

(19) 183-187

# 机器人多指手的位置—力混合控制\*

原 魁 于 激 郭 峰 袁 星 军

TP241.3

北京科技大学信息工程学院, 北京 100083

**摘要** 分析了一类机器人多指手的动力学模型的特点,针对这类机器人多指手在运动和抓握 2 个过程中动力学特性有很大差异的特点,提出了 1 种切实可行的位置—力混合控制方案,并成功的应用于北京科技大学双拇指手控制系统。

**关键词** 机器人多指手; 控制系统; 位置—力混合控制

**分类号** TP241.3

“北京科技大学双拇指手”是一种具有 3 指 14 自由度的非仿人机器人多指手,它两侧的 2 个手指都可以绕与手腕平行的轴转动,类似与人手拇指的功能,所以称为“双拇指手”。该手的特点是可以很方便地被安装在普通工业机器人末端,与机器人配合完成对不同形状的物体的抓取和简单操作等任务。图 1 给出了北京科技大学双拇指手的基本结构。

为了达到对多指手的抓握力进行控制的目的,双拇指手的 3 个手指上分别以阵列方式安装了 12 个薄膜式力敏电阻 (Force Sensing Resister, FSR, 美国 Interlink 电子公司生产) 作为力传感器。这样做能增加多指手与物体的接触点,保证对不同形状和大小的物体进行抓取时能够有效地进行力反馈控制。该力敏电阻为压阻聚合薄膜 (Piezoresistive Polymer Film), 其测力范围为 10 g~10 kg, 厚度为 0.35 mm, 具有良好的力响应特性和柔软性, 并可以和相应的电路配合得到具有较好线性度的压力—输出电压特性曲线。

## 1 多指手控制模型分析

机器人多指手的性能实际上取决于多指

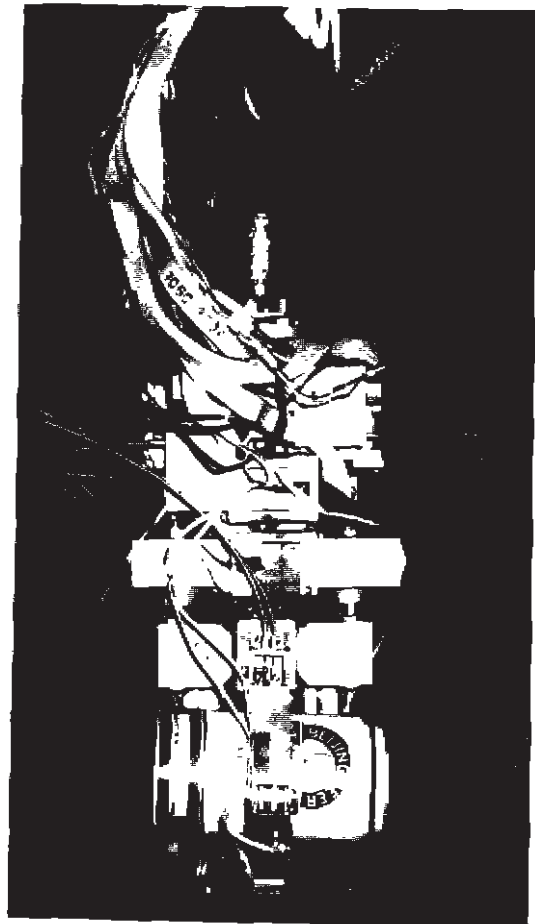


图 1 北京科技大学双拇指手基本结构

1997-03-25 收稿 原魁 男、40岁、博士

\* 国家“863”基金资助课题

手指屈伸动作的控制性能.因此,我们将就北京科技大学双拇指手手指完成屈伸动作时的动力学特性进行分析,以决定必要的控制策略.

北京科技大学双拇指手手指的屈伸是由 DC 电机通过蜗轮蜗杆、滑杆和钢丝绳来驱动的,其机械结构如图 2 所示.

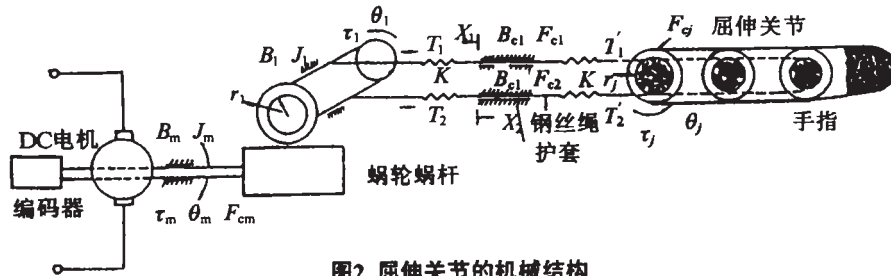


图2 屈伸关节的机械结构

图 2 中,  $\tau_m$  为 DC 电机的输出力矩,  $J_m$  为 DC 电机侧的等效转动惯量,  $\tau_1$  为负载侧的力矩 ( $\tau_1 = i\tau'_1$ ),  $\tau'_1$  为等效到电机上的负载力矩,  $B_m$  为 DC 电机轴上的粘性摩擦因数,  $F_{cm}$  为 DC 电机轴上库仑摩擦因数,  $i$  为蜗轮蜗杆的传动比 (为了简化分析过程, 以下假设传递效率 = 1),  $\theta_1$  为负载侧的角位移,  $\theta_m$  为电机轴的角位移 ( $\theta_m = i\theta_1$ ).

从图 2 可以得知, 当不考虑手指与物体的接触力产生的外部力矩时, 电机侧的力矩平衡方程为:

$$\tau_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + F_{cm} \text{sgn}(\dot{\theta}_m). \tag{1}$$

而当考虑手指与物体的接触力产生的外部力矩时, 式 (1) 的力矩平衡方程成为

$$\tau_m - \tau'_1 = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + F_{cm} \text{sgn}(\dot{\theta}_m) \tag{2}$$

这里,  $\tau'_1$  为外力在负载侧产生的力矩折算到电机上的等效力矩. 很明显, 该力矩的大小不但取决于物体与手指的接触力的大小, 而且取决于手指与物体的接触点的位置.

考虑到钢丝绳与护套以及手指关节滑轮上的摩擦力, 则负载侧的力矩平衡方程为

$$\tau_1 + T'_2 \gamma_1 - T'_1 \gamma_1 = J_1 \ddot{\theta}_1 + B_1 \dot{\theta}_1 \tag{3}$$

式中:  $J_1$  为负载侧的转动惯量,  $B_1$  为负载侧的粘性摩擦因数;  $T'_1, T'_2$  为由驱动电机产生的蜗轮侧的钢丝绳张力. 很明显,  $J_1$  和  $B_1$  的值都将随手指的姿态和运动速度等发生变化. 因此, 式 (1) 中的  $J_m$  和  $B_m$  也随手指的姿态和运动速度发生变化.

当驱动电机运转并通过钢丝绳驱动手指关节运动时, 钢丝绳张力与手指上部 2 个关节的动力学特性可以由下面 1 组方程描述:

$$\left. \begin{aligned} T'_1 &= K(r_1 \theta_1 - X_1) + T'_{10} \\ T_1 &= K(X_1 - r_j \theta_j) + T_{10} \\ T'_1 &= T_1 + F_{c1} \text{sgn}(\dot{X}_1) + B_{c1} \dot{X}_1 \\ T'_2 &= K(X_2 - r_1 \theta_1) + T'_{20} \\ T_2 &= K(r_j \theta_j - X_2) + T_{20} \\ T'_2 &= T_2 - F_{c2} \text{sgn}(\dot{X}_2) - B_{c2} \dot{X}_2 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中:  $T'_{10}, T_{10}, T'_{20}, T_{20}$  为钢丝绳的预张力;  $T_1, T_2$  为屈伸关节侧的钢丝绳张力;  $X_1, X_2$  为钢丝绳的位移;  $r_1, r_j$  分别为蜗轮半径与手指关节滑轮的半径;  $K$  为钢丝绳的弹性系数;  $B_{c1}, B_{c2}$  和  $F_{c1}, F_{c2}$  分别为护套上的粘性摩擦因数和库仑摩擦因数.

机器人多指手的驱动是由驱动电机通过钢丝绳实现的,机器人多指手的控制问题可以理解为控制驱动电机的输入实现对钢丝绳张力的控制问题.同时,由于 DC 电机的输出力矩可以被表示为

$$\tau_m = k_m \mu \quad (5)$$

其中,  $\mu$  为电机的输入电压,  $k_m$  为电机的转矩系数.因此,可以根据式(1)~(5)推导出驱动电机的输入电压与钢丝绳张力输出之间的数学模型,而该模型就是机器人多指手的控制模型.

但是,如式(1)~(4)所示,多指手指机构的不同部分分别存在着库仑摩擦和粘性摩擦.由于无法通过系统分析和辨识的方法求得相应的摩擦因数,所以即使在机器人多指手不与物体接触的情况下,即在不存在负载力矩的情况下,也难以得到多指手系统的准确模型.因此,为了对机器人多指手进行有效可靠地控制,必须采取正确的控制策略.

## 2 机器人多指手控制策略分析

### 2.1 机器人多指手的运动控制

在多指手的手指与物体接触之前的运动过程中,没有外力作用.由式(1)可知,当把多指手指作为 1 个转动惯量和粘性摩擦因数都随手指的姿态和运动速度而发生变化的负载考虑时,多指手指是 1 个典型的二阶系统<sup>[1]</sup>.因此,只要正确设计 DC 驱动电机控制系统,就可以达到对多指手进行运动控制的目的.

### 2.2 机器人多指手的位置控制

在多指手的运动过程中,由于驱动钢丝绳的松动、传动间隙等原因,DC 电机转角输出与手指各个关节位置之间将产生死区.这些死区的大小将随着机构的使用和磨损而发生变化,所以无法利用系统分析和辨识的手法获取与 DC 驱动电机和多指手指位置之间的准确模型,并利用该模型对多指手进行准确的位置控制.多指手指的位置控制往往只能是对 DC 伺服电机的输出进行控制,或在手指的关节位置另外安装位置检测装置.后者在实用性方面也受到很大限制.为使机器人多指手很好地完成对物体的稳定抓握任务,须对其抓握力进行反馈控制.

### 2.3 机器人多指手的力反馈控制

当多指手与物体接触后,式(2)中的负载力矩  $\tau_l'$  将不能忽略.根据前面的分析,负载力矩  $\tau_l'$  将因手指的姿态以及接触力的大小、手指与物体的接触点的位置等而发生变化,所以根本无法求得电机输入与多指手指受力之间的数学模型.因此,为了对多指手进行力反馈控制,必须采用不需要准确建立多指手数学模型的控制方案.所以在进行机器人多指手的力反馈控制时选择基于模糊控制思想的控制方案无疑是一种有力的方案<sup>[2]</sup>.

### 2.4 机器人多指手的位置—力混合控制

机器人多指手的控制系统是 1 个位置—力混合控制系统.在手指未与被抓物体接触之前,对手指的运动速度和位置进行反馈控制,以保证各个手指以给定速度运动至所需位置;当手指与被抓物体接触后,需要对抓握力进行控制,即需要切换为力反馈控制.图 3 给出了位置—力混合控制系统框图.

## 3 机器人多指手位置—力混合控制的实现

北京科技大学双拇指手控制系统采用了分布式主从计算机控制的方案.主机部分包括工控机,高速串行通讯板,A/D、D/A 板,而从机部分则包括 8 套以 Intel-8098 单片机为核心的全数

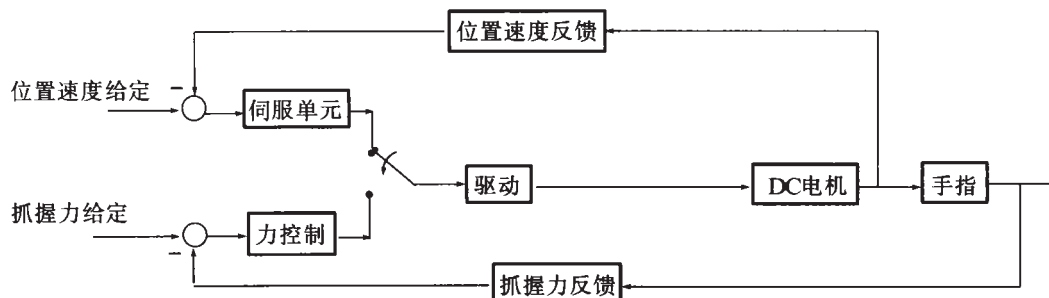


图3 北京科技大学双拇指手的位置—力混合控制框图

数字化伺服控制单元、PWM 驱动电路、力传感器信号处理单元、工业机器人 MOTOMAN 接口电路和控制驱动电源等。主机除了完成系统管理、抓取规划和作业编程等任务之外,还完成力传感器反馈信号采集,抓握力反馈控制和对各从机进行协调控制等任务。而从机则主要完成接受和执行主机命令,对伺服电机进行位置、速度的反馈控制和功率驱动等任务。

### 3.1 位置—速度反馈控制的实现

双拇指手的位置和速度控制是通过控制 DC 驱动电机的位置和速度完成的。上位机将必要的位置和速度指令通过高速串行口发给相应从机的全数字化伺服单元,由伺服单元根据安装在 DC 电机轴上的光码盘的输出信号对电机的位置和速度进行检测,并完成反馈控制。

在伺服电机的速度环中我们采用了 PI 控制,而在位置环中则采用了模糊控制+PI 控制的方案。在双拇指手的手指接近指定位置之前,为了使手指能够以较高速度运动采用了模糊控制,而为了避免出现位置超调和保证位置精度,则在手指接近指定位置后切换为 PI 控制。实验表明,采用这种控制方式时不但可以保证多指手以较高的速度运动(1.5s 以内到达指定位置),而且可以保证有足够的位置精度(电机轴的位置误差在一个脉冲以内)。

采用这种控制方式并不能保证多指手手指本身的位置和速度的精度。但是,因为机器人多指手在完成对给定物体的抓取任务时,将和机器人视觉系统以及多指手本身的力反馈控制系统配合使用,所以只要确定正确的控制策略,完全可避免位置和速度误差带来的不良影响。

### 3.2 力反馈模糊控制的实现

在多指手完成对物体的抓握过程中,上位机通过力传感器采样电路对手指与物体的接触力进行检测,并通过模糊控制算法得到所需的模糊控制量,将其转换为对 DC 驱动电机控制电压,完成对多指手的力反馈控制。图 4 给出了力闭环模糊控制器的基本结构。

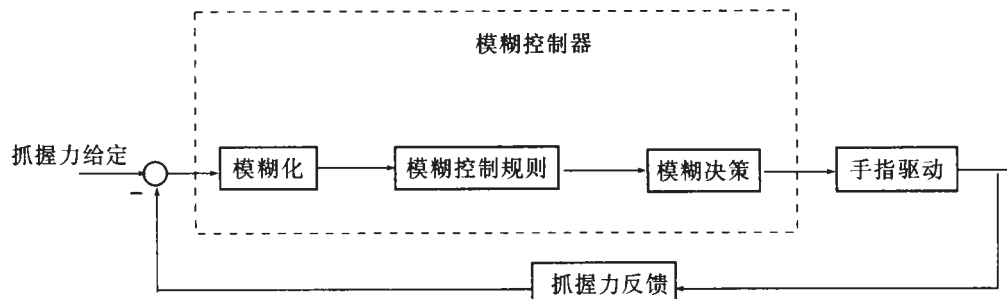


图4 力闭环模糊控制器结构图

图5给出了多手指抓握700g,直径为13cm盛水的可乐瓶时的抓握力变化情况.实验结果表明,采用上述模糊控制的方案时可以很好地完成对力的反馈控制.

#### 4 结论

将北京科技大学机器人多指手安装在日本安川电机的工业机器人MOTOMAN上,并根据上述控制策略进行了大量的抓取和搬运方面的实验研究.实验结果表明上述位置—力混合控制的控制策略非常有效,既可以保证多指手的各个手指以较高的速度和精度进行协调运动,又可以使多指手按照给定的抓握力完成对物体的稳定抓取.对于这类在传动机构中采用了钢丝绳的机器人多指手来说它是一种通用的控制策略.

#### 参考文献

- 1 王从庆. 机器人多指手控制方法的研究:[学位论文].北京:北京科技大学,1995.28
- 2 李士勇. 模糊控制和智能控制理论与应用.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.78

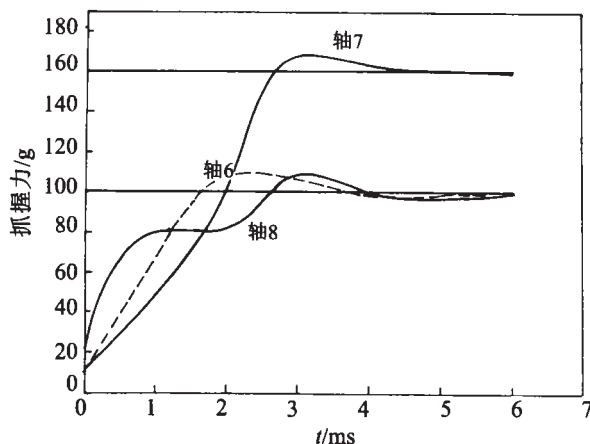


图5 实验结果

## Intelligent Control of Multi-fingered Robot Hand

Yuan Kui Yu Che Guo Feng Yuan Xingjun

Information Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** The dynamics properties of a kind of multi-fingered robot hand is analyzed. It is pointed out that the dynamics property of this kind of multi-fingered robot hand in the approaching process is quite different from that in the grasping process and, different control algorithm should be taken in the two process. A position-force hybrid control algorithm is proposed which is applied to the control system of the University of Science and Technology Beijing double-thumb robot hand successfully.

**KEY WORDS** multi-fingered robot hand; control system; position-force hybrid control