

机器人班组的自组织递阶控制

高为炳

(北京航空航天大学第七研究室 北京 100083)

摘 要

研究了机器人班组在执行各种任务时的协调控制。由于机器人班组是由多个能力有限的机器人组成的,被操作的对象可以是一个刚体、柔性体或机械系统,而且需要跟踪的运动也可以是各种各样的,所以整个系统是相当复杂的。这样的机械系统,按其力学性质可以将要实现的控制任务加以分解,从而实现递阶控制,各层的控制只完成被分解出来的特定的较简单的任务,而各机器人之间的协调由自组织算法自动完成。

关键词: 机器人控制,多机器人系统,机器人班组,自组织递阶控制。

1、引言

由于单个机器人的能力是有限的,如它的功率有限,且待操作的对象可能并非简单的刚体,欲跟踪的运动也是各种各样的,这就需要采用多个机器人组成的系统,才能完成任务。多机器人系统具有一些新的特点,如各机器人之间的运动是关联的,控制力数目多,因之其解是不唯一的,这就出现了协调控制载荷分配等新问题。近十余年来,在这方面已有不少研究工作:其中文[1]综述了多机器人系统控制中的特点、问题及成就,并给出了较完全的文献索引;文[2]和[3]中提出了新的“主-助”型控制策略,与其他所有研究不同,文中假设了单个机器人的控制强度的有限性,这是有现实工程背景的。同时还给出了力学及运动学的传递链,用递推形式表示了机器人之间的约束;文[4]研究手部强度受限的情况;文[5]解决了混合控制问题;文[6]研究了柔性体同时实现形状不变和运动跟踪控制;而文[7]考虑了对机械系统的跟踪控制。

除了单个机器人能力的有限性以外,还有一些问题在已有的文献中也未得到考虑,而这些问题正是多机器人系统控制问题中比较重要也不易解决的。这些问题有:在“主-助”控制中,如何保证每个机器人都做贡献;当系统在所设能力限制下不能完成任务时,如何调整能力限制,使任务得以完成;当任务变更时(包括物体变更和需要跟踪的运动变更),又如何使控制系统具有自调整能力。本文将研究上述几个问题,使对多机器人系统设计的控制策略具有更好的自适应和自调整能力。

在文[2—7]的基础上,本文建立了递阶自组织控制,以适应被控对象的变化、更换以

及机器人系统在复杂情况下的任务调整问题。

2、预备知识

本节给出文献[2,3]提出的定义、符号及“多机器人加物体”系统的静力学、运动学和动力学公式。

任意一个力系 $F = \{(f_i, p_i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 f_i 表示力向量, p_i 为作用点向量, n 为力的数目, 可以表示为一个力向量 f 和一个力矩向量 m_0 :

$$F = \{f, m_0\}, \quad f = \sum_{i=1}^n f_i, \quad m_0 = \sum_{i=1}^n r_i \times f_i. \quad (1)$$

其中 r_i 表示从 p_i 到刚体上任选的 o 点的向径。

力系 F 还可以表示为 6×1 阵形式:

$$F = [f_x, f_y, f_z, m_{ox}, m_{oy}, m_{oz}]^T, \quad (2)$$

其中 $oxyz$ 为任一坐标系, 这里被取为和某物体固联的动坐标系。 F 的各分量为 (f, m_0) 在相应坐标轴上的投影。

两个等价的力系间有转换关系

$$F_{0'} = SF_0, \quad (3)$$

其中 S 为一非奇 6×6 阵。

刚体的位置可以表示为:

$$P_0 = [x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \psi_0, \theta_0]^T. \quad (4)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 为 o 点坐标, $(\varphi_0, \psi_0, \theta_0)$ 表示刚体方位的欧拉角。

刚体的速度有两种表示方法:

$$\dot{P}_0 = [V_{0x}, V_{0y}, V_{0z}, \dot{\varphi}_0, \dot{\psi}_0, \dot{\theta}_0]^T, \quad (5)$$

$$V_0 = [V_{0x}, V_{0y}, V_{0z}, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T. \quad (6)$$

其中 $V_{0x} = \dot{x}_0, V_{0y} = \dot{y}_0, V_{0z} = \dot{z}_0$, 而 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 则表示角速度 ω 在动系 $oxyz$ 上的投影。两者之间的关系为

$$V_0 = X\dot{P}_0. \quad (7)$$

这里 X 是 6×6 非奇阵。

同一刚体在不同参考点 O 和 O' 的速度 V_0 和 $V_{0'}$ 之间有关系

$$V_{0'} = YV_0. \quad (8)$$

其中 Y 也是 6×6 非奇阵。

机器人端点作用器 E 的速度 V_e 与其关节速度 \dot{q} 之间有关系

$$V_e = G\dot{q}. \quad (9)$$

其中 G 是与 q 有关的 6×6 转换阵, V_e 也是机器人所抓紧的刚体的速度(参考点为作用器)。

现在给出系统的动力学方程:

机器人(共 m 个)的动力学方程为

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + N_i(q_i, \dot{q}_i) = \tau_i + G_i^T f_{ei}, \quad (10)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, m$; f_{ei} 为刚体加给第 i 个机器人的端点作用器的力。

刚体的动力学方程为

$$\dot{V} = K + F. \quad (11)$$

其中 $K = [L_x, L_y, L_z, H_x, H_y, H_z]^T$;

$$\begin{aligned} L_x &= \omega_z V_y - \omega_y V_z; \quad L_y = \omega_x V_z - \omega_z V_x; \\ L_z &= \omega_y V_x - \omega_x V_y; \quad H_x = J_x^{-1}(J_y - J_z)\omega_y\omega_z; \\ H_y &= J_y^{-1}(J_z - J_x)\omega_z\omega_x; \quad H_z = J_z^{-1}(J_x - J_y)\omega_x\omega_y; \\ F &= Ef; \quad E = \text{diag}[m^{-1}, m^{-1}, m^{-1}, J_x^{-1}, J_y^{-1}, J_z^{-1}]. \end{aligned}$$

f 表示加在刚体上的所有力组成的力系; m 为刚体质量; J_x, J_y, J_z 为其转动惯量。为简单计, 这里 $J_{xy} = J_{yz} = J_{zx}$ 取为零。

3、机器人控制的若干力学性质

为了对物体-机器人系统用递阶控制策略来解决所研究的问题, 明确以下力学性质是必要的。

性质 1.^[3] 力传递链。作用于物体-机器人系统各部分上的等价或平衡力系之间有以下关系, 形成一个力传递链

$$\tau_{i+1} = -G_{i+1}^T f_{ei+1}, \quad f_{ei+1} = S_{i+1}^{-1} f_i, \quad f_i = S_i f_{ei}, \quad f_{ei} = -G_i^{-1} \tau_i, \quad (12)$$

其中 f_i 为力系在物体质心上的表示。

性质 2.^[3] 速度传递链。物体-机器人系统的各部分的速度间有以下关系式, 且呈递推的链形关系:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{i+1} &= G_{i+1}^{-T} V_{ei+1}, \quad V_{ei+1} = Y_{i+1} V_0, \\ V_0 &= Y_i^{-1} V_{ei}, \quad V_{ei} = G_i^T \dot{q}_i. \end{aligned} \quad (13)$$

这一关系式与文献[8]中速度约束是等价的, 但以递推形式代替了代数等式, 且表示出任一部分的任意表示方法的等价及关系式, 是“主-助”型控制策略的建立所需要的。

性质 3.^[6] 控制力的可分解性。力学系统的力学原理可以取为拉格朗日方程

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} &= Q_i, \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial r_j}{\partial q_i} \right]^T F_j. \end{aligned} \quad (14)$$

其中 Q_i 为相对 q_i 的广义力; F_j 是加在系统上的力。这里需要指明 F_j , 即控制 $u_j(\tau_j)$, 是以线性形式出现的。将(14)式展开, 得

$$M_i(q_i) \ddot{q}_i + N_i(q_i, \dot{q}_i) = G_{i0} u_i + \sum_{j=1}^{n_i} G_{ij}^T F_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

其中 G_{ij} 均为非奇 6×6 阵, u_i 与 F_{ij} 均为原来的外力 $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 中的一部分, m 为机器人数量。

现在可将 u_i 分解为任意部分

$$\mathbf{u}_i = \sum_{\alpha=1}^{a_i} \mathbf{u}_{i\alpha},$$

使各部分 $\mathbf{u}_{i\alpha}$ 实现一定的任务。如使机器人本身跟踪一个运动^[2,3],使机器人承担一部分使物体跟踪运动所需的载荷,使柔性物体保持形状的微运动控制^[6],使物体与约束之间维持一定压力^[7]等等。

这种控制的可分解性,即可加性,是构造递阶控制的理论基础。在可解性基础上,就可以实现所谓的“主-助”型控制策略。此策略的前提是这样的基本假设:单个机器人的能力是有限的,当采用 m 个机器人的多机器人系统来执行某任务时,这就表示较少数目的机器人不足以完成任务。

机器人的能力采用握力强度,即端点作用器 E_i 的机械强度,并以力的极限来表示

$$|\mathbf{f}_{ci}| \leq \mathbf{f}_{ci}^*, (i = 1, 2, \dots, m). \quad (16)$$

这里绝对值及不等式均为对元而言的,即

$$|f_{cij}| \leq f_{cij}^*, (j = 1, 2, \dots, 6).$$

要说明的是标量 f_{cij}^* 可以是强度极限^[4],也可以是一种调整参数,它表示欲使该机器人承担的载荷的大小。正常参数值记为 f_{cij}^{*0} ,另取一个增强值 $f_{cij}^{*'}$ 和一个减弱值 $f_{cij}^{*''}$,它们满足:

$$f_{cij}^{*'} > f_{cij}^{*0} > f_{cij}^{*''} > 0 \quad (17)$$

今后,对任一机器人,如第 i 个,将通过选择 $f_{ci}^{*'}, f_{ci}^{*0}, f_{ci}^{*''}$ 中的一个来调整其载荷,以实现 m 个机器人载荷的重新分配。

4、控制策略

下面将按层次建立控制策略。

4.1 第一层单机器人控制

可取任一种常用的单机器人控制,如计算力矩控制、变结构控制或 PID 控制(适应于定点镇定)等。采用计算力矩控制方法,则有

$$\mathbf{u}_{i1} = N_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + M_i(\mathbf{q}_i)[\ddot{\mathbf{q}}_i^d(t) - K_{V_i}\dot{\mathbf{e}}_i - K_{P_i}\mathbf{e}_i]. \quad (18)$$

其中 $\mathbf{q}_i^d(t)$ 是需要的运动; $\mathbf{e}_i = \mathbf{q}_i(t) - \mathbf{q}_i^d(t)$ 为误差。这是空载控制,它只控制第 i 个机器人 $\mathbf{q}_i(t)$ 跟踪 $\mathbf{q}_i^d(t)$,在端点作用器上不产生任何操作力。

4.2 第二层物体跟踪控制

采用“主-助”型控制策略,需要将使物体跟踪 $\mathbf{x}^d(t)$ 时所需的力分配到 m 个机器人的端点作用器上,这个力就是加给机器人系统的动载荷。

现在物体的动力学方程(11)式中的 \mathbf{f} 可表示为

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_0 - \sum_{j=1}^m S_j^{-1} \mathbf{f}_{cj}. \quad (19)$$

其中 \mathbf{f}_0 是作用于物体上的外力组成的力系,参考点为物体质心; \mathbf{f}_{cj} 则表示物体加到第 j 个机器人端点作用器上的力,参考点在端点作用器, S_j 为其到质心的传递阵,是非奇的 6×6

6 常阵。现在

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{f}_0 - E^{-1}\dot{\mathbf{V}} \quad (20)$$

就是总载荷。从

$$\sum_{j=1}^m S_j^{-1} \mathbf{f}_{c_j} = \mathbf{f}_c$$

可解出 $\mathbf{f}_{c_j} (j = 1, 2, \dots, m)$ 。显然一般不能获得唯一解,于是出现了多种优化解法,但都需完成一个实时优化计算。在这里“主-助”型策略提出了一种代数计算方法,只用到加减运算,即可得到唯一解。

取某一机器人认定是主机器人,使它承担式(20)所示的全部载荷(作用在物体重心上)或 $S_1 \mathbf{f}_c$ (作用在端点作用器 E_1 上)。显然,按基本假设,这是不可能的。 \mathbf{f}_c 满足 $|S_1 \mathbf{f}_c| > |\mathbf{f}_{c1}^*|$,于是主机器人 E_1 处的载荷为

$$\mathbf{f}_{c1} = S_1 \mathbf{f}_c - \text{Tr}(S_1 \mathbf{f}_c - \mathbf{f}_{c1}^*) \quad (21)$$

其中 $\text{Tr}(\cdot)$ 是截取函数,定义为按元满足

$$\text{Tr}(x - x^*) = \begin{cases} x - x^*, & \text{当 } x > x^* \text{ 时;} \\ 0, & \text{当 } |x| \leq x^* \text{ 时;} \\ x + x^*, & \text{当 } x < -x^* \text{ 时。} \end{cases} \quad (22)$$

现在主机器人承担一部分载荷后,剩余的载荷为 $\text{Tr}(S_1 \mathbf{f}_c - \mathbf{f}_{c1}^*)$,作用在 E_1 处。令第一个助手机器人,即第二个机器人来承担这个载荷,移到 E_2 处后为

$$\mathbf{f}'_{c2} = S_2^{-1} [\text{Tr}(S_1 \mathbf{f}_c - \mathbf{f}_{c1}^*)].$$

以此类推,可得到第 $m-1$ 个机器人的载荷

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{ci} &= \mathbf{f}'_{ci} - \text{Tr}(\mathbf{f}'_{ci} - \mathbf{f}_{ci}^*), \\ \mathbf{f}'_{ci} &= S_i^{i-1} \text{Tr}(\mathbf{f}'_{ci-1} - \mathbf{f}_{ci-1}^*), (i = 2, 3, \dots, m-1) \end{aligned} \quad (23)$$

和最末一个机器人的载荷

$$\mathbf{f}_{cm} = S_m^{m-1} \text{Tr}(\mathbf{f}'_{cm-1} - \mathbf{f}_{cm-1}^*). \quad (24)$$

其中 S_i^{i-1} 是由 E_{i-1} 到 E_i 的力的传递链,都是 6×6 非奇常阵。

式(21),(23)和(24)给出了各机器人端点应承担的载荷,从而唯一地解决了载荷分配问题。因此也就最终导出了第二层的控制:

$$\mathbf{u}_{i2} = G_i^T \mathbf{f}_{ci}, (i = 1, 2, \dots, m). \quad (25)$$

4.3 第三层载荷分配自组织控制

4.3.1 第 m 个机器人不足以承担剩余载荷的情况。

这时式(24)不成立。显然增加前面机器人的载荷就有可能使(24)式得到满足。而增加机器人的能力可以通过将 \mathbf{f}_{ci}^* 增加一个 $\Delta \mathbf{f}_{ci}^*$ 来实现。有两种做法,即依次增加 \mathbf{f}_{cm-1}^* , \mathbf{f}_{cm-2}^* , \dots , 或依次增加 \mathbf{f}_{c1}^* , \mathbf{f}_{c2}^* , \dots 。下面给出的第三层控制流程图就说明了这个增加过程,如图 1 所示。

4.3.2 从第 $r (\leq m)$ 个机器人开始,直到第 $r+1, \dots, m$ 个机器人均为空载的情况。

显然,这时需要减小前 $r-1$ 个机器人的载荷。为此只需减小 $\mathbf{f}_{c1}^*, \dots, \mathbf{f}_{cr-1}^*$ 就可以了。可以按 1 到 $r-1$ 的顺序依次减小,直到后 $m-r+1$ 个机器人均有载荷,即直到

出现 $|f'_{em-1}| > f_{em-1}^*$ 为止. 所谓减小,就是将 f_{ci}^* 变为 f_{ci}^{**} . 还可以按 $r-1$ 到 1 的反顺序依次地减小 $f_{er-1}^*, \dots, f_{e1}^*$ 的值.

这个增减过程的流程图和式 (1) 中所述的调加过程的流程图合在一起就构成了第三层,即表示载荷分配过程的流程图.

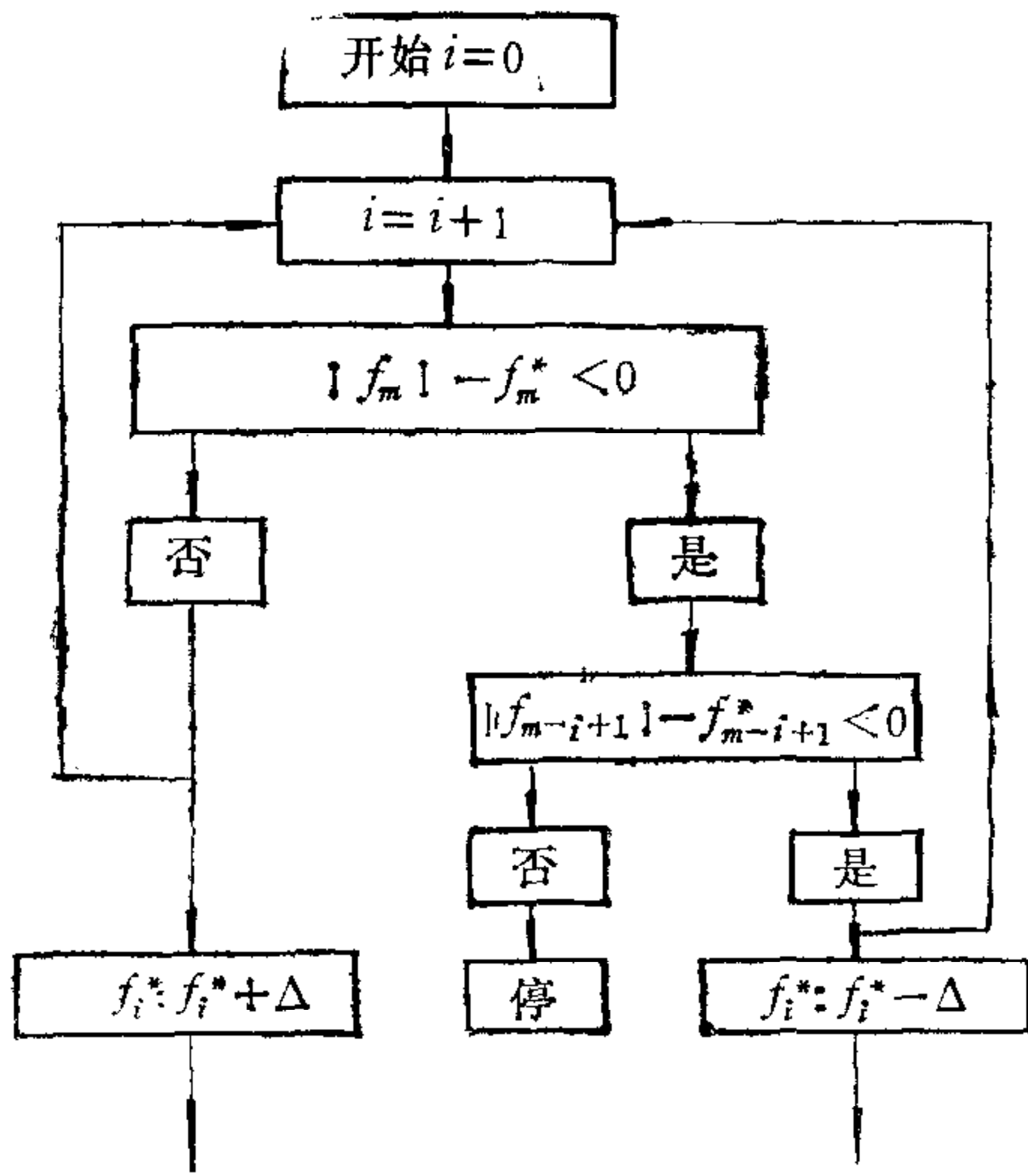


图 1 载荷分配自组织控制流程图

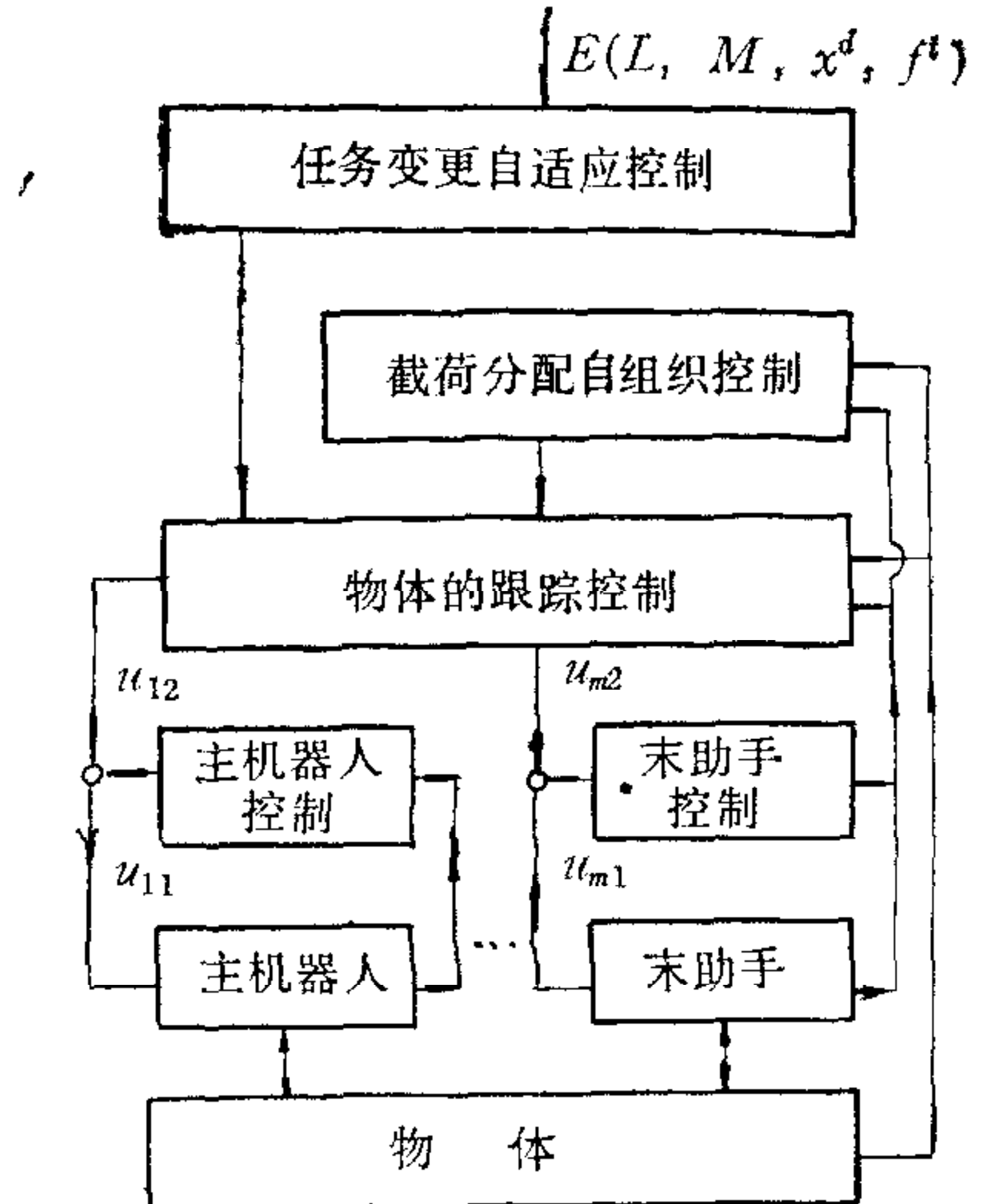


图 2 递阶自组织控制结构

4.4 第四层任务更换自适应层

在更换任务时,就是要改变物体或需要跟踪的运动,或两者兼而有之. 输入物体的新的几何参数向量 L 、惯性参数向量 M 和运动 $x^d(t)$. 算出所有在 u_{i1} 和 u_{i2} 中出现的力学量,如各种转换阵 S, G, Y 和对应的需要跟踪的运动 $q_i^d(t)$,作为第四层的输入,进入第一及第二层,就改变了原有控制,以适应任务的变化. 其控制结构如图 2 所示.

5、仿真

研究一个由两个平面机器人组成的系统. 控制系统是一个两层的递阶结构,如图 3 所示. 需跟踪的运动为

$$\begin{aligned} x^d(t) &= 0.5 \sin [\pi(t-1)/2](m), \\ y^d(t) &= 0.5 \sin [\pi(t-1)/2](m), \\ \theta^d(t) &= 0. \end{aligned}$$

其中力的单位为牛顿,力矩单位为牛顿·米,力的限制为 $f^* = [180, 150, 100]^T$.

仿真结果如图 5 所示. 其中图 5(a) 表示主机器人 E_1 处的受力;图 5(b) 表示助手机器人 E_2 上的作用力;图 5(c) 给出了跟踪误差:

$$e_1 = x(t) - x^d(t), e_2 = y(t) - y^d(t), e_3 = \theta(t).$$

仿真结果表明,本文提供的设计方法是成功的. 由于篇幅所限,仿真中没有包括第三、第四层控制,但不影响对所得结论的置信.

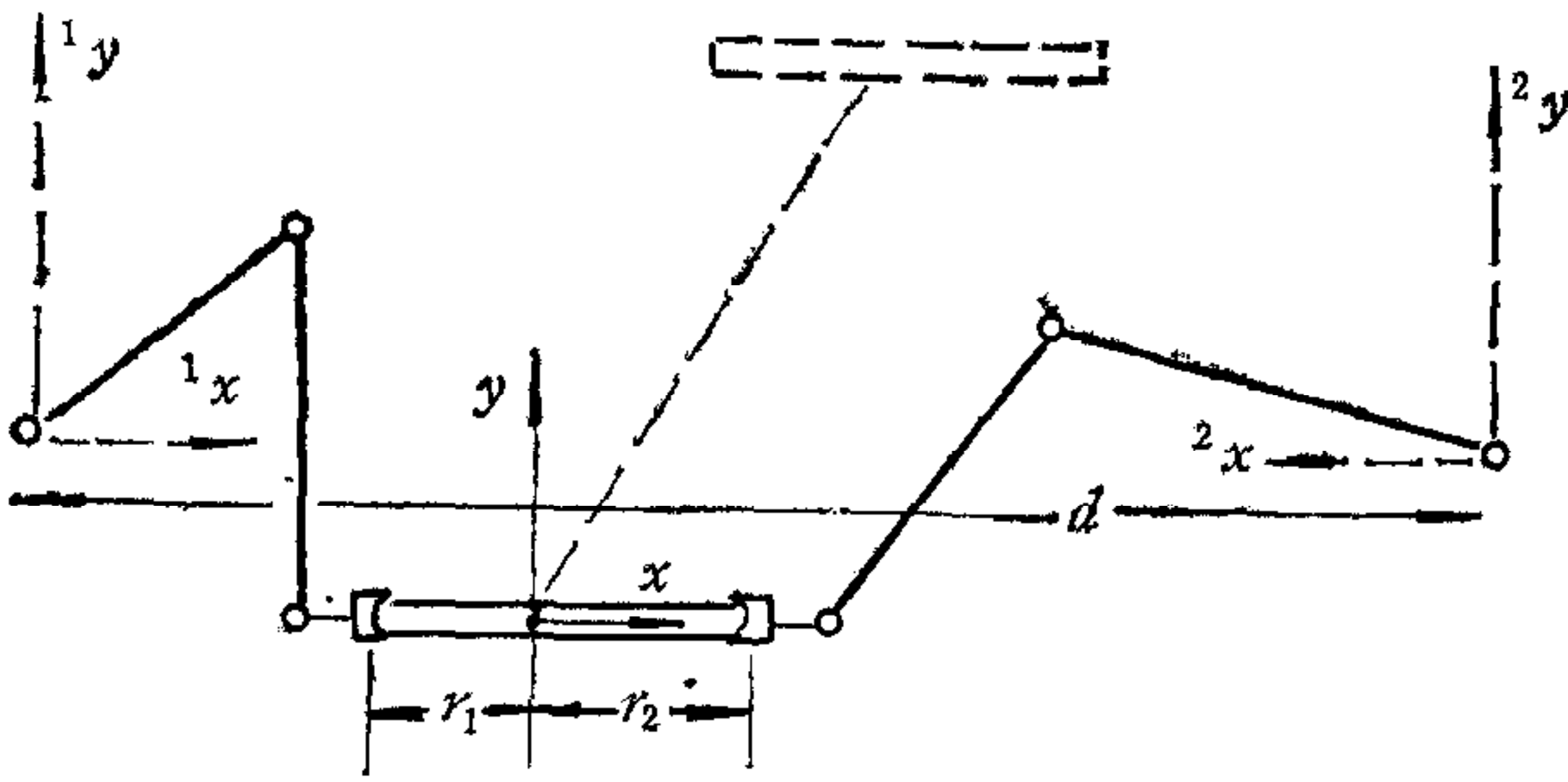


图3 平面二机器人系统

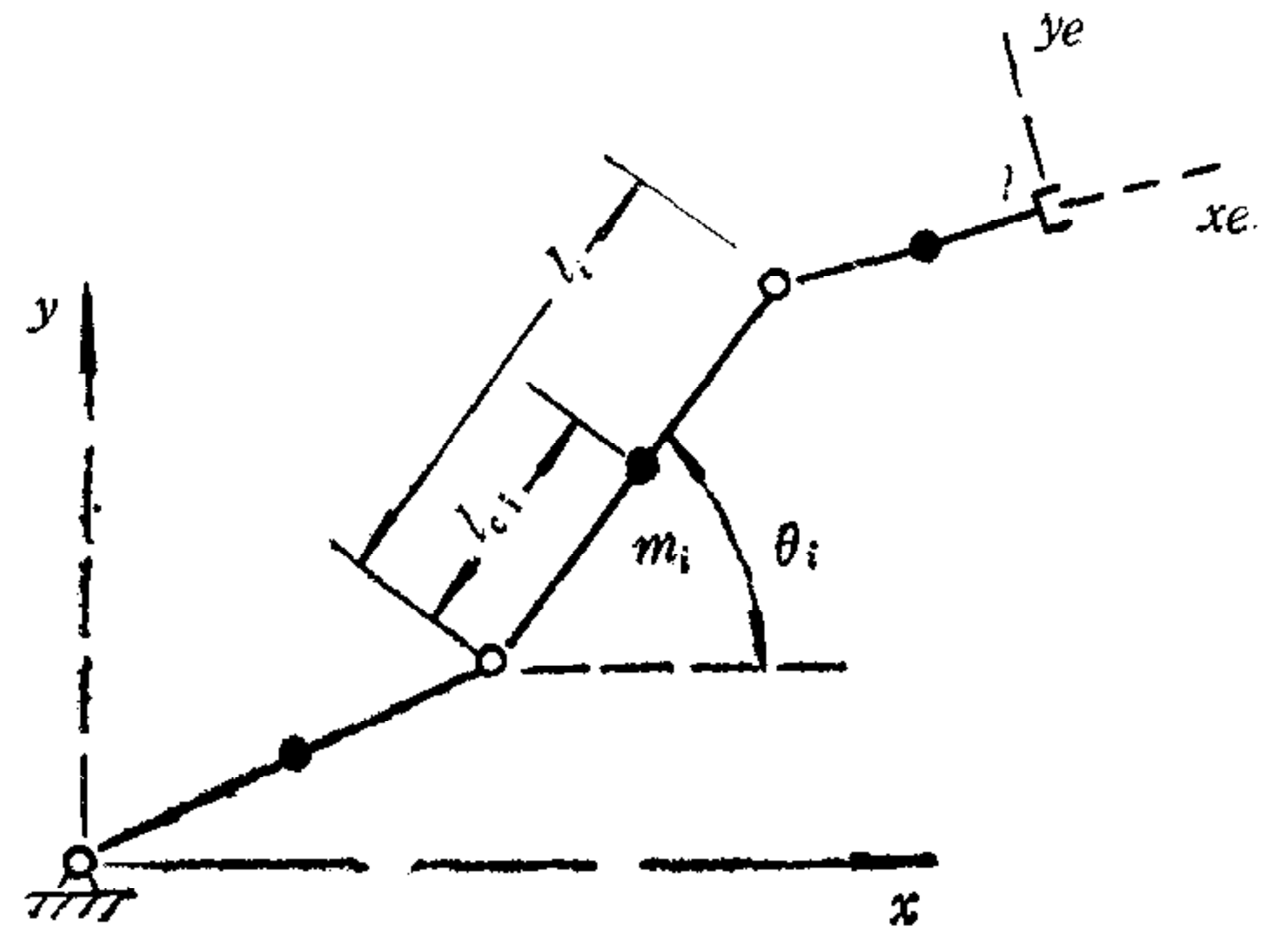
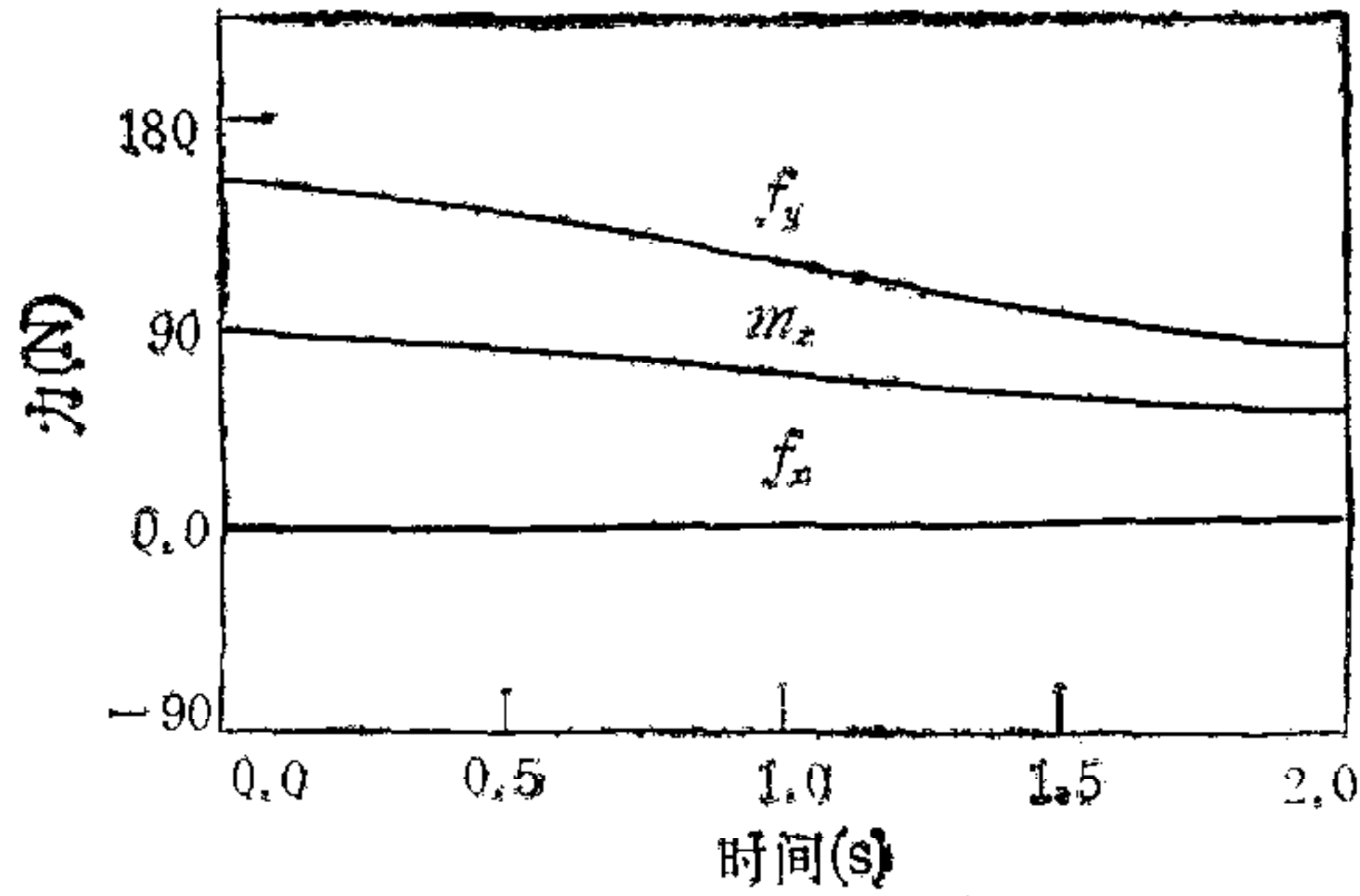
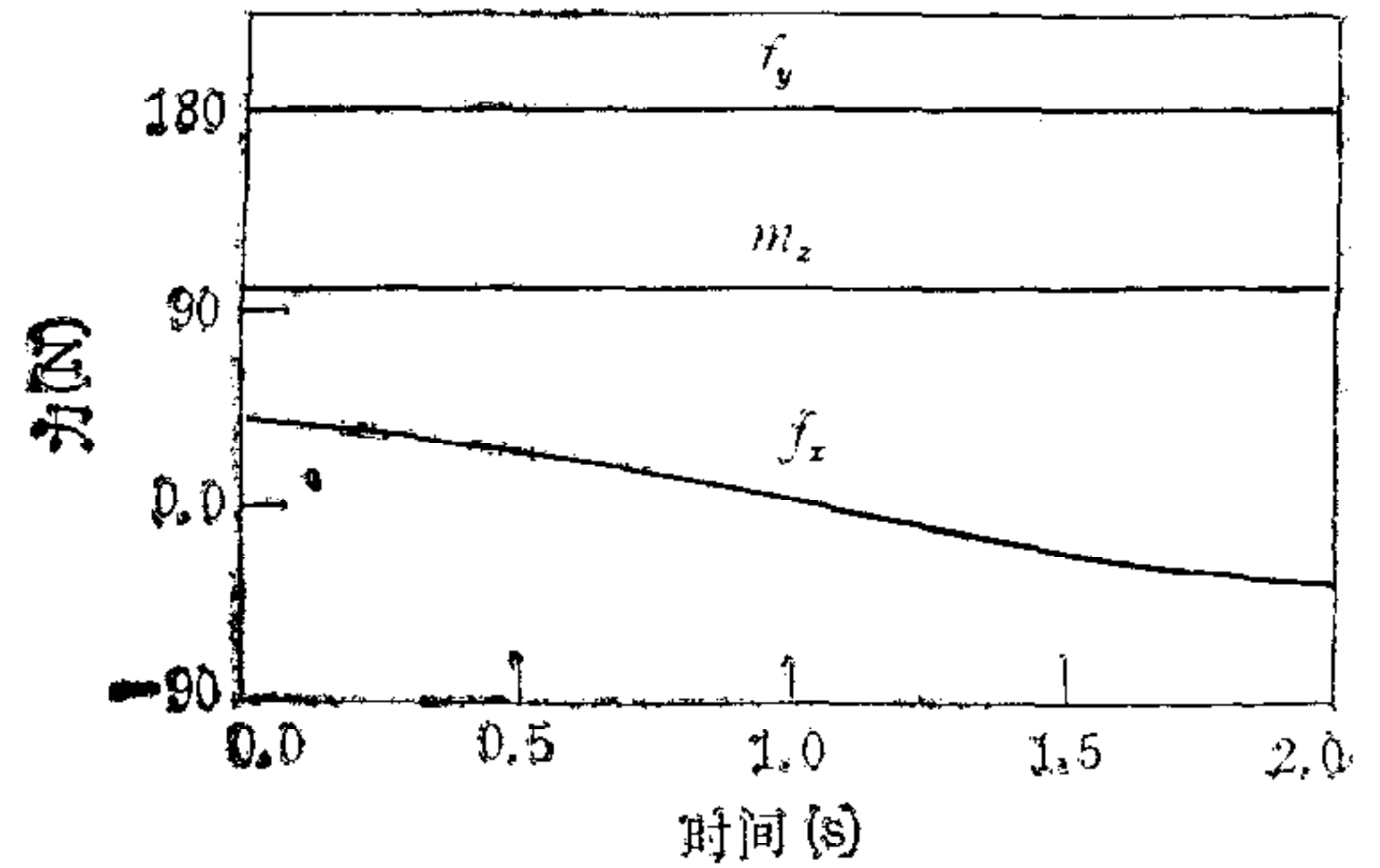


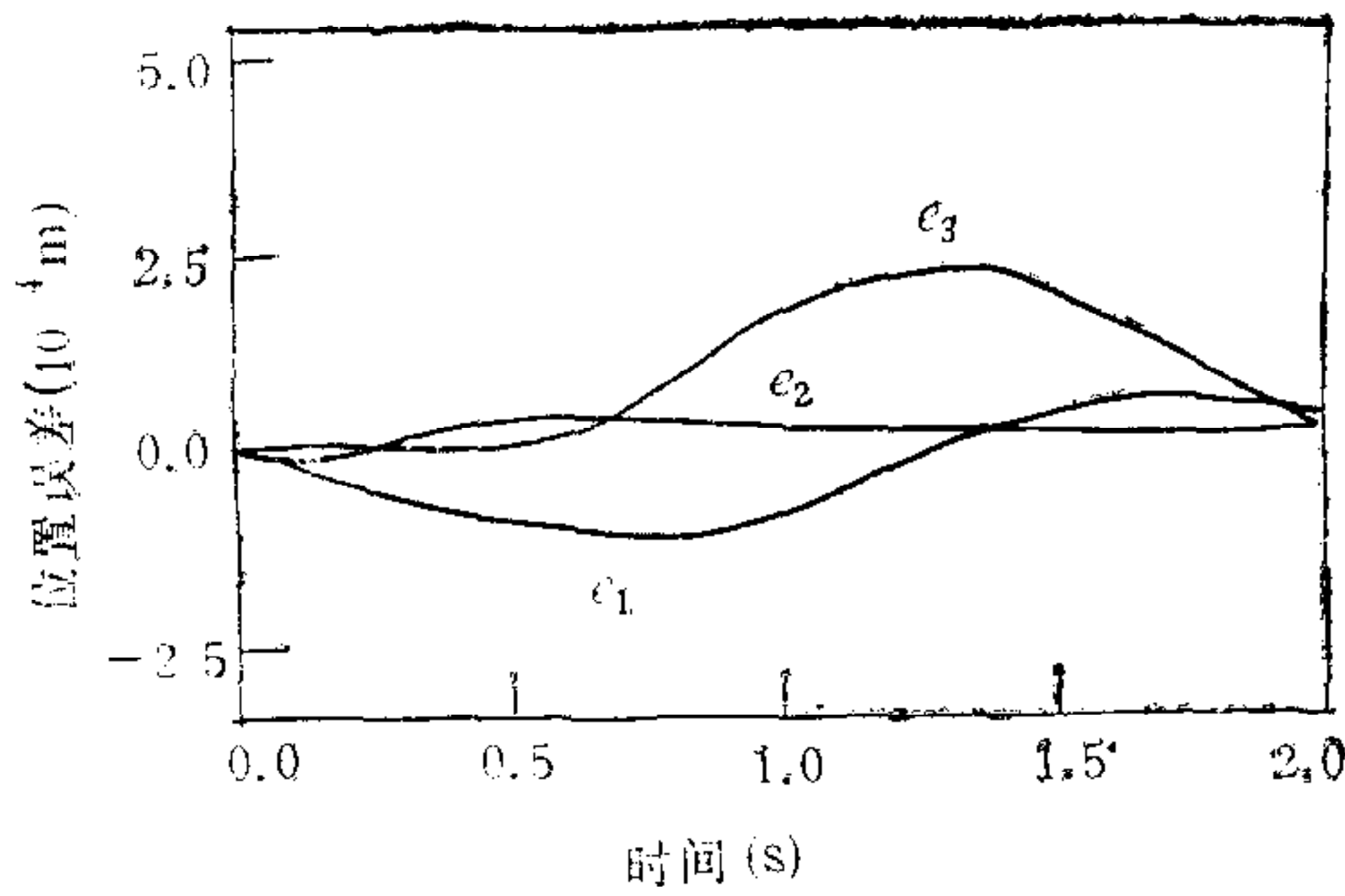
图4 机器人的尺寸



(a) 主机器人载荷



(b) 助手机器人载荷



(c) 跟踪误差

图5 仿真结果

6、结论

“主-助”型控制策略考虑了单机器人的能力限制，其载荷分配是最简单的加减计算，代替了各种实时优化算法。在解决复杂的多功能、多要求的问题时，递阶控制结构可以将问题分解为几个较简单的子问题，每一子问题对应于一个控制层，从而使问题的分析与解

决大为简化。

参 考 文 献

- [1] 高为炳. 多机器人系统的动力学与协调控制(综述). 控制与决策, 1992, 7(3).
- [2] 高为炳, 程勉. 机器人系统跟踪控制的一种新策略. 航空学报, 1990, 11(7); A360—368.
- [3] Gao WB, A new strategy for robotic systems in tracking tasks. *Mechatronics*, 1993, 1(2):353—366.
- [4] Gao WB. Self-organizing hierachical control strategy for robotic systems in tracking tasks. IEEE IW on IMC, Istanbul, 1990: 21—26.
- [5] Gao WB, Xiao B. Master-helper control strategy for robotic systems in tracking an object subject to environmental constraints. IECON'90, California, 1990: 221—226.
- [6] Gao WB. Tracking flexible objects by multiple robot systems. IEEE IW on IR and Systems, Osaka, 1991.
- [7] Gao WB. Cooperation manipulation of multiple arm robotic systems in tracking a mechanical systems. IEEE IW on AR, Pisa, Italy, 1991: 637—642.
- [8] Zheng YF, Luh JYS. Control of two coordinated robots in motion. Proc. 24th CDC, 1985: 1761—1765.

SELF-ORGANIZING HIERARCHICAL CONTROL FOR ROBOT TEAMS

GAO WEIBING

(7th Research Division Beijing University of Aero. and Astro., Beijing 100083)

ABSTRACT

The coordinated control for robot teams in performing tracking tasks is studied in this paper. Owing to the fact that a robot team is consisted of robots with limited abilities, the peformed object which may be rigid body, flexible body or a mechanical system, and the tracked motion which may be various, so the overall system is considerably complex. For such mechanical system, according to the mechanical properties of the system, the control task to be realized can be decomposed, and in consequence construct hierarchical architecture to the control. Therein each layer in the hierarchy is decomposed isolately to achieve simpler specific tasks. The coordination among the subtasks of the robots is achieved by self-organizing algorithms automatically.

Key words: robot control; multiple robots system; robots team; self-organizing hierarchical control.

高为炳 照片及简介见本刊第17卷第6期。