

# 基于粗糙集与遗传算法的机器人喷枪路径规划方法

## The Path Planning of Spray Gun of Painting Robot Based on Rough Set and Genetic Algorithm

镇江高等专科学校电子与信息系(江苏镇江 212003) 仲志燕

(Zhenjiang College, Jiangsu Zhenjiang 212003, China) Zhong Zhiyan

**摘要:** 为提高喷涂机器人喷枪路径的快速性和准确性,提出一种基于粗糙集和遗传算法的喷涂机器人喷枪路径规划方法。首先用粗糙集理论对初始决策表进行约简获得最小决策表,并从中提取最小规则,然后利用所得的最小决策规则训练得出一系列可行路径的集合,最后利用遗传算法对这个种群优化,获得最优喷涂路径。对某品牌汽车车身后盖为喷涂对象进行试验仿真,结果验证所提算法在喷涂机器人喷枪路径规划速度上具有优势。

**关键词:** 复杂曲面 粗糙集 遗传算法 路径规划

**Abstract:** Aiming to improve the speed and accuracy of spray path of painting robot, a path planning method of spray gun of painting robot based on rough set and genetic algorithm was proposed. Firstly initial decision table was made and simplified to get the minimal decision table by using rough set theory. And the minimal decision rule is extracted. Then the set of feasible paths was trained and obtained from the minimal decision rule. Finally, the most optimal spray path was gained by optimizing the set to use genetic algorithm. Simulation test was done with the back cover of a car as a spraying object. It indicated the advantage of this hybrid algorithm at the speed of path planning of painting robot's spray gun.

**Keywords:** complex surface rough sets genetic algorithm path planning

[中图分类号] TP18 [文献标识码] A [文章编号] 1000-3886(2009)02-0038-03

## 1 引言

喷枪路径规划是喷涂机器人离线编程法中的关键技术。目前,国内外对喷枪路径规划方法的研究主要有两类<sup>[1-3]</sup>,传统方法与智能方法。传统方法主要包括:梯度法、栅格法、枚举法、人工势场法、自由空间法及随机搜索法等。其中梯度法易陷入局部最小点,枚举法不能用于高维的优化问题,势场法则存在丢失解的部分有用信息的可能。智能方法主要有模糊逻辑、神经网络、遗传算法等。模糊算法主要用于在线规划中,自适应性较差,神经网络方法对于环境复杂的情况规划能力较差,遗传算法则是目前应用较多的一种方法,受到了广大研究者的重视。但是,采用遗传算法进行喷枪路径规划时,由于是随机产生初始种群,种群规模大导致搜索空间较大,删除冗余个体能力较差,大大影响了路径规划的速度,特别是环境复杂或多机器人路径规划时,这种缺点更明显。本文在基于遗传算法的机器人路径规划方法的基础上,引入粗糙集软计算方法,对遗传算法的种群初始化过程进行改进,提高了喷枪路径规划的速度和精度。

## 2 粗糙集的基本概念

粗糙集理论是波兰科学家 Z. Pawlak<sup>[4]</sup>在 1982 年提出的,他借鉴了逻辑学中对不精确和模糊的各种定义,针对知识库提出不精确范畴等概念。并在此基础上形成了完整的理论体系,即粗糙集理论。近年来,粗糙集理论已经成为人工智能领域中一个新的学术研究热点,并在模式识别、知识获取和决策分析等领域得到了应用。

## 2.1 知识表达系统

为处理智能数据,需要知识的符号表达,知识表达系统的基本成分是研究对象的集合,通过对象的基本特征(属性)和它们的特征值(属性值)来描述。一个知识表达系统  $S = \{U, C, D, V, f\}$ 。

其中  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为论域,即全体对象的集合;  $R = C \cup D$  为属性集合,其中  $C$  是条件属性,  $D$  为决策属性集;  $V = \bigcup_{r \in R} V_r$  为属性值的集合,  $V_r$  表示属性  $r$  的取值范围;  $f: U \times R \rightarrow V$  为一个函数,用于确定  $U$  中每一个对象  $x$  的属性值,即任一  $x_i \in U, r \in R$ , 则  $f(x_i, r) = V_r$ 。知识表达系统可以方便地用表格形式来实现。知识的表格表达法可以看作是一种特殊的形式语言,用符号来表达等价关系,这样的数据表称作知识表达系统(KRS)。

## 2.2 知识约简

知识约简是粗糙集理论的核心内容。所谓知识约简,就是在保持知识库分类能力不变的条件下消去冗余的知识。知识约简中有两个基本概念:约简和核。其中知识约简首先删除重复的实例及多余属性,并对每个实例删除多余的属性值,然后求出最小约简,并根据最小约简求出逻辑规则,提取最小规则,对数据进行预处理。

## 3 机器人喷枪路径规划方法

### 3.1 建立决策表

复杂曲面有两个特点:

① 曲面是一个复连通区域;

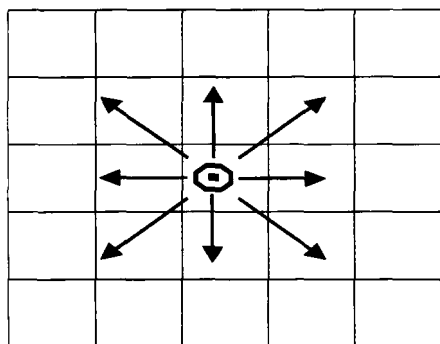


图1 路径方向图

②曲面上某些点的曲率较大;

在这两种情况下使用一般CAGD(Computer Aided Geometric Design)中曲面造型方法是很难处理的,如果采用曲面分片方法,就可以使问题简化。为高效率地生成复杂曲面上的喷枪路径,首先对复杂曲面进行栅格划分,再按照栅格之间的连接规则生成若干较大的片,并保证每个片为单连通区域且近似看为一个平面。假设机器人的喷枪当前所处的栅格序号为 $p_i$ (边界点除外),终点为序号99的栅格,则机器人的喷枪下一步喷涂方向有八个,如图1所示。将这八个作为条件属性( $C = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ )进行量化,条件属性由1~3表示,其中,1代表已喷栅格,2代表未喷栅格且为 $p_{i-1}$ 点,3代表未喷栅格,建立如表1所示的初始决策表。

表1 路径规划初始决策表

$U$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$Y$
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	1	1	1	1	2	1
3	2	2	2	1	1	1	1	3	1
4	2	2	2	2	1	1	1	1	1
5	2	2	2	2	1	1	2	1	1
6	2	2	2	2	1	1	3	1	1
7	2	2	2	3	1	1	1	1	1
8	2	2	2	3	1	1	2	1	1
9	2	2	2	3	1	1	3	1	1
10	2	2	2	3	1	1	3	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2685	1	3	3	3	3	3	3	3	1

### 3.2 决策表的约简

决策表的约简是在不丢失信息的前提下,以最简单形式表示决策系统的条件属性对决策属性的支持性。

决策表的约简步骤如下:

①条件属性约简,即从决策表中消去某些列,而不影响决策属性 $Y$ 对应的属性值;

②消去重复的行;

③消去属性的冗余值,且保证决策属性值 $Y$ 不变;

条件属性约简是在保证决策表相容性的前提下,去除某些条件属性,然后对相容的决策表,用粗糙集计算方法选出属性个数最少的最优属性集合。

根据上述性质,对初始决策表进行约简,计算得属性 $\{X_4\}$ , $\{X_6\}$ , $\{X_8\}$ 为冗余属性,去掉后不影响决策属性值的取值,可以进

表2 属性约简后的决策表

$U$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_5$	$X_7$	$Y$
1	2	2	2	1	1	1
2	2	2	2	1	2	1
3	2	2	2	1	3	1
4	2	2	2	2	1	1
5	2	2	2	2	2	1
6	2	2	2	2	3	1
7	2	2	2	3	1	1
8	2	2	2	3	2	1
9	2	2	2	3	3	1
10	1	2	2	1	1	2
...	...	...	...	...	...	...
127	1	3	3	3	3	8

表3 最小规则决策表

$U$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_5$	$X_7$	$Y$
1	2	2	2	1	-	1
2	2	2	2	2	-	1
3	2	2	2	3	-	1
4	2	2	2	-	1	1
5	2	2	2	-	2	1
6	2	2	2	-	3	1
7	1	2	2	1	-	1
8	1	2	2	2	-	1
9	1	2	2	3	-	1
10	1	2	2	1	1	2
...	...	...	...	...	...	...
80	-	3	3	3	3	8

行约简。最后,再对决策表中的重复行进行合并,删除冗余属性后,余下123个样本,即得到表2所示的样本集。

### 3.3 最小决策规则

在实际应用中,并不是所有的决策规则在决策算法中都是必须的,某些规则是可以去掉而不影响整个决策制定的,即可以消去与相同决策类相关的冗余决策规则,获得最小决策规则,如表3所示。

其方法如下:

令 $F$ 是一个基本算法, $S = (U, A)$ 为一个知识表达系统, $F$ 中具有相同的结果, $\Psi$ 的全部基本规则的集合用 $F_\Psi$ 表示,属于 $F_\Psi$ 的决策规则的全部因素集合用 $P_\Psi$ 表示。当 $1s \vee P_\Psi \equiv \vee \{P_\Psi - \{\theta\}\}$ 时, $F$ 中的基本决策规则 $\theta \rightarrow \Psi$ 是可省略的,这里 $\vee P_\Psi$ 是 $P_\Psi$ 中所有公式的分解。否则, $F$ 中的基本决策规则是不可省略的,此时,决策规则集合 $F_\Psi$ 称为独立的。如果决策规则集合 $F_\Psi$ 的子集 $F_\Psi'$ 中所有规则独立,且 $1s \vee P_\Psi \equiv$ ,则决策规则集合 $F_\Psi$ 的子集 $F_\Psi'$ 称为 $F_\Psi$ 的简化。当基本算法 $F$ 中所有决策规则都是简化的,且对于 $F$ 中的任一决策规则 $\theta \rightarrow \Psi$ , $F_\Psi$ 是简化的,则基本算法 $F$ 是最小的。表3的决策表即是最小规则决策,其中,短线“-”替代的条件属性值即为属于集合 $\theta$ 的可省略的部分。

## 4 试验仿真

以某品牌SUV汽车车身后盖为喷涂对象进行试验仿真。路径规划的粗糙集遗传算法描述如下:

①用栅格法建立机器人喷枪路径空间模型,其中已喷栅格随

(下转第57页)

术学院学报, 2003, 1(1): 33 ~ 35

[3]张勇军, 任震, 钟红梅, 唐卓尧, 尚春. 基于灾变遗传算法的无功规划优化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 29 ~ 32

[4]Lee K Y, Pappk Y M, Ortiz J L. A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dis-patch[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, 104: 1147 ~ 1153

[5]Boone G, Chiang H D. Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems by Genetic Algorithms, International Journal of Electric Power and Energy System, 1995, 15: 155 ~ 162

[6]Sundhararajan S, Pahwa A. Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm, IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9: 1499 ~

1507

[7]程浩忠. 基于遗传算法的电力系统无功优化[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(1)

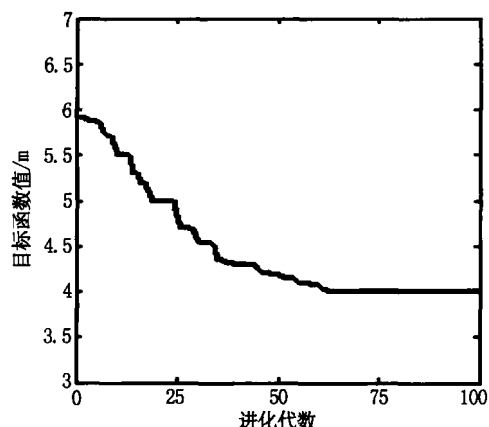
[8]张粒予, 舒隽, 林宪枢, 徐英辉. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6)

[9]周竹, 卢景衡, 许克明. 基于改进的遗传算法实现电网电压无功实时控制[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(4)

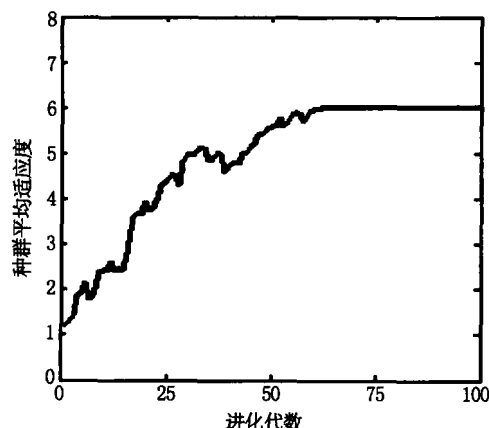
[10]文劲宇, 江振华, 姜霞, 程时杰, 杨文祥, 黄金明. 基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现[J]. 电力系统自动化, 2000(1)

[作者简介]庄旭(1975-), 女, 本科, 讲师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(上接第 39 页)



(a) 最优个体目标函数值



(b) 种群平均适应度

图 2 仿真结果图形

机产生(实际应用中, 已喷栅格位置由传感器或摄像头提供);

②随机产生一定规模序号编码的初始种群, 用粗糙集路径决策规则对初始种群进行训练, 产生一系列可行路径;

③遗传代数计数器初始化, options = 0;

④基于遗传算法路径规划, 进行选择、交叉和变异操作。其中种群规模  $P_{size} = 100$ , 交叉概率由式  $p_c = k_1(f_{max} - f') / (f_{max} - f_{min}) + k_2$  随机产生。其中  $f_{max}$ 、 $f_{min}$ 、 $f'$  分别为种群的最大适应函数值、最小适应函数值和相交叉的两个个体中的较大适应值, 变异概率  $m_{rate} = 0.05$ , 最大进化代数  $T = 100$ 。

采用上述算法进行试验仿真, 如图 2 所示。从图中可看出, 最优个体对应的目标函数值随进化过程呈单调下降趋势, 最后趋于定

表 3 实验结果对比

已喷数目	$F/f_{opt}$		$N_{opt}$	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
10	0.9999	0.9985	125	12
15	0.9981	0.9936	212	15
20	0.9982	0.9931	378	22
25	0.9979	0.9902	295	19
30	0.9979	0.9942	439	24

值。而在进化大约 70 代后, 平均适应度基本不再变化, 算法收敛。

用提出的方法对不同已喷栅格数目环境分别进行 10 次仿真实验, 其结果与采用 Kazuo Sugihara<sup>[5]</sup> 的遗传算法所做的结果相比较, 结果如表 3 所示。其中, 为平均适应值,  $f_{opt}$  为最优适应值, 为最优结果的平均遗传代数, 方法 1 代表 Kazuo Sugihara 采用的遗传算法, 方法 2 为提出的方法。

## 5 结论

粗糙集和遗传算法都是近年快速发展起来的智能算法, 粗糙集理论无需辅助信息, 只根据自身提供的信息就可以对数据进行约简并求得知识的最小表达。遗传算法是模拟自然界优胜劣汰原则的随机搜索算法, 已在机器人学习中表现出良好的优化能力。试验仿真表明该算法收敛速度快, 计算效率高, 并能有效减少喷涂作业的时间, 为建立新型机器人离线编程系统奠定了基础。提出的算法还可以用于其他类型机器人路径规划, 例如机器人研磨复杂曲面的路径规划、复杂曲面上的清洁机器人路径规划等等。

## 参考文献

- [1]Antonio J K, Optimal Trajectory Planning Problems for spray coating[C]. Proceedings of the 1994 IEEE Int'l Conference on Robotics and Automation, USA, 1994: 2570 ~ 2577
- [2]Antonio J K, Ramabhadran R, Ling T L. A framework for trajectory planning for automated spray coating[J]. International Journal of Robotics and Automation, 1997, 12(4): 124 ~ 134
- [3]刁训娣, 赵德安, 李医民, 等. 喷漆机器人喷枪轨迹设计及影响因素研究[J]. 机械科学与技术, 2004(4): 396 ~ 398
- [4]Pawlak z. Rough set[J]. International Journal of Information and Computer Science. 1982(11): 341 ~ 356
- [5]Kazuo Sugihara and John Smith. Genetic Algorithms for Adaptive Motion Planning of an Autonomous Mobile Robos[A]. Problems IEEE Trans. SMC [C]. M. I. T. US. 1997, 138 ~ 143

[作者简介]仲志燕(1977-), 女(汉), 江苏省镇江人, 讲师, 研究方向: 信号检测与控制。