

移动机器人轨迹跟踪的模糊 PID-P 型 迭代学习控制

刘国荣^{1,2}, 张扬名¹

(1. 湘潭大学信息工程学院, 湖南湘潭 411105; 2. 湖南工程学院, 湖南湘潭 411101)

摘要: 本文针对移动机器人轨迹跟踪控制问题的研究, 提出了一种基于移动机器人运动模型的模糊开闭环 PID-P 型非线性离散迭代学习控制方法, 给出了 PID-P 型迭代学习的收敛条件及其证明过程, 并采用模糊控制的原理整定 PID 三个学习增益矩阵的参数. 该控制方法提高了移动机器人对特定轨迹的重复跟踪能力, 具有算法实现简单的特点. 实验仿真结果表明, 采用模糊开闭环 PID-P 型迭代学习控制算法对轨迹跟踪是可行有效的.

关键词: 移动机器人; 迭代学习控制; 轨迹跟踪; 模糊控制

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1536-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.013

Trajectory Tracking of Mobile Robots Based on Fuzzy PID-P Type Iterative Learning Control

LIU Guo-rong^{1,2}, ZHANG Yang-ming¹

(1. The College of Information Engineering of Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China;

2. Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 411101, China)

Abstract: Through the research of mobile robot trajectory tracking control problem, this paper proposes fuzzy PID-P type open-closed loop nonlinear discrete iterative learning control (ILC) method based on the kinematic model of mobile robot. The PID-P type iterative learning convergence condition and certification procedure are presented. The fuzzy control principle is used to set PID parameters of three learning gain matrixes. This control method improves the ability of tracking repeatedly specific trajectory for mobile robot, and has the characteristics of simple algorithm. Simulation results show that the use of fuzzy open-closed-loop PID-P type iterative learning control algorithm for trajectory tracking is feasible and effective.

Key words: mobile robot; iterative learning control; trajectory tracking; fuzzy control

1 引言

移动机器人是一个典型的时变、强耦合的非线性复杂系统, 要实现对其精确和快速的控制, 一直是工业自动化领域研究的热点. 由于外部干扰和建模的不精确, 实际上无法得到移动机器人完整的运动模型, 鉴于移动机器人的这种特点以及重复学习控制特有的性质, 采用迭代学习控制这种高精度运动的有效控制策略^[1]是十分理想的选择. 迭代学习控制的想法最初是由日本学者 Uchiyama 于 1978 年提出, 1984 年 Arimoto 等^[2]人对迭代学习控制的思想加以了完善, 并取得了开创性的成果. 迭代学习控制是通过使用输出误差来修正输入控制量, 从而达到某种控制目标的改善.

针对移动机器人轨迹跟踪控制问题, 文献[3]中提出了一种 PD 型迭代学习控制律, 比起 D 型迭代学习控制律来说, 有效地减少了偏差; 2010 年, 文献[4]中提出了一种线性时不变系统的开闭环 PID 学习控制方法, 该控制方法是带有常量因子的连续迭代学习控制; 为了消除误差、减少超调, 文献[5]提出了一种连续可变增益的开闭环 PD 型迭代学习控制. 本文从改善算法收敛速度、提高跟踪精度的角度出发, 提出了一种新型的非线性离散时间的迭代学习控制策略. 该种迭代学习控制是通过模糊控制的方法优化增益矩阵的参数, 采用开闭环相结合, 从而达到提高跟踪精度和收敛速度的目的. 实验结果表明该种控制方法在移动机器人圆轨迹的跟踪控制中取得了较好的控制效果.

2 问题描述

2.1 研究对象

移动机器人的运动模型如图 1 所示,它是由前端的直流伺服电机驱动的两个同轴主动轮及后端的一个从动轮组成。

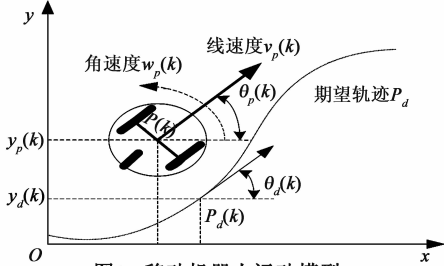


图1 移动机器人运动模型

移动机器人在二维平面运动,点 $\mathbf{P}(k)$ 代表机器人的当前位置, $\mathbf{P}(k)$ 点在全局坐标中定义为 $[x_p(k), y_p(k), \theta_p(k)]$, $x_p(k)$ 和 $y_p(k)$ 为直角坐标下 $\mathbf{P}(k)$ 的坐标, $\theta_p(k)$ 为移动机器人的方向角. 当移动机器人的前进方向为全局坐标系的横轴正半轴时, $\theta_p(k)$ 定义为 0. 设移动机器人的线速度和角速度分别为 $v_p(k)$ 和 $w_p(k)$. 根据图 1, 针对点 $\mathbf{P}(k)$, 则移动机器人的离散运动学方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x_p(k+1) \\ y_p(k+1) \\ \theta_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p(k) \\ y_p(k) \\ \theta_p(k) \end{bmatrix} + \Delta T \begin{bmatrix} \cos\theta_p(k) & 0 \\ \sin\theta_p(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p(k) \\ w_p(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 ΔT 为采样时间, 移动机器人状态向量为 $\mathbf{q}(k) = [x_p(k), y_p(k), \theta_p(k)]^T$, 速度向量为 $\mathbf{u}_p(k) = [v_p(k), w_p(k)]^T$.

由式(1), 可以将移动机器人的离散运动学方程描述如下:

$$\mathbf{q}(k+1) = \mathbf{q}(k) + \mathbf{B}(\mathbf{q}(k), k) \mathbf{u}_p(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{q}(k) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{B}(\mathbf{q}(k), k) = \Delta T \begin{bmatrix} \cos\theta(k) & 0 \\ \sin\theta(k) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{y}(k) = [x$

$(k), y(k), \theta(k)]^T$ 为系统输出, $\mathbf{u}(k) = [v(k), w(k)]^T$ 为系统控制输入量.

假设每次学习的初值 $\mathbf{q}(0)$ 相同, 移动机器人系统第 i 次迭代的状态、输入、输出分别为 $\mathbf{q}_i(k)$ 、 $\mathbf{u}_i(k)$ 、 $\mathbf{y}_i(k)$, 则根据式(2)和式(3)可得

$$\mathbf{q}_i(k+1) = \mathbf{q}_i(k) + \mathbf{B}(\mathbf{q}_i(k), k) \mathbf{u}_i(k) + \boldsymbol{\beta}_i(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_i(k) = \mathbf{q}_i(k) + \boldsymbol{\gamma}_i(k) \quad (5)$$

其中 $\boldsymbol{\beta}_i(k)$ 、 $\boldsymbol{\gamma}_i(k)$ 分别代表 i 次迭代状态干扰和输出噪声, 第 k 为离散时间, $k = 1, \dots, n$.

2.2 轨迹跟踪问题描述

假设移动机器人的当前位姿状态为 $\mathbf{P}(k) = [x_p(k), y_p(k), \theta_p(k)]^T$, 且 $1 \leq k \leq n$; 期望轨迹为 $\mathbf{P}_d(k) = [x_d(k), y_d(k), \theta_d(k)]^T$, 且 $1 \leq k \leq n$; 移动机器人的运行轨迹跟踪控制问题就是为了确定 $\mathbf{u}(k) = [v(k), w(k)]^T$, 使得 $x_p(k) \rightarrow x_d(k)$, $y_p(k) \rightarrow y_d(k)$, $\theta_p(k) \rightarrow \theta_d(k)$.

3 迭代学习控制律的设计及收敛性分析

移动机器人方程式(4)和式(5)满足下列性质和假设:

性质 1 考虑理想情况, 取 $\boldsymbol{\beta}_i(k)$ 、 $\boldsymbol{\gamma}_i(k)$ 均为零, $k \in N$, 则期望轨迹的方程可以描述为

$$\mathbf{q}_d(k+1) = \mathbf{q}_d(k) + \mathbf{B}(\mathbf{q}_d(k), k) \mathbf{u}_d(k) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_d(k) = \mathbf{q}_d(k) \quad (7)$$

性质 2 矩阵函数 $\mathbf{B}(\mathbf{q}_i(k), k)$ 满足 Lipschitz 条件: $\|\mathbf{B}(\mathbf{q}_1, k) - \mathbf{B}(\mathbf{q}_2, k)\| \leq L_B \|\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2\|$ 其中 $k \in N$, L_B 为正常数

性质 3 矩阵 $\mathbf{B}(\mathbf{q}_i(k), k)$ 是有界的, $\|\mathbf{B}(\mathbf{q}_i(k), k)\| \leq b_B$, b_B 为正常数, 矩阵 $\mathbf{B}(\mathbf{q}_i(k), k)$ 为 $(\mathbf{q}_i(k), k)$ 的满秩矩阵.

假设 1 $\max_{1 \leq k \leq n} \|\mathbf{u}_d(k)\| \leq b_{u_d}$; 其中 b_{u_d} 为正常数.

假设 2 干扰和噪声有界:

$\max_{1 \leq i \leq \infty} \max_{1 \leq k \leq n} \|\boldsymbol{\beta}_i(k)\| \leq b_\beta$, $\max_{1 \leq i \leq \infty} \max_{1 \leq k \leq n} \|\boldsymbol{\gamma}_i(k)\| \leq b_\gamma$; 其中 b_β 、 b_γ 为正常数.

假设 3 在每一次迭代中, 轨迹都是从 $\mathbf{q}_d(0)$ 的邻域开始, 即 $\|\mathbf{q}_d(0) - \mathbf{q}_i(0)\| \leq b_{q_0}$, $b_{q_0} > 0$, $i \geq 1$.

3.1 离散时间开闭环 PID-P 型迭代学习控制律设计及收敛性分析

为保证控制系统的稳定性和快速收敛性, 根据移动机器人离散运动学方程式(2)和式(3), 本文设计的移动机器人开闭环 PID-P 型迭代学习控制律为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{i+1}(k) = & \mathbf{u}_i(k) + \mathbf{G}_p(k) \mathbf{e}_i(k+1) + \mathbf{G}_d(k) [\mathbf{e}_i(k+1) \\ & - \mathbf{e}_i(k)] + \mathbf{G}_I(k) \sum_{l=0}^k \mathbf{e}_i(l+1) + \mathbf{L}_p(k) \mathbf{e}_{i+1}(k) \end{aligned} \quad (8)$$

对于第 i 次迭代, 跟踪误差信号为 $\mathbf{e}_i(k) = \mathbf{y}_d(k) - \mathbf{y}_i(k)$, $\mathbf{G}_p(k)$ 、 $\mathbf{G}_d(k)$ 、 $\mathbf{G}_I(k)$ 和 $\mathbf{L}_p(k)$ 是学习的增益矩阵, 满足 $\mathbf{G}_p(k) \leq b_{G_p}$, $\mathbf{G}_d(k) \leq b_{G_d}$, $\mathbf{G}_I(k) \leq b_{G_I}$, $\mathbf{L}_p(k) \leq b_{L_p}$, 且 b_{G_p} 、 b_{G_d} 、 b_{G_I} 、 b_{L_p} 均为正常数.

定义 1 α 范数

实函数 $f: N \rightarrow R$, 则有

$$\|f(\cdot)\|_{\alpha} = \sup_{k \in N} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha} \right)^k \|f(k)\| \right\}, \text{且 } \alpha \geq 1 \quad (9)$$

定理 1 考虑离散系统式(4)和式(5), 满足假设 1 ~ 假设 3, 采用控制律式(8), 则

$$\|I - [G_p(k) + G_d(k) + G_I(k)]B(q_i(k), k)\| \leq \rho_1 < 1, I \text{ 为单位矩阵} \quad (10)$$

对于所有 $(q_i(k), k) \in R^n \times N$ 成立. 如果忽略状态干扰、输出噪声和初始状态误差 ($b_{\beta} = b_{\gamma} = b_{q_0} = 0$), 则 $u_i(k), q_i(k), y_i(k)$ 分别收敛于 $u_d(k), q_d(k), y_d(k), k \in N, i \rightarrow \infty$. 如果考虑干扰、噪声和误差的存在, 则 $\|u_i(k) - u_d(k)\|, \|q_i(k) - q_d(k)\|, \|y_i(k) - y_d(k)\|$ 有界, 且收敛于 $b_{\beta}, b_{\gamma}, b_{q_0}$ 的函数.

证明: 将式(6)和式(4)相减, 令 $\tilde{q}_i(k+1) = q_d(k+1) - q_i(k+1)$, 由性质 2 和性质 3 以及假设 1 和假设 2, 可得 $\|\tilde{q}_i(k+1)\| \leq \|\tilde{q}_i(k)\| + L_B b_{u_d} \|\tilde{q}_i(k)\| + b_B \|\tilde{u}_i(k)\| + b_{\beta}$

令 $h_2 = 1 + L_B b_{u_d}$, 经过递推并由假设 3, 可得

$$\|\tilde{q}_i(k)\| \leq \sum_{j=0}^{k-1} h_2^{k-1-j} [b_B \|\tilde{u}_i(j)\| + b_{\beta}] + h_2^k b_{q_0} \quad (11)$$

由式(8), 取 $\tilde{u}_{i+1}(k) = u_d(k) - u_{i+1}(k)$, 利用假设 1 和假设 2, 令 $h_1 = (b_{C_p} + b_{C_d} + b_{C_I})[1 + c_B b_{u_d}]$, 即 $h_1 = (b_{C_p} + b_{C_d} + b_{C_I})h_2, b_1 = (b_{C_p} + b_{C_d} + b_{C_I})(b_{\beta} + b_{\gamma}) + b_{L_p} b_{\gamma} + b_{C_I} \sum_{l=0}^{k-1} b_{\gamma} + b_{C_d} b_{\gamma}$, 设 $h_3 = h_1 + b_{C_d} + b_{C_I}$, 由式(10)和式(11), 可得

$$\begin{aligned} & \|\tilde{u}_{i+1}(k)\| \\ & \leq \rho_1 \|\tilde{u}_i(k)\| + h_3 \sum_{j=0}^{k-1} h_2^{k-1-j} [b_B \|\tilde{u}_i(j)\| + b_{\beta}] \\ & + (h_3 + b_{L_p}) h_2 b_{q_0} + b_{L_p} \sum_{j=0}^{k-1} h_2^{k-1-j} [b_B \|\tilde{u}_{i+1}(j)\| + b_{\beta}] \\ & + b_{C_I} \sum_{l=0}^{k-2} \sum_{j=0}^l h_2^{l-j} [b_B \|\tilde{u}_i(j)\| + b_{\beta}] + b_{C_I} \sum_{l=0}^{k-2} h_2^{l+1} b_{q_0} + b_1 \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)两端同乘 $(\frac{1}{\alpha})^k$, 取 α 范数, 令 $m_1 = \sum_{l=0}^{k-2}$

$[1 - (h_2/\alpha)^{l+1}], m_2 = \sum_{l=0}^{k-2} (\frac{h_2}{\alpha})^{l+1}$, 取 $\alpha > \max\{1, h_2, h_2 + b_B b_{L_p}\}$, 则上式可以变成

$$\|\tilde{u}_{i+1}\|_{\alpha} \leq \bar{\rho}_1 \|\tilde{u}_i\|_{\alpha} + \epsilon \quad (13)$$

由于

$$T = \frac{b_{\beta}}{\alpha - h_2} \{ (h_3 + b_{L_p}) [1 - (h_2/\alpha)^n] + b_{C_I} m_1 \} + b_{C_I} b_{q_0} m_2 + b_1$$

则有

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\rho_1 + b_B h_3 \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2} + \frac{b_B b_{C_I} m_1}{\alpha - h_2}}{1 - b_B b_{L_p} \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2}}$$

$$\epsilon = \frac{T}{1 - b_B b_{L_p} \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2}}$$

对式(13)进行递推, 取 α 足够大, 使 $\bar{\rho}_1 \approx \rho_1 < 1$, 可得

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|\tilde{u}_i\|_{\alpha} \leq \frac{\epsilon}{1 - \rho_1} \quad (14)$$

对式(11)两端同时乘以 $(\frac{1}{\alpha})^k$, 并取 α 范数可得

$$\|\tilde{q}_i\|_{\alpha} \leq (b_B \|\tilde{u}_i\|_{\alpha} + b_{\beta}) \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2} + b_{q_0}$$

将式(14)代入上式, 可得

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|\tilde{q}_i\|_{\alpha} \leq b_B \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2} \frac{\epsilon}{1 - \rho_1} + b_{\beta} \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2} + b_{q_0} \quad (15)$$

将式(7)和式(5)相减, 令 $\tilde{y}_i(k) = y_d(k) - y_i(k)$,

两端同时乘以 $(\frac{1}{\alpha})^k$, 并取 α 范数可得

$$\|\tilde{y}_i\|_{\alpha} \leq \|\tilde{q}_i\|_{\alpha} + b_{\gamma} \quad (16)$$

将式(15)代入(16), 可得

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|\tilde{y}_i\|_{\alpha} \leq b_B \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2} \frac{\epsilon}{1 - \rho_1} + b_{\beta} \frac{1 - (h_2/\alpha)^n}{\alpha - h_2} + b_{q_0} + b_{\gamma} \quad (17)$$

综合式(14)、式(15)和式(17)可知定理 1 成立. 证毕

3.2 模糊开闭环 PID-P 型迭代学习控制律设计

由于 PID 的三个参数在以往的文献中一般凭经验给出, 为了使移动机器人控制系统具有更好的动态性能和静态性能, 本文采用模糊控制原理对开环 PID 的三个参数进行在线修改, 再与闭环比例项 P 相结合, 以达到优化的目的. 移动机器人的开环 PID 迭代学习控制律可以表示为:

$$u_{i+1}(k) = u_i(k) + G_p(k) e_i(k+1) + G_d(k) [e_i(k+1) - e_i(k)] + G_I(k) \sum_{l=0}^k e_i(l+1) \quad (18)$$

满足定理 1, 类似上述证明.

设矩阵 $C(k)$ 满足式(10), 则可以把 $G_p(k), G_d(k)$ 和 $G_I(k)$ 三个迭代学习增益矩阵表示为 $G_p(k) = [k_{p0} + k_p]C(k), G_d(k) = [k_{d0} + k_d]C(k), G_I(k) = [k_{I0} + k_I]C(k)$. 而 k_{p0}, k_{d0}, k_{I0} 为初始给定值, 模糊控制器是用来调节 k_p, k_d, k_I 三个参数, 通过比例系数 k_p 加快系统的响应速度, 通过微分系数 k_d 改善系统的动态特性, 通过积分系数 k_I 消除稳态误差.

本文中的模糊控制器是由误差 e 和误差变化 ec 作为输入, 由 PID 的三个参数 k_p, k_d, k_I 作为输出. 设向量 $e(k) = [e_x(k), e_y(k), e_{\theta}(k)]$, 而 $e_x(k) = x_d(k) - x_i(k), e_y(k) = y_d(k) - y_i(k), e_{\theta}(k) = \theta_d(k) - \theta_i(k)$. 这里的 $x_d(k), y_d(k)$ 和 $x_i(k), y_i(k)$ 分别表示第 i 次迭代

移动机器人的期望位置坐标和实际位置坐标、 $\theta_d(k)$ 和 $\theta_i(k)$ 分别表示第 i 次迭代移动机器人的期望方向角和实际方向角。

本文取输入误差和输入误差变化率分别为 $e = \| e(k) \|_\infty, ec = \| e(k) \|_\infty - \| e(k-1) \|_\infty$. $e, ec = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 子集中的元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 一种针对 k_p, k_d, k_i 三个参数分别整定的模糊控制表如表 1~表 3.

表 1 k_p 的模糊控制规则表

$ec \backslash k_p$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 k_d 的模糊控制规则表

$ec \backslash k_d$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

表 3 k_i 的模糊控制规则表

$ec \backslash k_i$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

为了提高抗干扰能力,可以在式(18)的基础上添加 $L_p(k) e_{i+1}(k)$ 这一项,就形成了模糊开闭环 PID-P 型迭代学习控制律,其表现形式为

$$u_{i+1}(k) = u_i(k) + C(k) \{ (k_{p0} + k_p) e_i(k+1) + (k_{d0} + k_d) [e_i(k+1) - e_i(k)] + (k_{i0} + k_i) \sum_{l=0}^k e_i(l+1) \} + L_p(k) e_{i+1}(k) \quad (19)$$

定理 2 考虑离散系统式(4)和式(5),满足假设 1~假设 3,采用控制律式(19),则

$$\| I - (k_{p0} + k_p + k_{d0} + k_d + k_{i0} + k_i) C(k) B(q_i(k), k) \| \leq \rho_2 < 1, I \text{ 为单位矩阵} \quad (20)$$

对于所有 $(q_i(k), k) \in R^n \times N$ 成立. 如果忽略状态干扰、输出噪声和初始状态误差 ($b_\beta = b_\gamma = b_{q_0} = 0$), 则 $u_i(k), q_i(k), y_i(k)$ 分别收敛于 $u_d(k), q_d(k), y_d(k), k \in N, i \rightarrow \infty$. 如果考虑干扰、噪声和误差的存在, 则 $\| u_i(k) - u_d(k) \|, \| q_i(k) - q_d(k) \|, \| y_i(k) - y_d(k) \|$ 有界, 且收敛于 $b_\beta, b_\gamma, b_{q_0}$ 的函数. 定理 2 的证明类似定理 1 的证明.

4 仿真研究

针对轮式移动机器人离散系统式(4)和式(5),且满足每一次迭代被控制对象初始值与理想信号的初始值相同,即取 $x_{p,i}(0) = x_d(0), y_{p,i}(0) = y_d(0), \theta_{p,i}(0) = \theta_d(0)$, 其中 $x_{p,i}(0), y_{p,i}(0), \theta_{p,i}(0)$ 为第 i 次迭代时的初始状态. 采用迭代学习控制律式(19), 位置指令为 $x_d(t) = \cos(\pi t) m, y_d(t) = \sin(\pi t) m, \theta_d(t) = \pi t + \frac{\pi}{2}$ rad. 按收敛条件(20), 可以取控制器的增益矩阵为, $k_{p0} = 0.2, L_p(k) = 0.01 [B^T(x_d(k), k) B(x_d(k), k)]^{-1} B^T(x_d(k), k), k_{i0} = 0.0, k_{d0} = -0.2, C(k) = \begin{bmatrix} \cos\theta(k) & \sin\theta(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$. 采样时间为 $\Delta T = 0.001s$, 迭代次数为 40, 每次迭代时间为 2000 个采样时间, 仿真结果如图 2~4 所示.

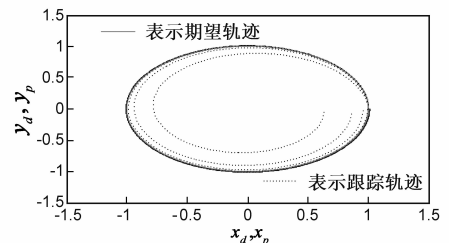


图2 随迭代次数运动轨迹的跟踪过程

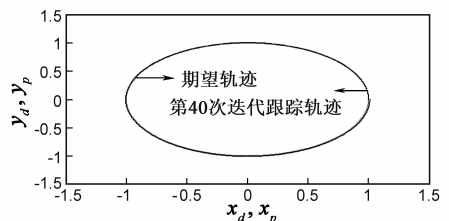


图3 第40次的位置跟踪

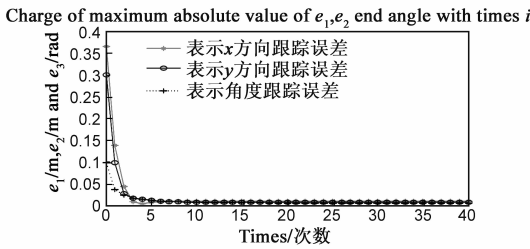


图4 位置和角度跟踪误差迭代收敛过程

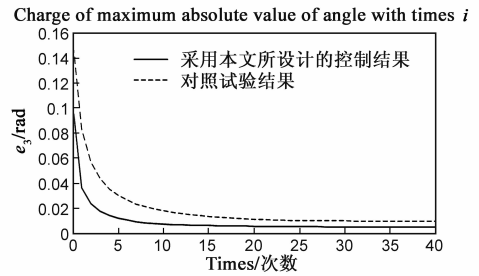


图9 角度跟踪误差迭代收敛过程

为了便于对比,采用文献[5]中提出的迭代学习控制律离散表达式 $u_{i+1}(k) = u_i(k) + K_{p1}(k) \cdot e_i(k+1) + K_{d1}(k)[e_i(k+1) - e_i(k)] + K_{p2}(k)e_{i+1}(k) + K_{d2}(k)[e_{i+1}(k) - e_{i+1}(k-1)]$, 仿真结果如图5~9所示。

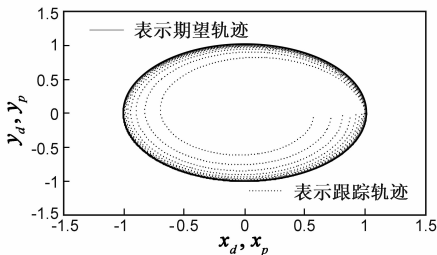


图5 随迭代次数运动轨迹的跟踪过程

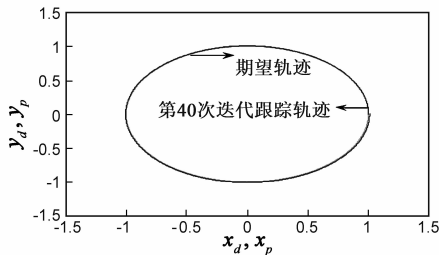


图6 第40次的位置跟踪

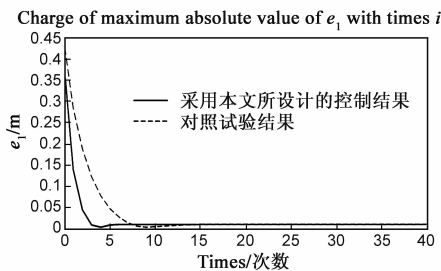


图7 X方向跟踪误差迭代收敛过程

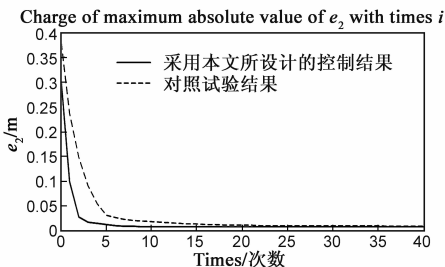


图8 Y方向跟踪误差迭代收敛过程

从图4中可以看出,在迭代次数不到15次就已经收敛,而且跟踪误差趋近于零.在实际应用中,由于控制算法在无限时间内收敛是没有意义的.为了体现本文中提出的控制律所具有的优势,通过采用模糊开闭环PID-P型迭代学习控制方法与采用开闭环PD型迭代学习控制方法相比,其仿真如图7、图8和图9所示,收敛速度和跟踪精度都得到了一定程度的改善.模糊开闭环PID-P型迭代学习控制不但提高了收敛速度,而且减少了误差,这对移动机器人快速、高精度跟踪控制是十分有效的。

5 结论

本文采用迭代学习控制方法对轮式移动机器人的轨迹跟踪问题进行了研究,提出了一种新型的迭代学习控制方法,给出了模糊开闭环PID-P型迭代学习控制律的收敛条件,并进行了详细的证明.通过把这种模糊开闭环PID-P型迭代学习控制应用于轨迹跟踪问题,充分发挥模糊控制和迭代学习控制的优势,极大地改善了移动机器人轨迹跟踪控制的性能,具有工程实践意义。

参考文献

- [1] 田慧慧,苏玉鑫.机器人系统非线性分散重复学习轨迹跟踪控制[J].自动化学报,2011,37(10):1264-1271.
Tian Huihui, Su Yuxin. Nonlinear decentralized repetitive control for global asymptotic tracking of robot manipulators[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1264-1271. (in Chinese)
- [2] S Arimoto, S Kawamura, et al. Bettering operation of robotics by learning[J]. Journal of Robotic System, 1984, 1(2): 123-140.
- [3] 孙明轩,黄宝健,等.非线性系统的PD型迭代学习控制[J].自动化学报,1998,24(5):711-714.
Sun Mingxuan, Huang Baojian, et al. PD-type iterative learning control for a class of nonlinear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(5): 711-714. (in Chinese)
- [4] Fali Ma, Chuandong Li. Open-closed-loop PID-type iterative learning control for linear systems with initial state error[J].

- Journal of Vibration and Control, 2010, 17(12): 1791 – 1797.
- [5] JianMing Wei, YunAn Hu. Open-closed-loop PD-type iterative learning control with variable gains[J]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 592 – 597.
- [6] 史忠科. 非线性离散系统的迭代学习控制方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(3): 327 – 332.
Shi Zhongke. Iterative learning control method for nonlinear discrete-time systems[J]. Control Theory and Applications, 1998, 15(3): 327 – 332. (in Chinese)
- [7] 皮道映, 孙优贤. 非线性系统开闭环 PI 型迭代学习控制律及其收敛性[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(3): 400 – 403.
Pi Daoying, Sun Youxian. An Open-closed-loop PI-type iterative learning control scheme for nonlinear systems and its convergence[J]. Control Theory and Applications, 1998, 15(3): 400 – 403. (in Chinese)
- [8] C T Freeman, P L Lewin, E Rogers, et al. Iterative learning control applied to a gantry robot and conveyor system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2010, 32(3): 251 – 264.
- [9] Xu-Hui Bu, Zhong-Sheng Hou. Stability of iterative learning control with data dropouts via asynchronous dynamical system[J]. International Journal of Automation and Computing, 2011, 8(1): 29 – 36.
- [10] Chiang-Ju Chien. A Combined Adaptive Law for Fuzzy iterative learning control of nonlinear systems with varying control tasks[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2008, 16(1): 40 – 51.
- [11] 晏静文, 侯忠生. 学习增强型 PID 控制系统的收敛性分析[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(6): 761 – 768.
Yan Jingwen, Hou Zhongsheng. Convergence analysis of learning-enhanced PID control system[J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(6): 761 – 768. (in Chinese)
- [12] M K Kang, J S Lee, et al. Kinematic path-tracking of mobile robot using iterative learning control[J]. Journal of Robotic Systems, 2005, 22(2): 111 – 121.
- [13] 孙明轩, 黄宝健. 迭代学习控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 17 – 56.
- [14] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 61 – 71.
- [15] 曹政才, 赵应涛, 等. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2012, 40(4): 632 – 635.
Cao Zhengcai, Zhao Yingtao, et al. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 632 – 635. (in Chinese)
- [16] Chris T. Freeman. Constrained point-to-point iterative learning control with experimental verification[J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(5): 489 – 498.
- [17] Dong Shen, Han-Fu Chen. Iterative learning control for large scale nonlinear systems with observation noise[J]. Automatica, 2012, 48(3): 577 – 582.
- [18] 陈卫东, 朱奇光. 基于模糊算法的移动机器人路径规划[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 971 – 974.
Chen Weidong, Zhu Qiguang. Mobile robot path planning based on fuzzy algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 971 – 974. (in Chinese)

作者简介



刘国荣 男, 1957 年生, 湖南华容人. 教授, 博士生导师, 湖南工程学院校长. 研究方向为智能机器人的控制, 交流电机控制等.



张扬名(通信作者) 男, 1987 年生, 湖南安仁人. 硕士研究生, 研究方向为移动机器人运动控制.

E-mail: ymz716@126.com