

XY平台的迭代学习控制初次控制信号选定

朱自立, 徐建明[†], 孙明轩, 臧永灿

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 当XY运动平台当前期望轨迹与以往轨迹基元的组合相似时, 本文提出如何选定迭代学习控制过程的初次控制信号. 首先依次提取各个相似轨迹基元的控制信号, 对它们进行相应的旋转和平移变换, 并在前后轨迹基元拼接处采用线性插值算法进行控制信号无扰切换, 从而获得当前操作的迭代学习控制的初次迭代控制信号; 最后通过仿真实例验证了所提方法的有效性.

关键词: 迭代学习控制; 轨迹基元; 初次迭代控制信号; XY平台

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Determining initial control signal in iterative learning control for XY tables

ZHU Zi-li, XU Jian-ming[†], SUN Ming-xuan, ZANG Yong-can

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: When the current desired trajectory is similar to a trajectory formed by matching and combining former trajectory primitives, we put forward a method for determining the initial control signal in the iterative learning control. Firstly, we subsequently extract from the data base the control signals of corresponding trajectory primitives, and then transform each control signal by rotation and translation. The linear interpolation method is applied to join the corresponding control signals of neighboring trajectory primitives to produce the joined trajectory smooth and without interruption in the transition zone. Thus, the initial control signal in the iterative learning control for the current desired trajectory is determined. The proposed method is validated by a simulation example based on the XY motion platform.

Key words: iterative learning control; trajectory primitive; initial iterative control signal; XY table

1 引言(Introduction)

迭代学习控制(iterative learning control, ILC)适合于一类具有重复运行特性的被控对象, 其任务是寻找控制信号, 使得被控系统的实际输出轨迹在有限时间区间上沿整个期望输出轨迹实现零误差的完全跟踪, 并且整个控制过程要求快速完成^[1]. 然而, 传统ILC初次迭代控制信号是任意选取的, 可以取为零或其他预设值. 若能获取期望的初次迭代控制信号, 将有效降低达到控制精度要求的迭代学习次数.

目前, XU J X和ZHU T等^[2-4]提出通过寻找在幅值、时间尺度上与目标轨迹存在比例关系的轨迹, 然后对控制信号进行分析、变换获得期望轨迹的近似控制信号. Pieter Janssens等通过基于之前学习的相似轨迹和扰动模型设计出面向线性时不变系统的ILC初始化方法^[5]. 然而, 在整个时间或幅值尺度上与目标

迹相似的轨迹是很难寻找到的. 近年来, Rizzolatti等^[6-7]通过对颞顶脑皮质和脑神经生理机理研究指出人的行动由一系列运动基元组成, 这类似于人的语言由音素组成, 并由颞顶脑皮质负责产生和识别行为; Mussa-Ivaldi等^[8]指出人类所有的运动行为可描述为有限运动基元的集合, 并存在如何组合运动基元的规则和机制. Schaal等^[9]指出机器人学习控制应模仿人类和动物获取新运动策略的方式, 在未知控制策略情形下, 机器人学习的目的在于寻找一种适当的控制策略去完成一项既定运动任务; Kruger等^[10]指出机器人学习可以模仿人类从连续观察中提取运动基元, 经运动基元识别与串联合成可产生新的运动; Hoelzle等^[11]提出了基于基本任务的ILC方法, 将跟踪轨迹分解为一系列基本任务(或运动基元), 通过对基本任务进行迭代学习训练获取相应的控制信号. 受此启发,

收稿日期: 2015-04-20; 录用日期: 2015-12-08.

[†]通信作者. E-mail: xujm@zjut.edu.cn; Tel.: +86 13967182316.

本文责任编辑: 徐胜元.

国家自然科学基金项目(61374103), 浙江省自然科学基金项目(LY13F030009)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374103) and Zhejiang Natural Science Foundation of China (LY13F030009).

ILC系统的当前期望轨迹的相似轨迹可以由以往若干段轨迹基元经旋转和平移变换、串联组合而成;显然寻找由若干段轨迹基元组合而成的相似轨迹相对于一条整个时域相同的相似轨迹要容易得多;从而也能拓展ILC的应用领域.

XY运动平台通过控制XY轴电机实现参考轨迹跟踪,当进行重复性操作任务时,ILC已得到成功应用^[12-15];然而,当前操作任务与以往任务不同,但通过匹配组合存在相似之处时,如何充分利用以往操作任务的信息,获取当前操作任务的初次迭代学习控制信号是本文研究的问题.考虑XY运动平台当前期望轨迹与由以往轨迹基元经旋转和平移变换匹配组合而成轨迹相似的情况,研究迭代学习控制的初次迭代控制信号提取方法.首先通过轨迹基元的坐标变换关系和线性系统叠加原理获得轨迹基元的控制信号;依据各轨迹基元与期望轨迹相应分段轨迹的相似性变换关系获得相似轨迹控制信号;设计过渡带并采用线性插值算法实现前后分段轨迹控制信号的无扰切换,进而提取出当前参考轨迹的初次迭代控制信号;最后通过仿真实验验证所提方法的有效性.

2 问题描述(Problem description)

在基坐标系(或{B}坐标系)下描述的期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ (其中 $t \in [0, T_d]$)的控制信号可以通过传统的ILC获得,其中

$$l_d(x(t), y(t)) = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \end{bmatrix}.$$

开环迭代学习控制是ILC的一种模式,Y轴的框架图如图1所示^[14](X轴也是如此).根据图1可知,学习律为

$$u_{i+1}(t) = u_i(t) + C e_{i+1}(t) + C_1 e_i(t). \quad (1)$$

由式(1)可以得出

$$u_1(t) = u_0(t) + C e_1(t) + C_1 e_0(t). \quad (2)$$

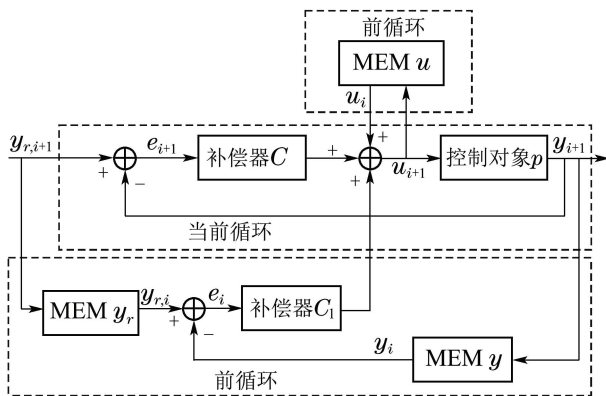


图1 开闭环迭代学习控制

Fig. 1 Previous and current circle iterative learning control

按照传统的迭代学习控制,期望轨迹 $x_d(t), y_d(t)$

的初次迭代控制信号 $u_0(t)$ 一般默认为常数,通常为0.但如果期望轨迹可通过参考轨迹优化匹配组合从以往作业任务的参考轨迹库中寻找相似参考轨迹,进而获取当前作业任务参考轨迹的初次迭代控制信号

$$u_{0d}(t) = \begin{bmatrix} u_{0dx}(t) \\ u_{0dy}(t) \end{bmatrix},$$

其中: $u_{0dx}(t), u_{0dy}(t)$ 为 $x_d(t), y_d(t)$ 的初次迭代控制信号.

假设 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 是期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ 的第j段轨迹, $l_j(x(t), y(t))$ 为轨迹库中一段轨迹基元,其中 $t \in (0, T_j)$; ${}^{dj}l_{dj}(x(t), y(t))$ 和 ${}^j l_j(x(t), y(t))$ 分别是 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 和 $l_j(x(t), y(t))$ 相对各自质心坐标系 $\{dj\}$ 和 $\{j\}$ 下的表示,如图2所示.

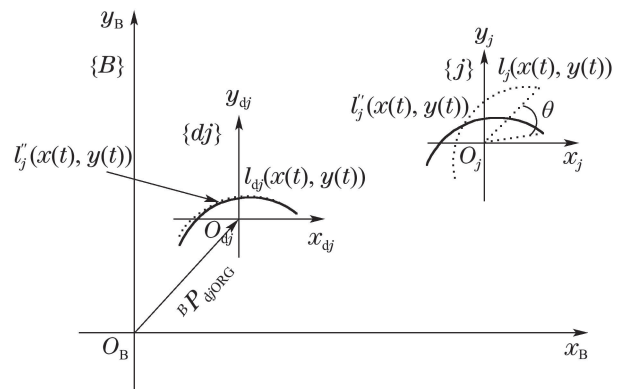


图2 两段轨迹的相似性分析过程

Fig. 2 The similarity analysis process for two trajectories

设轨迹 ${}^j l_j(x(t), y(t))$ 经旋转变换

$$R_j = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

与轨迹 ${}^{dj}l_{dj}(x(t), y(t))$ 姿态一致,则两条轨迹的偏差为

$$D_f(t) = R_j \cdot {}^j l_j(x(t), y(t)) - {}^{dj}l_{dj}(x(t), y(t)). \quad (3)$$

相应的最小均方根误差为

$$\text{lrm} = \sqrt{\frac{1}{T_j} \int_0^{T_j} (D_f^T(t) D_f(t)) dt}. \quad (4)$$

最小均方根误差lrm包含了两条轨迹的所有点,因此,可以将lrm作为轨迹相似性的指标;以下给出 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 和 $l_j(x(t), y(t))$ 的相似性定义.

定义 给定一个相似度 $\varepsilon > 0$,对于轨迹 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 与 $l_j(x(t), y(t))$,如果通过旋转 R_j ,两者之间的最小均方根误差 $\text{lrm} < \varepsilon$;则称在相似度 ε 下轨迹 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 与 $l_j(x(t), y(t))$ 相似,即 $l_{dj}(x(t), y(t)) \approx l_j(x(t), y(t))$;并且 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 与 $l''_j(x(t), y(t))$ 重叠,即

$$l_{dj}(x(t), y(t)) \approx l''_j(x(t), y(t)), \quad (5)$$

其中

$$l''_j(x(t), y(t)) = R_j \cdot {}^j l_j(x(t), y(t)) + P_{dj\text{ORG}}, \quad (6)$$

矢量 $P_{dj\text{ORG}}$ 表示坐标系 $\{dj\}$ 的原点相对于 $\{B\}$ 的位置.

依据轨迹相似性定义,在一定相似度下,如果期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ 分成 n 段轨迹,分别与轨迹库中的 n 条轨迹基元相似,即存在

$$l_{dj}(x(t), y(t)) \stackrel{\varepsilon}{\approx} R_j \cdot {}^j l_j(x(t), y(t)) + P_{dj\text{ORG}}, \quad j \in [1, n]. \quad (7)$$

因此,依据线性系统叠加定理,可得出期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ 的第 j 段轨迹 $l_{dj}(x(t), y(t))$ 的初次迭代控制信号为

$$u_{0dj}(t) = R_j^u \cdot {}^j u_j(t) + u\{P_{dj\text{ORG}}\}, \quad j \in [1, n], \quad (8)$$

其中:

$$R_j^u = \begin{bmatrix} R_{j11} & R_{j12} \frac{P_y(s)}{P_x(s)} \\ R_{j21} \frac{P_x(s)}{P_y(s)} & R_{j22} \end{bmatrix},$$

$u\{P_{dj\text{ORG}}\}$ 是 $P_{dj\text{ORG}}$ 的控制信号, ${}^j u_j(t)$ 是轨迹基元 ${}^j l_j(x(t), y(t))$ 的控制信号, $P_x(s), P_y(s)$ 分别是XY平台的X, Y轴传递函数模型.

3 轨迹基元控制信号的获取(Acquirement of control signal for trajectory primitives)

如图3所示,在基坐标系中,存放了 m 条已通过传统的迭代学习控制学习过的轨迹. $l_j(x(t), y(t))$ 是其中一段轨迹基元,与期望轨迹的一部分相似, $l_j(x(t), y(t))$ 在坐标系 $\{j\}$ 的描述如式(9)所示:

$${}^j l_j(x(t), y(t)) = l_j(x(t), y(t)) + {}^j P_{\text{BORG}}, \quad (9)$$

其中: 矢量 ${}^j P_{\text{BORG}}$ 表示 $\{B\}$ 的原点相对于 $\{j\}$ 的位置^[16],此外,

$${}^j l_j(x(t), y(t)) = \begin{bmatrix} {}^j x_j(t) \\ {}^j y_j(t) \end{bmatrix}, \quad l_j(x(t), y(t)) = \begin{bmatrix} x_j(t) \\ y_j(t) \end{bmatrix}.$$

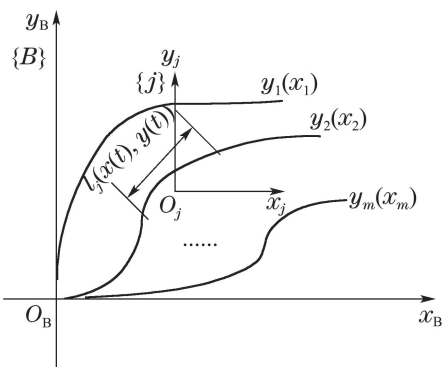


图3 轨迹基元的获取

Fig. 3 The acquirement of trajectory primitive

设定

$${}^j P_{\text{BORG}} = m_j^x \begin{bmatrix} I_x \\ 0 \end{bmatrix} + m_j^y \begin{bmatrix} 0 \\ I_y \end{bmatrix},$$

其中: m_j^x 和 m_j^y 是 ${}^j P_{\text{BORG}}$ 分别在 x, y 轴方向的坐标值, I_x, I_y 分别是 x, y 轴方向上的单位平移基元, 其对应的控制信号为 u_{I_x}, u_{I_y} .

则 ${}^j l_j(x(t), y(t))$ 在 x 轴、 y 轴的描述为

$${}^j x_j(t) = x_j(t) + m_j^x I_x(t), \quad (10)$$

$${}^j y_j(t) = y_j(t) + m_j^y I_y(t). \quad (11)$$

依据线性系统叠加定理,可以得到其对应的控制信号满足下面的关系:

$${}^j u_{x_j}(t) = u_{x_j}(t) + m_j^x u_{I_x}(t), \quad (12)$$

$${}^j u_{y_j}(t) = u_{y_j}(t) + m_j^y u_{I_y}(t), \quad (13)$$

其中: ${}^j u_{x_j}(t), u_{x_j}(t), {}^j u_{y_j}(t), u_{y_j}(t)$ 分别是指 ${}^j x_j(t), x_j(t), {}^j y_j(t), y_j(t)$ 的控制信号.

注1 在这里,可以通过下面的方法获取单位平移基元及其控制信号.如图4所示,当 $t > t_s$ (t_s 是调节时间)时,系统的输出才趋于稳态.设单位阶跃响应为 $1_y(t)$,取单位平移基元 $I_y(t) = 1_y(t + t_s)$,则 $1_y(t + t_s)$ 对应的控制信号为 $u_{I_y}(t)$,其中 $t \in [0, T_j]$.

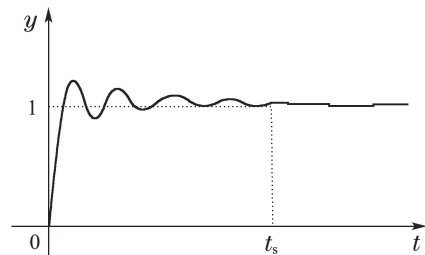


图4 单位阶跃响应

Fig. 4 The unit step response

4 初次迭代控制信号的获取(Acquirement of the initial control signal)

通过轨迹基元匹配,轨迹基元组成了期望轨迹的相似参考轨迹.但是在拼接的部分可能会出现如图5所示3种情况: ①前后轨迹基元交叉; ②前后轨迹基元不连续; ③前后轨迹基元连续衔接.因此,在前后轨迹基元拼接处,通过线性插值方法对控制信号引入过渡带,实现控制信号无扰切换.针对第①种情况,如图6所示,取 $l''_j(x(t), y(t))$ 的末端 d_j 和 $l''_{j+1}(x(t), y(t))$ 的始端 a_{j+1} 的中心点 O_j^{tr} ,以该点为圆心, r_j 为半径画圆,分别交于点 c_j, b_{j+1} . a_j 是 $l''_j(x(t), y(t))$ 的始端点, b_j 是上一个过渡带与 $l''_j(x(t), y(t))$ 的交点, c_{j+1} 是下一个过渡带与 $l''_{j+1}(x(t), y(t))$ 的交点, d_{j+1} 是 $l''_{j+1}(x(t), y(t))$ 的末端点.则过渡带的时间区间为

$$T_j^{\text{tr}} = t_{b(j+1)} - t_{c_j}, \quad (14)$$

其中: $t_{b(j+1)}$ 为点 b_{j+1} 在期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ 上的时刻, t_{c_j} 为点 c_j 在期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ 上的时刻.

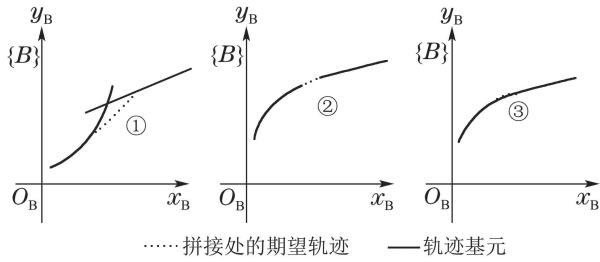


图5 拼接处可能出现的情况

Fig. 5 The possible situation occurs at joining area

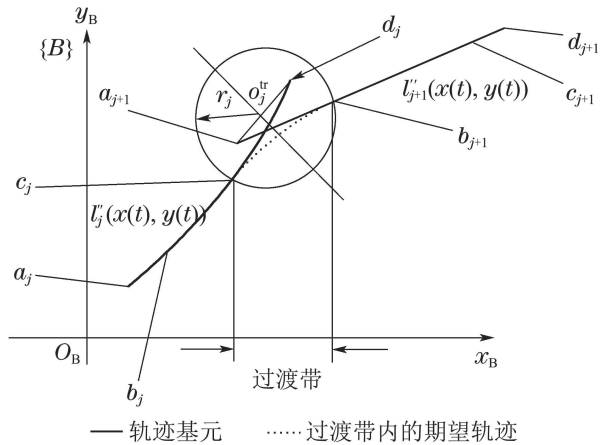


图6 第①种情况的拼接处的过渡带

Fig. 6 The transition band at joining area for the first situation

经过过渡带处理后的近似轨迹的时间长度与期望轨迹的时间长度的误差为

$$\Delta T_j^{tr} = T_j^{tr} - (t_{cdj} + t_{ab(j+1)}), \quad (15)$$

其中: t_{cdj} 是轨迹 $l_j''(x(t), y(x(t)))$ 上点 c_j 和点 d_j 之间的时间区间长度, $t_{ab(j+1)}$ 是轨迹 $l_{j+1}''(x(t), y(t))$ 上点 a_{j+1} 和点 b_{j+1} 之间的时间区间长度. 在过渡带中, 点 c_j 和点 b_{j+1} 对应的控制信号分别为 u_{c_j} 和 $u_{b(j+1)}$, 则在控制信号 u_{c_j} 和 $u_{b(j+1)}$ 用线性插值的方法进行无扰切换. 经过处理的控制信号存放在 $u_j^{tr}, t \in [0, T_j^{tr}]$.

针对第②③种情况, 如图7-8所示, 类似的, 可以得到过渡带的时间区间如式(14)所示, 经过过渡带处理后的轨迹的时间长度与期望轨迹的时间长度的误差如式(15)所示, 但是第①种情况的 $\Delta T_j^{tr} < 0$, 第②种情况 $\Delta T_j^{tr} > 0$, 第③种情况 $\Delta T_j^{tr} = 0$.

假设期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$ 由 n 段轨迹基元经过仿射变换近似获得, 当 $|\sum_{j=1}^{n-1} \Delta T_j^{tr}|$ 较小时, 则期望轨迹的初次迭代控制信号为

$$u_{0d} = \{u_1(t), \bar{u}_1^{tr}(t), \bar{u}_2(t), \bar{u}_2^{tr}(t), \bar{u}_3(t), \dots, \bar{u}_n(t)\}, \quad (16)$$

其中: $u_1(t) (t \in [0, t_{c1}])$ 是轨迹 $l_1''(x(t), y(t)) (t \in [0, t_{c1}])$ 的控制信号, $\bar{u}_1^{tr}(t) = u_1^{tr}(t - t_{c1}) (t \in (t_{c1}, t_{c1} +$

$T_1^{tr}])$ 为轨迹 $l_1''(x(t), y(t))$ 和 $l_2''(x(t), y(t))$ 的过渡带的控制信号, 其余各段控制信号如下:

$$\begin{aligned} \bar{u}_2(t) &= u_2(t - (t_{c1} + T_1^{tr} - t_{b2})), \\ t &\in (t_{c1} + T_1^{tr}, t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2}], \\ \bar{u}_2^{tr}(t) &= u_2(t - (t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2})), \\ t &\in (t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2}, t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2} + T_2^{tr}], \\ \bar{u}_3(t) &= u_3(t - (t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2} + T_2^{tr} - t_{b3})), \\ t &\in (t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2} + T_2^{tr}, \\ &\quad t_{c1} + T_1^{tr} + t_{c2} - t_{b2} + T_2^{tr} + t_{c3} - t_{b3}], \\ &\vdots \\ \bar{u}_n(t) &= u_n(t_n - \sum_{j=1}^{n-1} (t_{c_j} + T_j^{tr} - t_{b(j+1)})), \\ t &\in (\sum_{j=1}^n (t_{c_j} + T_j^{tr}) - t_{b(j+1)}, T_d], \end{aligned}$$

其中: $T_d = T^* - \sum_{j=1}^{n-1} \Delta T_j^{tr}$, T^* 为整段相似参考轨迹的时间长度, 且当 $\sum_{j=1}^{n-1} \Delta T_j^{tr} < 0$ 时, $\bar{u}_n(t) = u_n(T^*)$, $t \in [T^*, T_d]$.

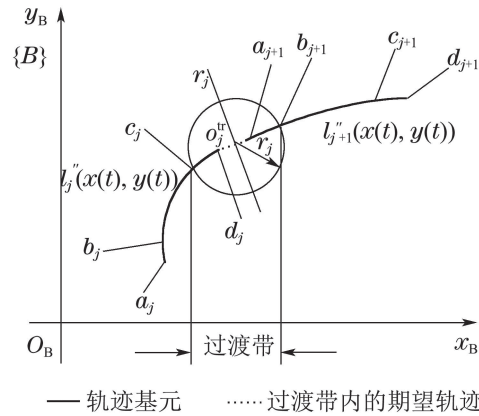


图7 第②种情况的拼接处的过渡带

Fig. 7 The transition band at joining area for the second situation

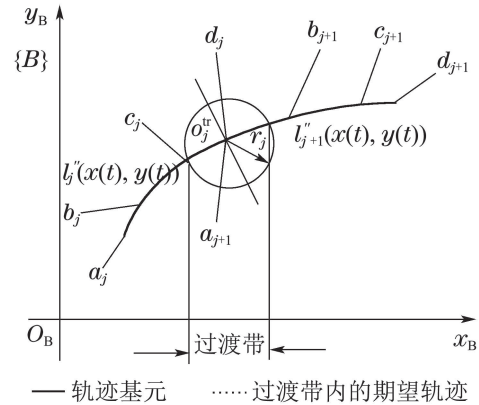


图8 第③种情况的拼接处的过渡带

Fig. 8 The transition band at joining area for the third situation

5 仿真实验(Simulation illustrations)

设XY运动控制平台各轴的设定速度至实际位移之间的线性动态特性可近似为如式(17)所示的二阶标准模型^[14].

$$P(s) = \frac{2.844}{0.354s^2 + s}. \quad (17)$$

采用的学习律C, C₁分别为

$$C = k_p + k_d s, \quad C_1 = k_p^0 + k_d^0 s, \quad (18)$$

其中:

$$k_p = 5.00, \quad k_d = 50.00, \quad k_p^0 = 0.00505, \quad k_d^0 = 3.917.$$

采用如图9所示的期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$, 分段期望轨迹及其质心坐标系如图10所示, 其中:

$$l_d(x(t), y(t)) = \{l_{d1}(x(t), y(t)), l_{d2}(x(t), y(t)), l_{d3}(x(t), y(t))\}.$$

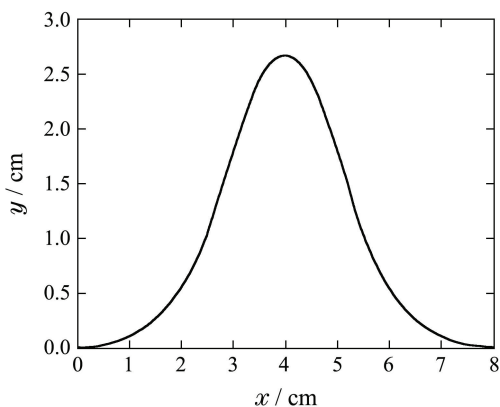


图9 期望轨迹 $l_d(x(t), y(t))$

Fig. 9 The desired trajectory $l_d(x(t), y(t))$

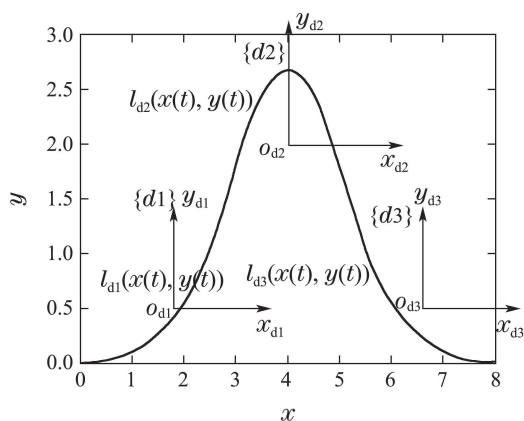


图10 分段期望轨迹及其质心坐标系

Fig. 10 Desired trajectory segment and its centroid coordinates

相似轨迹基元如图11所示, 在相似度 $\varepsilon = 0.1$ 的条件下,

$$l_{d1}(x(t), y(t)) \approx l_1(x(t), y(t)) + [1.71 \ 0.51]^T,$$

$$l_{d2}(x(t), y(t)) \approx \begin{bmatrix} \cos 30^\circ & -\sin 30^\circ \\ \sin 30^\circ & \cos 30^\circ \end{bmatrix} \times \\ l_2(x(t), y(t)) + [1.71 \ 10.51]^T,$$

$$l_{d3}(x(t), y(t)) \approx l_3(x(t), y(t)) + [6.62 \ 0.51]^T.$$

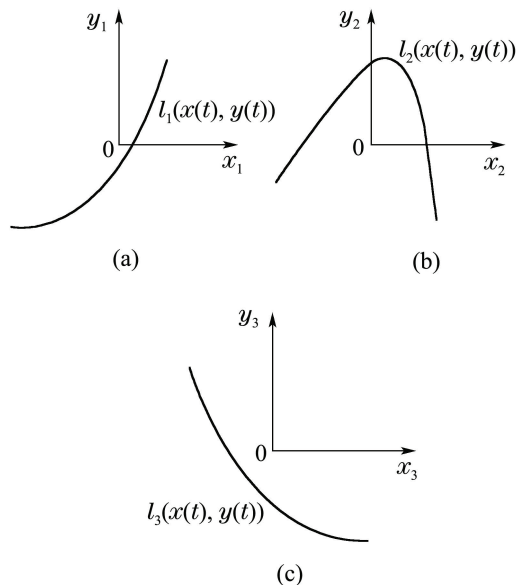


图11 相似的轨迹基元

Fig. 11 Similar trajectory primitive

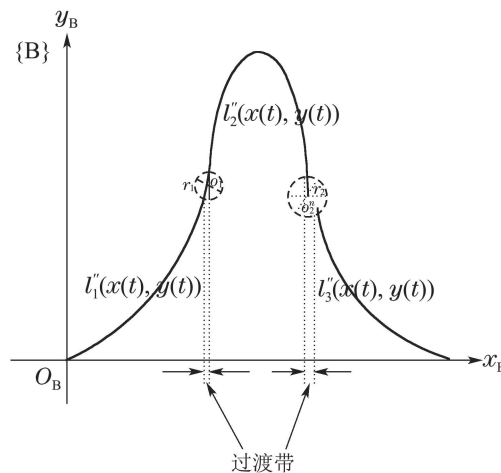


图12 拼接处的过渡带设计

Fig. 12 Design of the transition zone for the joining area

在拼接处的过渡带如图12所示. 其中

$$r_1 = 0.35, \quad r_2 = 0.44.$$

此外, 通过本文提出的方法, 提取的X, Y轴期望轨迹的初次迭代控制信号如图13-14所示.

第1次迭代学习, X, Y轴的初次跟踪误差如图15所示, X轴初次跟踪误差最大为0.045, Y轴为0.0017. 此外, 对采用本文提出的方法提取的初次迭代控制信号和传统ILC方法作了对比, 如图16所示; 在图16中, 期望轨迹 $x_d(t), y_d(t)$ 采用本文提出的方法的第1次迭

代跟踪误差的RMS分别为0.0004, 0.0007; 采用传统ILC方法的第4次迭代分别为0.0005, 0.0006. 不难看出, 采用本文提出的方法第1次迭代的跟踪精度接近采用传统ILC方法的第4次迭代的跟踪精度.

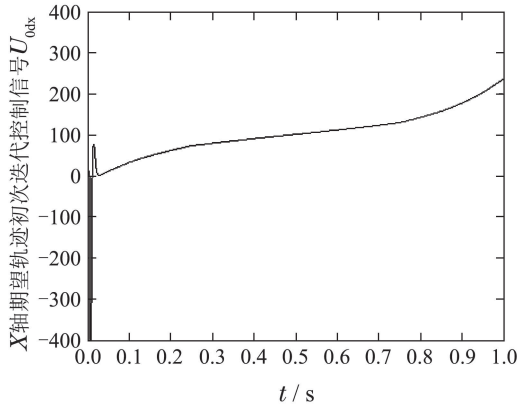


图 13 X轴期望轨迹的初次迭代控制信号

Fig. 13 Initial iterative control signals for X-axis trajectory

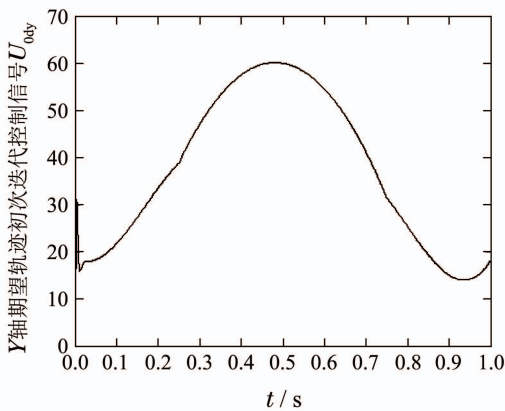


图 14 Y轴期望轨迹的初次迭代控制信号

Fig. 14 Initial iterative control signals for Y-axis trajectory

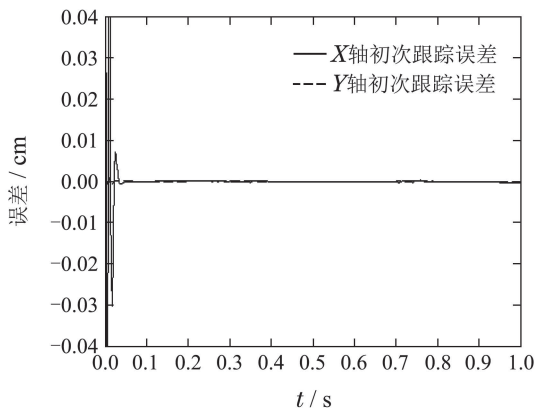


图 15 X, Y轴的初次跟踪误差

Fig. 15 Initial tracking error for X, Y-axis

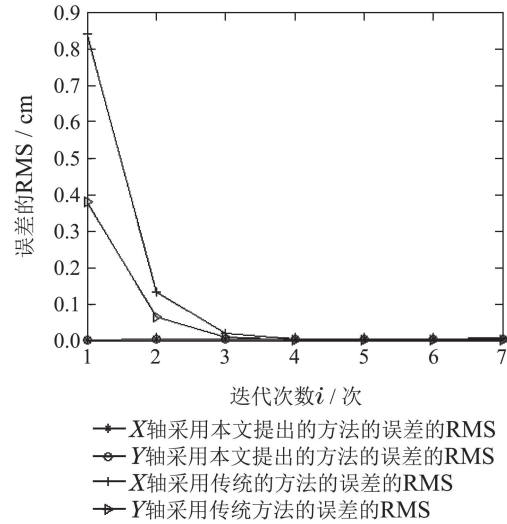


图 16 X, Y轴采用本文方法和传统方法的误差的RMS对比
Fig. 16 The RMSE comparison between the proposed method and traditional method for X, Y-axis

6 结论(Conclusions)

本文提出了XY平台的ILC的初次迭代控制信号的提取方法, 能够有效地解决ILC初次控制信号提取的问题, 减少了达到跟踪精度的迭代学习次数, 提高了收敛速度. 仿真实验结果表明, 本文提出的初次迭代控制信号的提取方法是有效的, 并能够显著降低初次迭代控制的跟踪误差.

参考文献(References):

- ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robots by learning [J]. *Journal of Robot System*, 1984, 1(2): 123 – 140.
- XU J X, ZHU T. Dual-scale direct learning control of trajectory tracking for a class of nonlinear uncertain systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(10): 1884 – 1888.
- XU J X. Direct learning of control efforts for trajectories with different time scales [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(7): 1027 – 1030.
- XU J X. Direct learning of control efforts for trajectories with different magnitude scales [J]. *Automatica*, 1997, 33(12): 2191 – 2195.
- JANSSENS P, PIPELEERS G, SWEVERVS J. Initialization of ILC based on a previously learned trajectory [C] // *American Control Conference*. Canada: ACC, 2012, 1: 610 – 614.
- RIZZOLATTI G, FOGASSI L, GALLESE V. Parietal cortex: from sight to action [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1997, 7(4): 562 – 567.
- RIZZOLATTI G, FOGASSI L, GALLESE V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action [J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2001, 2(9): 661 – 670.
- MUSSA-IVALDI F A, BIZZI E. Motor learning through the combination of primitives [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2000, 355(1404): 1755 – 1769.
- SCHAAL S, ATKESON C. Learning control in robotics [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2010, 17(2): 20 – 29.
- KRUGER V, HERZOG D, BABY S, et al. Learning actions from observations [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2010, 17(2): 30 – 43.

- [11] HOELZLE D J, ALLEYNE A G, JOHNSON A J W. Basis task approach to iterative learning control with applications to micro-robotic deposition [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(5): 1138 – 1148.
- [12] CHEN C K, HWANG J. PD-type iterative learning control for trajectory tracking of a pneumatic X–Y table with disturbances [J]. *The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series C*, 2006, 49(2): 520 – 526.
- [13] CHEN C K, HWANG J. Iterative learning control for position tracking of a pneumatic actuated X–Y table [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(12): 1455 – 1461.
- [14] XU J X, PANDA S K, LEE T H. *Real-Time Iterative Learning Control* [M]. London, U.K.: Springer-Verlag, 2009.
- [15] CUI J, YANG X W. Iterative learning control for voice coil motor XY motion platform [C] // *American Control and Artificial Intelligence*. Xiameng, China: 2012: 1276 – 1280.
- [16] CRAIG J J. *Introduction to Robotics* [M]. YUN Chao, Interpreter. Beijing: China Machine Press, 2006.
(CRAIG J J. 机器人学导论 [M]. 贡超译. 北京: 机械工业出版社, 2006.)

作者简介:

朱自立 (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为迭代学习控制,

E-mail: longmiwtn@163.com;

徐建明 (1970–), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为迭代学习控制、机器人控制, E-mail: xujm@zjut.edu.cn;

孙明轩 (1961–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为迭代学习控制, E-mail: mxsun@zjut.edu.cn;

臧永灿 (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为迭代学习控制、轨迹基元优化匹配, E-mail: Forbril@163.com.