

6-DOF 并联机器人修正位置/力控制系统的研究<sup>※</sup>

孔令富 韩佩富 黄 真 程从权

(燕山大学机器人中心 秦皇岛 066004)

郑 涌

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

**摘 要** 该文在 6-DOF 并联机器人运动控制系统的基础上, 研究了一种修正位置/力控制系统, 讨论了系统设计与实现中一些关键性技术问题 文中内容对改善并联机器人控制质量与性能大有益处

**关键词** 并联机器人, 修正位置/力控制, 计算机并行处理系统, 仿真研究

## 1 引言

并联机器人是一种具有广泛应用前景的新型机器人<sup>[1]</sup>。目前, 对于并联机器人运动控制的研究取得了一定的成果, 但从掌握的资料看, 对于并联机器人力控制的研究还尚未见到 并联机器人于实际应用中必将遇到诸如装配, 边缘跟踪等与环境接触的任务, 为了使并联机器人能在约束环境中具有灵活性和避免机器人与环境接触时产生较大的接触力与力矩, 在机器人控制系统中引入力与力矩控制是必要的 实现机器人力与力矩控制通常有两种方法<sup>[2]</sup>, 本文研究的是在现有并联机器人运动控制系统的基础上, 参照串联机器人力控制系统的研究成果, 在不改变机器人位置控制器的前提下实现力外环调节的修正位置/力控制

## 2 修正位置/力控制系统的设计

## 2.1 系统的组成

由文献[4]可知, 六自由度并联机器人运动控制系统具有较满意的运动性能指标, 以此系统为基础构造的并联机器人力控制系统组成如图 1 所示

图 1 中力控制系统是在并联机器人双环运动控制系统基础上, 接收力反馈信号而形成的, 整个力控制系统由 3 部分组成: (1) 六自由度并联机器人及其运动控制系统, 为已投入运行的可靠系统<sup>[4]</sup>; (2) LORD 六维腕力/力矩传感器及其预处理单元, 加之传感控制器 LORD 腕力传感器是美国 LORD 公司研制的六维腕力/力矩传感器, 安装于机器人腕部, 用于测量机器人末端执行工具与环境的相互作用力 它实际上是一种变送器, 用于检测和传送机器人末端工具的力和力矩的作用值 为了减少滞后和提高

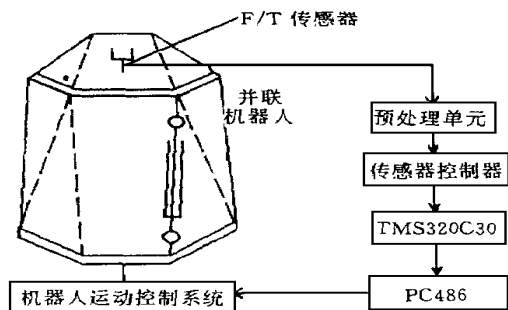


图 1 并联机器人力控制系统组成

<sup>※</sup> 中国科学院沈阳机器人学开放研究实验室基金资助项目, 1997- 05- 12 收稿

测量精度, 传感器通常由一整块金属制成 LORD 传感器的正比手腕力的电位输出值经过传感器预处理单元的放大, 通过一个多路开关先送入传感器控制器, 由 A/D 转换成数字量, 经过一个 16 位并行口送至力控制器<sup>[5]</sup>; (3) PC486 微型计算机与高速数字信号处理器 (DSP) TM S320C30 组成的主从式系统作为力反馈控制器, 机器人的力控制对控制算法的实时性要求较高, 目前一些较高级的控制技术, 由于控制算法复杂, 计算量大, 在普通的微型计算机上难以实现 本文的力反馈控制器是利用计算机并行处理技术保证力控制实时性的

## 2 2 力反馈控制器的设计

力反馈控制器的设计包括力反馈控制算法与力反馈控制器硬件结构两部分内容<sup>[2, 3]</sup>.

### 2 2 1 力反馈控制算法

由图 1 可知, 所研究的并联机器人控制系统, 是以机器人运动控制系统作内环, 力控制作为外环而实现的 而且, 在系统中将笛卡尔空间的力误差经过刚度矩阵转换为位置误差补偿量, 叠加在机器人笛卡尔空间期望的位置轨迹上 因此, 修正位置/力控制的并联机器人运动由下面两种运动所组成<sup>[5]</sup>:

- 1) 并联机器人运动控制器预先编程的机器人运动
- 2) 反馈力控制器产生的修正运动

正是由于机器人位置的不确定性导致预先编程的轨迹和运动位置无法满足环境约束的要求 因此, 必须用在线接触力信息去不断调整机器人预期轨迹, 以顺应外界约束 现以具有普遍意义的机器人跟踪表面有摩擦作用且顺应坐标系 {C} 和工具坐标系 {T} 不重合情况为例, 讨论力反馈控制器的算法 此时, 操作工具边缘跟踪情况如图 2 所示<sup>[6]</sup>.

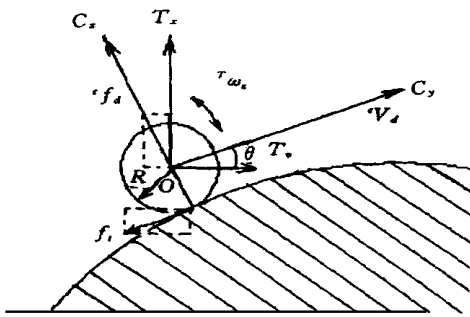


图 2 被跟踪表面有摩擦且两坐标系  
夹角  $\theta \neq 0$  的边缘跟踪情况

图 2 中机器人的任务是沿 {C} 的  $C_y$  方向以  $v_d$  的速度运动, 同时对接触表面法线方向施加压力  $f_d$  因为 {T} 与 {C} 方向不同, 并且夹角为  $\theta$ , 所以应把在 {C} 中描述的任务通过旋转变换矩阵  $H$  转换到 {T} 中去完成<sup>[5]</sup>. 这样我们得到图 3 所示的力反馈控制器<sup>[6]</sup>.

图中  $A/T$  是把力转换为运动信息的算法,  $K_F$  是传感器系数,  $K_E, K$  是刚度矩阵 由于  $\theta \neq 0$  使得控制变得复杂, 需实时求解矩阵  $H$ ,  $\theta$  值 从理论上讲可通过传感器的  $f_x$  和  $f_y$  来计算:

$$\theta = -\arctan f_y / f_x \quad (1)$$

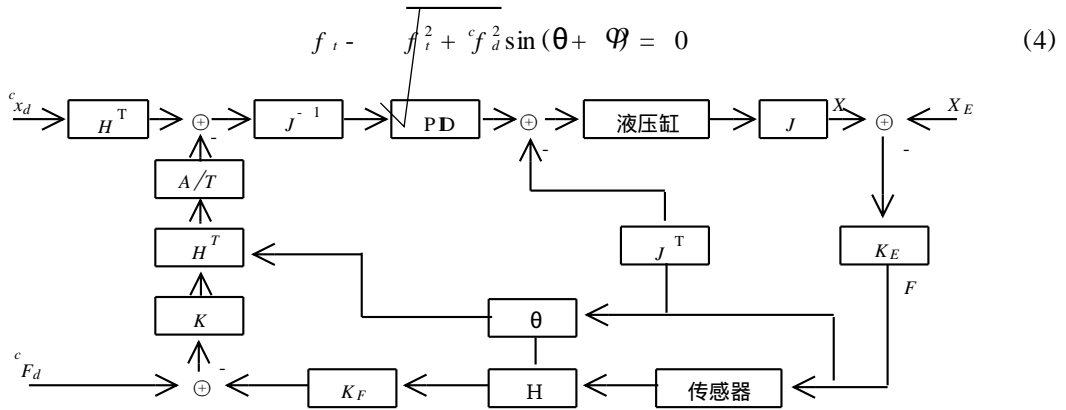
但在实际控制中, 由于力信号的噪声很大, 这种计算往往是不准确的, 很容易造成系统的不稳定 这里我们利用 Schutter 理论中跟踪方向的思想, 根据  $T_Y$  方向受力情况来调整  $T_Z$  轴的旋转, 使 {T} 和 {C} 始终保持一致 另外, 由于具有摩擦力  $f_t$ , 末端工具  $T_Y$  轴的受力:

$$T f_y = -f_t \cos \theta - f_d \sin \theta = -\sqrt{f_t^2 + f_d^2} \sin(\theta + \varphi) \quad (2)$$

其中  $\varphi = \arctan \frac{f_t}{f_d}$ , 如果这时仍希望  $\theta = 0$ , 有

$$T f_y + f_t = 0 \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 中, 得

图3 跟踪表面有摩擦且两坐标夹角为 $\theta$ 力反馈控制

当 $-\pi/2 < \theta + \varphi < \pi/2$ 时,  $\theta + \varphi$ 有唯一解, 即

$$\theta + \varphi = \arcsin \frac{f_t}{\sqrt{f_i^2 + c f_d^2}} \quad (5)$$

结合式(2)可知, 在 $-\pi/2 < \theta + \varphi < \pi/2$ 时,  $f_y$ 是单调可控的, 方程(3)的唯一解是 $\theta = 0$ 。也就是说当 $\theta$ 在一定范围 $(-\pi/2 - \varphi < \theta < \pi/2 - \varphi)$ 内时, 可以通过控制 $f_y = -f_t$ 来保证 $\theta = 0$ 。因不会出现 $f_t = 0$ , 而 $c f_d = 0$ 的情况。所以 $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$ 而摩擦力 $f_t$ 可由力传感器测得, 即

$$f_t = {}^T m_z / R \quad (6)$$

其中 ${}^T m_z$ 为绕 $\{T\}$ 的 $Z$ 轴的转矩,  $R$ 为末端工具半径。此种情况构造一个有 $f_t$ 存在时的

$$K_F = \begin{bmatrix} K_{F11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{F26} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{F26}}{R} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (7)$$

对应

$${}^T \omega = K_{F26} \cdot K_6 ({}^T f_y + \frac{{}^T m_z}{R}) \quad (8)$$

相应的修正向量为

$$\Delta^C x_d = [K_1(c f_d - {}^T f_z), 0, 0, 0, 0, K_{F26} K_6 ({}^T f_y + \frac{{}^T m_z}{R})] \quad (9)$$

稳定状态上有 ${}^T \omega = 0$ ,  $\theta = 0$

上述分析表明, 通过控制跟踪方向的速度 ${}^T \omega$ 实现这样一个控制目标:  ${}^T f_z + \frac{{}^T m_z}{R} = 0$ , 可使描述任务的顺应坐标系 $\{C\}$ 与实施控制的工具坐标系 $\{T\}$ 相一致, 从而简化了控制器的设计。工具坐标系 $\{T\}$ 中的位置控制自由度和力控制自由度就象在顺应坐标系 $\{C\}$ 中一样, 可相互独立, 所以对工具坐标系中某一自由度力控制可以作为一个独立的控制环进行研究。

## 2.2.2 力反馈控制器的硬件结构

如前面所述, 本文力反馈控制器是利用计算机并行处理技术保证力控制实时性的。其硬件

结构如图 4 所示

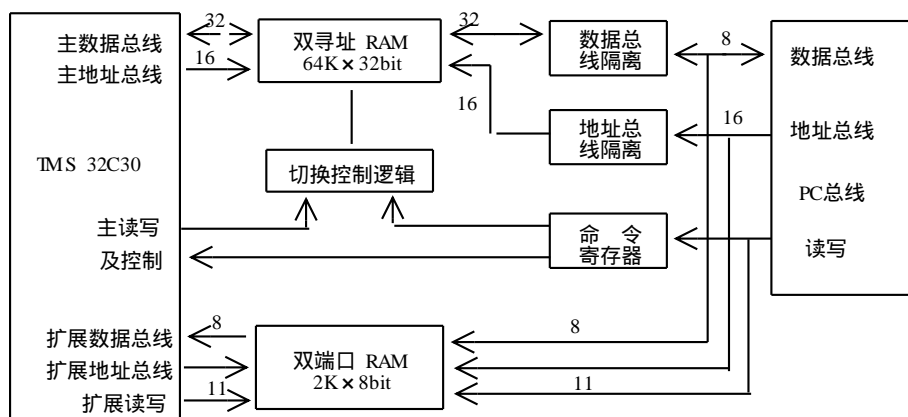


图4 力反馈控制器硬件结构图

该文以 PC486 与高速数字信号处理器 TM S320C30 组成双机并行处理系统, 作为并联机器人的力反馈控制器, TM S320C30 处理器具有独立的内存单元, 60ns 的单周期指令, 在一个周期内可并行完成 ALU 和 MUL 指令, 以及适合处理并行任务具有浮点运算的高精度等一些突出的特点, 正是由于 C30 的这些特点, 才选用 C30 作为机器人力控制实时算法的核心处理单元。在组成的双机处理系统中, 关键是要解决两个处理器之间的数据通信问题。为了提高交换信息速度, 这里不采用串行通信方式, 而采用基于共享存储技术, 让两个处理器都可以向双口 RAM 和双寻址 RAM 存取数据。

在图 4 中, 因并行处理时两 CPU 之间频繁地进行大量数据传输, 而只采用双寻址 RAM 方式时, 虽然可满足大量数据传输要求, 但同一时间只允许一个 CPU 访问, 这样两处理器同时运行时通信能力仍较弱。图中选用了  $2k \times 8$  位双端口 RAM, 它拥有两套独立地址、数据和控制信号线, 可分别与两个 CPU 相连接, 从而克服了上述缺点。在系统中, 主处理器 (PC 机) 与协处理器 (C30) 分别构成独立的子系统。两个子系统拥有局部存储器和 I/O 设备, 并通过 PC 总线相连接。只有主处理器控制总线, 享有总线资源, 并掌握总线上的协处理机。从机受主机控制, 有局部存储器, 依据主机发出的信息 (命令和数据), 完成指定的任务 (高速运算等), 并将结果送到公共存储器, 再由主机根据需要进行处理。

为了能接收 LORD 腕力传感器输出的反馈力/力矩信息, 系统采用可编程并行接口芯片 8255 作为与 LORD 传感器的接口。由于 LORD 传感器是一个精密的测量设备, 要求与其相接口的其他设备进行光电隔离, 以保证它工作的安全性和抗干扰性, 电路如图 5 所示。

作为 C30 与 LORD 传感器的并行接口, 其中 8255 的 A、B 口分别作为 LORD 传感器输出 16 位数据的高 8 位和低 8 位输入口, 8255 的 C 口  $PC_0$  作为 Ready 信号握手;  $PC_6$  和  $PC_7$  分别作为 Receive 和 Start 信号的握手。

对于力控制器与并联机器人运动控制器之间的信息通信, 本文采用两台 PC 机的串行口 2 (COM 2) 来完成的, 两台 PC 机采用统一定时串行通信的办法实现控制修正量的传送。

所设计的力反馈控制器中, 高速数字信号处理板要完成以下任务:

- 1) C30 内部初始化;
- 2) 通过并行接口 8255 定时采样腕力传感器;

3) 完成力控制实时算法;

4) 将修正量经公共双端口 RAM 送至 PC 机

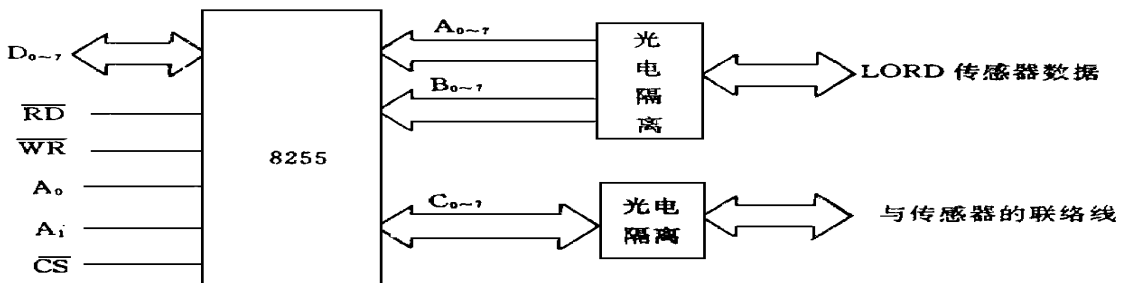


图 5 C30 与外设接口电路

PC 机完成以下任务

- 1) 将用户指令和一系列控制参数经公共双端口 RAM 传送给 C30;
- 2) 完成 C30 程序的编译(C 语言), 汇编, 连接和加载;
- 3) 接收 C30 的控制修正量, 并经 RS-232 串行口馈入并联机器人运动控制器;
- 4) 完成人设定的功能, 进行系统的维护。

### 3 力控制系统的仿真研究

为了检验本文所设计的力控制系统的正确性, 文中仅利用 PD 做调节器, 实现机械手对物体表面的跟踪 分别对 3 种不同的环境进行的仿真研究结果如图 6~ 图 8 所示

#### 仿真结果分析

1) 研究的并联机器人力控制系统性能稳定, 在较大环境刚度范围内, 系统都有相应的稳定输出状态

2) 对于不同的接触环境, 获得稳定响应特性的 PD 控制参数是不同的, 随着系统刚度的增加, 控制性能有变坏的趋势

考虑并联机器人液压驱动系统参数变化和机器人接触不同环境刚度等因素, 在 [290, 350] 范围内随机选取液压缸的固有频率  $\omega_n$ , 在 [0.1, 0.3] 中随机阻尼如  $\delta_n$ , 并取系统刚度  $K_E = 700$  时, 仍采用图 6 中的控制参数, 得到力响应曲线如图 9 所示 机器人接触两种不同环境刚度, 但

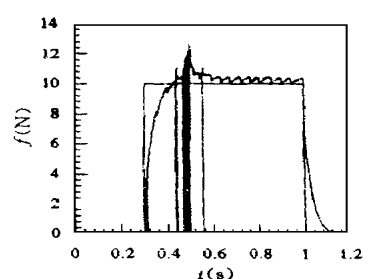
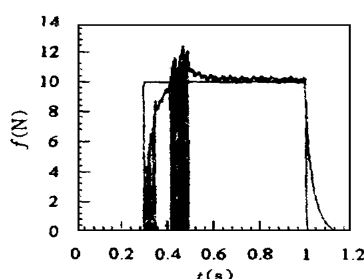
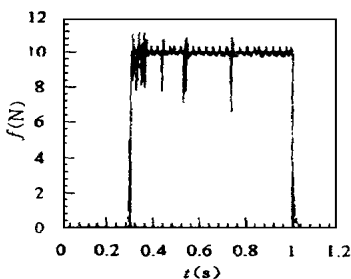


图 6 当  $K_E = 700$  时的力响应 图 7 当  $K_E = 5000$  时的力响应 图 8 当  $K_E = 30000$  时的力响应  
( $K_P = 0.55, K_I = 0.0062, K_D = 0.0041$ ) ( $K_P = 0.282, K_I = 0.0036, K_D = 0.0023$ ) ( $K_P = 0.142, K_I = 0.0043, K_D = 0.0017$ )

采用不变的控制参数时, 力响应曲线如图 10 所示 分析图 9, 10 可知: 1) 液压系统的变化对力控制的效果影响很小 2) PD 控制对环境刚度变化适应性较差, 对某一刚度设计的控制器, 当

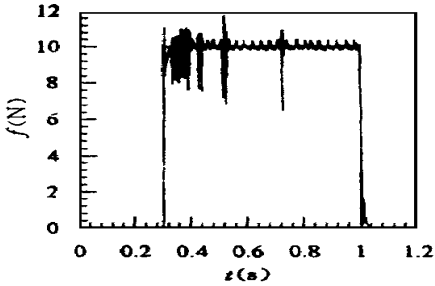


图 9 液压系统参数变化时力响应

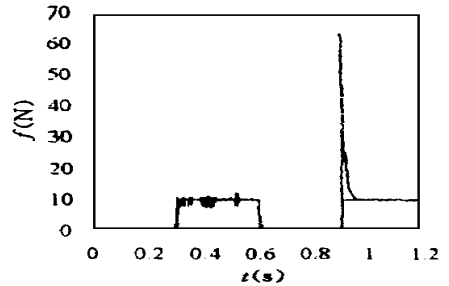


图 10 两种不同环境时机器人力响应

遇到另一种环境刚度时, 系统的动态性能发生明显的变化

#### 4 结束语

该文研究的 6-DOF 并联机器人修正位置/力控制系统, 开拓了并联机器人控制的研究领域, 文中的内容为进一步深入研究更高性能的机器人力控制系统奠定了基础, 是一种成功的尝试

#### 参 考 文 献

- 1 黄 真 空间机构学 机械工业出版社, 1991
- 2 Mason M T. Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators IEEE Trans System, Man and Cybernetics, 1991, **SMC-11**(6): 360~ 374
- 3 Liu M T *et al* Force-controlled Robotic Deburring Proc of the 12th IFAC World Congress, Sydney, Australia, 1993: 309~ 312
- 4 孔令富 六自由度并联机器人运动控制系统的研究 哈尔滨工业大学博士论文, 1995
- 5 郑涌 六自由度关节型机器人自适应力控制的研究 哈尔滨工业大学博士论文, 1995
- 6 程从权 六自由度并联机器人力控制系统的研究 燕山大学硕士论文, 1997

## A CORRECT POSITION/FORCE CONTROL SYSTEM FOR 6-DOF PARALLEL ROBOT

KONG Lingfu HAN Peifu HUANG Zheng CHENG Congquan

(Robot Center of Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

ZHENG Yong

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, 150001)

**Abstract** Based on the motion control system, this paper studies the correct position/force control system for 6-DOF parallel robot analyzes some key technology problems on the system design and realization. The contents will improve parallel robot control property.

**Key words** Parallel robot, correct position/force control, computer parallel processing system, simulation research

#### 作者简介

孔令富: 男, 40 岁, 教授, 博士 研究领域: 机器人技术、分布式计算机控制、实时信息并行处理技术

韩佩富: 男, 53 岁, 副教授 研究领域: 数控技术

黄 真: 男, 61 岁, 博士生导师 研究领域: 机械学理论、机器人技术。