

基于对象阻抗控制的多机器人协调方法 ——模型、算法与实验¹⁾

李杰 韦庆 常文森

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 推广了单机械手的阻抗控制思想,基于被操作对象的目标阻抗关系,推导了面向对象的多手协调动力学模型和控制算法.该算法包含不同的抓持类型,考虑对象与环境的接触点信息,能够补偿整个系统的动力学特性,同时实现对象运动、外力和内力的控制;另外,该算法具有模块化结构,它的分层和并行实现缩短了双手的控制周期.在两台 PUMA562 机械手上的实验结果验证了算法的有效性.

关键词 阻抗控制,多机器人协调,面向对象控制,分层控制

中图分类号 TP242

COORDINATED CONTROL OF MULTI-ROBOTS BASED ON THE OBJECT IMPEDANCE—MODEL, ALGORITHM AND EXPERIMENTAL RESULTS

LI Jie WEI Qing CHANG Wen-Sen

(Department of Automatic Control, National University of Defense and Technology, Changsha 410073)

Abstract Extending the idea of impedance control for single manipulator, we derived the dynamic model and object-oriented control algorithm for cooperative multi-robots based on the object target impedance relationship. This algorithm accommodates various grasp types, considers the information at the contact point of the object and the environment, compensates the dynamics of the system, and controls the object motion as well as the result force and internal force at the same time. On the other hand, this algorithm has a modular structure and its hierarchic and parallel implementation shortened the control period. At last, the experimental results on two PUMA 562 manipulators verified the efficiency of this method.

Key words Impedance control, multiple manipulators cooperation, object-oriented control, hierarchic control

1) 国家自然科学基金和国家“八六三”智能机器人主题专家组基础研究资助

收稿日期 1999-06-18 收修改稿日期 1999-10-18

1 引言

机械手协调以单手系统无法比拟的优点成了极限环境作业必备的技术,其中面向对象的多手协调方法以其系统化的思想和严格的理论基础受到了格外地关注. Yoshikawa^[1]等用两台两自由度机械手研究了对象运动、外力和内力的混合控制方法,但其算法对于六自由度的多手协调来讲太复杂,存在实时性问题. Schneider^[2]等也用两台两自由度机械手研究了基于对象阻抗控制的协调方法,能实现对象运动、外力和内力的控制,但其算法有时无法得到对象完整的动力学状态. Uchiyama^[3]等基于 Moore-Penrose 逆提出了面向对象的双手对称协调控制方法,但该方法平均分配负载,忽略对象动力学,限制了它的应用范围.

本文提出的协调控制算法具有模块化结构,适合并行计算;空间六自由度的协调操作可以得到对象完整的动力学,弥补了文献[2]的不足;考虑对象动力学,动态分配负载,可动态改变对象与环境的接触点位置,扩大了双手对称协调方法^[3,4]的应用范围.

2 系统动力学模型

考虑 k 个机器人操作同一刚性对象组成的系统. 手与对象之间的接触可以是刚性的抓持、带摩擦的点接触或者无摩擦的点接触等,我们只假定接触点不在对象上滑动. 系统模型如图 1 所示. 图中 Σ_P 为参考标架; Σ_O 为固定于质心的对象标架,相对于 Σ_P 的位置矢量为

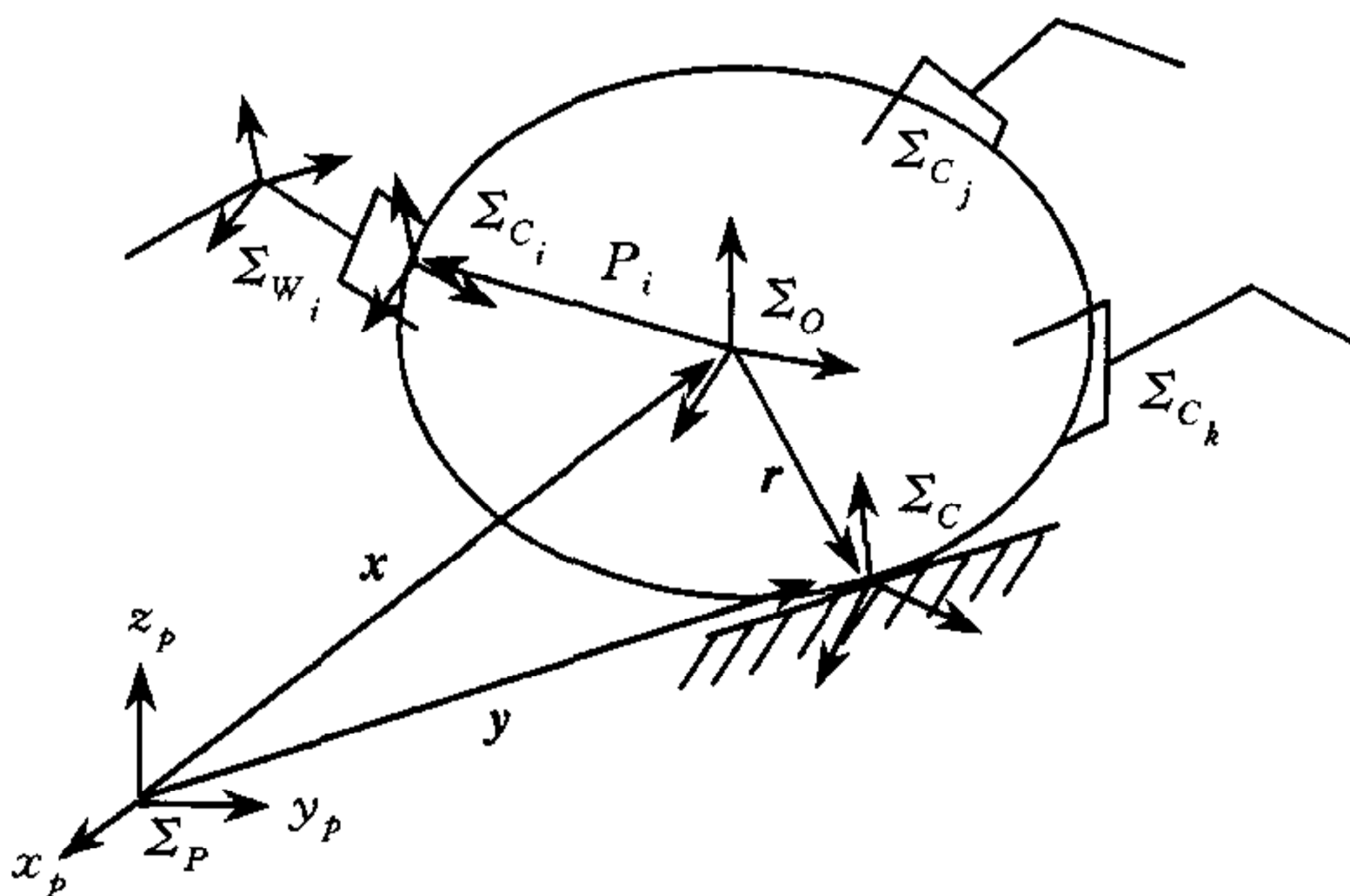


图 1 协调系统模型及标架图

$x \in R^3$; Σ_C 为对象与环境接触点 C 处的标架,对 Σ_O 的位置矢量为 $r \in R^3$,对 Σ_P 的位置矢量为 $y \in R^3$,姿态与标架 Σ_O 的姿态相同,用 $R_{pc} \in SO(3)$ 表示; Σ_{C_i} ($i = 1, 2, \dots, k$) 为各机械手与对象的接触点处的标架,它们固定于对象上,相对于 Σ_O 的位置矢量为 $p_i \in R^3$; Σ_{w_i} 为各机械手末端的腕关节坐标系,各接触点在相应的腕关节标架中的矢量为 $l_{hi} \in R^3$;除非说明,文中的速度均为体速度,力/力矩矢量均对自身标架描述.

我们

我们用矩阵 $S_i = [s_{i1} \ s_{i2} \ \dots \ s_{id_i}] \in R^{6 \times d_i}$ 描述机械手 i 与对象间的抓持类型^[5], 其中 $s_{ij} \in R^6$ ($j = 1, 2, \dots, d_i, d_i \leq 6$) 为在标架 Σ_{C_i} 中表达的单位矢量,它表示机械手能在对象上施加的独立力的方向,在这个方向上无相对运动产生. 例如, $S_i = I_6$ 表示刚性抓持; $S_i = [I_3 \ 0_3]^T$ 表示手以有摩擦的点接触对象,只能施加 3 个方向的力,不能施加力矩. d_i 为施加的独立力的个数. 将 k 个 S_i 联合起来,得到机械手与对象间的约束矩阵为

$$S = \text{diag}[S_1 \ S_2 \ \dots \ S_k] \in R^{6k \times d}, \quad d = \sum_{i=1}^k d_i \tag{1}$$

对象质心相对于参考系 Σ_P 的位姿可由手 i 运动的关系 $g_{po} = g_{pw_i} g_{w_i c_i} g_{c_i o}$ 得到,其中 g_{pw_i} 为手 i 的前向运动学, $g_{w_i c_i}$ 和 $g_{c_i o}$ 分别是手 i 的腕标架到接触标架和接触标架到对象标架的

运动学. 对 g_{po} 微分, 并注意到 $g_{c_i o}$ 为常量, 得到对象质心的速度螺旋坐标为

$$V_{po} = Ad_{g_{w_i o}}^{-1} V_{pw_i} + Ad_{g_{c_i o}}^{-1} V_{w_i c_i} \quad (2)$$

其中 V_{pw_i} 为手 i 的速度, $V_{w_i c_i}$ 为 Σ_{C_i} 相对 Σ_{W_i} 的速度. 由于手 i 的执行器与对象间在 S_i 的各方向上不滑动, 即有约束关系 $S_i^T V_{w_i c_i} = 0$, 将式(2)中的 $V_{w_i c_i}$ 代入此关系得到

$$S_i^T Ad_{g_{c_i w_i}} V_{pw_i} = S_i^T Ad_{g_{c_i o}} V_{po} \quad (3)$$

将式(3)联合, 并写成紧凑形式为

$$S^T W_h^T V_h = S^T W^T V_{po} \triangleq W_S^T V_{po} \quad (4)$$

其中 $V_h = [V_{pw_1}^T \cdots V_{pw_k}^T]^T \in R^{6k}$ 为各手的速度联合矢量, $W_S \triangleq WS \in R^{6 \times d}$, $W^T = [Ad_{g_{c_1 o}}^T \cdots Ad_{g_{c_k o}}^T]^T \in R^{6k \times 6}$, $W_h^T = \text{diag}[Ad_{g_{c_1 w_1}} \cdots Ad_{g_{c_k w_k}}] \in R^{6k \times 6k}$. 式(4)即为机械手与对象间的运动约束关系.

下面求力约束关系. 设对象在 C_i 处受到的机械手的作用力为 $F_{c_i} = [f_{c_i}^T \quad \tau_{c_i}^T]^T \in R^6$, 联合为 $F_c = [F_{c_1}^T \quad F_{c_2}^T \cdots F_{c_k}^T]^T \in R^{6k}$; 机械手 i 能够施加到 C_i 处的作用力为 $F_{hc_i} = [f_{hc_i}^T \quad \tau_{hc_i}^T]^T \in R^{d_i}$, 联合为 $F_{hc} = [F_{hc_1}^T \quad F_{hc_2}^T \cdots F_{hc_k}^T]^T \in R^d$; 定义 $F_{hw} = [F_{hw_1}^T \quad F_{hw_2}^T \cdots F_{hw_k}^T]^T \in R^{6k}$ 为表示在各 Σ_{C_i} 中的与各机械手的末端力 F_{w_i} 等价的联合力矢量, 并令 $F_w = [F_{w_1}^T \quad F_{w_2}^T \cdots F_{w_k}^T]^T \in R^{6k}$.

由速度约束关系及对偶原理知道, 对象在 C_i 处受到的作用力 F_{c_i} 与机械手 i 能够施加到 C_i 处的作用力 F_{hc_i} 有关系 $F_{c_i} = S_i F_{hc_i}$, 机械手 i 能够施加到 C_i 处的力只能在 S_i 的各方向上, 即有 $F_{hc_i} = S_i^T F_{hw_i}$, 于是 $F_{c_i} = S_i S_i^T F_{hw_i}$. 将之写成紧凑形式为

$$F_c = S S^T F_{hw} \quad (5)$$

又由对偶原理可知, 各机械手作用于对象的合力 $F = [f^T \quad \tau^T]^T \in R^6$ 为 $F = W F_c$. 同理可得到关系 $F_{hw} = W_h F_w$, 于是有

$$F = W F_c = W S S^T F_{hw} = W S S^T W_h F_w \triangleq W_{SSH} F_w \quad (6)$$

上式即为机械手与对象间的力约束关系. 从中看到, 要在三维空间自由操作对象, W_{SSH} 的秩必须为 6.

现求对象的动力学方程. 设对象的质量为 m , 相对体标架的惯性张量为 $I \in R^{3 \times 3}$, 则在体标架中描述的对象动力学方程为

$$\tilde{I}_O \dot{V}_{po} + \tilde{Q}_O = F_{ext} + F \quad (7)$$

其中 $\tilde{I}_O = \text{diag}[mI_3 \quad I] \in R^{6 \times 6}$, $\tilde{Q}_O = [(-mg + \omega_{po} \times mv_{po})^T \quad \{\omega_{po} \times (I\omega_{po})\}^T]^T \in R^6$, I_n 为 $n \times n$ 单位阵, g 为重力加速度, $F_{ext} = [f_{ext}^T \quad \tau_{ext}^T]^T$ 为对象所受环境的作用力.

方程(7)是以对象质心为目标点描述的. 当我们关心的是接触点处的力和位置控制时, 由体标架间的速度关系^[4]得到 $V_{pc} = Ad_{g_{oc}}^{-1} V_{po} + V_{oc}$. 因 Σ_O 与 Σ_C 都固定于对象上, 有 $V_{oc} = 0$, 从而

$$V_{po} = Ad_{g_{oc}} V_{pc} = [(v_{pc} + \hat{r}\omega_{pc})^T \quad \omega_{pc}^T]^T \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 注意到 $g_{oc} = (I_3, \hat{r})$ 为常量, 得到以 C 为目标点的对象动力学方程为

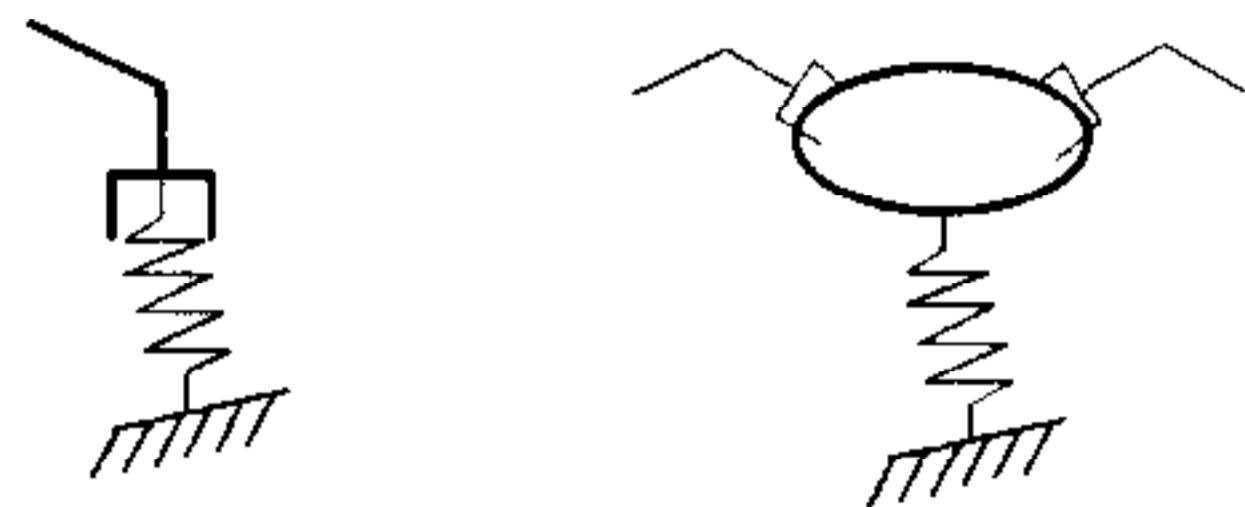
$$I_O \dot{V}_{pc} + Q_O = F_{ext} + F \quad (9)$$

这里

$$I_O = \tilde{I}_O Ad_{g_{oc}} = \begin{bmatrix} mI_3 & m\hat{r} \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad Q_O = \begin{bmatrix} -mg + \omega_{pc} \times mv_{pc} - m(\omega_{pc} \times (\omega_{pc} \times r)) \\ \omega_{pc} \times I\omega_{pc} \end{bmatrix}.$$

3 控制算法推导

Hogan 的阻抗控制思想可以想象为机械手附着在一端固定于环境的弹簧阻尼系统上,



(a) 单手阻抗控制 (b) 对象阻抗控制

图 2 阻抗控制示意图

弹簧的刚度可通过程序改变. 本文的对象阻抗思想^[2]是将对象附着于固定在环境上的弹簧阻尼系统上, 如图 2 所示. 单手的阻抗关系可以推广到对象的阻抗控制中. 单手的目标阻抗关系一般可写为

$$m_d \ddot{z} = e + f_{imp} \quad (10)$$

上式中 $f_{imp} = m_d \ddot{z}_{des} - k_v (\dot{z} - \dot{z}_{des}) - k_p (z - z_{des})$ 称为阻抗力; m_d , k_v 和 k_p 为正的惯性、阻尼和刚度系数; z 和 z_{des} 分别为位置的实际值和期望值; e 为力或力误差.

本文的思路是建立一种理想的阻抗关系, 通过各手的控制, 使对象的动力学跟踪这个目标阻抗关系. 为此, 我们构造一个理想的对象, 建立它的动力学方程(目标阻抗关系).

设理想对象与实际对象的质心重合, 其质量和相对 C 点的惯性张量分别为 m 和 I_d , 作用力 $F_{ext} = [f_{ext}^T \quad \tau_{ext}^T]^T$ 和指令力 $F_d = [f_d^T \quad \tau_d^T]^T$ 也作用于理想对象的质心处. 假设阻抗力/力矩 $F_{imp} = [f_{imp}^T \quad \tau_{imp}^T]^T$ 作用于理想对象的 C 点, 则期望对象的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} mI_3 & 0 \\ 0 & I_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{pc} \\ \dot{\omega}_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{pc} \times m v_{pc} \\ \omega_{pc} \times I_d \omega_{pc} \end{bmatrix} = Ad_{g_{oc}}^T \left(\begin{bmatrix} f_{ext} \\ \tau_{ext} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_d \\ \tau_d \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} f_{imp} \\ \tau_{imp} \end{bmatrix},$$

紧凑形式为

$$I_{od} \dot{V}_{pc} + Q_{od} = E_{ext} + F_{imp} \quad (11)$$

其中 E_{ext} 为对象 C 处的外力误差.

为使实际对象的动力学跟踪理想对象, 实际对象在 C 处的加速度必须与理想对象的相同. 从式(11)解得这个加速度 \dot{V}_{pc} , 注意到关系式(8), 将之代入速度约束方程(4), 并对时间微分(S, W_S 和 $Ad_{g_{oc}}$ 都为常数)得到各机械手的期望加速度矢量为

$$\dot{V}_{hd} = W_h^{-T} [(S^T)^+ W_S^T Ad_{g_{oc}} \dot{V}_d + N_S A_{I_d} - \dot{W}_h^T V_h] \quad (12)$$

这里 $(\cdot)^+$ 为 Moore-Penrose 广义逆, $N_S = I_{6k} - (S^T)^+ S^T$ 为到矩阵 S^T 零空间上的投影矩阵, A_{I_d} 为任意常数, 只存在于非刚性抓持的情况 ($\text{rank } S < 6k$).

下面计算阻抗力 F_{imp} . 设对象 k 时刻的指令位姿为 $\Omega_{cmd}(k) = [y_{cmd}^T(k) \quad \phi_{cmd}^T(k)]^T$, 其中 $\phi_{cmd}(k) = [O_k \quad A_k \quad T_k]^T$ 为 Euler 角表示的姿态伪向量(以下省略时标 k). 先将 Ω_{cmd} 转换为期望位姿 g_{pc}^d , 再利用螺旋理论^[4] 计算对象的位姿误差矢量.

对象 C 点的实际位姿为 $g_{pc} = g_{po} g_{oc} \triangleleft (R_{pc}, y)$, 指令位姿为 $g_{pc}^d \triangleleft (R_{pc}^d, y^d)$, 由 Ω_{cmd} 求姿态矩阵 R_{pc}^d 的方法参见文献[6], $y^d = y_{cmd}$; 设由 g_{pc} 到 g_{pc}^d 的速度螺旋坐标为 $\xi = [v, w]^T$, 由螺旋理论可知, $e^{\hat{\xi}\theta} \in SE(3)$ 是一个螺旋运动, θ 是螺旋的量值. g_{pc} 运动 $e^{\hat{\xi}\theta}$ 后达到 g_{pc}^d , 因速度螺旋 $\hat{\xi}$ 在体标架描述, 有 $g_{pc}^d = g_{pc} \cdot e^{\hat{\xi}\theta}$, 即 $e^{\hat{\xi}\theta} = g_{pc}^{-1} g_{pc}^d$. 利用 $e^{\hat{\xi}\theta}$ 的计算公式, 注意到 θ 是一个微量, 且 $\omega\omega^T - \hat{\omega}^2 = I_3$, 可解得

$$\omega\theta = \frac{1}{2} [o^d a - a^d o \quad a^d n - n^d a \quad n^d o - o^d n]^T \quad (13a)$$

$$v\theta = R_{pc}^T (y^d - y) \quad (13b)$$

其中 $[n \ o \ a] = R_{pc}$, $[n^d \ o^d \ a^d] = R_{pc}^d$. 于是从 g_{pc} 运动到 g_{pc}^d 的位置误差为 $\delta_p = v\theta$, 姿态误差为 $\delta_\theta = \omega\theta$, 它们是对象实际位姿和期望位姿的函数, 可表示为 $\delta = [\delta_p^T \ \delta_\theta^T]^T = \delta(g_{pc}, \Omega_{cmd})$.

求得了位姿误差后, 再利用对象的体速度, 得到理想对象的阻抗力计算公式为

$$F_{imp} = I_{od}\dot{V}_{cmd} - K_v \cdot (V_{pc} - V_{cmd}) - K_p \cdot \delta(g_{pc}, \Omega_{cmd}) \quad (14)$$

式中 \dot{V}_{cmd} 和 V_{cmd} 分别是对象 C 点的指令加速度和速度, K_v 和 K_p 是目标阻抗关系的系数.

现在求各机械手的期望力. 将对象的期望加速度 \dot{V}_{pc} 和力约束关系(6)代入对象动力学方程(9), 并以各手的联合力矢量为变量解方程得到

$$F_{wd} = (W_{SSh})^{w+} \{Q_0 - F_{ext} + I_O I_{od}^{-1} (E_{ext} + F_{imp} - Q_{od})\} + N_{W_{SSh}} f_{int} \quad (15)$$

上式中 $N_{W_{SSh}}$ 为到矩阵 W_{SSh} 的零空间上的投影矩阵; $W_{SSh}^{w+} = Q^{-1} W_{SSh}^T (W_{SSh} Q^{-1} W_{SSh}^T)^{-1}$ 为 W_{SSh} 的加权伪逆, 通过改变对角加权矩阵 Q 可以改变各手的负载; f_{int} 为对象的内力控制项, 可以形成比例积分控制的形式; F_{ext} 为对象所受的外力, 可由式(9)求得为 $F_{ext} = I_O \dot{V}_{pc} + Q_0 - F$, 其中对象加速度 \dot{V}_{pc} 可以用当前的指令加速度 \dot{V}_{cmd} 或上一时刻理想对象的加速度 $\dot{V}_{pc}(k-1)$ 代替, 这两种方案都能取得满意的实验结果.

得到了各机械手的期望加速度和期望力后, 各机械手根据这些控制量进行各自的控制. 经过反馈线性化后, 机械手的主动控制力矩可取为

$$F_a = H(\theta)\dot{V}_{hid} + F_{wid} \quad (16)$$

其中 \dot{V}_{hid} 和 F_{wid} 分别为机械手 i 的期望加速度和力矢量, $H(\theta)$ 为机械手的惯性矩阵. 对单机械手而言, 上式为开环的阻抗控制形式, 式中符号的详细说明见文献[6].

4 算法分解与实验

我们的 GKD4 系统主要有两台 PUMA560 机械手和基于 VME 总线的 Delta3000 工控机构成, VME 总线上有三块单板机负责两台机械手的控制. 针对系统配置, 将控制算法进行了分解: 一个 CPU 计算对象的状态及各手的控制量; 另二个分别负责一台机械手的下层控制. 算法的并行计算结构如图 3 所示. 图中括号里的数字表示该方块计算所根据的公式. 经过分解以后, 对象模块的计算周期为 2.2ms, 各手的控制周期为 1.7ms.

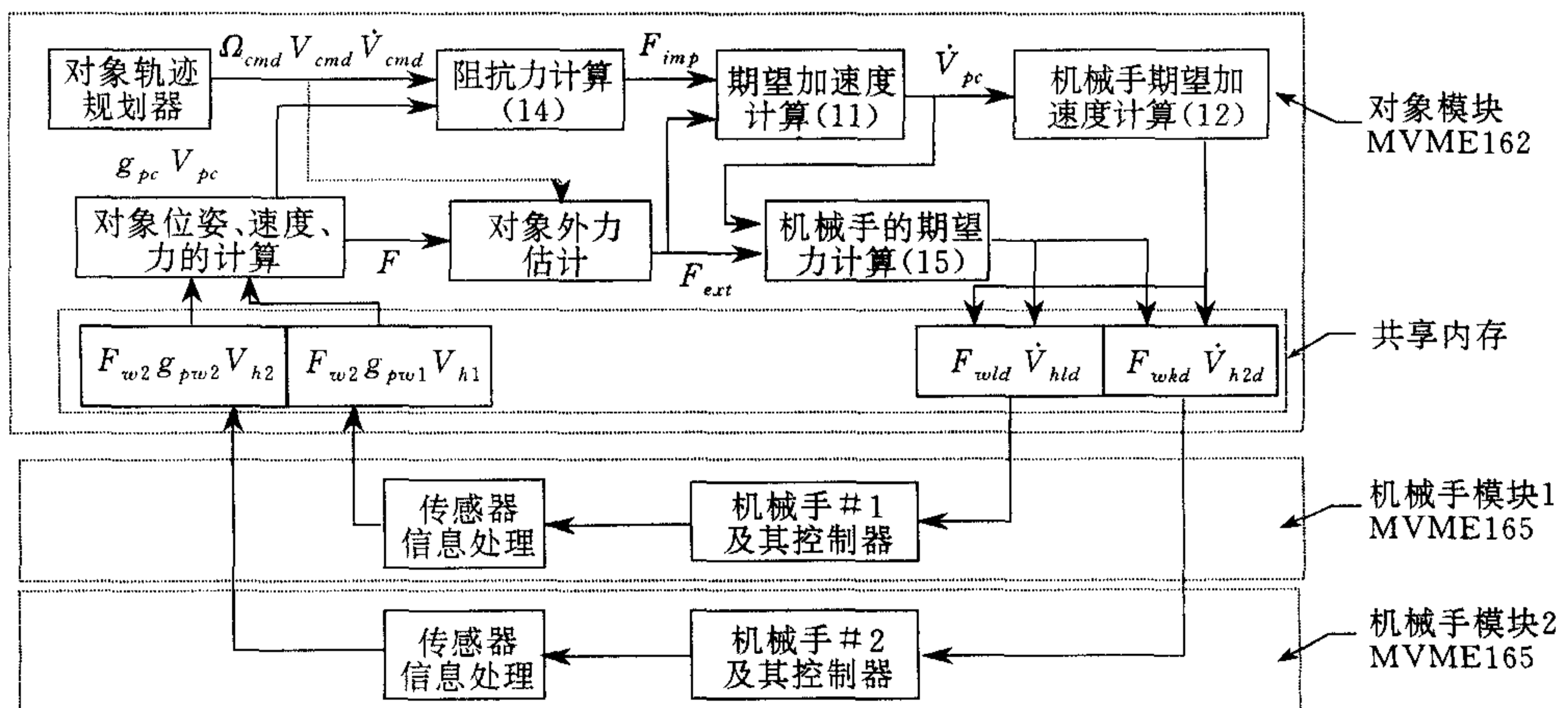


图 3 控制算法并行计算结构图

基于 GKD4 平台,我们用双手紧密抓持同一刚性对象验证了本文的算法.算法中,约束矩阵 $S = \text{diag}[I_6, I_6]$, $d_1 = d_2 = 6$,被操作对象的质量为 $m = 0.5\text{kg}$,相对质心的惯性张量为 $I = \text{diag}[0.04, 0.001, 0.04]\text{kgm}^2$;理想对象的惯性张量为 $I_d = \text{diag}[1.0, 1.0, 1.0]\text{kgm}^2$,质量 $m_d = 1.0\text{kg}$.实验内容如下所述.

1) 对象自由运动时的位姿和内力的控制实验.双手紧密抓持刚性棒体,在空间做平移或绕定点旋转运动.目标点设在对象质心,对象指令外力和内力都为零,内力采用 PI 控制形式;六个方向上,内力控制的比例和积分系数分别为 0.2 和 0.6,阻抗关系中的参数 $k_v = 20$, k_p 在位置和姿态控制中分别为 1 500 和 1 600.图 4 给出了对象在 Z 方向下降 0.12m 时的位置、位置误差和 Y 方向(两传感器的连线方向)的内力曲线.由图可见,对象位置控制误差小于 1.0mm, Y 方向的内力在 $\pm 1.0\text{N}$ 之内.其它方向的位置误差和内力都不大于这两个值.

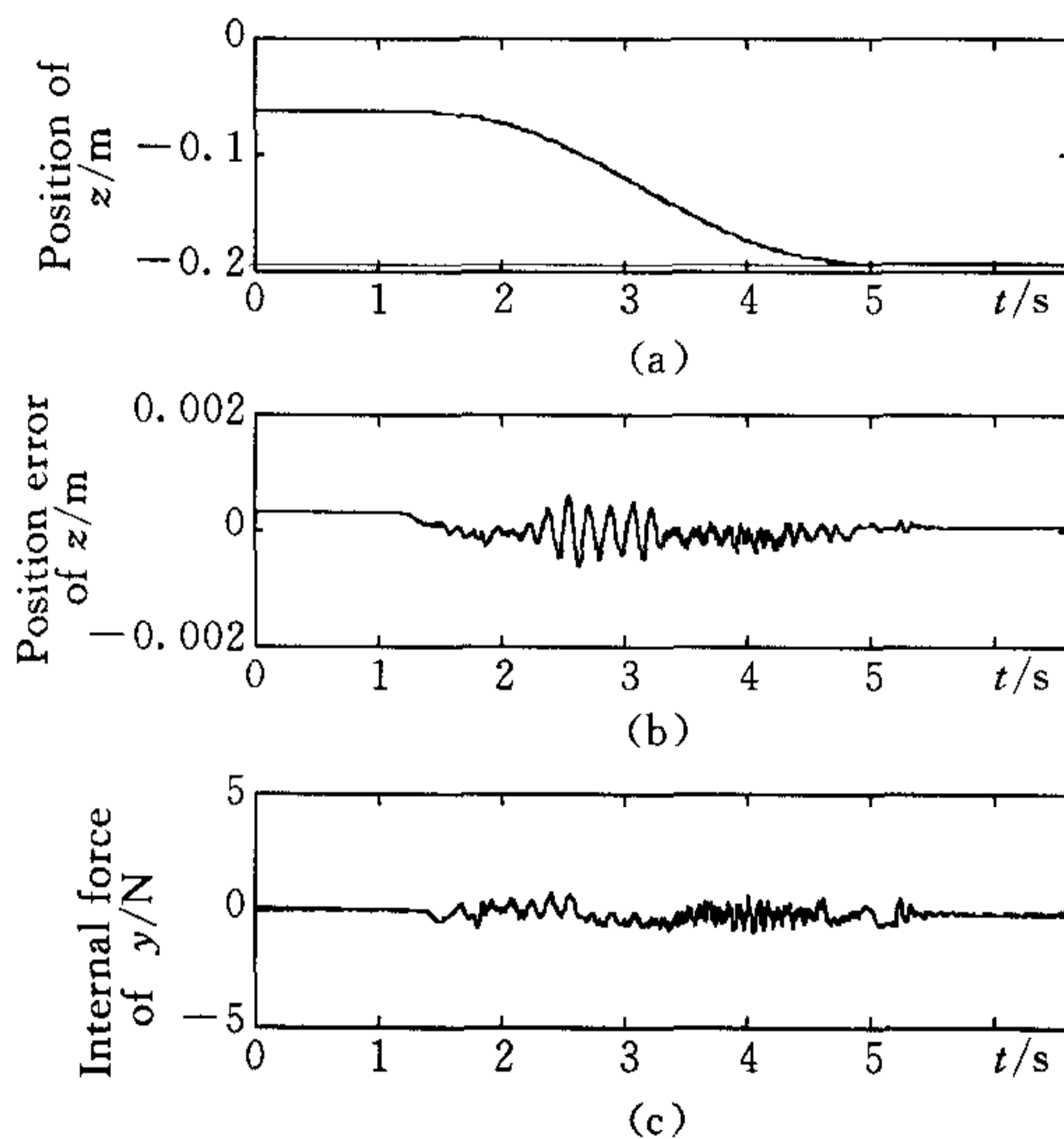


图 4 对象自由运动时的轨迹跟踪情况

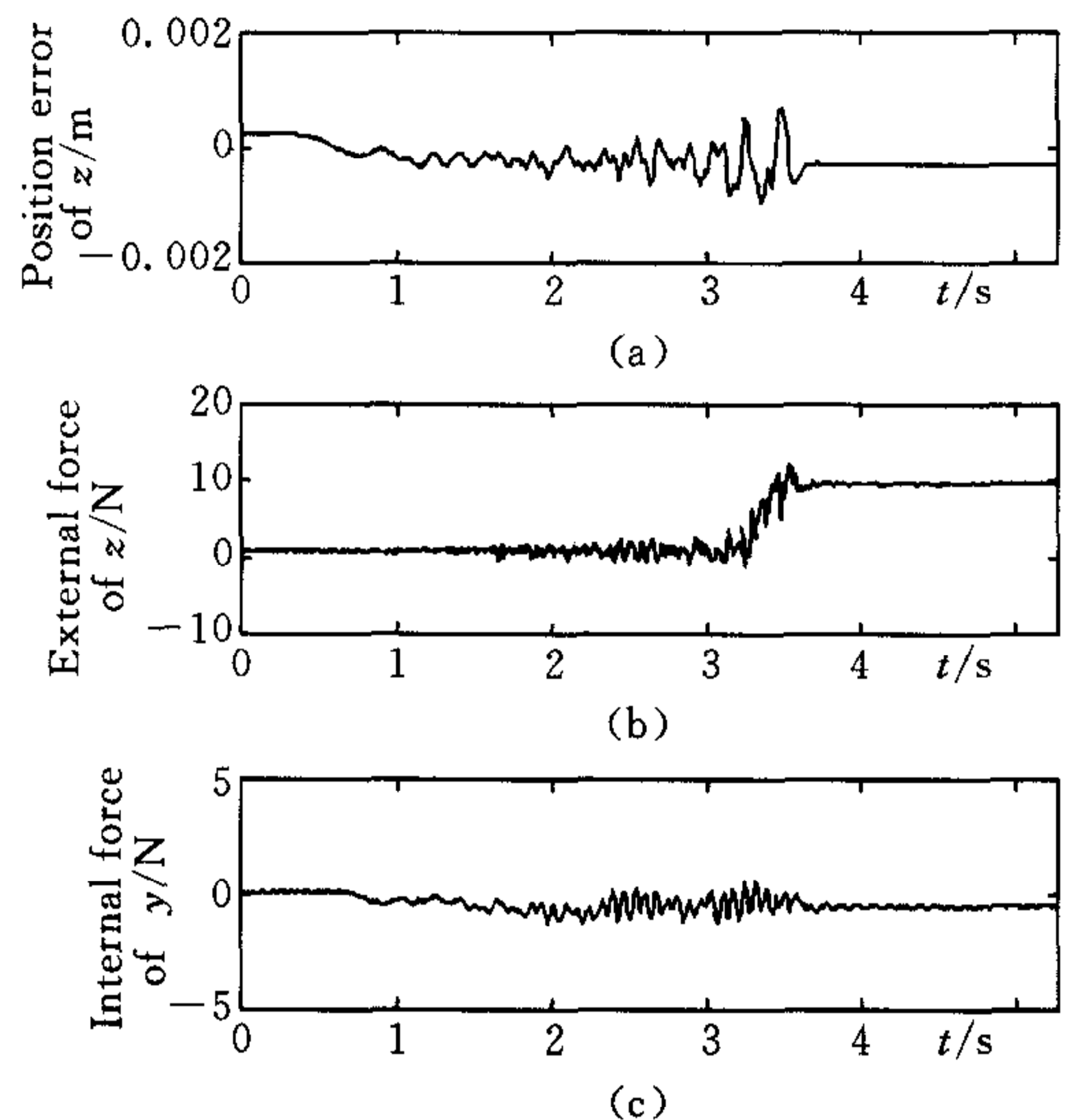


图 5 对象与环境接触时的力控制

2) 对象运动过程中遇到环境,并对环境施加一定压力的实验.在实验中,系统自动判断环境位置.六个方向内力控制的比例和积分系数分别为 0.4 和 1.0;前三方向的速度系数 $k_v = 18$,位置系数 $k_p = 1 500$,后三方向 $k_v = 20$, $k_p = 2 500$;对象 Z 方向的指令外力为 10N.图 5 给出了对象沿 Z 轴运动中遇到台秤时的控制曲线.从图中看到,由于动态判断环境知识,外力控制达到了较高的精度,而且外力跟踪曲线没有大的抖动,这体现了阻抗控制策略统一的特点.内力控制与自由运动情况类似.

从实验结果看到,无论对象是自由运动还是与环境接触,本文的算法对运动、外力和内力的控制都达到了较高的精度.另外,算法具有模块化结构,其分层并行实现不仅利于实时计算,而且为高层的规划调度提供了方便的接口.它补偿对象动力学,包含与环境的接触点信息,灵活分配负载等特点对于操作大质量对象和完成装配等作业将有较大的意义.

参 考 文 献

- dling one constrained object. *Int. J. Robotics Research*, 1993, **12**(3):219~230
- 2 Schneider S A, Cannon R H. Object impedance control for cooperative manipulation: Theory and experimental results. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1992, **8**(3):383~394
- 3 Uchiyama M, Dauchez P. Symmetric kinematic formulation and non-master/slave coordinated control of two arm robots. *Advanced Robotics*, 1993, **79**(4):361~383
- 4 陈国栋,常文森,张 彭,陈 景. 双机械手对称协调力/位混合控制——模型、控制算法与实现. *自动化学报*, 1996, **22**(4):418~427
- 5 Murry R, Li Zexiang, Sastry S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press. USA, 1994
- 6 常文森,朱晓峰,张曲光,徐小林. 操作器力和位置混合控制:数学模型和实验研究中的几个问题. *机器人*, 1993, **15**(1):1~9

李 杰 见本刊第 27 卷第 3 期.

韦 庆 见本刊第 23 卷第 4 期.

常文森 见本刊第 21 卷第 6 期.

系统复杂性研究中心在中国科学院自动化研究所挂牌成立

中国科学院自动化研究所

由中国科学院自动化所联合中国科学院过程研究所、中国中医研究院中药研究所、首都儿科医学研究所、国家安全部信息安全研究所、青岛大学等单位,于 2001 年 12 月 21 日在中国科学院自动化研究所挂牌成立“系统复杂性研究中心(System Complexity Research Center)”.该中心的成立,是中国科学院在前沿领域进行新布点的举措,也将有利于我国不失时机地开展复杂性科学研究并进一步提高我国在该学科领域的学术地位.

全国人大副委员长蒋正华,国家自然科学基金委员会副主任周炳昆等出席了成立大会.蒋正华副委员长在成立大会上讲话并祝贺中心成立.

指导委员会

总顾问 钱学森

委 员 成思危 蒋正华 于景元 王永炎 朱宗涵 李静海 刘艳茹 何德全 张嗣瀛
杨芙清 葛家理 郭 雷 涂元季 徐建培 谭铁牛 戴汝为

学术委员会

主 任 戴汝为

副主任 王飞跃 王 龙 黄璐琦

委 员 于景元 王飞跃 王 龙 刘保延 刘艳茹 朱宗涵 余振苏 李静海 张嗣瀛
陈 彪 陈 钰 张兆田 郭 雷 涂元季 黄 琳 黄璐琦 刘 胜 姚 力
谭 民 田 捷 杨一平 戴汝为