

机器人的离散自适应控制算法*

陈 愚 林建亚 路甬祥
(成都科技大学) (浙江大学)

摘 要

本文给出了一种适用于多关节液压伺服机器人的递推离散自适应控制算法, 该算法易于用微机实时在线实现. 实验表明, 其控制作用能显著改善机器人的运动性能.

关键词: 机器人, 自适应控制.

一、前 言

作者在文献[1,2]中以 Popov-landau 超稳定自适应理论为基础, 提出了一种适用于大负载、高速液压伺服机器人的连续时间自适应控制方法. 该法不需求解机器人的复杂动力学方程, 就能自动补偿各关节间耦合干扰和参数变化的影响, 使机器人获得希望的动态响应性能及跟踪精度.

本文将讨论该算法的离散递推形式及在微处理机上实现的有效性.

二、离散自适应控制算法

根据作者在文献[1,2]中给出的机器人的连续时间模型参考自适应控制系统, 假定机器人的输入 $r_i(t)$ 由计算机给出, 则连续系统的三阶常系数参考模型可用以下离散状态方程表示:

$$\begin{bmatrix} \theta_{mi}(kT + T) \\ \dot{\theta}_{mi}(kT + T) \\ \ddot{\theta}_{mi}(kT + T) \end{bmatrix} = S_i(T) \begin{bmatrix} \theta_{mi}(kT) \\ \dot{\theta}_{mi}(kT) \\ \ddot{\theta}_{mi}(kT) \end{bmatrix} + Q_i(T)r_i(kT), \quad (1)$$

上式中,

$$S_i(T) = e^{-x_1 T} F_1 + e^{-x_2 T} F_2 + e^{-x_3 T} F_3$$
$$= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 g_{11}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{12}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{13}^j e^{-x_j T} \\ \sum_{j=1}^3 g_{21}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{22}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{23}^j e^{-x_j T} \\ \sum_{j=1}^3 g_{31}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{32}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{33}^j e^{-x_j T} \end{bmatrix},$$

本文于1987年3月16日收到.

* 本课题的研究工作得到国家教委流体传动及控制开放实验室科学基金资助.

$$Q_i(T) = (1/d_3) \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^3 g_{31}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{32}^j e^{-x_j T} & \sum_{j=1}^3 g_{33}^j e^{-x_j T} \\ \sum_{j=1}^3 g_{13}^j (1 - e^{-x_j T})/x_j \\ \sum_{j=1}^3 g_{23}^j (1 - e^{-x_j T})/x_j \\ \sum_{j=1}^3 g_{33}^j (1 - e^{-x_j T})/x_j \end{bmatrix}$$

由 Sylvester 定理可得

$$\begin{aligned} F_1 &= (1/y_1) \begin{bmatrix} x_2 x_3 & -x_2 - x_3 & 1 \\ c_1 & x_2 x_3 + c_2 & c_3 - x_2 - x_3 \\ c_1(c_3 - x_2 - x_3) & c_1 + c_2(c_3 - x_2 - x_3) & c_2 + (c_3 - x_2)(c_3 - x_3) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} g_{11}^1 & g_{12}^1 & g_{13}^1 \\ g_{21}^1 & g_{22}^1 & g_{23}^1 \\ g_{31}^1 & g_{32}^1 & g_{33}^1 \end{bmatrix}, \quad y_1 = (x_1 - x_2)(x_1 - x_3); \\ F_2 &= (1/y_2) \begin{bmatrix} x_1 x_3 & -x_1 - x_3 & 1 \\ c_1 & x_1 x_3 + c_2 & c_3 - x_1 - x_3 \\ c_1(c_3 - x_1 - x_3) & c_1 + c_2(c_3 - x_1 - x_3) & c_2 + (c_3 - x_1)(c_3 - x_3) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} g_{11}^2 & g_{12}^2 & g_{13}^2 \\ g_{21}^2 & g_{22}^2 & g_{23}^2 \\ g_{31}^2 & g_{32}^2 & g_{33}^2 \end{bmatrix}, \quad y_2 = (x_1 - x_2)(x_3 - x_2); \\ F_3 &= (1/y_3) \begin{bmatrix} x_1 x_2 & -x_1 - x_2 & 1 \\ c_1 & x_1 x_2 + c_2 & c_3 - x_1 - x_2 \\ c_1(c_3 - x_1 - x_2) & c_1 + c_2(c_3 - x_1 - x_2) & c_2 + (c_3 - x_1)(c_3 - x_2) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} g_{11}^3 & g_{12}^3 & g_{13}^3 \\ g_{21}^3 & g_{22}^3 & g_{23}^3 \\ g_{31}^3 & g_{32}^3 & g_{33}^3 \end{bmatrix}, \quad y_3 = (x_1 - x_3)(x_2 - x_3); \end{aligned}$$

以上各式中, d_0-d_3 依次为参考模型的各阶常系数; $c_1 = -d_0/d_3$; $c_2 = -d_1/d_3$; $c_3 = -d_2/d_3$. 自适应补偿信号 k_{ki} 可表示为

$$\begin{aligned} \underline{k}_{ri}(kT + T) &= [b_i(kT + T) - \dot{\theta}_{pi}(kT + T)/k_{vi}] \\ &\quad \cdot [\underline{k}_{ri}(kT) + \beta_i T e_i(kT) u_{mi}(kT)], \end{aligned} \quad (2)$$

上式中,

$$\begin{aligned} b_i(kT + T) &= r_i(kT + T) - \theta_{pi}(kT + T); \\ \underline{k}_{ri}(kT + T) &= \underline{k}_{ri}(kT) + T \beta_i e_i(kT) u_{mi}(kT); \\ e_i(kT) &= \theta_{mi}(kT) - \theta_{pi}(kT); \\ u_{mi}(kT) &= J_{mi} \dot{\theta}_{mi}(kT) + f_{mi} \theta_{mi}(kT); \\ k_{ri}(0) &= 0, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned}$$

在(1-2)式中,脚标 i 表示第 i 次采样时刻的信息; T 是采样时间; x_j 是参考模型状

态方程的特征根； k_{vi} 是系统增益； β_i 、 J_{mi} 、 f_{4mi} 为可调常系数。由以上各式可给出机器人离散自适应控制系统方块图（如图 1）。

三、离散算法的稳定性及性能特点

图 1 所示离散自适应控制系统的稳定性主要取决于采样时间 T 。一般情况下， T 值按下式选择：

$$T \leq 1/10\omega_c, \quad (3)$$

式中的 ω_c 是机器人各关节的闭环带宽 (Hz)。

表 1 典型机器人离散自适应控制算法比较*

文献	项目	控制器输入	加法次数	乘法次数
本文		$\dot{\theta}_i, \theta_i$	$15n$	$19n$
[3]		$\ddot{\theta}_i, \dot{\theta}_i, \theta$	$17n$	$25n$
[4]		$\ddot{\theta}_i, \dot{\theta}_i, \theta$	$8n^3 + n^2 + n + 18$	$8n^3 + 32n^2 + 5n$
[5]		$\ddot{\theta}_i, \dot{\theta}_i, \theta$	$3427(n=6)$	$3037(n=6)$

* n 为机器人关节数， θ_i 为关节角。

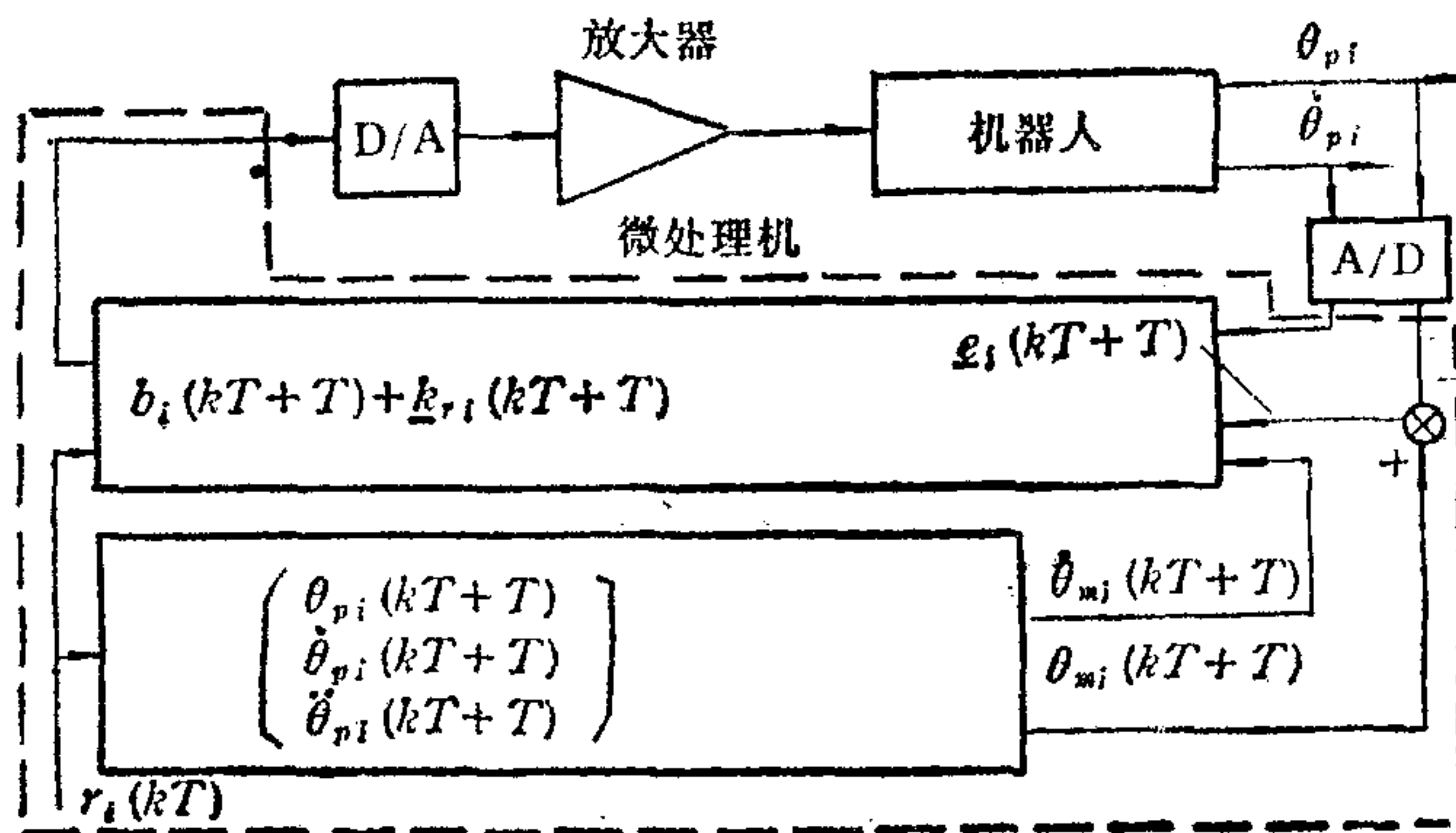


图 1 机器人的离散自适应控制系统

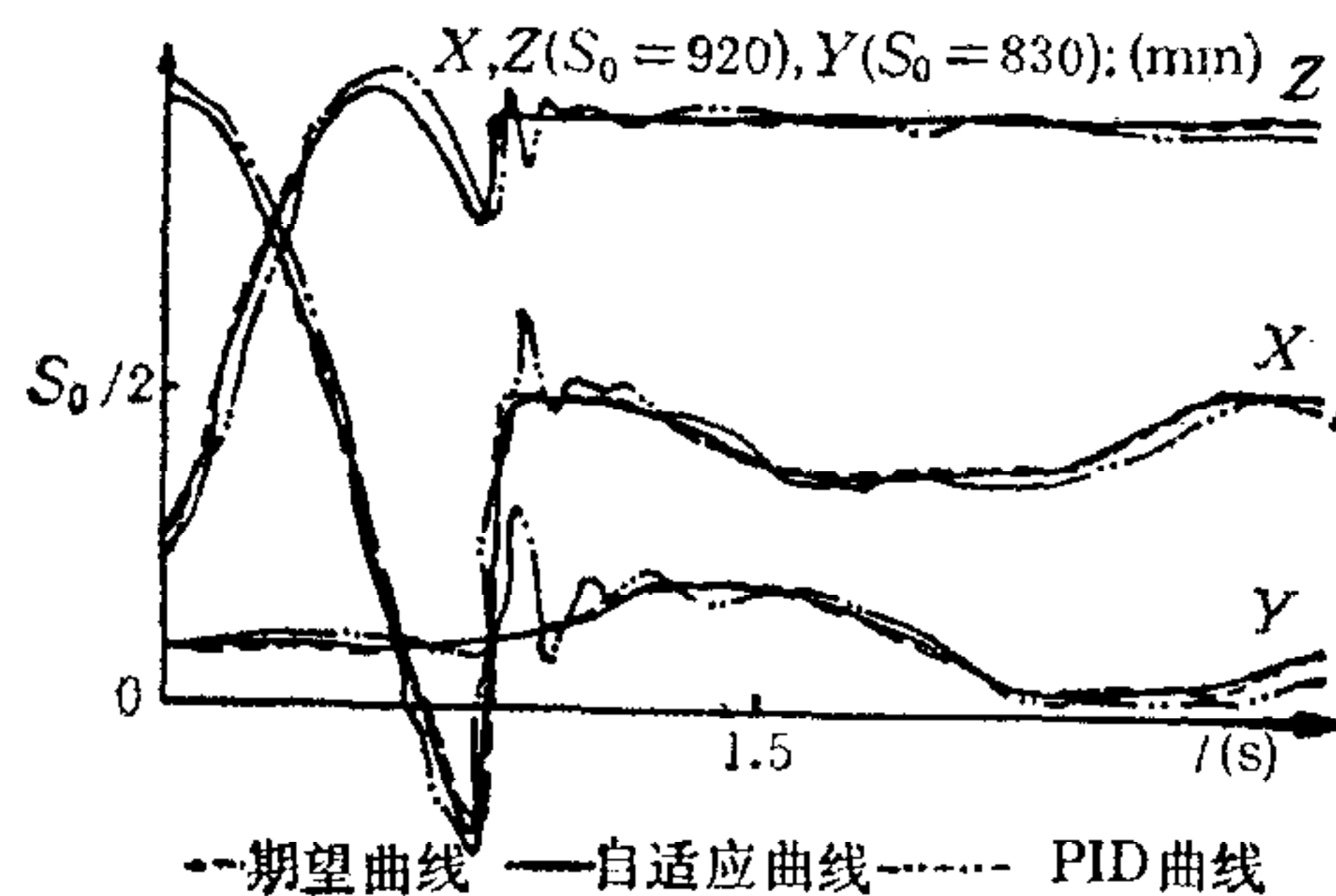


图 2 机器人手部末端的运动轨迹投影曲线

表 1 比较了几种典型机器人离散自适应算法的计算量。图 2 是一组 6 自由度液压伺服机器人轨迹运动控制实验曲线, 控制器为 TP801A 单板机。由图 2 可见, 机器人在本文给出的离散自适应调节作用下, 跟踪和响应性能比 PID 调节有显著的改善。

四、结 论

本文给出的机器人离散自适应控制算法及系统有下述特点:

- 1) 结构简单, 只需测量关节位置即可实现控制;
- 2) 算法以递推形式给出, 计算时间短, 占用内存少, 可在微机上实时在线实现;
- 3) 算法有良好的自适应性能, 显著地改善了机器人的动态响应及跟踪性能。

参 考 文 献

- [1] Lin Jian Ya, Chen Ken, Adaptive Control of Hydraulicoperated Joint of Robot, *Proc of Inter Conference on FPTC*, 1(1985), 132—148.
- [2] 陈恳, 林建亚, 机器人电液伺服关节的自适应控制实践, 中国力学学会流体控制专业委员会 1986 年学术会议论文, 1986.
- [3] Dubowsky, S., The Application of Model-Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators, *J. of Dynamic System, Measurement and Control, ASME*, 101(1979), 3, 193—200.
- [4] Chung, M. J., An Adaptive Control Strategy for Computer-Based Manipulators, *Proc of the 21st Conference on Decision and Control*, Dec, 1982, 95—100.
- [5] Lee, C. S. G., Resolved Motion Adaptive Control for Mechanical Manipulations, *Proc of the Third Yale Workshop on Application of Adaptive System Theory*, 1983, 190—196.

DISCRETE ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM OF ROBOT

CHEN KEN

(Chendu University of Science and Technology)

LIN JIANYA LU YONGXIANG

(Zhejiang University)

ABSTRACT

A discrete recurrence adaptive control algorithm to hydraulic joint type robot is given in the paper. Calculation of this algorithm can be programmed on a microcomputer. The experiment to control a robot has shown that the discrete adaptive control can obviously improve dynamic performance of the robot.

Key words —— Robot; adaptive control.