

机器人力控制器的鲁棒性设计及其在装配作业中的应用

戴铁成 蔡鹤皋 吴 林

(哈尔滨工业大学机械工程系, 150006)

摘要: 当机器人与外界环境发生接触时, 接触刚度等不确定性因素对机器人力控制系统的稳定性有很大影响. 为了解决这个问题, 本文根据变结构控制理论设计了一个机器人力控制器, 并提出了一种旋转滑动平面的自适应算法, 以加快系统状态的收敛速度和保证收敛过程的鲁棒性. 装配实验结果表明, 利用本文的方法所设计的机器人力控制器对接触刚度的变化具有很好的鲁棒性.

关键词: 变结构控制; 鲁棒控制; 机器人; 时变滑动平面; 力控制系统

1 引言

机器人是一个非常复杂的非线性系统, 各关节之间的动态耦合、载荷的变化、以及传动间隙等因素的存在, 使其动力学模型的参数存在着不确定性. 当机器人与外界环境发生接触时, 环境刚度的变化对机器人力控制系统的性能有很大的影响, 这就出现了鲁棒性问题. 根据变结构系统理论, 在滑动模式时, 系统运动对参数变化和干扰不敏感, 因此, 变结构控制在机器人领域已受到了重视^[1,2,3].

目前各种变结构控制方法普遍存在的问题是: 系统在从初始状态向滑动平面的收敛过程中, 处于正常的反馈控制下, 其轨迹对参数变化很敏感, 而且这种收敛是渐近的, 使得变结构控制的优点难以实现. 文献[4]提出了加大反馈增益的方法, 以提高系统的收敛速度, 缺点是大反馈增益对系统建模时忽略的动态、驱动器饱和等特别敏感. 本文提出了一种选择滑动平面的自适应方法, 通过不断旋转滑动平面来缩短正常反馈控制的时间, 加快系统状态的收敛速度. 本文同时还讨论了直角坐标机器人力控制器的设计方法, 并利用所设计的力控制器进行了装配作业实验.

2 机器人装配作业的力控制

1) 机器人装配作业简介

按机器人受控制情况划分, 装配作业可以分为两个阶段:

i) 位置控制阶段. 此时, 机器人在自由空间运动, 不受外界环境约束, 其控制器称为位置控制器.

ii) 力控制阶段. 当机器人与外界接触后, 如果仍采用原位置控制器, 过大的接触力将损坏机器人或零件, 因此, 当接触力达到某一定值后, 应使机器人停止运动, 切换控制器, 此控制器能够保持接触力为设定值. 这个阶段为机器人装配作业的关键阶段, 本文所设计

* 国家863高技术智能机器人专题资助课题.

本文于1991年11月13日收到, 1992年6月4日收到修改稿.

的力控制器就是针对此阶段进行的。

2) 机器人力控制器的设计

实际中所使用的是一个三自由度直角坐标机器人,下面以 x 轴为例,讨论力控制器的设计方法.机器人与外界环境发生接触后的动力学模型为

$$m\ddot{x}(t) = F_R(t) + u(t) + d(t). \quad (1)$$

式中 $u(t)$ 为驱动力, $d(t)$ 为干扰, $F_R(t)$ 为接触力

$$F_R(t) = -K_c x(t). \quad (2)$$

式中 K_c 为系统接触刚度, x 为系统总变形量.接触刚度对机器人力控制器的性能影响很大,而实际中很难给出准确值,只能采用其估计值 $\hat{K}_c$, 设

$$\frac{1}{2} \leq \frac{\hat{K}_c}{K_c} \leq 2. \quad (3)$$

由于载荷变化等影响,机器人有效移动质量也只能采用估计值 $\hat{m}$, 且

$$\frac{1}{2} \leq \frac{\hat{m}}{m} \leq 2. \quad (4)$$

干扰 $d(t)$ 主要来源于传动机构误差,其幅值

$$|d(t)| \leq D = 0.5N, \quad (5)$$

设期望的接触力为 F_d , 相应的误差信号为

$$\tilde{F} = F_R - F_d, \quad (6)$$

控制问题就是要保证 $\tilde{F}$ 等于零.

根据变结构控制理论,滑动模式存在的充分条件为

$$S\dot{S} \leq -\eta|S|. \quad (7)$$

式中 η 为一正常数,滑动平面 S 定义为

$$S(t) = \lambda \tilde{F}(t) + \dot{\tilde{F}}(t). \quad (8)$$

这里 λ 为系统有效控制频带宽度.

若系统初始状态 $\tilde{F}(t=0)=0$, 则控制问题就等价于在 $t>0$ 时,选择满足式(7)的控制律 u , 以保证系统状态留在 $S(t)=0$ 平面上.若 $\tilde{F}(t=0) \neq 0$, 则由式(7)可以求得系统到达 $S(t)=0$ 平面所需的时间为 $T \leq |S(t=0)|/\eta$.

在滑动模式控制中,控制量 $u(t)$ 由低频分量和高频分量两部分组成,即

$$u(t) = u_L(t) + u_H(t). \quad (9)$$

令 $\dot{S}=0$, 由式(1), (2)和(8)得

$$u_L(t) = -F_R(t) + \hat{m}\hat{K}_c^{-1}(-\dot{\tilde{F}}_d(t) + 2\lambda\dot{\tilde{F}}(t)). \quad (10)$$

选取

$$u_H(t) = \hat{m}\hat{K}_c^{-1}K\text{sgn}(S). \quad (11)$$

式中 sgn 为符号函数

$$\text{sgn}(S) = \begin{cases} 1, & S > 0, \\ -1, & S < 0. \end{cases}$$

为了满足滑动模式存在条件式(7),应有

$$K \geq \hat{K}_c\hat{m}^{-1}[3|u_L| + 4(D + \eta)]. \quad (12)$$

在实际中 $\dot{\tilde{F}}_d$ 测不到,只能采用其估计值

$$\dot{F}_E \approx -\hat{K}_c |\dot{x}|. \quad (13)$$

$\dot{F}_E$ 的不确定性将使滑动平面 S 变为不确定, 由 S 的定义可得

$$\Delta S = |\hat{K}_c - K_c| |\dot{x}| \leq \hat{K}_c |\dot{x}|. \quad (14)$$

为了解决实际系统中的高频震颤问题, 这里采用了文献[2]中的方法. 基本思想是定义一个边界层

$$B(t) = \{x, S^-(x, t) > 0 \text{ 且 } S^+(x, t) < 0\}. \quad (15)$$

在 $B(t)$ 外部, 仍维持原控制律式(9); 在 $B(t)$ 内部, 用近似的连续控制律代替原控制律, 即用饱和函数 $\text{sat}(S/\lambda\varepsilon)$ 取代式(11)中的 sgn , 其中

$$\text{sat}(y) = \begin{cases} y, & |y| \leq 1, \\ \text{sgn}(y), & |y| > 1. \end{cases} \quad (16)$$

这种方法会造成系统轨迹误差, 精度范围为 ε .

因此 $\tilde{F}$ 的跟踪精度是由两部分组成的, 其一是由于 $\dot{F}_E$ 不确定造成的, 其二来源于为抑制高频震颤采用近似的连续控制律.

3 滑动平面选择的自适应算法

当系统初始状态误差 $\tilde{F}(t=0)$ 不为零时, 系统状态在 T 时间内到达 $S=0$ 平面. 由 $S=0$ 得

$$F_E(t) = F_d(t) + \tilde{F}(t=0)e^{-\lambda t}. \quad (17)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, F_E 以指数形式趋向 F_d , λ 越大, 收敛速度越快. 但是, 过大的 λ 会破坏滑动模式存在的条件, 下面讨论选取 λ 的方法.

机器人动力学模型式(1)可重写为形如

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{K_c}{m}x_1 + \frac{1}{m}u(t). \end{aligned} \quad (18)$$

式中 $|u(t)| \leq L$.

设 λ 为大于零的常数, 滑动平面定义为

$$S = \lambda x_1 + x_2. \quad (19)$$

控制律为

$$u = -\text{sgn}(\lambda x_1 + x_2). \quad (20)$$

为了保证滑动模式存在, 应有 $S\dot{S} < 0$, 则得

$$\left| \lambda x_2 - \frac{K_c}{m}x_1 \right| \leq \frac{L}{m}. \quad (21)$$

如果 λ 变化, 点 (x_1, x_2) 描述了一条轨迹 C_0 , 由式(19)和式(21)求得 C_0

$$\begin{cases} x_2^2 + \frac{K_c}{m}x_1^2 - \frac{L}{m}|x_1| = 0, & |x_1| \leq \frac{L}{K_c}, \\ x_2 = 0, & |x_1| > \frac{L}{K_c}. \end{cases} \quad (22)$$

在图 1 中, 当系统状态落在阴影部分时, 满足滑动模式存在的条件. 因此可以进行滑动模式控制. 反之, 当系统状态运动到阴影部分以外时, 滑动条件被破坏, 滑动不再发生. 因此 λ 的选择必须保证系统状态不超出图 1 中的阴影部分.

在机器人装配作业的力控制阶段,系统所处的初始状态为 $x_1 > 0, x_2 = 0$, 系统从初态向期望的滑动平面运动时,处于正常反馈控制之下,此时系统对参数变化很敏感.为此本文提出了变 λ 法,使系统状态在向期望滑动平面的运动过程中,在满足滑动模式存在的前提下,不断地处于不同的滑动平面上(如图 2 所示),并尽快地接近期望滑动平面,就能使系统状态以尽可能短的时间向原点收敛,同时在收敛过程中对系统参数的变化具有鲁棒性.具体算法如下:

1) 在图 2 中,取 $\lambda = \delta, \delta$ 为一很小的正数,初始滑动平面为

$$P_1: \delta x_1 + x_2 = 0, \quad (23)$$

控制律为

$$u = -\operatorname{sgn}(\delta x_1 + x_2). \quad (24)$$

在式(24)的 u 作用下,系统状态从 P_0 驱动到 P_1 上的 A 点.由于 δ 足够小,满足式(21),滑动开始.

2) 当检测到滑动后,旋转滑动平面,使其恰好处于系统状态前面,即 $\lambda(t + \Delta) = \lambda(t)(1 + \Delta)$, Δ 为一小正数,则控制律变为

$$u = -\operatorname{sgn}[\delta(1 + \Delta)x_1 + x_2]. \quad (25)$$

如果检测滑动运动需要的时间很短,即 A 与 A' 重合,则式(25)简化为

$$u = -\operatorname{sgn}x_1 = \operatorname{sgn}x_2, \quad (26)$$

于是系统状态从 A 点被驱动到 P_2 上的 B 点,然后滑动又开始了.

3) 重复上述过程,当系统状态运动到 C 点时,滑动平面为

$$P_i: \lambda_i x_1 + x_2 = 0. \quad (27)$$

旋转 P_i 至 P_{i+1}

$$P_{i+1}: \lambda_i(1 + \Delta)x_1 + x_2 = 0. \quad (28)$$

在式(26)的 u 作用下,系统状态被驱动到 P_{i+1} 上的 D 点,由于 D 点已超出 C_0 ,即

$$x_1[\lambda_i(1 + \Delta)x_1 + x_2] < 0 \quad (29)$$

滑动条件被破坏,没有滑动发生,系统状态将沿着抛物线运动到 E 点,滑动才又重新开始.如果 Δ 很小($\Delta \rightarrow 0$),则系统状态对 C_0 的过冲也很小,可以忽略,这样就保证了系统状态在滑动模式控制下向原点运动.

由于 λ 要受实际系统有效频带宽度等因素的限制,不能无限增大,设 $\lambda \leq \lambda_0$,则在上述算法中

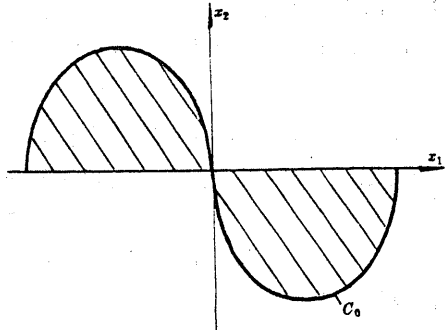


图 1 系统状态滑动存在区

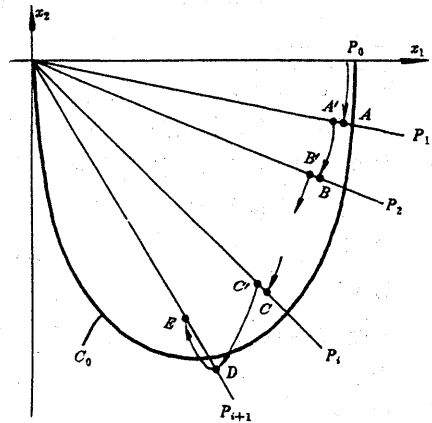


图 2 变 λ 控制算法

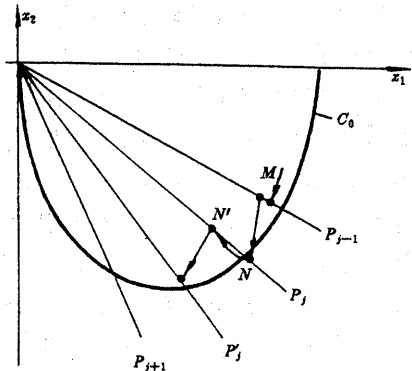


图 3 λ 为有限时的控制算法

应加入图 3 部分:

当系统状态在 M 点发生滑动后, 旋转滑动平面至

$$P_j: \lambda_{j-1}(1+\Delta)x_1 + x_2 = 0. \quad (30)$$

在式(26)的 u 作用下, 系统状态被驱动到 P_j 上的 N 点, 因为 N 点已超出 C_0 , 系统状态沿抛物线运动到 N' 滑动开始, 接着旋转 P_j 至 P_{j+1} , 因为此时有 $\lambda_j(1+\Delta) \geq \lambda_0$, 所以令滑动平面为

$$P'_j: \lambda_0 x_1 + x_2 = 0. \quad (31)$$

控制律为

$$u = -\operatorname{sgn}(\lambda_0 x_1 + x_2). \quad (32)$$

式(32)将把系统状态驱动到期望的滑动平面 P'_j 上, 然后利用式(9)控制系统状态沿着 P'_j 向状态原点运动.

4 实验结果及分析

为了验证本文所述的方法, 我们利用所设计的机器人力控制器进行了机器人装配作业实验, 实验中使用的具体参数如下:

机器人有效移动质量	$m=1.8\text{kg}$,
载荷重量	$m_p=0.4\text{kg}$,
系统接触刚度	$K_c \approx 7000\text{N/m}$,
控制系统频带宽度	$\lambda_0=50\text{Hz}$,
扰动幅值	$D \leq 0.5\text{N}$.

图 4(a)与(b)分别是 $\hat{K}_c=6000\text{N/m}$ 和 $\hat{K}_c=8000\text{N/m}$ 时系统的相轨迹图.

它描述了系统状态在滑动模式控制器作用下从初始状态向状态原点运动的动态过程, 经过一段时间调整后, 系统状态进入到边界层 $B(t)$ 内部, 并留在 $B(t)$ 内部. 图 5(a)与(b)分别为 $\hat{K}_c=6000\text{N/m}$ 和 $\hat{K}_c=8000\text{N/m}$ 时的驱动力矩曲线, 从图中可见, 经过一段时间调整, 即系统状态进入至 $B(t)$ 内部后, 驱动力矩将变为连续曲线. 图 6(a)与(b)分别

为 $\hat{K}_c=6000\text{N/m}$ 和 $\hat{K}_c=8000\text{N/m}$ 时的接触力曲线, 从图中可见, 尽管系统接触刚度估计值 $\hat{K}_c$ 与实际的 K_c 不符, 但控制系统能够调整接触力 F_R , 使得 $\tilde{F}$ 趋于零. 比较图 6(a)与(b)还可发现, 当取 $\hat{K}_c=6000\text{N/m}$ 时, 即估计值低于实际值, 则系统调整时间较短; 反之, 当 $\hat{K}_c=8000\text{N/m}$ 时, 即过高地估计了系统接触刚度, 则系统的调整时间较长, 系统响应能力降低, 但无论过低还是过高地估计了系统的接触刚度, 系统是稳定的. 如图 6(a), $\hat{K}_c=6000\text{N/m}$ 时, 调整时间约为 1.7 秒, 在图 6(b)中, $\hat{K}_c=8000\text{N/m}$ 时, 调整时间约为 2.1 秒. 这说明了利用变结构理论设计的机器人力控制器对系统参数的变化具有较好的鲁棒性.

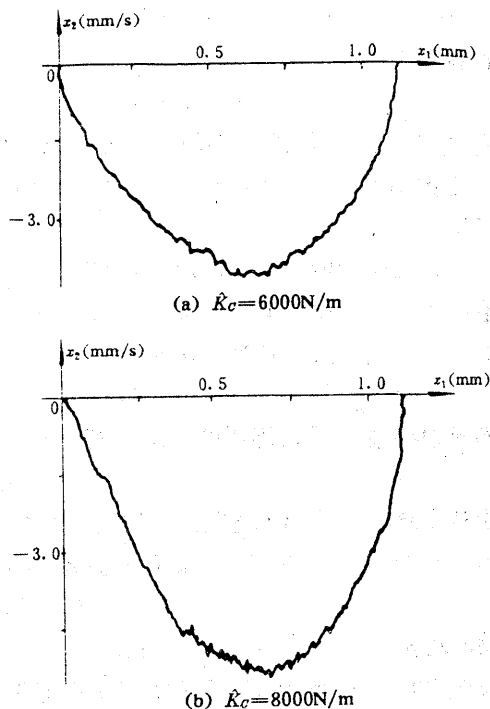


图 4 不同 $\hat{K}_c$ 的相轨迹

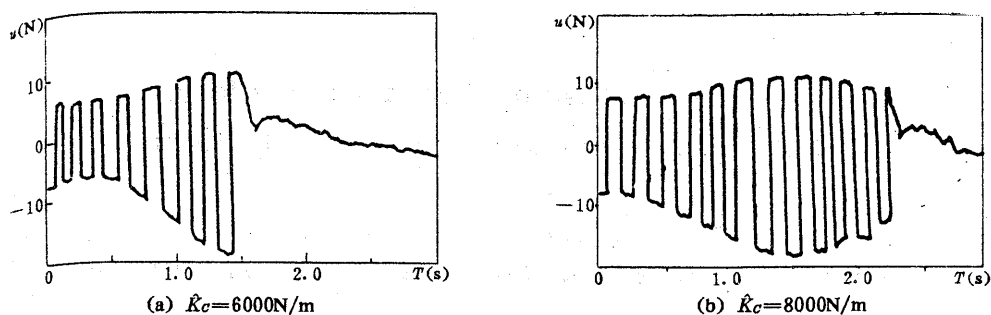


图 5 驱动力矩曲线

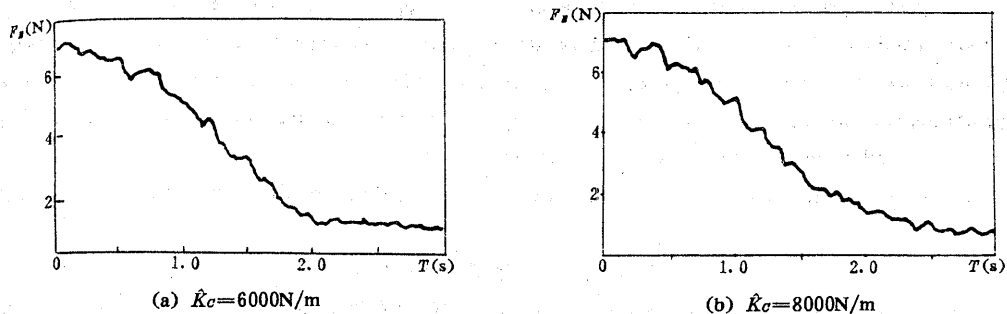


图 6 接角力曲线

5 结 论

本文对机器人装配作业的滑动模式力控制进行了详细的讨论,得到如下结论:

- 1) 利用本文提出的旋转滑动平面法选择 λ , 可以加快系统状态的收敛速度, 缩短正常反馈控制的时间, 提高系统的抗干扰能力。
- 2) 机器人装配作业的实验表明: 本文所设计的机器人力控制器对接触刚度的变化具有很好的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] Young, K.. Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure System. IEEE Trans. on SMC, 1978, SMC-8(2); 251—259
- [2] Slotine, J.. Sliding Controller Design for Nonlinear Systems. Int. J. Control, 1984, 40(2); 485—492
- [3] Hashimoto, H. and Harashima, F.. Variable Structure Strategy in Motion Control. IFAC Symp. Infor. and Contr. Problems in Manufacturing Tech., Tokyo, 1987
- [4] Young, K. and Kokotovic, P.. A Singular Perturbation Analysis of High Gain Feedback Systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1977, AC-22

Robustness Design of Force Controller for a Robot and Its Applications to Assembly Tasks

DAI Tiecheng, CAI Hegao and WU Lin

(Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology • Harbin, 150006, PRC)

Abstract: When a robot makes contact with external environments, some uncertainties from the contact stiffness have great effects on the stability of the force control system of the robot. To solve the problem, a robot force controller was designed using the theory of variable structure control. An algorithm of rotating sliding surfaces was suggested to increase the convergence speed of the system state and ensure robustness of the system during the convergence course. The experiment results of the robotic assembly shown that the robot force controller designed in this paper was robust to the variations of the contact stiffness.

Key words: variable structure control; robust control; robot; time-varying sliding surface; force control

本文作者简介

戴铁成 1962年生. 1984年毕业于哈尔滨工业大学机械工程系, 分别于1987年和1990年在哈尔滨工业大学获工学硕士和博士学位. 现在哈尔滨工业大学材料科学与工程博士后流动站做博士后研究, 发表论文20余篇. 主要研究工作兴趣包括传感器技术, 机器人动力学与控制, 和人工智能等.

蔡鹤皋 1934年生. 1959年毕业于哈尔滨工业大学, 现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长, 机械工程系教授, 博士生导师. 主要研究领域包括测量技术和机器人学等.

吴林 1935年生. 1960年毕业于哈尔滨工业大学, 现任哈尔滨工业大学副校长, 金属材料与工艺系教授, 博士生导师. 主要研究领域包括机器人学与焊接自动化等.