

基于模糊遗传算法的移动机器人墙跟踪控制策略

段 萍, 张建畅, 丁承君, 张明路

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 针对传统模糊控制器在设计过程中存在的人为主观因素较多, 隶属函数参数不变引起的控制器适应能力差等缺点, 本文将遗传算法引入到移动机器人直墙跟踪的模糊控制器优化问题中, 阐述了遗传算法用于离线方式寻优模糊控制器隶属函数参数的具体操作过程, 如编码策略、适应度函数的确定、选择、交叉、变异等。最终经过仿真平台的验证, 确定一组最优解, 并在 HEBUT-I 型智能移动机器人上进行试验, 结果表明与传统模糊控制策略相比, 该方法不但提高了响应速度, 同时改善了跟踪精度。

关键词: 模糊控制; 遗传算法; 移动机器人; 墙跟踪

中图分类号: TP273

文献标识码: A

The fuzzy genetic algorithm for the mobile robot's wall tracking control

DUAN Ping, ZHANG Jian-chang, DING Cheng-jun, ZHANG Ming-lu

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Traditional fuzzy controller has some disadvantages, such as inferior adaptability due to the invariable membership function parameters and too many subjective factors and so on. Genetic Algorithm is applied to off-line optimize the membership function parameters of fuzzy controller, which is used in the tracking control of mobile robot's straight wall. Firstly, the whole optimizing operations including coding strategy, determination of the fitness function, selection, crossover and mutation are introduced. Then by the validation of simulation platform, it determines the group of the best solutions. Finally, this group of solutions is applied to off-line experiment on the HEBUT-I intelligent mobile robot. The result shows that the optimizing control strategy is more effective in the aspect of tracking precision and responding speed than traditional fuzzy controller.

Key words: fuzzy control; genetic algorithm; mobile robot; wall tracking

1 引言(Introduction)

遗传算法(genetic algorithms, GA)是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化全局搜索算法。它能够在复杂的空间内进行有效的搜索, 并且有计算简单, 收敛速度快等优点, 而被广泛应用于各种优化搜索技术中, 与各种控制规律相结合, 可以对控制器参数寻优进化, 迄今为止基于遗传算法优化的模糊控制器可以分为 3 类, 即优化隶属函数的参数、优化模糊控制规则、同时优化控制规则和隶属函数的参数^[1]。为了保持模糊控制的简便、灵活和快速性, 加强模糊控制的自适应性, 本文提出了采用遗传算法优化模糊控制器隶属函数参数的方法, 在仿

真平台上进行大量的试验后, 选出了一组最优的隶属函数参数, 在 HEBUT-I 型智能移动机器人上进行试验, 结果证实了该方法在移动机器人的直墙跟踪中具有很强的鲁棒性、实时性和可行性。

2 HEBUT-I 型智能移动机器人模糊控制系统设计(Fuzzy control system design for HEBUT-I intelligent mobile robot)

移动机器人为了能在未知环境下自主的工作, 必须具有对作业环境的感知能力, HEBUT-I 型智能移动机器人除由 CCD 视觉导航系统采集外部信息外, 在车体上还安装了 2 组超声传感器, 用于对距离的信息进行采集, 图 1 为超声传感器的布置情况。

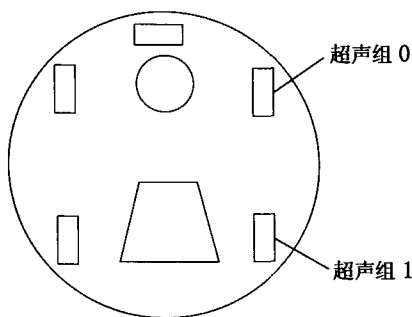


图1 超声传感器的布置情况

Fig. 1 Layout of two groups of ultrasonic sensors

在墙跟踪中,移动机器人首先利用BP神经网络分类器对所跟踪的墙的类型进行识别和分类,在识别出直墙后采用二维模糊控制器进行跟踪控制.该模糊控制器的输入量分别为移动机器人距右侧墙实际距离(由超声组0所测的距离)与期望距离之间的偏差 Δd 和移动机器人车体与直墙的夹角 θ (由超声组0,1所测距离换算得到),控制量为左右轮驱动电机的电压差 ΔU .

兼顾稳定性和响应速度,归纳出49条If-Then控制规则,即:

If($F\theta$ is $F\theta_i$ and $F\Delta d$ is $F\Delta d_j$)

Then ($\Delta U = \Delta U_{ij}$). (1)

式中 $i = 1, 2, \dots, 7, j = 1, 2, \dots, 7$.

如表1所示,其中 Δd 的模糊论域为 $[-6, +6]$;夹角 θ 的模糊论域为 $[-6, +6]$;控制量 ΔU 的模糊论域为 $[-8, +8]$.

表1 模糊控制规则表

Table 1 Table of fuzzy control rules

ΔU_{ij}	θ_i						
	TVF	TMF	TF	PR	TN	TMN	TVN
VN	LVB	LVB	LVB	LB	LM	LS	NA
MN	LB	LB	LB	LM	LS	NA	NA
N	LM	LM	LM	LS	NA	RS	RM
Δd_j	ZE	LM	LM	LS	NA	RS	RM
	F	LS	LS	NA	RS	RM	RM
	MF	NA	NA	RS	RM	RB	RB
	VF	NA	RS	RM	RB	RVB	RVB

输入输出变量的模糊子集均采用三角形隶属函数^[2],其隶属度为:

$$\text{trig}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x. \end{cases} \quad (2)$$

为减少信息丢失,采用拉森乘积运算法则进行推理合成,设距离偏差 Δd 模糊化后为 Δd_f ,夹角 θ 模糊化后为 θ_f ,则控制量的隶属函数为:

$$\mu_{\Delta u}(\Delta u_k) = \bigwedge_{k=1}^{17} (\mu_{\Delta d_j}(\Delta d_f) \wedge \mu_{\theta_i}(\theta_f) \wedge \mu_{\Delta U_{ij}}(\Delta u_k)). \quad (3)$$

式中: Δu_k 为控制量论域中整元素, $\mu_{\Delta u}(\Delta u_k)$ 为 Δu_k 隶属于控制量的模糊子集 ΔU_{ij} 的隶属度; $\mu_{\Delta d_j}(\Delta d_f)$ 为 Δd_f 隶属于距离偏差的模糊子集 Δd_j 的隶属度; $\mu_{\theta_i}(\theta_f)$ 为 θ_f 隶属于车体与墙夹角的模糊子集 θ_i 的隶属度.

控制量的解模糊采用 $\min-\max$ (重心法):

$$\text{delta } U = \frac{\sum_{k=1}^{17} \mu_{\Delta u}(\Delta u_k) \cdot \Delta u_k}{\sum_{k=1}^{17} \mu_{\Delta u}(\Delta u_k)}. \quad (4)$$

若解模糊得到 t 时刻的控制量(左右轮驱动电机的电压差) $\text{delta } U(t)$ (ΔU),则两轮驱动电机的电压 $U_l(t)$, $U_r(t)$ 为:

$$U_l(t) = U_{li} + \text{delta } U(t)/2, \quad (5)$$

$$U_r(t) = U_{ri} - \text{delta } U(t)/2. \quad (6)$$

式中 U_{li} , U_{ri} 表示左右轮初始给定电压, $U_{li} = U_{ri}$.

3 基于遗传算法优化的模糊控制器 (Optimizing fuzzy controller based on genetic algorithm)

遗传算法是受达尔文进化论——适者生存的启发.借鉴生物的自然选择和遗传进化机制而产生的一种全局优化自适应概率搜索算法.他最早由美国Michigan大学的Holland于1975年提出来的,起源于60年代对自然和人工自适应系统的研究.遗传算法利用简单的编码技术和繁殖机制来表现复杂的现象,从而解决复杂的问题.特别是由于他不受搜索空间的限制性假设的约束,不要求诸如连续性、导数存在和单峰等假设,以及其固有的并行性,目前已经在最优化、机器学习和并行处理等领域得到了广泛的应用^[3].

HEBUT-I 型智能移动机器人在直墙跟踪中采用了传统的模糊逻辑控制器的控制策略,其控制规则和隶属函数的参数都是固定不变的,故降低了跟踪精度和响应速度.因此,本文采用遗传算法去寻优模糊控制器隶属函数的参数,如图2所示.通过调整隶属函数的宽度 b_i 及中心值 c_i ,改变隶属函数的形状,实现模糊控制器的离线自寻优,提高移动机器人的跟踪性能^[4].

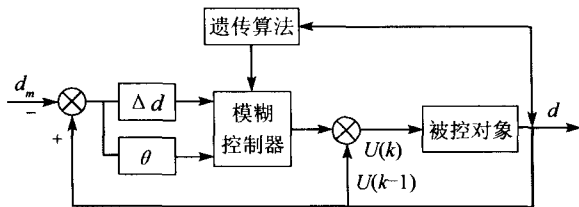


图2 基于遗传算法优化的自调整模糊控制器框图

Fig. 2 Flow chart of optimizing fuzzy controller based on genetic algorithms

由上文可知,二维模糊控制器共有 $7 + 7 + 9 = 23$ 个模糊子集,每个子集又均有两个参数 $\{c_i, b_i\}$ 待寻优.对于这样一个46维空间的寻优问题,常规优化算法并不适用,而遗传算法却为我们提供了一种很好的解决途径.

3.1 编码策略和种群初始化 (Coding strategy and community initialization)

寻优后的隶属函数采用正负论域区对称的形式,例如在输入量 Δd 的模糊子集中, VN 与 VF 的宽度相等设为 d_1 , 其中心值的绝对值相等设为 a_1 ; MN 与 MF 子集的宽度相等设为 d_2 , 中心值的绝对值相等设为 a_2 ; N 与 F 的宽度相等设为 d_3 , 中心值的绝对值相等设为 a_3 ; 子集 ZE 的宽度则为 d_4 , 中心值为 a_4 . 则对于 Δd 来说共有8个待寻优参数.同理,输入量 θ 和输出量 ΔU 的寻优参数分别为8个和10个,如图3所示,则遗传算法共需对26个参数进行优化,个体编码采用多参数级联式定点映射编码^[5],每个参数均用8位二进制数表示,则每条染色体的总长度为208位字符串.设各个隶属函数宽度取值范围为 $2.0 \sim 4.0$, 中心值为 $c_i \pm 0.2$.

Δd	θ	ΔU
$d_1, a_1, \dots, d_4, a_4$	$d_5, a_5, \dots, d_8, a_8$	$d_9, a_9, \dots, d_{13}, a_{13}$

图3 二进制串结构图

Fig. 3 Structure of binary strings

初始群体的规模即指群体中包含的个体数目 N . N 的大小将直接影响 GA 的有效性,个体太少,

GA 搜索效果会很差.相反,若群体中包含个体太多,会增加计算量,使搜索收敛时间增长.研究结果表明,一般群体规模控制在 $N = 30 \sim 200$ 个个体之间较为合适.故初始种群数目取100.

3.2 个体适应度函数的选择 (Choice of individual fitness function)

为了评价每个个体性能的好坏,需要制定对每个个体都适用的目标函数.进而求出个体的适应度,适应度值是种群进化的向导,是调整控制器参数的依据.

在 HEBUT-I 型移动机器人的直墙跟踪中,我们不难分析到,若要保持较高的跟踪精度,移动机器人的行动路线应始终是沿着某一直线轨迹前进的.这里我们假定这条跟踪路径是距离直墙 0.5m 的直线.目标函数采用能量型性能指标:

$$J = \sum_{i=k}^{k+l} \frac{1}{2} [d_m - d_i]^2. \quad (7)$$

式中 d_m 为理想值,取为 0.5m, d 为实际输出, L 为模糊控制器对受控对象的控制步数,取 $L = 10$, K 为学习样本数.

利用遗传算法优化参数时,算法的运行仅由适应值驱动,而不需要被优化对象的局部信息.个体适应值函数按下式计算:

$$F(x) = \frac{1}{1 + J}. \quad (8)$$

当性能指标 J 趋于较小值时,适应度函数 $F(x)$ 趋于较大区域.

3.3 遗传算法的搜索过程 (Searching process of GA)

遗传算法通常使用3种标准操作符,它们是选择(selection)、交叉(crossover)、变异(mutation).

3.3.1 选择 (Selection operator)

从群体中选择优胜的个体,淘汰劣质个体的操作称为选择.选择的目的是为了从当前群体中选出优良的个体,使它们有机会作为父代为下一代繁殖子孙,判断个体优良与否的准则就是各自的适应度值.适值比例法(即轮盘赌法)是目前遗传算法中最基本也是最常用的选择方法,设群体大小为 n , 其中个体的适应值为 f_i , 则 i 被选择的概率 p_{si} 为

$$p_{si} = f_i / \sum_{j=1}^n f_j. \quad (9)$$

3.3.2 交叉 (Crossover operator)

交叉是指将两个或多个父辈的特征组合起来产生一个或多个子代个体,本论文采用两点交叉的方

法,就是把个体分割成3段,交叉点的选择一般是随机的,然后两个个体间隔交换相应的段,从而产生新的个体.由于它们融合了父代的优良性状而对环境有更好的适应度.通常交叉概率 $P_c = 0.6 \sim 1.0$,取0.8.

3.3.3 变异(Mutation operator)

变异是指对个体所作的小的局部改动,即按一定的概率改变二进制串群中某些位的值.通过引入新的基因确保种群的不断进化.变异的实质是在染色体的复制过程中由于干扰而使得某个或某几位发生变化,从而产生出具有新特征的个体.也正是由于变异才使得个体跳出局部最优解.本论文采用位点变异方法.变异概率 $P_m = 0.001 \sim 0.01$,取0.006.

在经历了一轮搜索过程后,种群将不断地进行选择、遗传、变异操作,直至达到最大进化代数或种群个体的进化已趋于稳定为止^[5].

4 仿真与分析(Simulation and analysis)

如果将 HEBUT-I 型智能移动机器人在实际跟踪环境中对每一代中的每条染色体(代表一组待寻优的隶属函数参数)进行验证,这几乎是不可能的.因为遗传算法的初始规模选为 $N = 100$,寻优结束条件为进化100代,则总共需要进行10000次试车试验,显然,此种方法极其费时费力,开发成本高,周期长,可行性很差.故为了验证本论文所提出的控制方案,开发了以 HEBUT-I 型智能移动机器人作为参考模型的用于墙识别与跟踪的仿真平台.该仿真平台采用 VC++6.0 面向对象的程序设计语言进行开发.将基于模糊遗传算法控制的直墙跟踪设为一个类(CFuzzyContraGA),主要实现对模糊控制器的初始化、精确量的模糊化、遗传算法优化模糊子集隶属函数参数的实现、利用规则库进行推理决策、模糊量的精确化、模糊控制查询表的生成、等功能.经过仿真,本文算法实现了直墙跟踪规划问题的寻优控制,在经过不到20代的进化过程便收敛至全局最优解,如表2所示,可以看出,由于对26个参数进行了寻优,故输入量 Δd , θ 和输出量 ΔU 的隶属函数形状均发生了显著变化.

最后由动画仿真类(Simulation),实现移动机器人的直墙跟踪动画仿真功能.图4为移动机器人直墙跟踪情况图,图中凹凸处为分别考虑了门和暖气的情况.

表2 隶属函数参数的优化结果

Table 2 Optimizing result of membership function parameters

Δd	VN	MN	N	ZE	F	MF	VF		
$a_1 \cdots a_4$	-6.053	-3.847	-2.059	0.267	2.059	3.847	6.053		
$b_1 \cdots b_4$	4.276	3.958	3.675	3.574	3.675	3.958	4.276		
θ	TVF	TMF	TF	PR	TN	TMN	TVN		
$a_5 \cdots a_8$	-6.253	-3.897	-1.745	-0.143	1.745	3.897	6.253		
$b_5 \cdots b_8$	4.213	4.058	3.594	3.382	3.594	4.058	4.213		
ΔU	LVB	LB	LM	LS	NA	RS	RM	RB	RVB
$a_9 \cdots a_{13}$	-8.231	-6.011	-3.787	-1.813	0.067	1.813	3.787	6.011	8.231
$b_9 \cdots b_{13}$	4.352	4.287	3.891	3.496	3.359	3.496	3.891	4.287	4.352

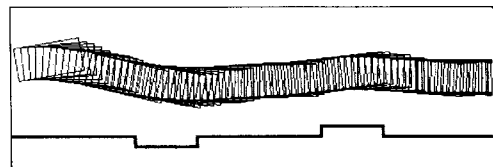


图4 HEBUT-I 型智能移动机器人直墙跟踪仿真试验

Fig. 4 Simulation experiment of HEBUT-I intelligent mobile robot tracking straight wall based on GA

5 结论(Conclusion)

本文针对移动机器人直墙跟踪的行为,提出了模糊遗传算法的控制策略,此方法由遗传算法对模糊控制器隶属函数的参数进行离线优化,在一定程度上克服了传统模糊控制器存在的主观不确定性的缺点.经过仿真平台的验证,最终选出一组参数(如表2),在 HEBUT-I 型智能移动机器人上进行实验,如图5所示.

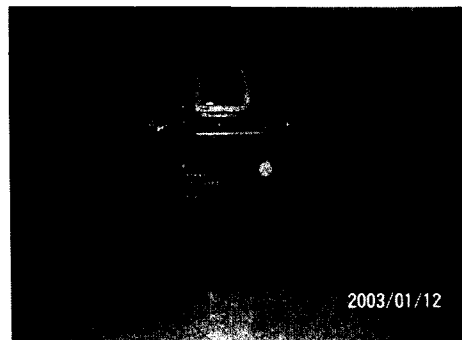


图5 移动机器人直墙跟踪试验

Fig. 5 Experiment of HEBUT-I intelligent mobile robot tracking the straight wall

根据超声传感器组0定时采集到的实际距墙信息,将传统模糊控制器和基于遗传算法优化的模糊控制器进行比较,从图6中可以看到,优化后的结果

与原有控制策略相比,响应速度与跟踪精度都得到了明显改善.值得指出的是本文给出的是模糊控制器离线遗传优化方法,如何将遗传算法用于模糊控制的在线优化将是下一步的研究方向.

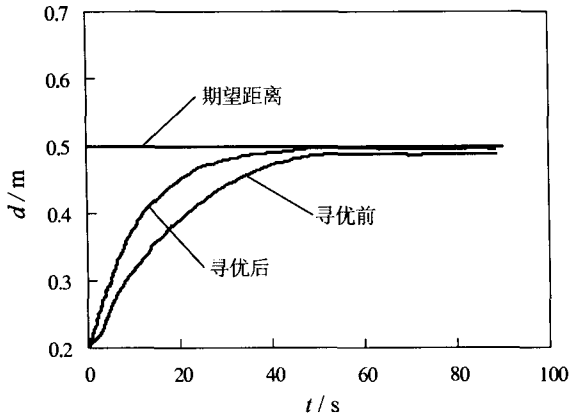


图6 优化结果

Fig. 6 Optimizing result

参考文献(References):

- [1] PARK D, KANDEL A, LANGHOLZ C. Genetic-based new fuzzy reasoning models with application to fuzzy control[J]. *IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics*, 1994, 24(3): 39-47.
 - [2] LI R H, ZHANG Y. Fuzzy logic controller based on genetic algorithm[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 83(5): 1-10.
 - [3] KARR C L. Design of an adaptive fuzzy logic controller using a genetic algorithm [C]// *Proc the 4th Int Conf Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publication, 1991: 450-457.
 - [4] 于华男, 戴军. 基于遗传算法的水下机器人模糊控制器优化设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2002, 23(5): 12-15.
(YU Huanan, DAI Jun. Control of autonomous underwater vehicle using fuzzy logic tuned by genetic algorithms[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2002, 23(5): 12-15.)
 - [5] DAVIS L. *Handbook of Genetic Algorithms* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991: 27-57, 60-110.
- 作者简介:
- 段 萍 (1973—), 女, 博士研究生, 研究方向: 移动机器人智能控制, 计算机视觉, E-mail: dwj637@eyou.com;
- 张建畅 (1962—), 男, 博士研究生, 研究方向: 移动机械手协调控制技术, E-mail: jc Zhang@hebut.edu.cn;
- 丁承君 (1973—), 男, 博士, 研究方向: 移动机器人智能控制, E-mail: dcj@eyou.com;
- 张明路 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 河北工业大学机械学院院长, 研究方向: 机器人技术及控制理论, 多智能体协调技术研究, E-mail: zhangml@hebut.edu.cn.

(上接第415页)

- [3] SHENG LIU, GOLDENBERG A A. Robust damping control of mobile manipulators [J]. *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics-part B: Cybernetics*, 2002, 32(1): 126-132.
 - [4] DONG W J, Xu Y S, WANG Q. On tracking control of mobile manipulators [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation*. San Francisco, USA: IEEE Press, 2000: 3455-3460.
 - [5] ELDEEB Y, ELMARAGHY W H. Robust adaptive control of a robotic manipulator including motor dynamics[J]. *J Robot Syst*, 1998, 15(1): 661-669.
 - [6] HU Y M, CHAO H M. High order sliding mode control of nonlinear control systems with application to mobile robots [C]// *Advances in Variable Structure Systems: Analysis, Integration and Applications*. Singapore: World Scientific, 2000: 125-134.
 - [7] YOUNG K D, ZGUNER O U. *Variable Structure Systems, Sliding Mode, and Nonlinear Control* [M]. London, New York: Springer, 1999.
 - [8] CHAO H M, HU Y M. Dynamical sliding mode control with applications to output tracking of mobile robots [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 565-568.
 - [9] SIRA RAM IREZ H. On the dynamical sliding mode control of nonlinear systems[J]. *Int J of Control*, 1993, 57(5): 1039-1061.
 - [10] LEVANT A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control [J]. *Int J of Control*, 2003, 76(9/10): 924-941.
 - [11] WU Y X, HU Y M. Kinematics, dynamics and motion planning of wheeled mobile manipulators [C]// *Proc of Int on Complex Systems Intelligence and Modern Technological Applications*. Cherbourg, France: [s. n.], 2004: 221-226.
- 作者简介:
- 吴玉香 (1968—), 女, 副教授, 在职博士研究生, 感兴趣的研究方向: 非线性控制, 智能控制及其应用, 机器人控制等, E-mail: xyuwu@scut.edu.cn;
- 胡跃明 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 非线性控制, 智能控制, 机器人控制等.