


图 9 RTDC-PFC 位置误差——方波力情形

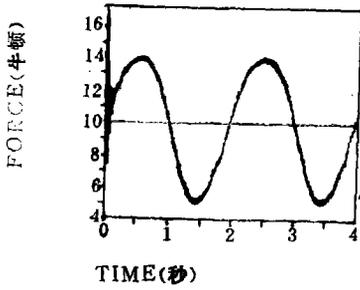


图 10 GC-PFC 环境运动下恒力跟踪

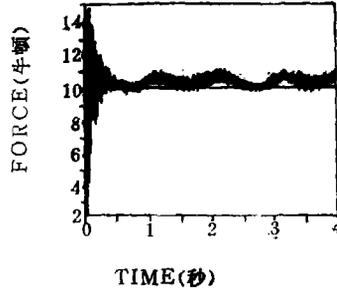


图 11 FDC-PFC 环境运动下恒力跟踪

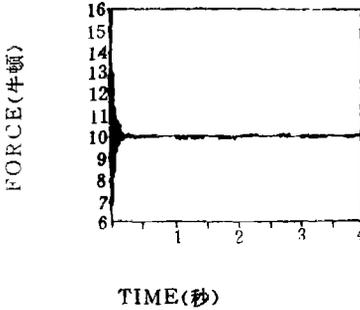


图 12 RTDC-PFC 环境运动下恒力跟踪

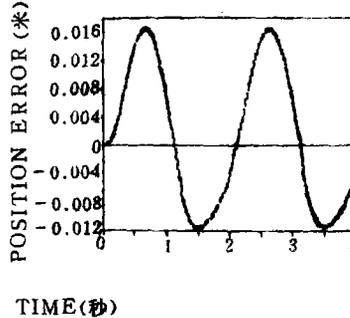


图 13 GC-PFC 位置误差——环境运动、恒力情形

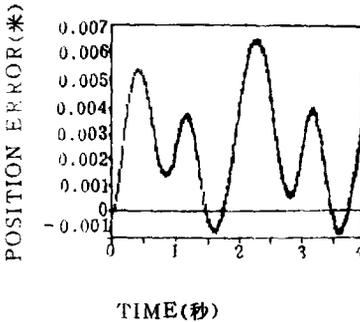


图 14 FDC-PFC 位置误差
——环境运动、恒力情形

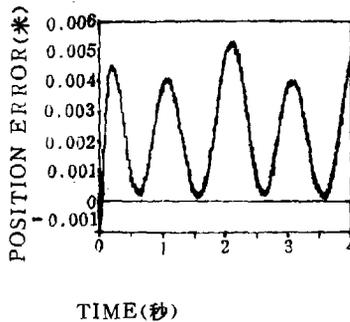


图 15 RTDC-PFC 位置误差
——环境运动、恒力情形

可以看出，在方波力跟踪情形下，尽管当 $\omega_1 = \pi/2$ 时 GC-PFC 仍具有良好的控制性能^[1]，但当机器人运动速度加大， $\omega_1 = 2\pi$ 时 GC-PFC 的控制性能变得很差，而由于动力学补偿的引入，RTDC-PFC 和 FDC-PFC 均具有远远优于 GC-PFC 的控制性能，且采用实时动力学补偿的 RTDC-PFC 的控制性能最佳。同样地，在环境运动及恒力跟踪情形下，RTDC-PFC 的控制性能最好，FDC-PFC 次之，GC-PFC 最差。所以，有效的动力学补偿在机器人位置/力控制中十分重要。

在零力控制方式下可得到类似上述的结论（仿真结果略）。然而，在正弦波形力跟踪的情形下，三种控制器的控制效果相近。因此，动力学补偿的引入并不能改善机器人跟踪快速力变化的能力。

4 结 束 语

本文采用前馈动力学补偿和实时动力学补偿两种设计方法,提出了两种机器人位置/力混合控制器。仿真结果表明,由于动力学补偿的引入,机器人位置/力混合控制系统的性能得到明显改善。

机器人力控制中还有许多问题有待进一步研究,如环境刚度很大会导致控制性能很差,甚至出现不稳定现象,当环境刚度未知时如何选取反馈增益,等等。为此,作者正在研究能自动适应环境刚度的自适应位置/力控制系统。

参 考 文 献

- [1] 刘美华, 常文森. 机器人位置/力控制系统的稳定性. 机器人, 1988; (3), 13~19
- [2] Raibert M H and Craig J J. Hybrid Position/Force Control of Manipulators. ASME J. DSMC. 1981; 102:126~133
- [3] Khatib O and Burdick J. Motion and Force Control of Robot Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1986:1381~1386
- [4] Whitney D E. Historical Perspective and state of the Art in Robot Force Control. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1985:262~268
- [5] An C H, Atkeson C G and Hollerbach J M. Experimental Determination of the Effect of Feedforward Control on Trajectory Tracking Errors. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1986:55~60

Two Hybrid Position/Force Controllers with Dynamics Compensation for Robot Manipulators

Liu Meihua Chang Wensen

Abstract

By using feedforward dynamics compensation and real-time dynamics compensation, two hybrid position/force controllers are proposed for robot manipulators. The effectiveness of these dynamics compensations is shown by simulation results. The performances of the hybrid position/force control system are obviously improved due to these dynamics compensations.

key words: robotic manipulator, controller, position/force, Compliant motion, dynamics compensation