

双机械手对称式协调力控制稳定性分析*

张辉 张彭 常文森 韦庆

(国防科技大学自动控制系统 长沙 410073)

摘要 本文利用双机械手协调内力和外力控制系统的简化模型,分析了在双手紧夹持物体与环境接触时,1)机械手等效电机的动态特性;2)双手所夹持物体的刚度;3)双手所操作物体的动态特性;4)机械手的采样控制延时;5)双手的非对称性等系统未建模因素对双手对称式协调外力和内力控制稳定性的影响,并给出仿真结果。此结果与实验结果基本相符。

关键词 双手协调,力控制,稳定性分析

分类号 TP242

Analysis of the Force Control Stability of the Symmetric Coordination of Two Robots

Zhang Hui Zhang Peng Chang Wensheng Wei Qing

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

Abstract In this paper, when two robots rigidly grasp an object to contact the ground, using the simplified model of the two symmetric coordinated robots, we analyze the effect on the stability of the internal force and external force symmetric control system due to the unmodeled factors: (1) the equivalent motor dynamic of robot, (2) the stiffness of the object grasped by two robots, (3) the dynamic of the object, (4) the sampling control delay of the computer control, (5) the dissymmetry of two robots. Then the results of the simulations are given, which accord with the experimental results.

Key words Two coordinated robots, force control, stability analysis

双机械手协调系统与单机械手相比具有更高的负载能力、灵活性和效率^[1],此外它还能完成单个机械手所不能完成的任务。在众多的双手协调方法中,Uchiyama和Dauchez^[2]所提出的对称协调从人的双手协调本质出发,假设双手紧夹持物体可施加所有方向的力和力矩、双手之间无相对位移、忽略物体的质量,定义了完备的相互正交的外力/内力和绝对运动/相对运动空间,推导出与单机械手形式一致的双手系统动力学方程。力控制算法普遍存在系统响应速度和稳定性之间的矛盾。An和Hollerback^[3]把这个问题称为机械手的动力学不稳定性问题,指出在与高刚度环境接触时,力传感器反馈的高增益特性是造成机械手力控制不稳定的原因。韦庆、常文森和张彭^[4]在此基础上利用机械手与环境接触的简化模型,分析了单机械手力控制的稳定性,指出机械手的电机特性、环境刚度和控制器采样控制延时是影响机械手力控制稳定性的重要因素。本文将利用双机械手协调内力和外力控制系统的简化模型,分析双机械手系统未建模因素对双手对称式力控制稳定性的影响,并给出仿真结果,此结果与实验结果基本一致。

1 双机械手协调内力和外力控制模型的简化

本文将包括物体在内的双手协调内力和外力控制系统简化成为多个质量-弹簧-阻尼系统,这样能使人更容易理解各种未建模因素对双手对称式协调力控制稳定性的影响。双机械手系统的全动力学模型是一个非线性的、时变的和耦合的多维微分方程组,在双机械手紧夹持物体与环境点接触假设^[2]的情

* 国家自然科学基金项目资助

1998年12月24日收稿

第一作者:张辉,男,1971年生,博士生

况下,由于物体和环境的约束,在力控制的方向上机械手只能做微动,因此可以对机械手的动力学模型进行局部线性化。

假设 x 方向为力控制方向。将双机械手紧夹持物体与环境接触的模型简化为如图 1 所示。图中, $k_i (i=1, 2)$ 分别是机械手与物体的接触刚度; $b_i (i=1, 2)$ 和 $b_{ri} (i=1, 2)$ 分别是机械手与物体以及与环境的速度阻尼系数; k_e 和 b_e 分别是物体与环境的接触刚度和速度阻尼系数; $m_i (i=1, 2)$ 和 m_b 分别是机械手和物体在 x 方向上的等效质量; $f_{ci} (i=1, 2)$ 分别是机械手的控制力; $x_i (i=1, 2)$ 、 x 和 $x_{i0} (i=1, 2)$ 、 x_0 是机械手和物体的位置和它们的初始位置。如果取

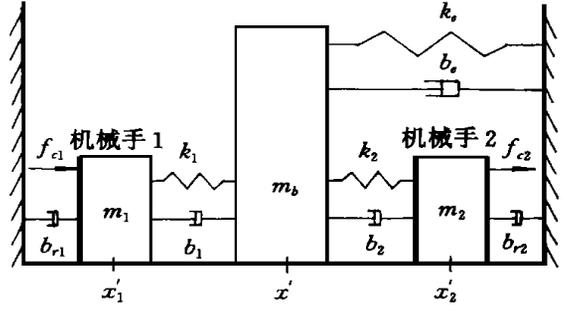


图 1 双机械手的简化接触模型

Fig. 1 The simplified contact model of two robots

$$x_1 = x_1 - x_{10}, x_2 = x_2 - x_{20}, x = x - x_0, x_0 = \frac{(x_{10} + x_{20})}{2}$$

则 $\dot{x}_1 = \dot{x}_1, \dot{x}_2 = \dot{x}_2, \dot{x} = \dot{x}; \ddot{x}_1 = \ddot{x}_1, \ddot{x}_2 = \ddot{x}_2, \ddot{x} = \ddot{x}$

那么双机械手的控制模型和物体的运动模型分别为

$$m_1 \ddot{x}_1 + (b_1 + b_{r1}) \dot{x}_1 + k_1 x_1 = f_{c1} + k_1 x + b_1 \dot{x} \tag{1}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (b_2 + b_{r2}) \dot{x}_2 + k_2 x_2 = f_{c2} + k_2 x + b_2 \dot{x} \tag{2}$$

$$m_b \ddot{x} + (b_1 + b_2 + b_e) \dot{x} + (k_1 + k_2 + k_e) x = k_1 x_1 + k_2 x_2 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 \tag{3}$$

根据双机械手对称式协调的定义^[2]

$$f_a = -k_1(x - x_1) + k_2(x_2 - x), f_r = \frac{1}{2}[-k_1(x - x_1) - k_2(x_2 - x)]$$

$$x_a = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) + x_0, x_r = x_1 - x_2$$

其中, f_a 定义为外力, 表示物体对环境的作用力, f_r 定义为内力, 表示物体所受到的压缩或拉伸力; x_a 定义为绝对位置, 表示物体质心的位置; x_r 定义为相对位置, 表示两个机械手的相对位置。

对于外力和内力控制, 我们分别取相近的 PD 控制率, 其中 f_{af} 和 f_{rf} 分别是外力和内力控制力, 则机械手 1、2 的控制力分别为,

$$f_{c1} = \frac{1}{2}f_{af} + f_{rf}, f_{c2} = \frac{1}{2}f_{af} - f_{rf}$$

$$f_{c1f} = k_{pfa}(f_{ad} - f_a) + k_{dfa}(x_{ad} - x_a) + f_{ad}, f_{c2f} = k_{pfr}(f_{rd} - f_r) + k_{dfr}(x_{rd} - x_r) + f_{rd}$$

其中, k_{pfa} 、 k_{pfr} 分别是外力和内力的比例增益系数, k_{dfa} 、 k_{dfr} 分别为外力和内力的速度阻尼系数, f_{ad} 、 f_{rd} 分别是外力和内力的指令力。由于在实际控制中, 力微分量一般无法精确地直接获取, 我们用速度误差来代替力微分量的误差。

2 外力/内力控制稳定性分析

下面分别建立双手协调系统外力和内力控制的动力学方程。如果忽略物体质量和各种阻尼; 设两机械手的等效质量相同, $m_1 = m_2 = m$; 再考虑到物体在力控制方向上弹性性质一致, 可以设物体与两机械手之间的刚度相同, $k_1 = k_2 = k$; 利用(3)式, 则(1)、(2)式可分别简化为

$$m(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + \frac{kk_e}{2k + k_e}(x_1 + x_2) = f_{c1} + f_{c2} = f_{af} \tag{4}$$

$$m(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) + k(x_1 - x_2) = f_{c1} - f_{c2} = 2f_{rf} \tag{5}$$

上两式经化简和拉氏变换, 可得

$$[ms^2 + \frac{k_{dfa}}{2}s + (1 + k_{pfa})\frac{kk_e}{2k + k_e}]x_a(s) = input_term \tag{6}$$

$$[ms^2 + 2k_{df} s + (1 + k_{pfr})k]x_r(s) = input_term2 \quad (7)$$

其中, $input_term$ 是指令输入量。从(6)、(7)式可以看出外力和内力的闭环分别是一个二阶方程, 位置反馈增益分别为 $(1 + k_{pfa}) \frac{k k_e}{2k + k_e}$ 和 $(1 + k_{pfr})k$ 。从稳定性的角度来看, 外力和内力的反馈分别相当于很高增益的绝对位置和相对位置的反馈, 而且为了减少控制的稳态误差, 我们还要取尽可能大的反馈增益。理想系统的临界阻尼参数分别为

$$k_{dfa}^2 = 16m(1 + k_{pfa}) \frac{k k_e}{2k + k_e}, k_{dfr}^2 = m(1 + k_{pfr})k \quad (8)$$

从上面的分析可以看出, (6)和(7)式是闭环稳定的系统, 所以双手对称式协调的外力和内力控制的不稳定性不在于力控制算法的本身, 而是由于在应用这种算法时, 双机械手协调系统的其他未建模因素对系统稳定性的影响, 下面我们分别考虑这些未建模因素对系统稳定性的影响。

2.1 机械手电机的动态特性的影响

我们可以把力控制方向上等效电机驱动的动态特性建模为一阶惯性环节^[4]

$$f_{c1}(s) = \frac{\lambda_1}{T_1 s + 1} f_{c1}(s), f_{c2}(s) = \frac{\lambda_2}{T_2 s + 1} f_{c2}(s)$$

其中, T_1, T_2 和 λ_1, λ_2 分别是机械手 1、2 的等效电机的时间常数和增益, 为了简化问题, 我们设 $T_1 = T_2$

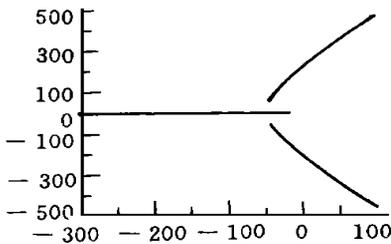


图 2(a) 考虑等效电机特性的外力控制闭环根轨迹

Fig. 2(a) The close-loop root locus of the external force control with considering the equivalent motor effect

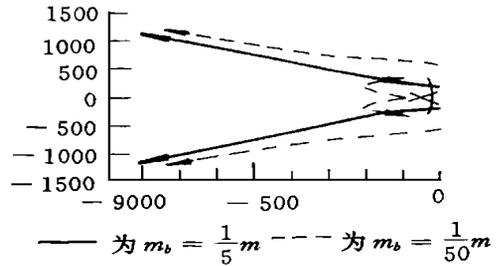


图 2(b) 考虑物体质量的外力控制闭环根轨迹

Fig. 2(b) The close-loop root locus of the external force control with considering the object mass

$= T, \lambda_1 = \lambda_2 = 1$ 。可得到

$$[mT s^3 + ms^2 + (\frac{k_{dfa}}{2} + \frac{k k_e}{2k + k_e} T) s + \frac{k k_e}{2k + k_e} (1 + k_{pfa})] x_a(s) = input_term3$$

$$[mT s^3 + ms^2 + (kT + 2k_{dfa}) s + k(1 + k_{pfa})] x_a(s) = input_term3$$

取 k_{dfa} 为临界阻尼值, 得到系统外力控制的闭环根轨迹为图 2(a), 内力控制的闭环根轨迹与之类似。由此可以看出, 机械手的等效电机驱动特性使得外力和内力控制均变为三阶系统, 都出现了两个趋于不稳定的极点, 所以它是影响力控制稳定性的一个重要因素。

2.2 物体动态特性的影响

如果双手所夹持的物体质量与机械手的等效质量相比无法忽略时, 在忽略各种阻尼的情况下, 可以得到

$$\begin{aligned} & [mmbs^4 + \frac{k_{dfa} m b}{2} s^3 + [(2K + k_e)m + (1 + k_{pfa}) k m b] s^2 + \\ & \frac{k_{dfa} (2K + k_e)}{2} s + k k_e (1 + k_{pfa})] x_a(s) = input_term4 \\ & [ms^2 + 2k_{df} s + (1 + k_{pfr})k] x_r(s) = input_term5 \end{aligned}$$

可见物体的动态性质不会影响内力控制而只是影响外力控制, 给外力控制的系统增加了两个极点。从图 2(b) 中可以看出, 外力控制虽然是稳定的, 但系统有两个极点随着物体质量的增大超向虚轴, 这就相当

于减小了外力控制的稳定域。

2.3 机械手控制器的采样控制延时及其它因素的影响

由于双机械手对称式协调力/位置控制算法十分复杂,再加上机械手动力学补偿项的计算开销,使得控制计算机的采样控制周期较长,实验研究证实控制计算机的采样控制周期的缩短对力控制的稳定性有限帮助,所以有必要在稳定性分析中考虑这个因素的影响。

考虑到控制计算机的采样控制延时,外力和内力控制力矩分别为

$$f_{ga}(n+1) = k_{pfa}(f_{ad}(n) - f_a(n)) + k_{dfa}(x_{ad} - (x_a(n) - x_a(n-1))/T_s) + f_{ad}(n)$$

$$f_{gr}(n+1) = k_{pfr}(f_{rd}(n) - f_r(n)) + k_{dfr}(x_{rd} - (x_r(n) - x_r(n-1))/T_s) + f_{rd}(n)$$

其中, T_s 是计算机的采样控制周期。将上两式带入到系统离散化的状态方程,其中的各项参数均取双手协调控制线性简化时的典型值,对于不同的采样延时可得到下面的结果。

在仅考虑控制延迟时系统的稳定区域如图 3(a)和图 3(b)。在考虑机械手等效电机动态特性,系统的稳定区域如图 4(a)和图 4(b)。与图 3(a)和图 3(b)比较,其稳定域减少了。

在完成的过程中,双机械手之间可能存在非对称性。由于机械手的惯性系数矩阵是关节角的函数,当两只机械手处于不同的位姿时,它们的等效质量将会不同。在不考虑等效电机特性,取 $m_1 = 2m_2$,系统稳定区域如图 5(a)和图 5(b)。与图 3(a)和图 3(b)比较,双手等效质量的不平衡也会减小对称力控制的稳定域。而在实验中这种情况往往是最一般的情况,两个机械手之间无法保证绝对的对称。

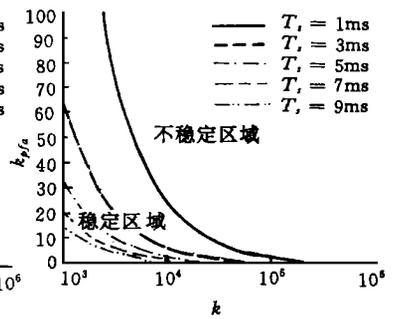
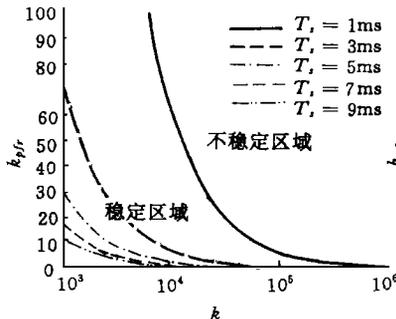
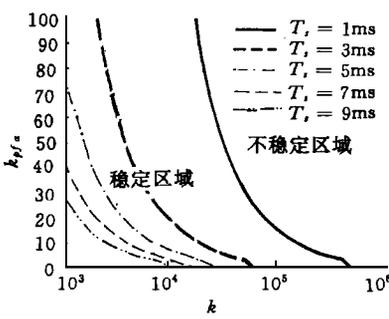


图 3(a) 外力控制的稳定区域

图 3(b) 内力控制的稳定区域

图 4(a) 外力控制的稳定区域

Fig. 3(a) Stable domain of the external force control

Fig. 3(b) Stable domain of the internal force control

Fig. 3(a) Stable domain of the external force control

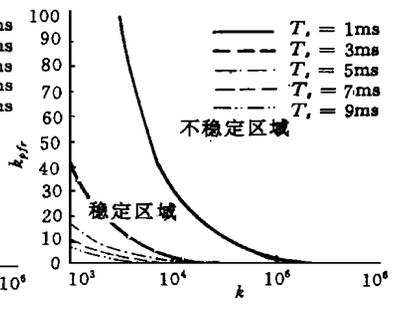
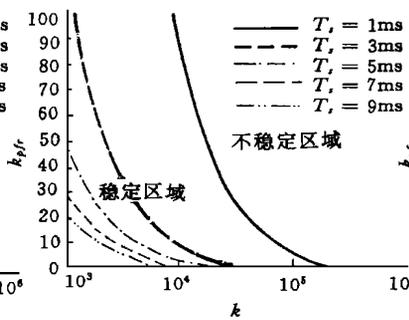
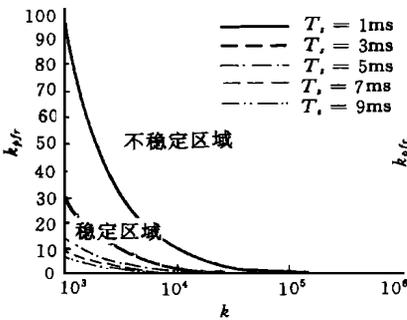


图 4(b) 内力控制的稳定区域

图 5(a) 外力控制的稳定区域

图 5(b) 内力控制的稳定区域

Fig. 4(b) Stable domain of the internal force control

Fig. 5(a) Stable domain of the external force control

Fig. 5(b) Stable domain of the internal force control

如果双手所夹持的物体的质量无法忽略,在不考虑等效电机特性时,将物体的质量增大 10 倍,系统的外力控制的稳定区域如图 6,系统内力控制的稳定区域与图 3(b)相同。可见物体质量的增大只会减小外力控制的稳定域,而对内力控制没有影响。

以上各图都是在 k_{dfa} 和 k_{dfr} 取临界阻尼值情况下获得的, 各曲线的上半区域是不稳定区域, 下半区域是稳定区域。在实验中我们发现, 虽然增加 k_{dfa} 和 k_{dfr} 可以在某种程度上增强外力和内力控制的稳定性, 但当它们增加到一定值时, 不仅不能增强系统的稳定性, 而且会造成系统的震荡, 破坏系统的稳定, 这主要是由离散控制的特性所造成的。

3 仿真结论

(1) 机械手的电机特性是影响内力和外力控制的重要因素。

(2) 由于我们假设物体在力控制方向上弹性性质一致, 双机械手和物体之间的刚度与物体和环境的刚度是一致的, 物体的刚度成为影响内外力控制的重要因素。当物体的刚度很高时, PD 控制率很难保证内力和外力控制的稳定性。

(3) 当双手所夹持物体的质量与机械手的等效质量相比无法忽略时, 它只会影响外力控制的稳定性, 而对内力控制的稳定性没有影响。

(4) 采样控制延时是影响外力和内力控制稳定性的至关重要的因素, 有必要尽可能简化系统模型补偿的计算, 减少采样控制延时, 以保证系统的稳定性。

(5) 双手的不对称性(双机械手的等效质量不同)也能影响内力和外力控制的稳定性, 有必要改进控制算法, 减少对这部分参数的敏感性。

4 实验验证

在我们开发的 GKDF-2 双机械手系统上, 实现了双手对称协调得力/位置混合控制算法, 由于双手系统的模型十分复杂, 虽然将各种补偿计算分解到两个 MC68040 单板机上执行, 采样控制周期仍然为 7.0ms。我们进行了多次实验, 得到了双手对称式协调外力和内力控制的稳定区域, 与前面的仿真结果大致一样, 这就基本验证了我们前面的理论和仿真结果的正确性。

参考文献

- 1 Koivo A J, Bekey G. Report of Workshop on Coordinated Multiple Robot Manipulator: Planning, Control and Application. IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 1, pp91-93, 1988
- 2 Uchiyama M, Dauchez P. A Symmetric Hybrid Position/force Control Scheme for the Coordination of Two Robots. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp350-356, 1988
- 3 An C H, Hollerback J M. Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp890-897, 1987
- 4 韦庆, 常文森, 张彭. 机器人操作力控制稳定性分析. 机器人, Vol. 18, No. 3, pp173-178, 1996
- 5 Xu Y, Ma D, Hollerback J M. Nonlinear Proportional and Derivative Control for High Disturbance Rejection and High Gain Force Control. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp752-759, 1993

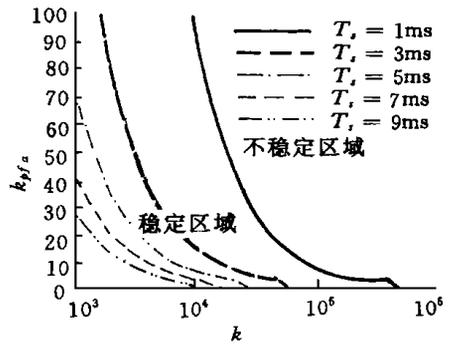


图6 外力控制的稳定区域

Fig. 6 Stable domain of the external force control