

机器人的自校正控制

刘 美 华

(自动控制系)

摘要 本文从统一的角度给出了四种机器人的自校正控制方案,并通过仿真研究和算法的在线计算量估计,就控制性能和易实现性两个方面对各方案进行了比较。

关键词 机器人; 自校正控制; 自适应控制; 控制器

1. 引 言

对于机器人这个复杂的控制对象,其动力学描述需要一组高度非线性的方程组,且关节变量之间存在强耦合作用。在过去的二十年里,已相继提出许多机器人的动力学控制方案。传统的机器人控制系统设计基于运动学考虑,忽略了机器人的动力学特性;近年来提出的其它设计方案考虑了机器人的动力学特性,但这些方案对动力学建模的精度要求较高,建模误差对机器人系统的动态特性和轨迹跟踪精度有很大的影响;另外,它们所设计的控制系统适应负载变化的能力较差,负载变化对机器人系统产生很大的冲击作用。

随着机器人的日益发展及其应用范围的进一步扩大,人们对机器人的性能要求越来越高,因而有必要提出更高级更有效的控制方案。近年来,非线性控制及自适应控制在机器人中的应用得到了大量的探讨,其中自校正控制因易于在计算机上实现而受到人们的重视^[1-5]。Lee等^[1,2]提出了机器人自校正控制器的状态空间设计,获得了远比PID控制优越的控制效果。该设计的不足在于其在线计算量过大。作者在文献^[3]中通过引入系统分解,将整个机器人系统的控制问题转化为多个低维子系统的控制问题来处理,对Lee等的方案提出了改进。而Koivo等^[4]和刘^[5]对于机器人非线性动力学采用线性时变差分模型等效,并基于差分模型提出了不同的机器人自校正控制器。由于这种直接等效导致其等效线性系统的参数变化较快,因而其控制性能受到很大程度的影响。

作者在文献^[6]^[7]中基于不同的差分模型对机器人的自校正控制进行了研究,提出了不同的控制方案。本文则从统一的角度对这些方案进行了介绍,着重对各方案的控制性能及其简易实现性给予了比较。

2. 基于偏差输出差分模型的机器人自校正控制器

1) 联合关节自校正控制方案 (方案 I) [6]

对于 N 自由度机器人, 其一般形式的 Lagrange 动力学方程可表示为

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

其中, N 维向量 q 、 \dot{q} 、 \ddot{q} 、 $u(t)$ 、 $Q(q, \dot{q})$ 以及 $G(q)$ 分别表示关节位移、关节速度、关节加速度、关节输入力矩、哥氏力和向心力作用以及重力作用; $D(q)$ 为 $N \times N$ 维惯量矩阵。

由方程 (1) 及其输出方程 $y=f(x)$, 通过线性化和离散化, 可提出如下典范形式的机器人输入-偏差输出差分模型 [6]

$$A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i}B_i(z^{-1})u_i(k) + \sum_{j \neq i} z^{-m_{ij}}B_{ij}(z^{-1})u_j(k) + h_i + \xi_i(k) \quad (2)$$

其中, $\delta y_i(k) = y_i(k) - y_i^d(k)$, $y_i^d(k)$ 和 $y_i(k)$ 分别为第 i 关节子系统的希望输出和实际输出; h_i 为包含重力作用和非线性耦合作用在内的 N 维强制项; z^{-1} 为向后移位算子, 即 $z^{-1}u(k) = u(k-1)$; m_{ij} 为关节 j 的输入 u_j 到关节 i 的输出偏差 δy_i 之间的时间延迟, m_i 为 u_i 到 δy_i 之间的时间延迟, 且可假定 $m_{ij} > m_i (j \neq i)$; $\xi_i(k)$ 为零均值白噪声过程, 包含外界干扰和建模误差; $A_i(z^{-1})$ 、 $B_i(z^{-1})$ 和 $B_{ij}(z^{-1})$ 为 z^{-1} 的多项式, 阶次分别为 n_{A_i} 、 n_{B_i} 和 $n_{B_{ij}}$, 且具有如下一般表达形式: $X(z^{-1}) = x_0 + x_1z^{-1} + \dots + x_{n_x}z^{-n_x}$, 其中 $a_{i0} = 1$, $b_{i0} \neq 0$ 。

对于系统 (2), 考虑如下最优化性能指标:

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

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。

系统 (2) 极小化性能指标 (3) 得到如下广义最小方差控制律:

$$H_i(z^{-1})u_i(k) + \sum_{j \neq i} H_{ij}(z^{-1})u_j(k+m_i-m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) + \gamma_i = 0 \quad (4)$$

其中 $H_i(z^{-1}) = F_i(z^{-1})B_i(z^{-1}) + Q_i'(z^{-1})$; $H_{ij}(z^{-1}) = F_i(z^{-1})B_{ij}(z^{-1})$

$$\gamma_i = F_i(z^{-1})h_i = F_i(1)h_i; \quad Q_i'(z^{-1}) = q_{i0}'Q_i'(z^{-1})/b_{i0}$$

$F_i(z^{-1})$ 和 $G_i(z^{-1})$ 的阶次分别为 $m_i - 1$ 和 $n_{A_i} - 1$, 且 $f_{i0} = 1$, 满足如下方程

$$p_i(z^{-1}) = A_i(z^{-1})F_i(z^{-1}) + z^{-m_i}G_i(z^{-1}) \quad (5)$$

控制器参数基于估计模型

$$\begin{aligned} \phi_i(k) &= H_i(z^{-1})u_i(k-m_i) + \sum_{j \neq i} H_{ij}(z^{-1})u_j(k-m_i-m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k-m_i) + \gamma_i + e_i(k) \\ &= \bar{X}_i^T(k-m_i)\theta_i + e_i(k) \end{aligned} \quad (6)$$

按递推最小二乘辨识算法提供:

$$\theta_i(k) = \theta_i(k-1) + M_i(k)[\phi_i(k) - \bar{X}_i^T(k-m_i)\theta_i(k-1)] \quad (7)$$

$$M_i(k) = P_i(k-1)\bar{X}_i(k-m_i)[\rho + \bar{X}_i^T(k-m_i)P_i(k-1)\bar{X}_i(k-m_i)]^{-1} \quad (8)$$

$$P_i(k) = P_i(k-1)[I - \bar{X}_i(k-m_i)M_i^T(k)]/\rho \quad (9)$$

其中 θ_i 为由 $H_i(z^{-1})$ 、 $H_{ij}(z^{-1})$ 、 $G_i(z^{-1})$ 及 γ_i 组成的参数向量; $\bar{X}_i(k-m_i)$ 为对应的数据向量; $\hat{\theta}_i$ 为 θ_i 的估值, ρ 为遗忘因子; $\phi_i(k)$ 为辅助输出;

$$\phi_i(k) = P_i(z^{-1})\delta y_i(k) + Q_i(z^{-1})u_i(k - m_i) \quad (10)$$

控制器参数由以上辨识算法获得后,自校正控制律由(4)式给出。控制系统结构框图如图1所示。

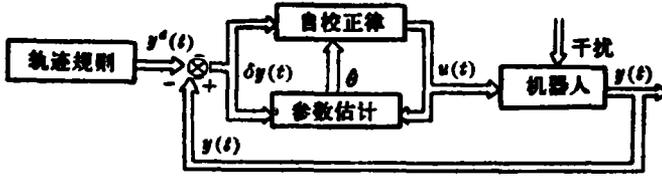


图1 方案I、方案II控制系统结构方框图

2) 独立关节自校正控制方案(方案I) [7]

从后文对各方案在线计算量的估计可以看出,方案I具有太大的计算量。为此,文献[7]通过引入系统分解,采用独立关节控制方式提出了一种简单的机器人自校正控制方案。

由方程(2),对机器人每个关节子系统提出如下差分模型($i=1, \dots, N$):

$$A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i}B_i(z^{-1})u_i(k) + h'_i + \xi_i(k) \quad (11)$$

其中, $h'_i = h_i + \sum_{j \neq i} z^{-m_{ij}}B_{ij}(z^{-1})u_j(k)$, $A_i(z^{-1})$ 和 $B_i(z^{-1})$ 均为 n_i 阶 z^{-1} 多项式。

同样地,极小化性能指标(3),得到如下自校正控制算法:

最优控制律由下式给出:

$$H_i(z^{-1})u_i(k) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) + \gamma_i = 0 \quad (12)$$

控制器参数基于如下估计模型辨识得到:

$$\phi_i(k) = H_i(z^{-1})u_i(k - m_i) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k - m_i) + \gamma_i + e_i(k) \quad (13)$$

进一步,加权多项式 $P_i(z^{-1})$ 和 $Q_i(z^{-1})$ 按如下方程得到在线调整,实现了闭环极点配置[5,7],

$$H_i(z^{-1})P_i(z^{-1}) - z^{-m_i}G_i(z^{-1})Q_i(z^{-1}) = h_{i0}T_i(z^{-1})F_i(z^{-1}) \quad (14)$$

其中, $T_i(z^{-1})$ 为给定首1希望特征多项式,且 $n_{p_i} = n_{q_i} = n_i - 1, n_{T_i} \leq 2n_i - 1$, $H_i(z^{-1})$ 和 $G_i(z^{-1})$ 由辨识算法提供。

3. 基于摄动差分模型的机器人自校正控制器

由于机器人是一个关节间具有强耦合的非线性系统,为了得到较好的逼近,方案I中的典范型模型(2)和方案II中的解耦模型(11)仍具有变化较快的系统参数。为了提高机器人控制系统的性能,有必要有效地补偿机器人各关节之间的非线性耦合作用。于是,采用递推Newton-Euler方程求解机器人逆动力学,得到额定力矩 $u^d(k)$ 用作前馈补偿,如图2所示。

在图2中, $u^d(k)$ 是在理想情况下实现希望轨迹 $\{q^d(t), \dot{q}^d(t), \ddot{q}^d(t)\}$ 所需要的额定力矩,它反映了沿希望轨迹上各关节间的耦合作用。由于自校正控制器设计的目标是使实际运动轨迹与希望轨迹之间的偏差趋于零,因此, $u^d(k)$ 对沿实际运动轨迹各关节间的耦合作用进行了充分地补偿。

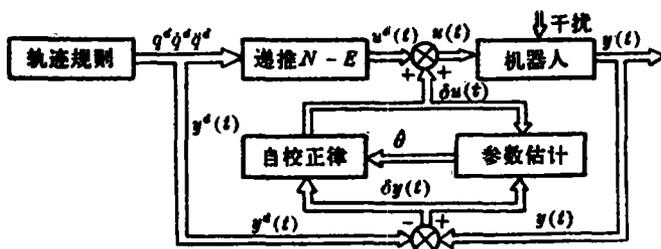


图 2 方案 III、方案 IV 控制系统结构方框图

1) 改进的联合关节自校正控制方案 (方案 III) [6]

由文献[6], 补偿后的机器人系统可用如下典范形式的摄动差分模型表示:

$$A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i}B_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{j \neq i} z^{-m_{ij}}B_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k) + \xi_i(k) \quad (15)$$

其中 $\delta u_i(k) = u_i(k) - u_i^d(k)$.

系统(15)极小化性能指标

$$J_i = E\{[P_i(z^{-1})\delta y_i(k+m_i)]^2 + [Q_i'(z^{-1})\delta u_i(k)]^2\} \quad (16)$$

得到如下最优控制律:

$$H_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \sum_{j \neq i} H_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k+m_i-m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) = 0 \quad (17)$$

其控制器参数 $H_i(z^{-1})$ 、 $H_{ij}(z^{-1})$ 以及 $G_i(z^{-1})$ 基于估计模型

$$\phi_i(k) = H_i(z^{-1})\delta u_i(k-m_i) + \sum_{j \neq i} H_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k-m_{ij}) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k-m_i) + \varepsilon_i(k) \quad (18)$$

辨识得到, 这里

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

2) 改进的独立关节自校正控制方案 (方案 IV) [7]

从后文的仿真结果可以看出, 方案 III 对方案 I 和方案 II 具有明显改进。然而从实现的角度来看, 其计算量仍然很大。本小节将给出一种既具有良好控制性能, 又便于实现的控制方案[7]。

引入系统分解, 将模型(15)用如下解耦形式表示 ($i=1, \dots, N$):

$$A_i(z^{-1})\delta y_i(k) = z^{-m_i}B_i(z^{-1})\delta u_i(k) + \zeta_i'(k) \quad (20)$$

其中 $\zeta_i'(k) = \xi_i(k) + \sum_{j \neq i} z^{-m_{ij}}B_{ij}(z^{-1})\delta u_j(k)$, 可假定为零均值白噪声过程。

类似地, 系统(20)极小化性能指标(16), 最优控制律由下式给出:

$$H_i(z^{-1})\delta u_i(k) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k) = 0 \quad (21)$$

而控制器参数 $H_i(z^{-1})$ 和 $G_i(z^{-1})$ 基于以下估计模型辨识得到:

$$\phi_i(k) = H_i(z^{-1})\delta u_i(k-m_i) + G_i(z^{-1})\delta y_i(k-m_i) + \varepsilon_i(k) \quad (22)$$

其中 $\phi_i(k)$ 由(19)式给出。

同样地, $P_i(z^{-1})$ 和 $Q_i(z^{-1})$ 可通过求解方程 (14) 得到在线调整, 以实现闭环极点配置。

4. 仿真结果

仿真用机器人具有图3所示结构,其参数如下: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 $m_H=3\text{kg}$;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。

仿真中,机器人的作业任务为其手爪跟踪两种典型曲线,即直线和圆。直线由点 $(0, 0.5, 0.5)$ 到点 $(0.97, -0.2, 0)$, 单位为米;要求在2秒内完成,且具有图4所示的希望运动速度。圆方程为 $x^2+z^2=0.4^2$, $y=0.5$ (单位为米), 整个圆在2秒内完成。以关节位移 q_1 、 q_2 和 q_3 (见图3) 作为输出,通过仿真,模型(2)和(15)的阶次取为 $n_{A_i}=n_{B_i}=m_{i,j}=2$, $n_{B_{i,j}}=0$, $m_{i,j}=1$, $i,j=1,2,3$, $j\neq i$; 模型(11)和(20)的阶次取为 $n_i=2$, $m_i=1$, $i=1,2,3$ 。

对于方案I和方案II,加权多项式取为: $P_i(z^{-1})=1+0.5z^{-1}$, $Q_i(z^{-1})=0.0005$, $i=1,2,3$ 。对于方案III和方案IV,特征多项式取为: $T_1(z^{-1})=1-1.96z^{-1}+0.98z^{-2}$, $T_2(z^{-1})=1-1.94z^{-1}+0.99z^{-2}$, $T_3(z^{-1})=1-1.78z^{-1}+0.89z^{-2}$; $P_i(z^{-1})$ 和 $Q_i(z^{-1})$ 的初值取为: $p_{i1}=q_{i1}=0$, $i=1,2,3$, $q_{10}=0.0015$, $q_{20}=q_{30}=0.0005$ 。各方案均取遗忘因子 $\rho=0.945$, 辨识初值 $\bar{X}_i(0)=0$, $\theta_i(0)=[1\cdots 1]^T$, $P_i(0)=10^{10}I$, $i=1,2,3$ 。由于准确的辨识初值不可能得到,在机器人运动轨迹的起始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,机器人在多次重复性工作中,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,仿真曲线如图5和图6所示。图中虚线为希望轨迹,点划线为运用方案I,方案II时的仿真曲线,实线为运用方案III、方案IV时的仿真曲线。

从仿真结果可以看出:具有相同控制结构的独立关节自校正控制方案能给出与联合关节自校正控制方案相当的控制效果;而由于前馈额定力矩的引入,改进的控制方案具

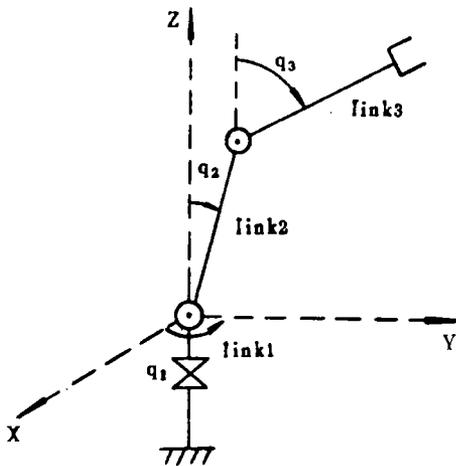


图3 仿真用机器人示意图

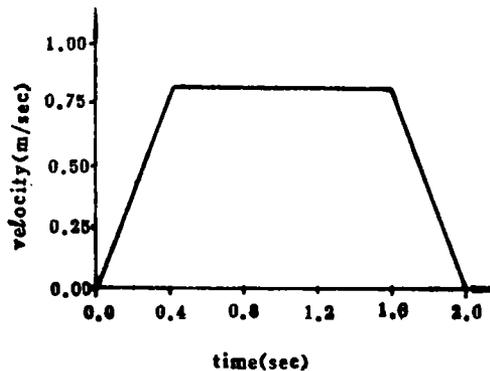


图4 直线轨迹的希望速度

有明显优越的控制性能。这种优越的控制性能是以需要已知机器人的动力学模型为代价获得的。然而，仿真研究表明，方案Ⅲ和方案Ⅳ对动力学建模的精度要求并不很高，当模型参数存在一定误差时，其控制效果仍然很好。这正是我们所希望的，因为机器人的动力学模型是可以建立的，而精确模型和准确的参数是难以得到的，即建模误差总是存在的。改进的方案之所以具有优越的性能，也正是比较充分地利用了可得到的模型信息的结果。从仿真中还可以看出，各方案适应负载变化的能力都比较强。

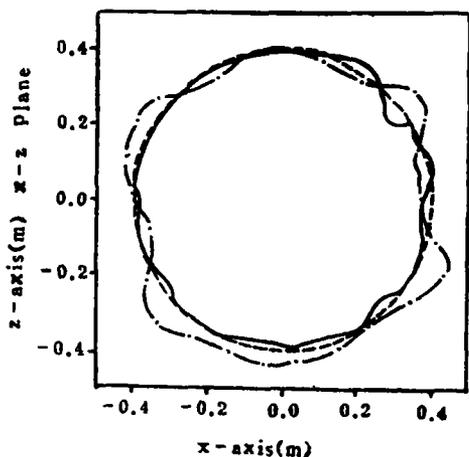


图 5.a. 运用方案 I、III 跟踪圆

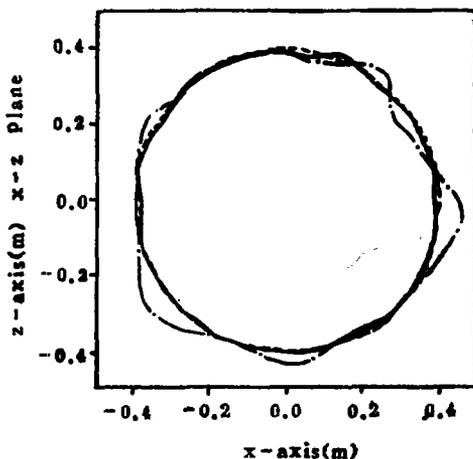


图 6.a. 运用方案 II、IV 跟踪圆

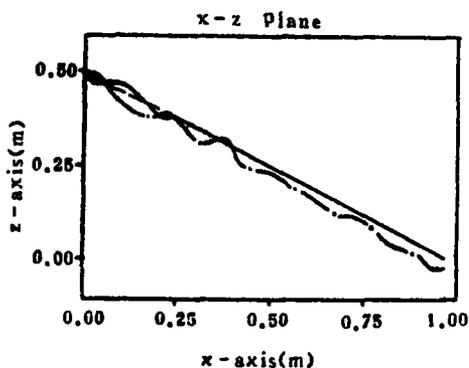


图 5.b. 运用方案 I、III 跟踪直线

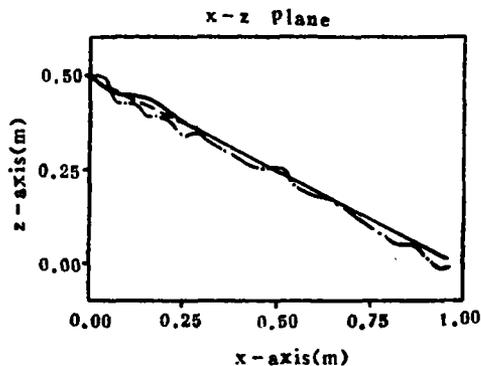


图 6.b. 运用方案 II、IV 跟踪直线

5. 各算法在线计算量估计及其比较研究

为了考察四种控制方案的可实现性，本节给出了它们的在线计算量估计及其比较，并在计算机实现方面进行了讨论。多个仿真研究表明，二阶差分模型能较好地逼近机器人系统，因此表 1 列出了 2 阶差分模型下各方案的计算量及其在 PDP11/45 计算机上用 FORTRAN 语言浮点运算的时间（单位为 ms）。对于方案Ⅲ和方案Ⅳ，由于控制器的两大部分——前馈（额定力矩 $u^d(k)$ 的计算）和反馈（修正力矩 $\delta u(k)$ 的计算）相互独立，可采用两个微处理器并行处理，因而控制方案的总计算量取较大者（如表中“△”

所示)

从表 1 可以看出, 联合关节控制方案具有较大的计算量, 而且随着机器人自由度的增加, 其计算量增加尤为显著。考虑到独立关节控制方式能给出与联合关节控制方式相当的控制性能, 算法简单的独立关节控制方案更为可取。而且在独立关节控制方式下, 各关节自校正控制器相互独立, 对于每一关节子系统可以设置一个 CPU 来实行并行处理。表 2 列出了在并行处理方式下方案 I 和方案 IV 的最大计算量。

表 1 各控制方案的在线计算量及其在 PDP11/45 上用 FORTRAN 浮点运算的时间

控制方案		计算量	计算量、总计算量(Δ)		N=3		N=6		运算时间	
			加减运算	乘除运算	加减	乘除	加减	乘除	N=3	N=6
独立 关节 控制 方式	方案 II		$146N$	$205N$	438	615	876	1230	6.7	13.4
	方案 IV	递推 $N-E$	$106N-22$	$126N-20$	330	468	680	936	5.1	10.2
		控制算法	$\Delta 110N$	$\Delta 156N$						
联合 关节 控制 方式	方案 I		$3N^3+35N^2+99N+1$	$4N^3+47N^2+132N$	694	927	2503	3348	10.3	37.1
	方案 III	递推 $N-E$	$106N-22$	$126N-20$	547	711	2101	2754	7.9	30.8
		控制算法	$\Delta 3N^3+29N^2+68N+1$	$\Delta 4N^3+38N^2+87N$						

表 2 方案 I、IV 采用并行处理时的计算量

方案		计算量	各 CPU 上计算量		最大计算量	
			加 减	乘 除	加 减	乘 除
方案 II			146	205	146	205
方案 IV	递推 $N-E$	$106N-22$	$106N-22$	$126N-20$	$106N-22$	$126N-22$
	控制算法	110	156			

表 3 $u^d(t)$ 离线计算时方案 I、IV 的计算量

方案		计算量	各 CPU 上计算量		运算时间
			加 减	乘 除	
方案 II			146	205	2.2
方案 IV			110	156	1.7

这时, 方案Ⅳ的在线计算时间完全由递推 Newton-Euler 方程决定。Luh 等^[8]提出了一种多 CPU 并行计算递推 Newton-Euler 方程的方法, 采用该方法可使方案Ⅳ的在线计算时间进一步减小。本文则从一种完全不同的角度, 提出了离线进行逆动力学求解的有效方法。这时, 递推 Newton-Euler 方程沿希望轨迹离线求解, 并将所求得的额定力矩值存入计算机内。可见, 这种实现方法实际上是以增加计算机的存贮容量来提高在线计算速度。表 3 列出了在上述实现方案下, 本文给出的两种独立关节控制方案的在线计算量及其在 PDP11/45 计算机上用 FORTRAN 语言浮点实现的时间。可见, 这两方案完全满足高速机器人运动的快速伺服要求。而且各 CPU 相互独立, 编程简单, 易于实现。

6. 结 论

本文给出了四种机器人自校正控制方案的比较研究。仿真结果表明: (1) 与直接线性模型等效^[4,5], 与偏差输出差分模型相比, 摄动差分模型具有变化较慢的系统参数。因而由此设计的自校正控制系统具有明显优越的控制性能, 这一优越的性能正是比较充分地利用了可得到的机器人动力学信息, 较好地补偿了机器人运动中各关节之间的非线性耦合作用的结果; (2) 机器人的独立关节自校正控制能够给出与联合关节自校正控制相当的控制效果, 因而从便于实现的角度, 简单的独立关节自校正控制方案更为可取。这一结论, 在 Koivo 等^[4]的控制方案下同样得到证实。在计算机实现方面, 本文提出了前馈额定力矩离线计算, 在线自校正控制算法采用多 CPU 并行处理的实现方案。算法在线计算量估计表明, 在该实现方案下, 本文提出的独立关节自校正控制方案具有很小的在线计算量, 适用于机器人的快速控制。

参 考 文 献

- [1] Lee, C.S.G. and Chung, M.J. An Adaptive Control Strategy for Mechanical Manipulators, IEEE Trans., AC-29, 837-840, 1984.
- [2] Lee, C.S.G., Chung, M.J. and Lee, B.H.; Adaptive Control for Robot Manipulators in Joint and Cartesian Coordinates, Int. Conf. on Robotics, 530-539, 1984.
- [3] Liu Mei-Hua, Lin Wei and Huang Yi-Fu, A New Adaptive Control Scheme for Robotic Manipulators, BSSS, 263-268, 1986.
- [4] Koivo, A.J. and Guo, T.H., Adaptive Linear Control for Robotic Manipulators, IEEE Trans., AC-28, 162-171, 1983.
- [5] Liu Mei-Hua, An Adaptive Control Scheme for Robotic Manipulators, 15th ISIR, 673-680, 1985.
- [6] 刘美华, 林威, 黄一夫: 新的机器人自校正控制方案, 机器人, 1987年第1期, 18-23.
- [7] 刘美华, 林威: 机器人的独立关节极点配置自校正控制方案, 机器人, 1988年第1期。
- [8] Luh, J.Y.S and Lin, C.S.; Scheduling of Parallel Computation for a Computer-Controlled Mechanical Manipulator, IEEE Trans. SMC-12, 214-234, 1982.

Self-Tuning Controls of Robotic Manipulators

Liu Mei-Hua

ABSTRACT

Four self-tuning control schemes for robotic manipulators are developed in a unified frame. Simulation results of these schemes on a 3-DOF manipulator and estimations of their computational quanta are presented to demonstrate the effectiveness and simplicity of these schemes and to make comparisons among them.

Key words: robots; Manipulators; Self-tuning control; Adaptive control; controllers