

# 坐标测量机迭代学习控制研究

吴 晓 峰

(中国航空精密机械研究所北京 100076)

**关键词:** 迭代学习, 坐标测量机 CMM.

## 1 引言

坐标测量机 (CMM) 通常要求在重复作业的环境下实现精确定位及精密测量。虽然许多学者对迭代学习控制进行了理论研究<sup>[1,2]</sup>, 并且在重复作业的机器人中有了一些成功的应用<sup>[3]</sup>, 但仍有不足。本文提出一种采用前馈控制器补偿非线性误差、用线性 PD 控制器跟踪期望轨迹的迭代学习控制算法, 并首次在 CMM 中尝试。该方法的优点是算法与结构简单、抗干扰性强。

## 2 学习算法

考虑  $n$  维 CMM 重复学习控制问题, 其误差动态方程描述为

$$\dot{e} = f(t, e) + B(t, e)[\omega(u) + \hat{\omega}(t, u)], \quad (1)$$

式中  $e(t) = y_d(t) - y_i(t) \in R^n$  是误差矢量,  $y_d(t)$  和  $y_i(t)$  分别为期望和实际轨迹; 当  $e(t)$  有界时, 非线性函数  $f(\cdot) \in R^n$  和惯量矩阵  $B(\cdot) \in R^{n \times m}$  也有界; 系统的干扰输入  $\omega(\cdot) \in R^m$  是周期为  $T$  的未知函数, 即  $\omega(t+T) = \omega(t)$ ;  $\hat{\omega}(\cdot, \cdot) \in R^m$  是  $\omega(\cdot)$  的估计;  $u(t) \in R^m$  是已知的周期函数, 与学习任务有关; 子空间  $R^m$  取决于学习任务。

学习控制器的目标是对任意有界的初始条件  $e(0)$  来讲, 通过迭代学习控制算法生成期望输入力矩  $\hat{\omega}(t, u)$ , 随着迭代次数的增加使得误差矢量逐渐趋于零。

由文[4]知, 适当地选取  $\Phi$  后下列算法收敛:

$$e_i(t) = y_d(t) - y_i(t), \quad (2)$$

$$u_{i+1}(t) = u_i(t) + \Phi e_i(t), \quad (3)$$

式中  $i$  为迭代次数,  $\Phi$  是已知矩阵。

学习系统的一个重要特性是在学习一些不同的任务时能够尽快地收敛。因此, 为使 CMM 在  $t \in [0, T]$  尽快地跟踪  $y_d(t)$ , 设计具有前馈补偿的控制器如下:

$$\hat{\omega}(t, u) = P_i(t) + F_i(t), \quad (4)$$

$$P_i(t) = L[x_d(t) - x_i(t)] + R[\dot{x}_d(t) - \dot{x}_i(t)], \quad (5)$$

式中  $(x_d, \dot{x}_d)$  和  $(x_i, \dot{x}_i)$  分别为期望和实际轨迹的位置和速度;  $L, R$  均为正定阵, 分别为位置和速度反馈增益;  $P_i$  为传统的 PD 控制器;  $F_i$  为预测前馈控制输入, 在每次迭代时由学习规则来计算;  $\hat{\omega}(t, u)$  是每次迭代的输入力矩。

这种反馈控制器的误差可通过增大反馈增益而使得任意小。实际上, 由于力矩的限制不可能任意增大反馈增益。通常, 这意味着当系统存在模型误差或非线性时, 线性反馈控制不适合于跟踪。为了克服这一不足, 故采用前馈控制输入  $F_i(t)$  与线性反馈控制器组合, 随着  $i \rightarrow \infty$ , 使得  $[\hat{\omega}(t) - F_i(t)] \rightarrow 0$ 。

现在, 推导一个学习规则来修正  $F_i(t)$ , 使  $F_i(t)$  收敛于未知值  $\hat{\omega}(t)$ 。考虑下列性能指标

$$J = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{\infty} \|\hat{\omega}(t) - F_r\|^2, \quad (6)$$

由此得到

$$F_{i+1}(t) = F_i(t) - \beta \frac{\partial J}{\partial F_i} = F_i(t) + \beta[\hat{\omega}(t) - F_i(t)], \quad (7)$$

式中  $\beta$  称学习因子。由式(4), (7)得学习规则为

$$F_{i+1}(t) = F_i(t) + \beta P_i(t). \quad (8)$$

由上式看出, 学习规则可以认为是一种对未知期望输入力矩  $\hat{\omega}(t)$  的搜索算法, 其中 PD 控制器的误差  $P_i(t)$  用于修正  $F_i(t)$ 。

### 3 实验系统与结果

上述学习控制算法在 YQ3000 大型坐标测量机<sup>[5]</sup>中初步实验, 如图 1 示。系统中 PD 控制器使得整个系统稳定在规定的误差范围内, 而前馈控制器用于修正前馈力矩分量  $F_i(t)$ 。在学习开始时, 由于位置和速度误差较大, 则令  $F_i(t) = 0$ , 这时  $P_i$  起主要作用。但是随着迭代次数的增加,  $F_i(t)$  的作用增大,  $P_i(t)$  的作用减小。

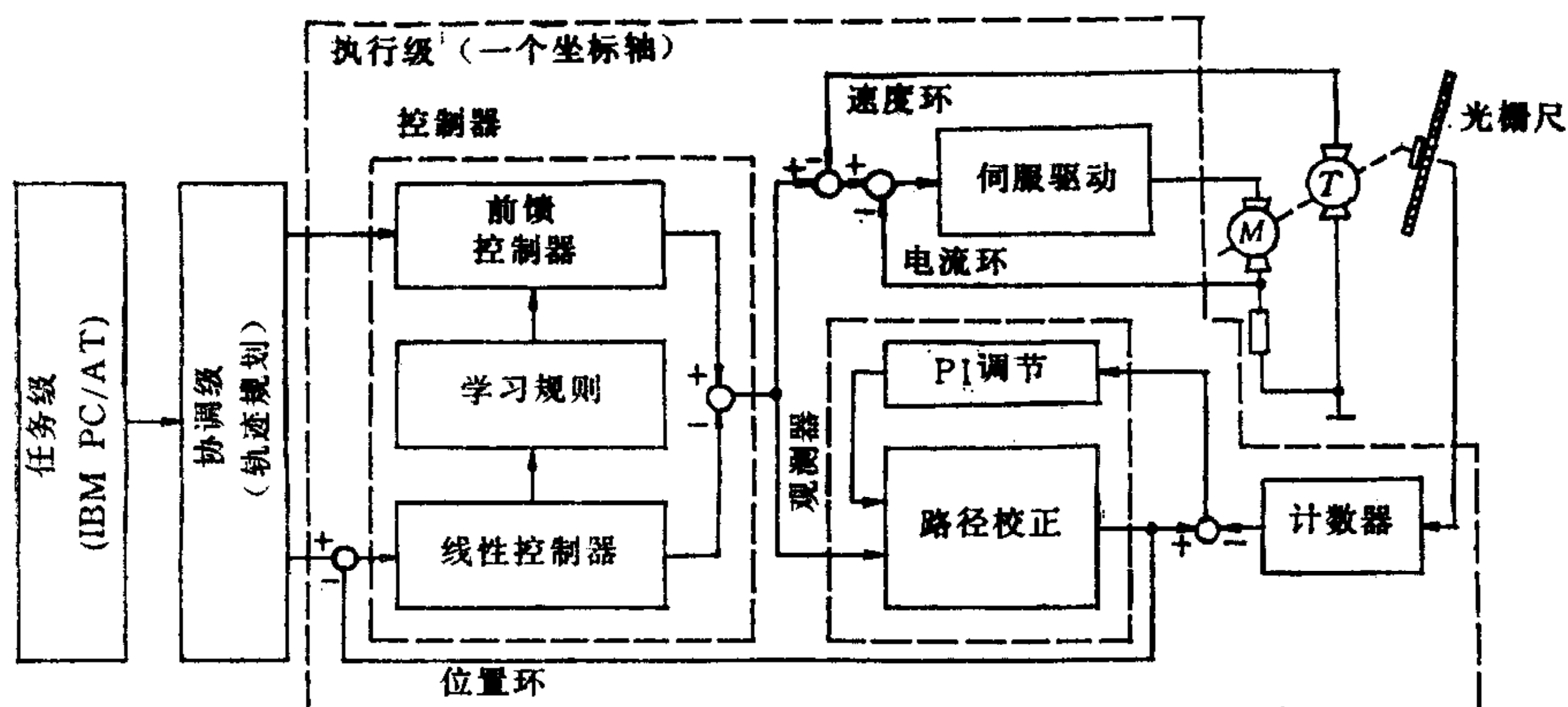


图 1 实验系统框图

实验系统参数: 位置采样周期 2ms, 三轴定位精度 1 $\mu$ m, 最大速度 4m/min, 最大加速度 g/20, 最大跟踪误差 2mm, 最大力矩 2.6Nm. 选择  $\beta = 0.6$  以及下列矩阵:

$$L = \begin{bmatrix} 71.2 & 0 & 0 \\ 0 & 91.3 & 0 \\ 0 & 0 & 74.1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 3.1 & 0 & 0 \\ 0 & 3.2 & 0 \\ 0 & 0 & 3.4 \end{bmatrix},$$

学习控制器的期望和实际轨迹由图 2 给出. 在 20 次迭代后, CMM 的位置和速度误差仅是不采用学习控制时误差的 1%.

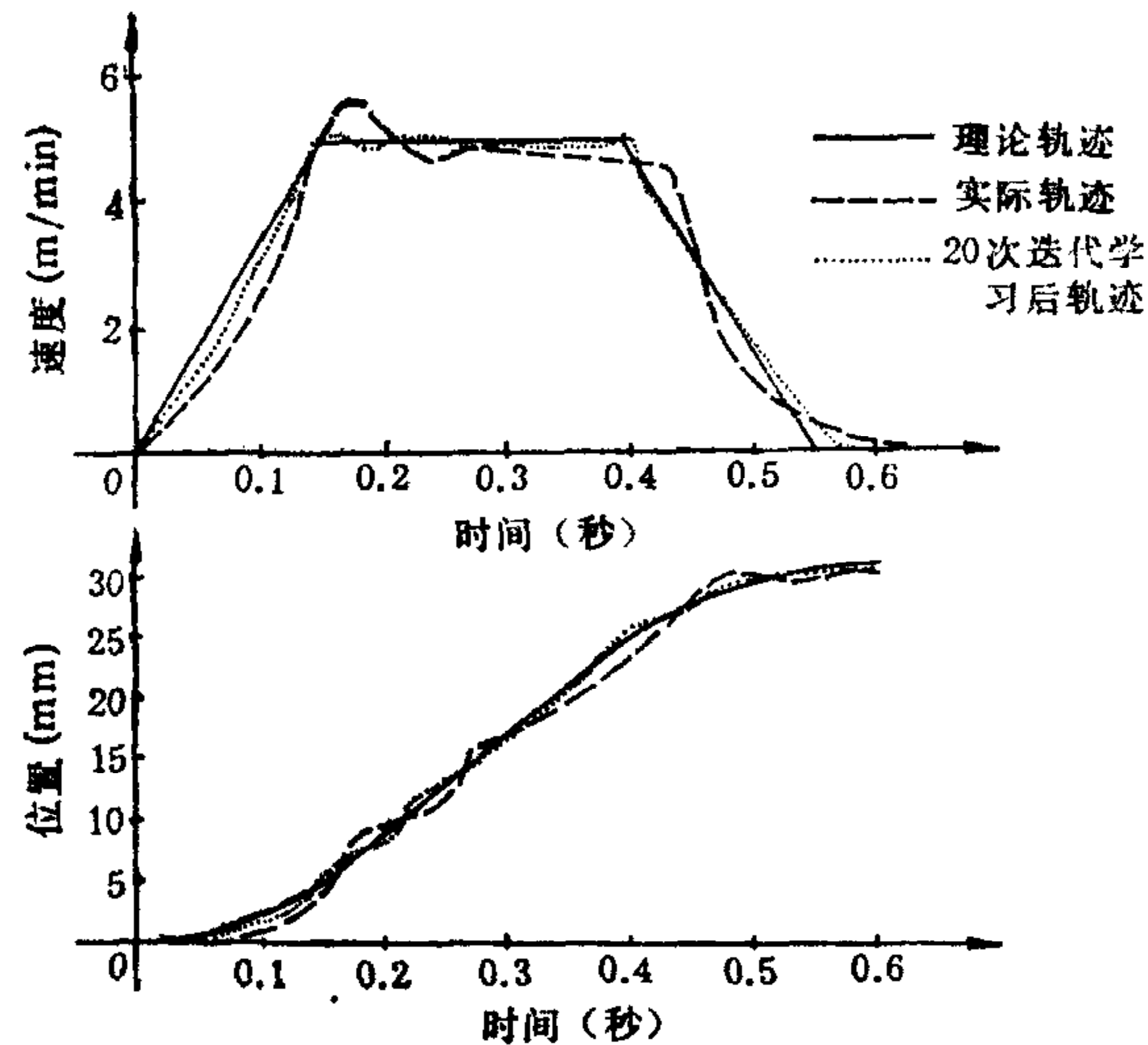


图 2 控制器轨迹比较

### 参 考 文 献

- [1] Arimoto S. Mathematical Theory of Learning with Applications to Robot Control, in Adaptive and Learning System. Ed. New York, Plenum, 1986.
- [2] Horowitz R. A New Adaptive Learning Rule. *IEEE Trans. on Automat. Control*, 1991, 36(2): 188—197.
- [3] Oh SR, Bien Z. An Iterative Learning Control Method with Application for the Robot Manipulator. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1988, 4(5):508—514.
- [4] Arimoto S, Kawamura, S, Miyazaki F. Learning Control Theory for Dynamical System. Proc. 24th CDC, Ft Lauderdale, FL, 1985, 1375—1380.
- [5] 吴晓峰. 一种分布式实时位置控制算法及其在坐标测量系统中的应用. *信息与控制*, 1992,(6): 374—377.

## A STUDY ON ITERATIVE LEARNING CONTROL IN COORDINATE MEASTRING MACHINE

WU XIAOFENG

(China Precision Engineering Institute for Aircraft Industry Beijing 100076)

**Key words:** Iterative learning; CMM.