

双机械臂协调： 以运动学为基础的模型分析与动态补偿控制方法

顾新兴

冯纯伯

(山东纺织工学院光学所·青岛, 266033) (东南大学自动化所·南京, 210018)

刘伟 黄亚楼 蒋喜华 安刚 刘景泰 卢桂章

(863 南开大学机器人控制理论与方法网点实验室·天津, 300071)

摘要: 本文建立了双机械臂协调系统的主从式控制的非结构模型, 并针对两臂具有相同特性和不同特性这两种情形作了稳定性分析, 提出特性校正的方法, 本文还利用内模原理设计出动态补偿器来克服标定约束的不确定性对系统控制品质的影响, 最后给出了实验结果。

关键词: 双机械臂协调; 非结构模型; 特性校正; 动态补偿控制

1 引言

随着机器人学及其应用的发展, 双机械臂(简称双臂)协调的控制无论在理论上还是在应用上都有了很大发展, 现今双臂协调控制的研究中主要存在动力学控制^[5,9,10]和运动学控制两类方法。由于动力学模型的高度复杂性和现有机械臂伺服控制系统改造的实际困难, 以运动学为基础的协调控制是目前比较实用可行的主要方法。这种方法又主要分三个方面: 1) 纯位置控制: 这是早期研究与应用较多的一种方法, Alford^[7]提出一种主从式方法, 主机械臂(简称主臂)按预先规划的轨迹运动, 从机械臂(简称从臂)沿着由主臂轨迹按约束导出的轨迹进行运动, 两者均为位置控制, 为避免通讯造成的滞后, 控制中作了一步预测, Lim^[8]先规划好物体的运动轨迹, 每个臂的微分变换可以从已规划的轨迹的微分变换计算得到, 每个臂的运动可用微小的位移增量进行控制, Luh 和 Zheng^[6]首次提出了双臂协调运动所需满足的齐次约束方程, 并实现了一些简单的协调试验, 由于运动学建模存在误差、通讯完全同步有困难及各臂本身运动学控制的误差等, 纯运动学控制的精度是较低的; 2) 位/力混合控制: 针对需要同时协调好位置与力的较复杂任务, 一类位/力混合控制方法应运而生, Uchiyama^[13]通过定义虚棒(virtual sticks)分析当机械臂末端间相对运动可忽略时操作空间的静力学, 通过应用 Moore-Penrose 逆定义了外力、内力的概念, 再利用力与速度的对偶关系得到与力空间划分一致的绝对速度/位置、相对速度/位置的概念, 从而建立了操作空间中一致的力与运动空间划分, 并据此将业已发展成熟的单机械臂位力混合控制方法推广到双臂情形, 其中控制输入通过类似 Resolved motion rate control 的方法将操作空间的混合位置/力误差转化为各机器人关节速度校正输入来实现, Dauchez^[14], Hayati^[15]等也提出类似的方案, 位/力混合控制由于适用性广而得到很大重视, 其不足之处是系统结构复杂, 实现起来还有许多困难有待克服; 3) 位置/力补偿控制: Ishida^[16]较早提出一种位置/力控制方案, 主臂采用位置控制, 从臂则完全是力依从控

制,这种方法由于从臂忽略了自身位置控制冗余能力从而有很大的局限性. Tao 和 Luh 在 [17] 中提出一种方案,主臂采用位置控制,从臂依据约束关系也进行位置控制,而腕力误差信息则作为一种误差修正量迭加到从臂的位置控制环上. 曲道奎、谈大龙^[18]等也提出了位置/力补偿控制方案,通过预测方法来改善力输出响应的特性,并讨论了协调的系统结构问题.

总的来说,一般运动学控制方法都是根据运动学将任务分解到各臂,控制问题很大程度上由两臂各自的点到点或加上力修正来完成,但以上文献均缺乏关于稳定性的充足的理论分析,或至多如 Kazerooni^[1]所提出一种非结构模型来描述双臂协调运动学顺应性控制系统,并用小增益定理证明了当系统中具有充分柔顺性时控制系统的稳定性. 因小增益定理本身的局限性这种分析方法是较粗糙的,工程设计与控制理论间的脱节可以说是目前以运动学为基础的协调控制研究中所存在的主要问题. 我们认为在运动学控制方法中精确的运动学参数(尤其约束参数)是非常重要的,尽管 [11] 给出一种有效的约束标定方法,但标定结果具有一定误差是不可避免的,那么,约束几何的不确定性对协调控制会有何影响呢? 两臂的动态特性配置(相同与相异)对协调控制的影响又如何? 以往的方法对这些问题都未予以充分重视. 本文将提出一种新的协调系统的非结构动态模型,基于这一模型通过运用内模原理来解决以上这些问题. 本文将研究,当标定的约束关系非常精确,且两手的动态特性基本一致时,通常认为此时的协调较易实现,文中将给出理论证明. 若两臂的特性有一定差异,如何克服这种协调中的动态误差本文也给出了力补偿方法,当标定约束存在较大误差时,此时力反馈的补偿作用不仅要克服约束偏差还要充分补偿动态过程中所造成的误差,而事实上力的微分控制又不易实现,因此就不能保证好的控制效果. 本文提出一种动态补偿控制算法,该法的关键在于给出一种动态观测器,对约束偏差进行了有效的补偿,以减轻了力补偿在协调控制中的负担,使力的阻抗控制在克服纯粹动态协调误差中能获得较好的控制效果.

2 双机械臂协调的动态模型分析

纵观以往的运动学控制方法,事实上是依据非结构模型来考虑的,所谓非结构模型就是包括执行机构、传感器等系统环节的输入输出模型,一般以传递函数表示各单元组合而成的系统模型,相对于动力学模型考虑被控对象复杂物理结构而言是“非结构”的. Kazerooni^[1]首次提出了一种非结构模型来描述双臂协调系统,并用 Small Gain Theorem 证明了当系统中具有充分柔顺性时控制系统的稳定性. 然而 [1] 没有研究各臂特性配置及约束几何对系统的影响. 本节将给出一种充分考虑系统微分运动学和系统特性分析的新的非结构模型来改进文献 [1] 的方法. 本文采用类似文献 [17] 的主从式模式,如图 1(a) (不包括点虚线回路),其中 $G_l(s)$, $G_f(s)$ 分别表示主、从臂 (leader and follower manipulator) 的 6×6 特性传函,且假设 $G_l = \text{diag}\{g_l^i(s), i=1, \dots, 6\}$, $G_f = \text{diag}\{g_f^i(s), i=1, \dots, 6\}$. $\delta P_r^{6 \times 1}$ 表示主臂的规划路径的位置姿态微增量向量, $\delta P_l^{6 \times 1}$, $\delta P_f^{6 \times 1}$ 分别为主、从臂实际位置姿态输出的微增量向量,它们的分量表示为 $\delta P_r = [\delta x_r, \delta y_r, \delta z_r, \delta r_{x_r}, \delta r_{y_r}, \delta r_{z_r}]^T$, 下标 $r=l, f$ 分别指主、从臂, B_l, B_f 为 6×6 常阵,分别表示真实的及假设的双臂微增量约束, $H(s)^{6 \times 6}$ 为特性校正传递函数, $H(s) = \text{diag}\{h(s)\}^{6 \times 6}$, k_r 为弹性系数, $k(s)$ 为力阻抗控制增益项,令 $G_{r,\alpha}(s) = (I + H(s)G_r^{-1}(s))^{-1}$, $r=l, f$, 经分析图 1(a) 可等价转化为图 1(b). 其中 $\delta P_{r,\alpha} = B_f \delta P_r$ 为从臂的

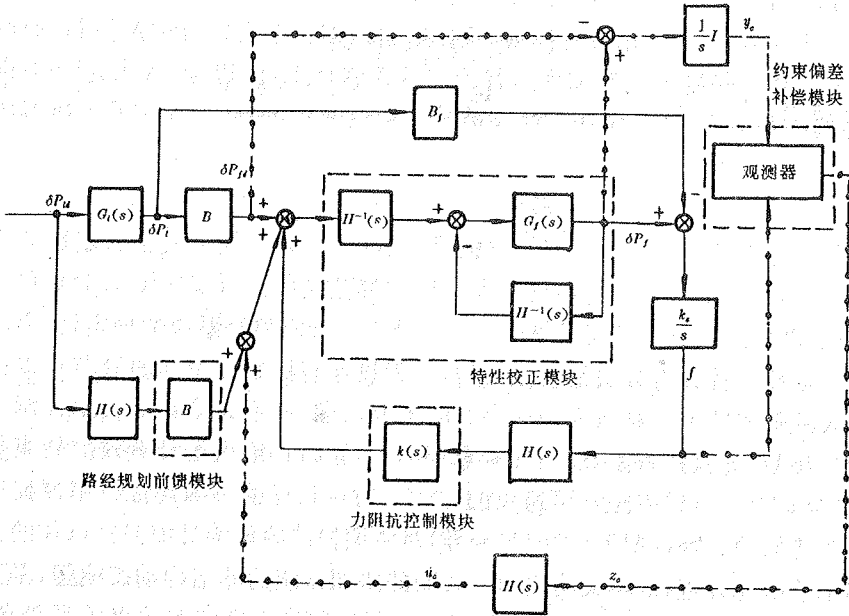


图 1(a) 协调控制系统结构图

期望规划路径的微增量。当标定约束非常接近真实约束时, $B \approx B_f$, 并当两臂动态特性一致时, 即 $G_i(s) = G_f(s)$ 时, 令 $h(s) = 1$, 则 $G_{ih}(s) = G_{fh}(s) = (I + G_i^{-1}(s))^{-1} = (I + G_f^{-1}(s))^{-1}$ (记相同传递函数阵为 $G(s)$), 此时图 1(b) 就转化为图 1(c)。现在我们来分析图 1(c) 所示的系统, 假如无虚框中的

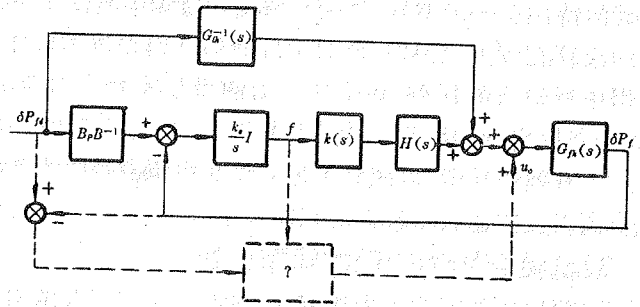


图 1(b) 两臂特性分析结构图

的 $G^{-1}(s)$, 则根据线性调节系统的内模原理^[2,3], 为使单位反馈系统获得 0 稳态精度, 前向传递函数 $k(s)G(s)/s$ 中的极点必须复现输入信号 δP_{fd} 的极点, 由于任务的复杂多样, 所跟踪信号 δP_{fd} 通常是一种时变多项式函数, 这样就势必要求 $k(s)$ 具有复杂的形态, 使得实现起来困难重重, 现在由于我们采用适当的校正方法, 而两臂控制系统又是最小相位系统, 即 $G_i(s), G_f(s)$, 从而 $G(s)$ 传递函数的分子项是 Hurwitz 的。尽管我们无法精确获知 $G(s)$ 的模型, 图 1(c) 所示系统恰恰是一种前向逆特性补偿 (feedforward inverse dynamic compensation scheme) 的结构, 类似^[2]的分析, 我们易知不论 δP_{fd} 是何种信号, 可设计简单的 $k(s)$ 来保证 f 有 0 稳态精度 (见附录)。

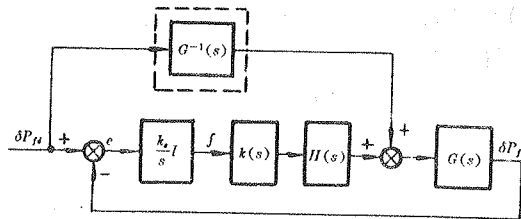


图 1(c) 当约束完全精确且两臂特性一致时的前向逆特性补偿图

当两臂特性不同时,此时 $G_{lh}(s) \neq G_{fh}(s)$. 定义特性比传递函数 $G_{lf}(s) = G_l^{-1}(s)G_f(s)$, $G_{fh}(s) = G_h^{-1}(s)G_f(s)$. 不妨令 $G_r(s) = \frac{n_{r1}s + n_{r2}}{s^2 + d_{r1}s + d_{r2}}I$, $r = l, f$, 其中 $n_{l2} = d_{l2}$, $n_{f2} = d_{f2}$, 采用特性校正为 $H(s) = hsI$, 则有

$$|g_r^i(j\omega)| = \sqrt{\frac{n_{r2}^2 + n_{r1}^2\omega^2}{(d_{r2} - \omega^2)^2 + d_{r1}^2\omega^2}}$$

$$\angle g_r^i(j\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{(n_{r1}d_{r2} - n_{r2}d_{r1})\omega - n_{r1}\omega^3}{n_{r2}d_{r2} + (n_{r1}d_{r1} - n_{r2})\omega^2}$$

$$|g_{rh}^i(j\omega)| = \sqrt{\frac{n_{r2}^2 + n_{r1}^2\omega^2}{(n_{r2} - hd_{r1}\omega^2)^2 + [(hd_{r2}^2 + n_{r1})\omega - h\omega^3]^2}}$$

$$\angle g_{rh}^i(j\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{-n_{r2}hd_{r2}\omega - n_{r1}hd_{r1}\omega^3 + n_{r2}h\omega^3}{n_{r2}^2 + [n_{r1}(hd_{r2} + n_{r1}) - n_{r2}hd_{r1}]\omega^2 - n_{r1}h\omega^4}$$

其中 $r = l, f$, $i = 1, 2, \dots, 6$. 当 ω 较小时

$$\angle g_r^i(j\omega) \approx \text{tg}^{-1} \frac{n_{r1} - n_{r2}\omega}{n_{r2}}, \quad r = l, f,$$

而 $\angle g_{rh}^i(j\omega) \approx \angle g_{fh}^i(j\omega) \approx \text{tg}^{-1}(-h\omega)$, 又

$$|g_{rh}^i(j\omega)| \approx |g_{fh}^i(j\omega)| \approx 1.$$

为了更清楚地了解特性校正的作用, 现举例:

$$g_f^i(s) = \frac{2.4272s + 1.8699}{s^2 + 3.0256s + 1.8699}, \quad (2.1)$$

$$g_f^i(s) = \frac{1.5222s + 0.4601}{s^2 + 2.0851s + 0.4601}, \quad (2.2)$$

$$h = 0.1.$$

此时特性比 $g_{lf}^i(s)$, $g_{fh}^i(s)$ 的 Bode 图示于图 3 (a), (b), 可见虽然两臂的特性有较大差异, 但经校正后的特性在低频工作段基本一致, 因而可得 $g_{lh}^i(s) \approx g_{fh}^i(s) \approx g^i(s)$, 其中 $g_{lh}^i(s)$, $g_{fh}^i(s)$, $g^i(s)$ 分别为 $G_{lh}(s)$, $G_{fh}(s)$, $G(s)$ 对角线第 i 个传递函数项, 系统可近似等价于图 1(c) 这种前向逆特性补偿结构.

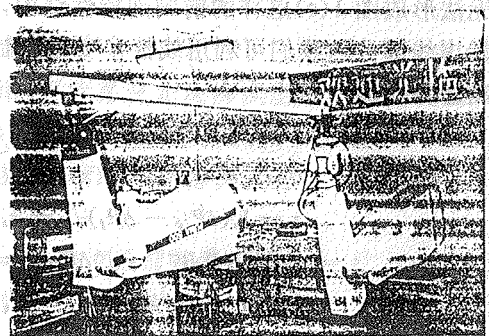


图 2 双臂协调搬运长棒

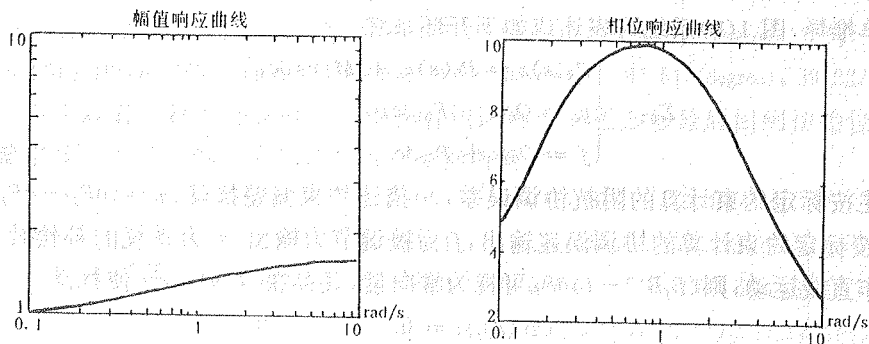


图 3(a) 原系统特性比 Bode 图

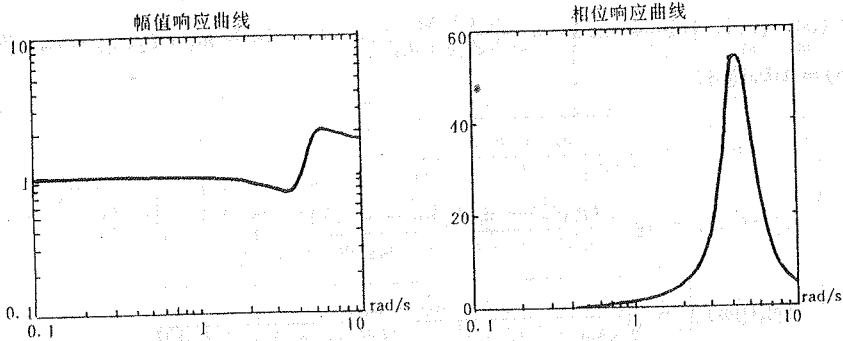


图 3(b) 加特性校正后特性比 Bode 图

双臂系统采用主从式模式时,从臂是控制的主体,以从臂的角度来看,主臂属于外部世界,控制的任务就是使从臂跟踪具有复杂动力学结构的主臂,当控制采用规划路径前馈结合特性校正时,控制的目的是利用外部世界模型在内部控制系统中的复现来实现好的控制效果,此举体现了一般调节系统内模原理的基本要求。

3 动态补偿控制方法

由于实际双臂系统的标定总存在一定误差,仅靠特性校正、规划路径前馈和力阻抗控制无法形成图 1(c) 这样的前向逆特性结构,从而得不到好的控制效果。现考虑图 1(b) (不包括虚线部分),我们可利用线性多变量控制的几何方法^[3]或与之等价的频域方法^[12]来设计动态补偿器。

记

$$G(s) = G_z^{-1}(s)G_n(s),$$

$$z = k_s(\delta P_{fd} - \delta P_f)/s = k_s(P_{fd} - P_f),$$

$$\Delta c = (B_f B^{-1} - I)\delta P_{fd}/s = B_f P_f - B P_f,$$

$$P_0(s) = (s/k_s)G_z(s) + G_n(s)k(s)H(s), \quad R_0 = G_n(s),$$

$$M(s) = -k_s G_n(s)k(s)H(s),$$

$$Q_{01}(s) = (1/k_s)I, \quad F_{01} = 0,$$

$$Q_{02}(s) = I, \quad F_{02} = k_s I, \quad y = [y_c^T \ f^T]^T.$$

经简单推导,图 1(b) 系统可表述成如下开环系统

$$\Sigma_0: \begin{cases} P_0(s)z = R_0(s)u_c + M(s)\Delta c, \\ y_c = Q_{01}z + F_{01}\Delta c, \\ f = Q_{02}z + F_{02}\Delta c. \end{cases} \quad (3.1)$$

其中 z 描述按标定约束计算的阻抗协调误差, Δc 描述约束偏差扰动, $y_c = (\delta P_{fd} - \delta P_f)/s = P_{fd} - P_f$ 是按标定约束计算的协调误差输出, f 为被调节力输出, u_c 为系统的补偿控制项。假设主臂作直线运动,则 $(B_f B^{-1} - I)\delta P_{fd}$ 可视为常向量,且存在 $N(s) = s^2 I$ 使扰动 Δc 满足

$$N(s)\Delta c = 0. \quad (3.2)$$

设计动态补偿器

$$\Sigma_p: \begin{cases} P_1(s)z_c = R_1 y, \\ u_c = Q_1(s)z_c + F_1 y. \end{cases} \quad (3.3)$$

其中

$$\begin{aligned} R_1 &= [-k_{ds} s I (k_{ds}/k_s) s I], \\ P_1(s) &= s^2 I, \\ Q_1(s) &= H(s) I, \quad F_1 = 0. \end{aligned}$$

根据[12]的有关结论,欲使动态补偿器 $\Sigma_p(3.3)$ 是系统 $\Sigma_0(3.1) \sim (3.2)$ 在标称参数点 $p(M, F_{02})$ 处的结构无静差补偿器,则 Σ_p 中必须编入 $N(s)$ 的一个内模 s^2 . 因此 $P_1(s) = s^2 I$ 之选择是以内模原理为依据的.

由于无法确知弹性系数 k_s ,在实际设计时,我们采用如下补偿方案

$$z_c^{(i)}(1) = 0. \quad (3.4)$$

当 $|f^{(i)}(k-1)| < \varepsilon_1$ 或 $|f^{(i)}(k)/f^{(i)}(k-1)| \geq \varepsilon_2$ 时

$$z_c^{(i)}(k) = z_c^{(i)}(k-1). \quad (3.5)$$

当 $|f^{(i)}(k-1)| \geq \varepsilon_1$ 且 $|f^{(i)}(k)/f^{(i)}(k-1)| < \varepsilon_2$ 时

$$\begin{aligned} z_c^{(i)}(k) &= (1 + f^{(i)}(k)/f^{(i)}(k-1))z_c^{(i)}(k-1) - (f^{(i)}(k)/f^{(i)}(k-1))z_c^{(i)}(k-2) \\ &\quad + k_{ds}(f^{(i)}(k)/f^{(i)}(k-1))y^{(i)}(k-1) - k_{ds}y^{(i)}(k). \end{aligned} \quad (3.6)$$

其中上标 (i) 代表向量第 i 分量, $i=1, \dots, 6$. (3.6) 形式上可由在 (3.3) 中 k_s 取 $\hat{k}_s(k) = \frac{f^{(i)}(k-1)}{z_c^{(i)}(k-1) + y^{(i)}(k-1)}$ 离散化得到.

动态补偿器 (3.3) 起到一个观测器的作用,尽管系统无法辨识出约束的精确几何参数,但它能对因标定约束误差引起的协调偏差作出适当估计并及时给以补偿.

总的控制框图见图 1(a) (包括点虚线回路). 从臂的控制可表示成

$$u = u_{fpp} + u_{odc} + u_{bc} + u_{fi}.$$

其中 $u_{fpp} = B\delta P_d$ 为路径规划的前馈模块, $u_{odc} = z_c$ 为约束偏差补偿模块, $u_{bc} = H^{-1}(s)(B\delta P_l - \delta P_f)$ 为特性校正模块, $u_{fi} = k(s)f$ 为力阻抗控制模块.

4 实 验

协调实验在一个 PUMA760 (从臂) 和一个 PUMA 562 (主臂) 间进行 (见图 2), 它们的初始位置在各自 World 坐标系中分别为

$$P_{ms}^{760} = [796.1\text{mm}, 110.9\text{mm}, 558.0\text{mm}, -177.704(\text{degree}), -89.995(\text{degree}), 0]^\text{T},$$

$$P_{ms}^{562} = [510.19\text{mm}, 156.09\text{mm}, 416.84\text{mm}, 90.884(\text{degree}), -87.517(\text{degree}), 39.227(\text{degree})]^\text{T},$$

协调任务为双臂抓物在任务坐标系中作直线运动走一正方形最后回到初始位置, 从主臂到从臂末端间的标定约束表示成的齐次变换阵为:

$$C_{75} = \begin{bmatrix} 0.60011 & 0.79989 & -0.0068 & 45.81404 \\ -0.79931 & 0.59931 & -0.04401 & 279.33609 \\ -0.03113 & 0.03185 & 0.99901 & -140.69446 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

经实验分析真实约束相对于标定约束在 y 位置方向有较大偏差, 相应的 B 可用微分变换公式由 C_{75} 换算得到^[4], 设 $H(s) = hsI$, $u_{bc} = (BP_l - P_f)/h$, $h=5$, $k(s) = k_p$.

当控制不采用约束偏差补偿模块时,令 $k_p=0.001$,此时的 y 方向力输出见图 4(a).

当控制采用约束偏差补偿模块时,令 $k_p=0.001$, $k_{dc}=0.00035$, $\varepsilon_1=2(\text{kg})$, $\varepsilon_2=1.5$, 此时 y 方向力输出见图 4(b),与图 4(a)比较,可以看出系统特性改善较明显.此外,对于其它方向的力和力矩输出,采用补偿算法与简单力阻抗控制相比亦有不同程度改善,按标定约束测出的 y 方向位置协调误差由图 5(a)表示,它大体上反映了 y 方向的约束偏差.约束偏差补偿项 u_{dc} 见图 5(b).

由图 4 可知,系统采用约束偏差补偿控制比起只有力阻抗调节无论在过渡过程品质或稳态精度上都有较好的改善,这是由于观测器较快地估计出约束偏差(见图 5(b)),力很快被调整到较小的值(小于 ε_1),事实上此时系统相当于按较精确约束对从臂进行路径规划,力误差基本上仅由动态过程中的误差造成,这时力阻抗的比例控制就能发挥较好的作用.

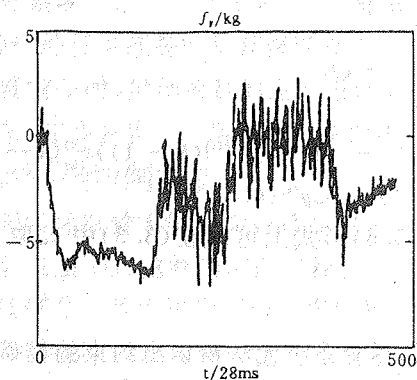


图 4(a) 无补偿时 y 方向力输出的实验结果

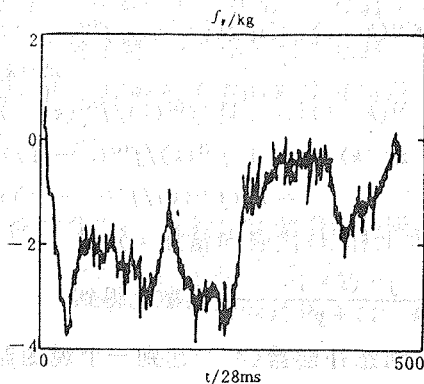


图 4(b) 有补偿时 y 方向力输出的实验结果

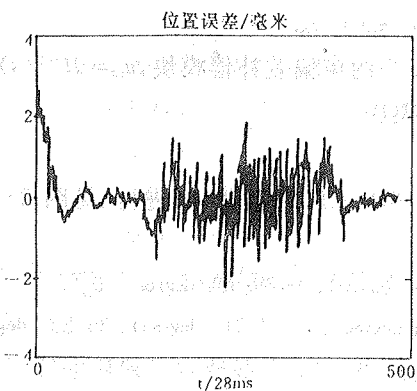


图 5(a) y 方向协调误差输出的实验结果

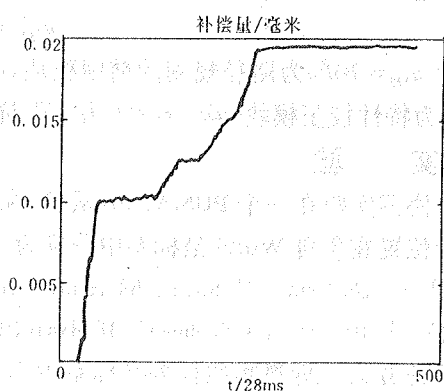


图 5(b) y 方向补偿控制项的实验结果

5 结 论

双臂协调系统中存在许多不确定因素,两臂特性差异和约束标定是两个主要方面,因此控制的设计必须具有克服这种不确定的鲁棒性,根据一般调节系统内模原理的要求,当约束关系非常精确,且两臂特性基本一致时,可证明双臂的协调控制是较易实现的,若两臂的特性有差异时,为了使双臂在协调中尽可能的步调一致,我们采用特性校正的方法使

从臂控制系统复现主臂的模型;协调过程中的误差主要由标定约束偏差和两臂特性差异所引起的误差两部分所组成,为使系统从约束扰动所激励而产生的误差与动态特性不一致所产生的误差以及其它次要内部破坏作用发生混淆的现象中区分开来,我们设计了包含有扰动信号内模的动态补偿器来改善控制系统的品质,得到比较好的结果.

致谢 本文工作在东南大学自动化所完成,本文的实验工作受南开大学机器人实验室开放基金支持,特此致谢!

参 考 文 献

- [1] Kazerooni, H. and Tsay, T. I. . Compliance Control and Unstructured Modeling of Cooperating Robots. Proc. 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, 1988, 510—515
- [2] Wolovich, W. A. . Robotics, Basic Analysis and Design. CBS Colege Publishing, 1987, 331—336
- [3] Wonham, W. M. . Linear Multivariable Control; a Geometric Approach. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, New York, Springer Verlag, 1974, 101
- [4] Paul, R. P. . Robot Manipulators; Mathematics, Programming, and Control. The MIT Press, 1981, 85—118
- [5] Tarn, T. J. , Bejczy, A. K. and Yun, X. . Design of Dynamic Control of Two Cooperating Robot Arms; Closed Chain Formulation. Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, 7—13
- [6] Luh J. Y. S. and Zheng, Y. F. . Constrained Relation between Two Coordinated Industrial Robots for Motion Control, The International Journal of Robotics Research, Fall, 1987, 6(3);60—70
- [7] Alford, C. O. and Belyeu, S. M. . Coordinated Control of Two Robot Arms. Proc. 1984 IEEE Int. Conf. on Robotics, Atlanta, GA. , 468—473
- [8] Lim Joonhong and Chyung Dong H. . On Control Scheme for Two Cooperating Robot Arms. Proc. 24th IEEE Conf. on Decision and Control, Ft. Landerdale, FL. , 1985, 334—337
- [9] 顾新兴,冯纯伯. 基于 Lyapunov 全局指数稳定的机器人双手协调控制. 机器人, 1991, (1); 51—56
- [10] 顾新兴,叶桦,冯纯伯. 基于模型偏差补偿原理的机器人双臂协调控制. 控制理论与应用, 1993, 10(1); 21—28
- [11] 顾新兴. 双机器人协调的研究,东南大学博士论文,1992
- [12] 王恩平,王朝珠. 多变量系统内模原理的频域方法. 系统科学与数学, 1981, 2; 128—138
- [13] Uchiyama, M. and Lwasawa, N. . Hybrid Position/Force Control for Coordination of a Two-Arm Robot. Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, 1987, 1242—1247
- [14] Dauchez, P. and Fournier, A. . Hybrid Control of a Two-Arm Robot for Complex Tasks. Robotics and Autonomous Systems, North-Holland, 1987, 5; 323—332
- [15] Hayati, S. and Tso, K. . Dual-Arm Coordination and Control. Robotics and Autonomous Systems. North-Holland, 1989, 5; 333—344
- [16] Ishida, T. . Force Control in Coordination of Two Arms. Proc. of the 5th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, 1977
- [17] Tao, J. M. and Luh, J. Y. S. . Compliant Coordination Control of Two Moving Industrial Robots. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Clemson University, USA, 1987
- [18] Qu, D. K. , Tan, D. L. , Zhang, C. J. , Li, X. B. and Wu, Z. W. . A Control System for Two Robot Arms Coordination. 1991 IFAC Symposium on Robot Control, 1991

附 录:

关于对任意信号 δP_M 图 1(c) 系统中 f 稳态精度为 0 的说明.

由于图 1(c)中各传递函数均为对角阵,不妨仅考虑它的单变量情形.设 $G(s) = \frac{n_p(s)}{d_p(s)}$, $n_p(s)$ 为 Hurwitz, $n_p(s)$ 和 $d_p(s)$ 互质,且设 $k(s) = k_p + k_i/s$ 则 $k(s)H(s) = hs(k_p + k_i/s) = hk_p s + hk_i$.

易推得

$$n_p(s)[d_p(s) + n_p(s)k_p(hk_p s + hk_i)]f(s) = k_p(d_p(s)n_p(s) - n_p(s)d_p(s))\delta P_{fd} = 0.$$

因 $d_p(s)$ 和 $n_p(s)$ 互质,故存在 h, k_p, k_i 可将 $d_p(s) + n_p(s)k_p(hk_p s + hk_i)$ 配置成 Hurwitz. 又 d_p 为 Hurwitz 故不论 δP_{fd} 为何种信号, f 的稳态精度为 0.

Dual Robot Coordination; Model Analysis and Dynamic Compensation Control Method

GU Xinxing

(Shandong Textile Engineering College • Qingdao, 266033, PRC)

FENG Chunbo

(Research Institute of Automation, Southeast University • Nanjing, 210018, PRC)

LIU Wei, HUANG Yalou, JIANG Xihua, AN Gang, LIU Jingtai and LU Guizhang

(Robotics Research Laboratory, Nankai University • Tianjing, 300071, PRC)

Abstract: The control strategy of two manipulators handling a common object is studied in this paper. First, a new unstructured model of dual manipulator system is established and the stability issue is studied, then a behavior correction method is given. Next, based on internal model principle, a dynamic compensated control strategy is developed for compensating the uncertainty in kinematic modeling. Experimental results for a dual manipulator system involving PUMA 760 and PUMA 562 are presented to verify the dynamic performance.

Key words: dual robot coordination; unstructured model; behavior correction; dynamic compensated control

本文作者简介

顾新兴 1965年生. 1986年和1989年在南开大学计算机与系统科学系分别获得学士和硕士学位, 1993年在东南大学自动化所获工学博士学位, 现为山东纺织工学院颜色光学研究所讲师. 目前主要从事智能机器人与智能控制方面的研究.

冯纯伯 见本刊1994年第1期第29页.

刘伟 1970年生. 分别于1991年和1993年在南开大学计算机与系统科学系获学士学位和硕士学位. 目前主要从事双机器人协调的研究.

黄亚楼 1964年生. 1985年和1990年在南开大学计算机与系统科学系获学士学位和硕士学位. 1993年在该系获博士学位. 目前主要从事机器人控制理论与方法, 多机器人协调系统体系结构, 多机器人协调控制, 自适应控制的研究.

蒋喜华 1965年生. 讲师. 1986年毕业于南开大学计算机与系统科学系软件专业. 目前主要从事机器人语言, 机器人运动学, 双机器人协调系统的研究.

安刚 1957年生. 讲师. 硕士. 1984年毕业于天津大学自动化系. 目前研究方向为机器人体系结构设计, 多机器人协调控制和机器人语言等.

刘景泰 1964年生. 副教授. 1984年和1987年在天津大学自动控制系分别获得学士和硕士学位. 目前主要从事机器人控制系统, 机器人语言, 双机器人协调的研究.

卢桂章 1938年生. 毕业于北京大学数学系. 现任南开大学计算机与系统科学系教授. 目前主要从事机器人控制理论与方法, 智能机器人体系结构, VLSI专用芯片设计, 机器人语言等方面的研究.