

新的机器人自校正控制方案*

刘美华

林 威

黄一夫

(国防科技大学, 长沙)

(复旦大学, 上海)

(华中工学院, 武汉)

摘要 本文提出了两种新的机器人联合关节自校正隐式控制方案, 在三自由度机器人上在强负载扰动下对这两种方案进行了仿真检验, 由此显示了其控制有效性, 并对两者进行了性能比较。

1 引言

对于机器人这个极其复杂的控制对象, 在过去的二十年里, 已相继提出许多控制方案。其中, 自校正控制在机器人的控制系统设计中越来越得到重视。文献〔1〕提出了一种机器人的显式自校正控制方案, 该方案的缺陷是将性能指标中的加权因子限定为常量, 而且没有提供一种选取这些加权因子的法则。作者在文献〔2〕中, 将加权因子推广为多项式, 并且对它们进行在线调整, 实现了闭环极点配置, 从而使得机器人系统的性能有所改善。然而在以上两种自校正控制方案中, 关节间的耦合作用仅用一个强制项来表达, 因而并未得到充分地补偿。

本文提出了一种新的机器人自校正控制器设计方法, 并由该方法提出了两种新的机器人自校正控制方案。在第一种方案中, 关节间的线性耦合得以考虑, 按一典范型多变量差分模型导出了一种新的多变量自校正控制算法。由于机器人是一个关节间具有强耦合作用的非线性系统, 为了充分补偿这种非线性耦合, 在第二种方案中采用递推牛顿-欧拉方程计算额定力矩构成前馈补偿, 而反馈控制器基于一典范型多变量摄动差分模型进行设计。本文首先将介绍这两种控制方案, 接着对它们进行仿真检验, 并比较其控制效果。

2 机器人的联合关节自校正控制方案

对于 N 自由度机器人, 其一般形式的拉格朗日动力学方程可表达为

$$D(q)\ddot{q} + Q(q, \dot{q}) + G(q) = u(t) \quad (2-1)$$

其中, N 维向量 q , \dot{q} 和 \ddot{q} 分别表示关节位置、关节速度和关节加速度; $u(t)$ 为 N 维关节输入力矩向量; $G(q)$ 为 N 维重力作用向量; $Q(q, \dot{q})$ 为 N 维哥氏力、向心力向量; $D(q)$ 为 $N \times N$ 惯量矩阵。

定义 $2N$ 维系统状态向量

$$X(t) = [q^T(t) \quad \dot{q}^T(t)]^T = [q_1 \cdots q_N \dot{q}_1 \cdots \dot{q}_N]^T = [x_1 \cdots x_{2N}]^T \quad (2-2)$$

则由方程(2-1), 系统状态空间描述可表示为

$$\dot{X}(t) = WX(t) + R[X(t)]u(t) + S[X(t)] \quad (2-3)$$

其中

$$W = \begin{bmatrix} 0 & I_N \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$R[X(t)] = \begin{bmatrix} 0 \\ -D^{-1}(q) \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$S[X(t)] = \begin{bmatrix} 0 \\ -D^{-1}(q) [Q(q, \dot{q}) + G(q)] \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

方程(2-3)的解为

* 收到本文的时间是 1986 年 7 月 2 日。

$$X(t) = e^{W(t-t_0)} X(t_0) + \int_{t_0}^t e^{W(t-\tau)} R[X(\tau)] \cdot u(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t e^{W(t-\tau)} S[X(\tau)] d\tau \quad (2-7)$$

由 (2-7) 式, 得到如下离散化状态方程

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)u(k) + a(k) \quad (2-8)$$

其中, $k+1$ 和 k 分别指 $(k+1)T$ 和 kT , T 为采样周期,

$$F(k) = e^{WT} \quad (2-9)$$

$$G(k) = \int_{kT}^{(k+1)T} e^{W[(k+1)T-\tau]} R[X(\tau)] d\tau \quad (2-10)$$

$$a(k) = \int_{kT}^{(k+1)T} e^{W[(k+1)T-\tau]} S[X(\tau)] d\tau \quad (2-11)$$

机器人的关节空间希望轨迹 $[q^d(t), \dot{q}^d(t), \ddot{q}^d(t)]$ 由轨迹规划提供, 于是希望状态 $X^d(t) = [(q^d(t))^T (\dot{q}^d(t))^T (\ddot{q}^d(t))^T]^T$ 。取不同的变量作为输出, 可得到不同的偏差输出方程 $\delta y(k) = \bar{C}(k)\delta X(k) = \bar{C}(k)[X(k) - X^d(k)]$

$$(2-12)$$

其中, $\bar{C}(k)$ 为偏差输出矩阵。两个重要的偏差输出方程是

$$\delta y(k) = [I_N \mid 0] \delta X(k) \quad (2-13)$$

和 $\delta y(k) = [0 \mid I_N] \delta X(k) \quad (2-14)$

由状态方程 (2-8) 和偏差输出方程 (2-12), 并考虑外界干扰作用, 可以提出如下典范型差分模型

$$\begin{bmatrix} A_1(z^{-1}) & 0 \\ 0 & A_N(z^{-1}) \end{bmatrix} \delta y(k) = \begin{bmatrix} z^{-m_{11}} B_{11}(z^{-1}) \cdots z^{-m_{1N}} B_{1N}(z^{-1}) \\ \cdots \\ z^{-m_{N1}} B_{N1}(z^{-1}) \cdots z^{-m_{NN}} B_{NN}(z^{-1}) \end{bmatrix} u(k) + h + \xi(k) \quad (2-15)$$

即 $A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i} B_i(z^{-1})u_i(k) + \sum_{j \neq i} z^{-m_{ij}} B_{ij}(z^{-1})u_j(k) + h_i + \xi_i(k)$

$$i = 1, \dots, N \quad (2-16)$$

其中, $u_i(k)$ 和 $\delta y_i(k)$ 分别为关节 i 子系统的输入力矩和输出偏差; m_i 为 u_i 到 δy_i 之间的时

延, m_{ij} 为 u_j 到 δy_i 之间的时延, 可以假定 $m_{ij} > m_i, j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, N$; h_i 为强制项, 包含重力作用和建模误差; $\xi_i(k)$ 为零均值白噪声过程, 包含外界干扰; $A_i(z^{-1})$ 、 $B_i(z^{-1})$ 和 $B_{ij}(z^{-1})$ 为 z^{-1} 多项式 (z^{-1} 为向后移位算子), 阶次分别为 n_{A_i} 、 n_{B_i} 和 $n_{B_{ij}}$, 且具有如下一般表达式:

$$X(z^{-1}) = x_0 + x_1 z^{-1} + \cdots + x_{n_x} z^{-n_x} \quad (2-17)$$

其中, $a_{i0} = 1, b_{i0} \neq 0$ 。

对于系统 (2-16), 考虑如下最优化性能指标

$$J_i = E\{[P_i(z^{-1})\delta y_i(k+m_i)]^2 + [Q_i'(z^{-1})u_i(k)]^2\} \quad (2-18)$$

其中, $P_i(z^{-1})$ 和 $Q_i'(z^{-1})$ 分别为 n_{P_i} 和 n_{Q_i}' 阶 z^{-1} 多项式, 且 $P_{i0} = 1$; E 为数学期望算子。

定义辅助系统

$$\phi_i(k+m_i) = P_i(z^{-1})\delta y_i(k+m_i) + Q_i(z^{-1})u_i(k) \quad (2-19)$$

和恒等式

$$P_i(z^{-1}) = A_i(z^{-1})F_i(z^{-1}) + z^{-m_i}G_i(z^{-1}) \quad (2-20)$$

其中, $Q_i(z^{-1}) = q_i' Q_i'(z^{-1})/b_{i0}$; $F_i(z^{-1})$ 和 $G_i(z^{-1})$ 分别为 m_{i-1} 和 $n_{A_i} - 1$ 阶 z^{-1} 多项式, 且 $f_{i0} = 1$

容易证明, 系统 (2-16) 极小化性能指标 (2-18) 得到的广义最小方差控制律与系统 (2-19) 极小化性能指标 $E\{\phi_i^2(k+m_i)\}$ 得到的最小方差控制律相同, 且控制律由下式给出:

$$\hat{\phi}_i(k+m_i) = H_i(z^{-1})u_i(k) + \sum_{j \neq i} H_{ij}(z^{-1})u_j(k+m_i - m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) + \gamma_i = 0 \quad (2-21)$$

其中

$$H_i(z^{-1}) = F_i(z^{-1})B_i(z^{-1}) + Q_i(z^{-1}) \quad (2-22)$$

$$H_{ij}(z^{-1}) = F_i(z^{-1})B_{ij}(z^{-1}) \quad (2-23)$$

$$\gamma_i = F_i(z^{-1})h_i = F_i(1)h_i \quad (2-24)$$

于是,引入以下估计模型

$$\begin{aligned} \phi_i(k) &= H_i(z^{-1})u_i(k-m_i) + \sum_{j \neq i} H_{ij}(z^{-1}) \\ & u_j(k-m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k-m_i) \\ & + \gamma_i + \varepsilon_i(k) = \overline{X}_i^T(k-m_i)\theta_i + \varepsilon_i(k) \end{aligned} \quad (2-25)$$

其中数据向量和参数向量分别定义为

$$\begin{aligned} \overline{X}_i(k-m_i) &= [u_i(k-m_i) \cdots u_i(k-m_i - \\ & n_{H_i}); u_1(k-m_{i1}) \cdots u_1(k- \\ & m_{i1} - n_{H_{i1}}); \cdots; u_{i-1}(k- \\ & m_{i,i-1}) \cdots u_{i-1}(k-m_{i,i-1} - \\ & n_{H_{i,i-1}}); u_{i+1}(k-m_{i,i+1}) \cdots \\ & u_{i+1}(k-m_{i,i+1} - n_{H_{i,i+1}}); \cdots; \\ & u_N(k-m_{iN}) \cdots u_N(k-m_{iN} - \\ & n_{H_{iN}}); \delta y_i(k-m_i) \cdots \\ & \delta y_i(k-m_i - n_{G_i}); 1]^T \end{aligned} \quad (2-26)$$

$$\begin{aligned} \theta_i &= [h_{i0} \cdots h_{in_{H_i}}; h_{i1,0} \cdots h_{i1,n_{H_{i1}}}; \cdots; h_{i,i-1,0} \\ & \cdots h_{i,i-1,n_{H_{i,i-1}}}; h_{i,i+1,0} \cdots h_{i,i+1,n_{H_{i,i+1}}}; \\ & \cdots; h_{iN,0} \cdots h_{iN,n_{H_{iN}}}; g_{i0} \cdots g_{in_{G_i}}; \gamma_i]^T \end{aligned} \quad (2-27)$$

采用最小二乘辨识算法,参数递推公式如下

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + M_i(k)[\phi_i(k) - \overline{X}_i^T(k-m_i)\hat{\theta}_i(k-1)] \quad (2-28)$$

$$M_i(k) = P_i(k-1)\overline{X}_i(k-m_i)[\rho + \overline{X}_i^T(k-m_i)P_i(k-1)\overline{X}_i(k-m_i)]^{-1} \quad (2-29)$$

$$P_i(k) = P_i(k-1)[I - \overline{X}_i(k-m_i)M_i^T(k)]/\rho \quad (2-30)$$

其中, $0.9 \leq \rho \leq 1$ 为遗忘因子。控制器参数由以上辨识算法获得后,自校正控制律由(2-21)式给出。控制系统的方框图如图1所示,整个控制算法汇列如下:

- ① 轨迹规划、设定初值
- ② 读新数据 $y(k)$ 、 $y^d(k)$
- ③ 按(2-19)式形成 $\phi_i(k)$, $i=1, \dots, N$
- ④ 由(2-28) ~ (2-30) 诸式估计控制器参数 $H_i(z^{-1})$, $H_{ij}(z^{-1})$, $G_i(z^{-1})$ 以及 γ_i ,

$i=1, \dots, N; j=1, \dots, i-1, i+1, \dots, N$

⑤ 按(2-21)式给出控制律

⑥ 置 $k=k+1$, 返回2。

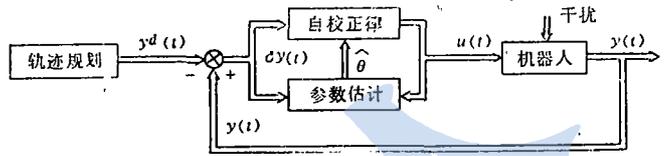


图1 方案一控制系统方框图

3 改进的机器人自校正控制方案

在上节中,考虑机器人关节间的线性耦合作用,基于一典型型多变量差分模型,提出了一种机器人的联合关节自校正隐式控制方案。由于机器人关节间的耦合不仅仅是一种线性耦合,这种直接线性模型描述并不充分。于是本节提出了前馈额定力矩补偿方法,对上节方案进行了改进。在文献[3]的基础上,作者首次提出了机器人的摄动差分模型,并由此给出了一种有效的机器人自校正控制方案(图2)。

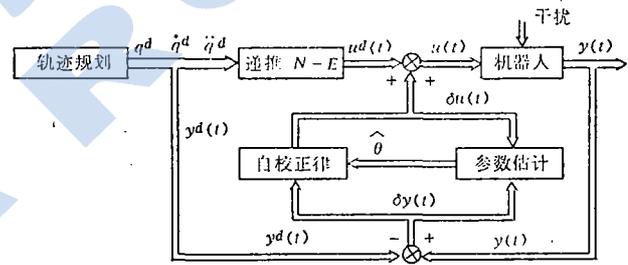


图2 方案二控制系统方框图
N-E, 牛顿-欧拉动力学

从机器人的拉格朗日动力学方程出发,其状态空间描述由(2-3)式给出。采用递推牛顿-欧拉方程求解机器人逆动力学得到额定力矩 $u^d(k)$, 用来作为前馈补偿。由拉格朗日动力学与牛顿-欧拉动力学的等价性, $X^d(t)$ 与 $u^d(t)$ 之间满足

$$\dot{X}^d(t) = WX^d(t) + R[X^d(t)]u^d(t) + S[X^d(t)] \quad (3-1)$$

将(2-3)式在希望轨迹附近按台劳展开,忽略其高次项,并减去(3-1)式,得到

如下线性化摄动状态模型

$$\delta \dot{X}(t) = F_x(t)\delta X(t) + F_u(t)\delta u(t) \quad (3-2)$$

其中 $\delta X(t) = X(t) - X^d(t)$

$$\delta u(t) = u(t) - u^d(t)$$

$$F_x(t) = W + \frac{\partial}{\partial X} [R(X)u + S(X)] \Big|_{\substack{X=X^d(t) \\ u=u^d(t)}} \quad (3-3)$$

$$F_u(t) = R[X^d(t)] \quad (3-4)$$

方程 (3-2) 的解为

$$\delta X(t) = \Phi(t, t_0)\delta X(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t-\tau, t_0) F_u(\tau)\delta u(\tau) d\tau \quad (3-5)$$

其中, $\Phi(t, t_0)$ 为系统 (3-2) 的状态转移矩阵。

由 (3-5) 式, 得到如下离散化摄动状态模型

$$\delta X(k+1) = \bar{A}(k)\delta X(k) + \bar{B}(k)\delta u(k) \quad (3-6)$$

其中

$$\bar{A}(k) = \Phi[(k+1)T, kT] \quad (3-7)$$

$$\bar{B}(k) = \int_{kT}^{(k+1)T} \Phi[(k+1)T-\tau, kT] F_u(\tau) d\tau \quad (3-8)$$

由状态方程 (3-6) 和输出方程 (2-12), 可提出如下典型型多变量摄动差分模型 ($i = 1, \dots, N$):

$$A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i} B_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{j=1}^i z^{-m_{ij}} B_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k) + \xi_i(k) \quad (3-9)$$

除特殊申明外, 本节所有符号均与上节定义相同。

对于系统 (3-9), 考虑性能指标

$$J_i = E\{[P_i(z^{-1})\delta y_i(k+m_i)]^2 + [Q'_i(z^{-1})\delta u_i(k)]^2\} \quad (3-10)$$

类似上节推导, 得到如下自校正控制算法。

最优控制律由

$$H_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{j=1}^i H_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k) + m_i - m_{ij} + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) = 0 \quad (3-11)$$

给出, 控制器参数基于如下估计模型辨识得到

$$\begin{aligned} \phi_i(k) &= H_i(z^{-1})\delta u_i(k-m_i) + \sum_{j=1}^i H_{ij}(z^{-1}) \\ &\delta u_j(k-m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k-m_i) + \varepsilon_i(k) \\ &= \bar{X}_i^T(k-m_i)\theta_i + \varepsilon_i(k) \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\text{式中 } \phi_i(k) = P_i(z^{-1})\delta y_i(k) + Q_i(z^{-1})\delta u_i(k-m_i) \quad (3-13)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_i(k-m_i) &= [\delta u_i(k-m_i) \dots \delta u_i(k-m_i - n_{H_i})_i; \delta u_1(k-m_{i1}) \dots \delta u_1(k-m_{i1} - n_{H_{i1}}); \dots; \delta u_{i-1}(k-m_{i,i-1}) \dots \delta u_{i-1}(k-m_{i,i-1} - n_{H_{i,i-1}}); \delta u_{i+1}(k-m_{i,i+1}) \dots \delta u_{i+1}(k-m_{i,i+1} - n_{H_{i,i+1}}); \dots; \delta u_N(k-m_{iN}) \dots \delta u_N(k-m_{iN} - n_{H_{iN}}); \delta y_i(k-m_i) \dots \delta y_i(k-m_i - n_{G_i})]^T \end{aligned} \quad (3-14)$$

$$\begin{aligned} \theta_i &= [h_{i0} \dots h_{in_{H_i}}; h_{i10} \dots h_{i1, n_{H_{i1}}}; \dots; h_{i,i-10} \dots h_{i,i-1, n_{H_{i,i-1}}}; h_{i,i+10} \dots h_{i,i+1, n_{H_{i,i+1}}}; \dots; h_{iN0} \dots h_{iN, n_{H_{iN}}}; g_{i0} \dots g_{in_{G_i}}]^T \end{aligned} \quad (3-15)$$

参数递推公式由 (2-28) ~ (2-30) 给出, 改进的机器人控制系统方框图如图 2 所示。改进的控制算法总结如下:

- 1) 轨迹规划、设定初值
- 2a) 按递推牛顿-欧拉方程计算额定力矩 $u^d(k)$
- 2b) 按自校正控制算法计算修正力矩 $\delta u(k)$
 - 2b.1) 读入新数据 $y(k), y^d(k)$
 - 2b.2) 按 (3.13) 式形成辅助输出 $\phi_i(k), i = 1, \dots, N$
 - 2b.3) 按估计模型 (3-12) 辨识控制器参数
 - 2b.4) 由 (3-11) 式获取控制律 $\delta u_i(k), i = 1, \dots, N$
- 3) 施加关节输入力矩 $u(k) = u^d(k) + \delta u(k)$
- 4) 置 $k = k + 1$, 返回 2a)。

由于2a)和2b)相互独立,可引入两个微处理器并行处理;各关节子系统的自校正控制器可通过多CPU(如单片机)并行实现,以减少在线计算时间。

4 仿真结果

本节对以上两种机器人自校正控制方案进行了仿真检验,显示了其控制有效性。仿真对象为一典型三自由度机器人,其结构示意图见图3。参数如下:杆1的转动惯量 $I_1 = 0.2\text{kg}\cdot\text{m}^2$;杆2和杆3的长度 $l_2 = l_3 = 0.5\text{m}$,质量 $m_2 = 10\text{kg}$, $m_3 = 8\text{kg}$;手爪质量 $m_H = 2\text{kg}$ 。作用负载由两部分组成:3kg恒定负载和均方差为2kg的零均值随机负载。

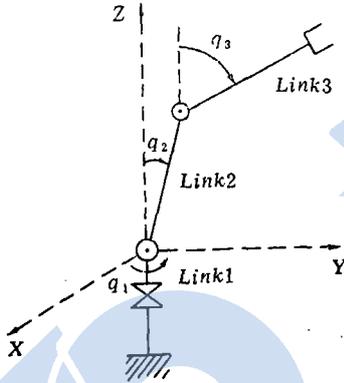


图3 仿真用机器人

仿真中,手爪的希望轨迹为一个圆: $x^2 + z^2 = 0.4^2$, $y = 0.5$ (以米计),整个圆要求在两秒内完成。

以关节位置变量(如图3中 q_1 、 q_2 和 q_3 所示)作为输出。通过仿真,模型(2-16)和(3-9)的阶次取为 $n_{A_i} = n_{B_i} = m_{i,j} = 2$, $n_{B_{i,j}} = 0$, $m_i = 1$, $i, j = 1, 2, 3$, $j \neq i$ 。

取加权因子 $P_i(z^{-1}) = 1 + 0.5z^{-1}$, $Q_i(z^{-1}) = 0.0005$, $i = 1, 2, 3$ 。辨识初值取为 $\hat{X}_i(0) = 0$, $\hat{\theta}_i(0) = [1 \dots 1]^T$, $P_i(0) = aI$, $a = 10^{10}$, $i = 1, 2, 3$;取遗忘因子 $\rho = 0.945$ 。由于递推辨识的初值不可能准确得到,因此在机器人运动轨迹的前段出现较大的轨迹偏差。好在机器人的作业任务大都是一定作业的多次重复,上工作周期的末值可以作为下工作周期

的初值。这样,机器人在多次性重复工作中,其控制性能越来越高。这使得机器人系统具有自动学习的功能。为了得到较好的控制效果,在机器人起动时可以引入一段“预学习”过程。取“预学习”时间0.15秒,采用方案一时的仿真结果如图4—7中点划线所示,而图中实线为运用方案二时的仿真曲线,虚线为希望曲线。从图中可以看出,改进的控制方案具有远远优于第一种控制方案的控制效果。

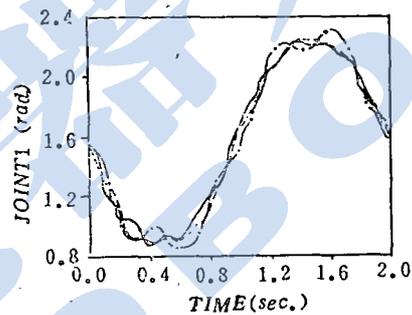


图4 关节1跟踪情况

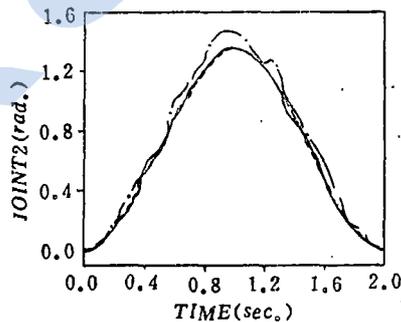


图5 关节2跟踪情况

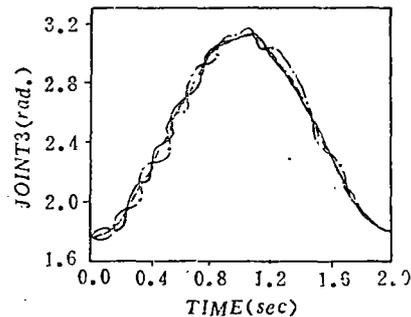


图6 关节3跟踪情况

5 结束语

本文提出了两种机器人自校正控制方案。

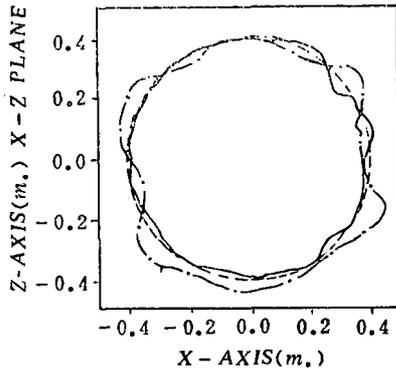


图7 直角空间圆跟踪情况

控制律由极小化某广义性能指标得到，而控制器参数直接由在线递推辨识算法提供。第一种控制方案考虑了机器人各关节间的线性耦合作用，然而仿真结果表明，该方案对文献〔2〕中独立关节控制方案没有给出明显改进。在本文第二种方案中，通过引入前馈额定力矩补偿、

基于摄动差分模型设计自校正控制器，其控制效果远远比文献〔1,2〕中优越，而其控制性能与文献〔4〕中相当。

参 考 文 献

1. Koiyo A J, Guo T H. Adaptive linear control for robotic manipulators. IEEE Trans. 1983, AC-28, 162—171
2. Liu Meihua. An adaptive control scheme for robotic manipulators. Proc. 15th Int. Symp. Industrial Robot, Japan, 1985:673—680
3. Lee C S G, Chung M J. An adaptive control strategy for mechanical manipulator. IEEE Trans. 1984, AC-29: 837—840
4. Liu Meihua, Lin Wei, Huang Yifu. Pole assignment self-tuning control of robotic manipulators. To appear in Proc. 16th Int. Symp. Industrial Robots. Belgium, 1986

New Self-Tuning Control Schemes for Robotic Manipulators

LIU Meihua, LIN Wei, HUANG Yifu

Two new associated-joint implicit self-tuning control schemes for robotic manipulators are proposed. Simulations to a 3-degree-of-freedom manipulator under strong load disturbances are presented to demonstrate the effectiveness of and to make a performance comparison between these two schemes.

中国电子学会计算机工程及应用学会机器人专业学组成立暨学术研讨会

为了促成计算机与机器人快速有机地结合，推动我国的机器人事业向前发展，也为1987年将在北京举行的首届全国机器人年会作好准备，中国电子学会计算机工程及应用学会于1986年12月12日至14日在武汉华中工学院召开了机器人专业学组成立暨学术研讨会。来自全国的二十一个单位的五十一名代表（包括列席代表）参加了会议并就机器人技术研究、开发与应用的有关问题进行了广泛的交流。大家认为我国现阶段应重点开发简单可行而又急需的机器人系统以解决生产实际中的某些燃眉之急，同时应支持有条件的科研单位和高等院校进行高技术跟踪和某些基础理论的研究。