文章编号：1674-8085(2019)06-0071-05

采用模糊免疫 PID 控制的移动机器人避障误差仿真研究

*吕　雪，牛海侠

（安徽三联学院，安徽，合肥 230601）

摘　要：当前，移动机器人运动规划路径较长，实际运动轨迹与理论运动轨迹误差较大。对此，设计了移动机器人模糊免疫 PID 控制系统，并对控制系统输出误差进行仿真验证。建立移动机器人平面简图，给出机器人运动方程式，采用平面栅格来描述机器人运动规划路径。引用传统 PID 控制器并进行改进，设计了模糊免疫 PID 控制系统，给出了移动机器人 PID 控制输出系统在线调节流程。采用 MATLAB 软件对机器人输出误差进行仿真，比较 PID 控制和模糊免疫 PID 控制输出误差大小。结果显示：移动机器人采用传统 PID 控制系统，稳定调节时间为 1.0 s，产生的最大误差为 0.83 mm，系统输出误差较大；移动机器人采用模糊免疫 PID 控制系统，稳定调节时间为 0.5 s，产生的最大误差为 0.59 mm，系统输出误差较小。移动机器人采用模糊免疫 PID 控制系统，响应速度快，追踪误差较小，从而提高系统的稳定性。

关键词：移动机器人；模糊免疫 PID 控制；运动路径；误差；仿真

中图分类号：TP242　　**文献标识码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2019.06.013

SIMULATION STUDY ON OBSTACLE AVOIDANCE ERROR OF MOBILE ROBOT CONTROLLED BY FUZZY IMMUNE PID

*LV Xue，NIU Hai-xia

(Anhui Sanlian University, Hefei,Anhui 230601,China)

Abstract: At present, the path of mobile robot motion planning is long, and the error between actual and theoretical trajectories is large. In this regard, a fuzzy immune PID control system for mobile robot is designed, and the output error of the control system is verified by simulation. The planar sketch of the mobile robot is established, the motion equation of the robot is given, and the planar grid is used to describe the path of the robot motion planning. The traditional PID controller is introduced and improved. The fuzzy immune PID control system is designed, and the on-line adjustment flow of the mobile robot's PID control output system is given. The output error of the robot is simulated by using MATLAB software, and the output error of the PID control and the fuzzy immune PID control is compared. The results show that the mobile robot adopts the traditional PID control system, the stable adjustment time is 1.0s, the maximum error is 0.83mm, and the system output error is large; the mobile robot adopts the fuzzy immune PID control system, the stable adjustment time is 0.5s, the maximum error is 0.59mm, and the system output error is small. The mobile robot adopts the fuzzy immune PID control system, which has fast response speed and small tracking error, thus can improve the stability of the system.

Key words: mobile robot; fuzzy immune pid control; motion path; error; simulation

收稿日期：2019-03-13；修改日期：2019-04-19

基金项目：安徽三联学院校级项目(yjqr17006)

作者简介：*吕　雪(1986-)，女，安徽舒城人，讲师，硕士，主要从事机器人技术、先进材料制造、软件模拟加工技术等方面的研究(E-mail:xuelv1986@126.com);

牛海侠(1979-)，女，山东单县人，讲师，硕士，主要从事自动控制技术、材料加工等方面的研究(E-mail: haixia79@163.com).

0 引言

伴随机器人智能化的发展，从而带动工业迅速发展。机器人可以替代人类手工劳动，不仅提高生产效率，而且可以降低危险事故的发生，广泛应用于工业、农业、交通、航天及海洋等许多领域。移动机器人在工作过程中，其路径规划和避障能力至关重要，路径规划和避障就是要从起始点到目标点搜索到一条最优路径并成功避开障碍物[1-2]。移动机器人在复杂环境中工作，会受到多种不确定综合因素的影响。为了抑制外界干扰，寻找最优路径，更精确地完成任务，必须设计出更好的控制系统。因此，研究移动机器人控制系统，对于提高机器人运动轨迹精度具有重要的意义。

机器人路径规划和避障问题受到许多学者的关注，为了更好地规划机器人运动路径，许多学者对其进行了研究。例如：文献[3-4]研究移动机器人路径跟踪 PID 控制方法，建立了移动机器人运动学模型，设计了 PID 控制系统，采用遗传算法对 PID 控制参数进行在线优化和调节，通过 MATLAB 软件对移动机器人路径跟踪进行仿真，实现了移动机器人路径实时跟踪；文献[5-6]研究了移动机器人路径规划模糊控制方法，对模糊规则进行推导，设计了模糊控制系统，给出移动机器人运动平台，通过仿真和实验对机器人运动路径进行验证，结果显示，移动机器人在障碍物较少的情况下，能够到达指定的目标位置，避障效果较好；文献[7-8]研究了仿人机器人反馈控制方法，建立机器人三连杆简图模型，根据拉格朗日定律推导机器人动力学模型，采用离线规划法对机器人运动进行规划，设计了反馈控制器，通过 MATLAB 软件对仿人机器人运动输出误差进行仿真，证明了反馈控制器的有效性。

机器人在有障碍物环境中追踪目标时，不仅运动路径较长，而且运动轨迹输出误差较大，导致控制系统运动不稳定。对此，本文建立了移动机器人平面模型简图，阐述了机器人平面路径规划；对传统 PID 控制系统进行改进，设计模糊免疫 PID 控制系统；在有障碍物环境中对机器人运动输出误差进行仿真，比较了不同控制系统的稳定性，为深入研究移动机器人路径规划和追踪精度提供参考依据。

1 机器人运动规划

1.1 机器人模型

本文以移动机器人为研究对象，研究其运动路径避障问题，其平面运动模型如图 1 所示。

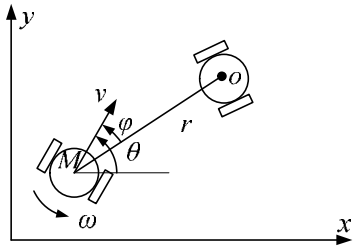


图 1 机器人平面运动模型

Fig.1 Planar motion model of robot

在图 1 中，M 点为机器人起始位置，O 点为机器人运动终点位置，v 为机器人移动速度，ω 为机器人自转角速度，r 为机器人运动路径，φ 为移动角度偏差。

移动机器人运动速度和角速度方程式[9]为：

$$\begin{cases} x' = v\cos\theta \\ y' = v\sin\theta \\ \theta' = \omega \end{cases} \tag{1}$$

式中：x、y 为机器人在坐标系中位置。

机器人运动路径误差方程式为：

$$e = r - r_d \tag{2}$$

式中：r 为理论运动路径；r_d 为实际运动路径。

1.2 路径规划

采用平面栅格来描述机器人运动规划路径，如图 2 所示。

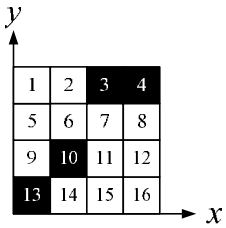


图 2 栅格与序号关系图

Fig.2 Raster and ordinal graph

在图 2 中，序号 3、4、10、13 为障碍物，用黑色栅格表示，在矩阵中为 1，其它用白色栅格表示，在矩阵中为 0。因此，状态矩阵表示为：

$$P=\begin{bmatrix}0&0&1&1\\0&0&0&0\\0&1&0&0\\1&0&0&0\end{bmatrix} \tag{3}$$

在栅格中，序号在坐标系中构成的映射关系[10]为：

$$\begin{cases}x_i=\left[\mathrm{mod}\left(n,N_x\right)-\dfrac{1}{2}\right]\\ y_i=\left[N_y+\dfrac{1}{2}-ceil\left(n/N_y\right)\right]\end{cases} \tag{4}$$

式中：n 为栅格序号；N_x 为每行格数；N_y 为每列格数；$\mathrm{mod}(n,N_x)$为 n/N_x 的余数；$ceil(n/N_y)$为 n/N_y 的整数。

移动机器人运动最短路径方程式为：

$$f=\sqrt{\left(x_i-x_j\right)^2+\left(y_i-y_j\right)^2} \tag{5}$$

式中：(x_i,y_i)为起始坐标点；(x_j,y_j)为目标坐标点。

2 模糊免疫 PID 控制

2.1 分数阶 PID 控制

由于 PID 控制器操作简单、适应能力强，在日常控制系统中，大多采用 PID 控制器。PID 控制器主要由比例、积分和微分三个部分组成，控制过程如图 3 所示。

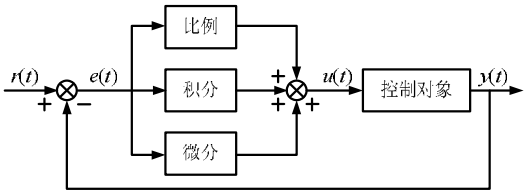


图 3 PID 控制流程

Fig.3 PID control flow

PID 控制产生的误差方程式为：

$$e(t)=r(t)-y(t) \tag{6}$$

式中：$r(t)$为输入信号；$y(t)$为输出信号。

PID 控制方程式[11]为：

$$u(t)=k_pe(t)+k_i\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+k_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

式中：k_p 为比例系数；k_i 为积分系数；k_d 为微分系数。

采用分数阶微积分定义方程式为：

$$C(s)=k_p+\frac{k_i}{s^\lambda}+k_ds^u \tag{8}$$

式中：λ、μ 为控制器可调参数。

由于分数阶 PID 控制器增加了两个调节参数 λ 和 μ，使控制器更加地灵活和自由，进一步增加 PID 控制器的综合性能。

2.2 模糊免疫 PID 控制

在控制系统快速反应方面，免疫调节起到至关重要的作用。本文采用免疫调节机理对分数阶 PID 控制器进行改进，增加免疫调节环节，根据控制系统的输出量和变化量在线调整 PID 控制参数，使控制系统更加的稳定输出。

假设免疫系统在 t 时刻，其抗原数量为 $\varepsilon(t)$，通过抗原刺激辅助细胞 T_H 后输出为 $T_H(t)$，抑制细胞 T_S 对 B 细胞影响为 $T_S(t)$，B 细胞所受到的刺激为：

$$S(t)=T_H(t)-T_S(t) \tag{9}$$

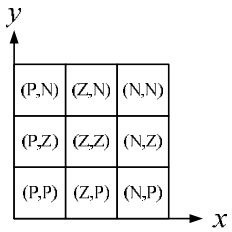
式中：$T_H(t)=k_1\varepsilon(t)$，$T_S(t)=k_2f[S(t),S'(t)]\varepsilon(t)$。

抗原数量 $\varepsilon(t)$采用误差 $e(t)$表示，受到的刺激 $S(t)$作为控制输入 $u(t)$。因此，反馈控制规律为：

$$u(s)=\left(K_p+\frac{K_i}{s^\lambda}+K_ds^\mu\right)e(s) \tag{10}$$

式中：$K_p=K_1\{1-\eta_1f_1[u(t),u'(t)]\}$；$K_i=K_2\{1-\eta_2f_2[u(t),u'(t)]\}$；$K_d=K_3\{1-\eta_3f_3[u(t),u'(t)]\}$；$K_1$、$K_2$、$K_3$ 为控制响应速度；η_1、η_2、η_3 为控制稳定效果；$f(\cdot)$为模糊函数。

本文采用 9 个模糊区域，如图 4 所示。



N-负，P-正，Z-0

图 4 模糊区域

Fig.4 Fuzzy region

将输出反馈误差分为{N,Z,P}，模糊输出转角分为{N,P}。为了能够使机器人避开路面障碍物，采用的模糊隶属度函数[12]如下：

$$u_N(e)=\begin{cases}1, & e\le -0.03\\ -\dfrac{e}{0.03}, & -0.03<e\le 0\\ 0, & e>0\end{cases} \tag{11}$$

$$u_P(e)=\begin{cases}0, & e\le 0\\ \dfrac{e}{0.03}, & 0<e\le 0.03\\ 1, & e>0.03\end{cases} \tag{12}$$

$$u_Z(e)=\begin{cases}\dfrac{e+0.03}{0.03}, & -0.03\le e<0\\ -\dfrac{e-0.03}{0.03}, & 0\le e\le 0.03\\ 0, & \text{其它}\end{cases} \tag{13}$$

$$u_S=\begin{cases}1, & 0.9\le S\le 1.1\\ 0, & \text{其它}\end{cases} \tag{14}$$

$$u_N(\theta)=\begin{cases}-\dfrac{\theta}{10}, & -10\le\theta\le 0\\ 0, & 0\le\theta\le 10\end{cases} \tag{15}$$

$$u_P(\theta)=\begin{cases}0, & -10\le\theta\le 0\\ \dfrac{\theta}{10}, & 0\le\theta\le 10\end{cases} \tag{16}$$

采用模糊免疫 PID 控制规律为：

$$C(s)=K_p+\frac{K_i}{s^{\lambda}}+K_d s^{u} \tag{17}$$

采用模糊免疫控制步骤如下：

1）初始化参数，赋予 $u(t)$和 $u'(t)$的初始值，根据要求对参数 K_1、K_2 和 K_3 进行赋值；

2）根据模糊推理，可以求解 $f_1[\cdot]$，$f_2[\cdot]$和 $f_3[\cdot]$；

3）通过控制量和变化量反馈，在线免疫修正 KpKiKd 参数。

4）若满足要求，输出结果，否则返回步骤 2。

移动机器人采用模糊免疫 PID 控制系统在线调节流程如图 5 所示。

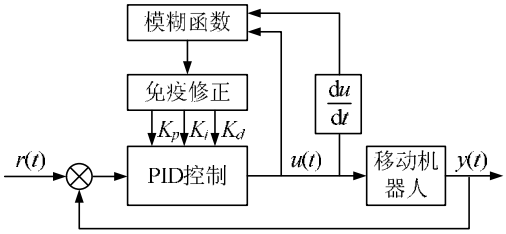


图 5 移动机器人模糊免疫 PID 控制系统

Fig.5 Fuzzy immune PID control system for mobile robot

3 仿真与分析

为了验证移动机器人采用模糊免疫 PID 控制效果，采用 MATLAB 软件对移动机器人运动误差进行仿真。假设起始点为（2,4），终止点（11,4），为障碍物坐标分别为（4,4）、（6,2）、（6,6）、（8,3.5）、（8,4.5）、（9,6），坐标单位为 m。路径跟踪输出误差仿真步骤如下：1）打开模糊推理系统编辑器，2）添加输入和输出对话框；3）使用隶属函数编辑器；4）使用规则编辑器；5）将免疫模糊逻辑添加到 Simulink 中；6）运行结果。

移动机器人采用 PID 控制运动路径如图 6 所示，而采用模糊免疫 PID 控制运动路径如图 7 所示。

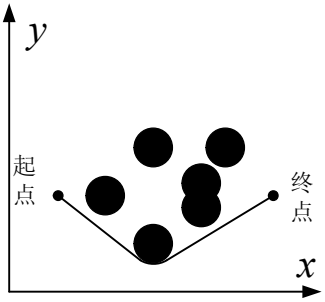


图 6 PID 控制运动路径

Fig.6 PID control motion path

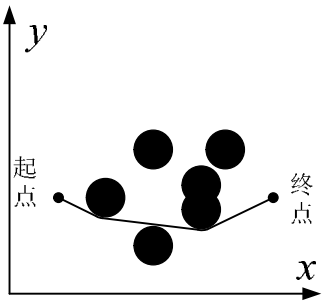


图 7 模糊免疫 PID 控制运动路径

Fig.7 Fuzzy immune PID control motion path

移动机器人采用 PID 控制产生的误差如图 8 所示，而采用模糊免疫 PID 控制产生的误差如图 9 所示。

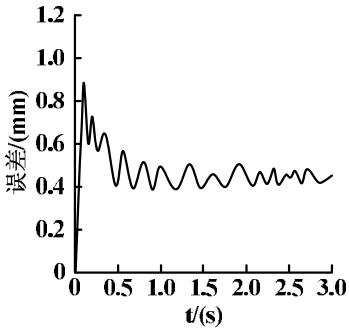


图 8 PID 控制输出误差

Fig.8 PID control output error

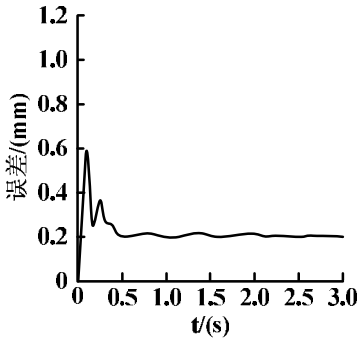


图 9 模糊免疫 PID 控制输出误差
Fig.9 Fuzzy immune PID control output error

由图 6、图 7 可知，移动机器人采用 PID 控制，运动规划路径较长，运动最短路径为 10.8 m；而采用模糊免疫 PID 控制，运动规划路径较短，最短路径为 9.6 m，从而搜索到最优路径。由图 8 可知，移动机器人采用 PID 控制，超调量较大，响应时间为 1.0 s，产生的最大误差为 0.83 mm，稳定时，实际运动路径与规划运动路径误差较大；由图 9 可知，移动机器人采用 PID 控制，超调量较小，响应时间为 0.5s，产生的最大误差为 0.59 mm，稳定时，实际运动路径与规划运动路径误差较小。由于机器人所处环境容易受到外界干扰，而传统 PID 控制响应速度慢，调节时间较长，很难搜索到最优控制参数。采用模糊免疫 PID 控制器，能够抑制外界环境的干扰，响应速度快，从而搜索到最优控制参数 K_p、K_i 和 K_d，从而降低控制系统输出误差。因此，采用模糊免疫 PID 控制方法，不仅可以成功的避开障碍物，而且可以提高移动机器人追踪精度。

4 结语

针对移动机器人运动规划路径较长、产生误差较大问题，设计了模糊免疫 PID 控制器，并对控制效果进行仿真验证，主要结论如下：

1）移动机器人采用传统 PID 控制，机器人运动路径规划距离较长，而采用模糊免疫 PID 控制，能够在线调节和搜索到最近控制参数，缩短了机器人运动路径。

2）移动机器人采用传统 PID 控制系统，输出误差较大，对外界适应力较差，而采用模糊免疫 PID 控制系统，输出误差较小，能够克服外界环境的影响，提高移动机器人运动轨迹精度。

3）移动机器人运动误差通过 MATLAB 软件进行仿真，可以比较传统 PID 控制和模糊免疫 PID 控制的稳定性，为设计和研发人员提供在线模拟数据，从而设计出更好的控制系统。

参考文献：

[1] 孙贝贝. 基于异质传感器信息融合的移动机器人避障研究[D].太原:中北大学,2018.

[2] 徐成宇,高洪. 基于关节空间与工作空间协同的 6R 点焊机器人路径规划方法[J].井冈山大学学报:自然科学版, 2017,38(5):59-62.

[3] 李林琛,蒋小平. 基于 PID 控制的移动机器人路径跟踪[J].激光杂志,2016,37(2):110-112.

[4] Hyunjin Chang, Taeseok Jin. Adaptive Tracking Controller Based on the PID for Mobile Robot Path Tracking[J]. Intelligent Robotics and Applications,2013, 8102(10): 540-549

[5] 沈飞. 未知环境下移动机器人路径规划模糊控制器的设计[J].自动化与仪表,2018,33(7):46-49.

[6] Bakdi Azzeddine, Hentout Abdelfetah, Boutami Hakim, et al. Optimal path planning and execution for mobile robots using genetic algorithm and adaptive fuzzy-logic control[J]. Robotics and autonomous systems,2017,89(6): 95-109.

[7] 李正文,张国良,张维平. 基于反馈控制的仿人机器人步态规划[J].机械与电子,2011(9):62-64.

[8] Sahu Chinmaya, Kumar Priyadarshi Biplab, Parhi Dayal R. An Intelligent Path Planning Approach for Humanoid Robots Using Adaptive Particle Swarm Optimization[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools,2018, 27(5):128-136.

[9] 李晶,李文斌. 基于模糊控制的移动机器人路径规划[J]. 中国农机化学报,2015,36(1):272-274.

[10] Yen C T, Cheng M F. A study of fuzzy control with ant colony algorithm used in mobile robot for shortest path planning and obstacle avoidance[J]. Microsystem Technologies,2018,24(1):125-135.

[11] 陈俊. 非完整轮式移动机器人的轨迹跟踪控制研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2017.

[12] Salmanpour Soheila, Motameni Homayun. Optimal path planning for mobile robot using Intelligent Water Drops algorithm[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2014,27(3):1519-1531.