

# 计算智能在移动机器人路径规划中的应用综述

夏琳琳<sup>1,2</sup>, 张健沛<sup>1</sup>, 初妍<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 东北电力大学 自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 移动机器人路径规划是建立在机器人定位与避障研究之上, 进一步对机器人行为的深入. 在给出人工神经网络(ANN)、模糊逻辑(FL)、遗传算法(GA)等计算智能原理性方法的基础上, 从一般意义讨论了各类计算智能方法用于路径规划的切入点, 研究了各类算法的实现机理与设计思想. 最后结合目前的技术发展趋势, 对路径规划问题未来可能的研究发展方向进行了探讨.

**关键词:** 计算智能; 路径规划; 模糊逻辑; 人工神经网络; 遗传算法

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)02-0160-06

## An application survey on computational intelligence for path planning of mobile robots

XIA Linlin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianpei<sup>1</sup>, CHU Yan<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Path planning focuses on further behavior control, which is based upon the positioning and obstacle avoidance capabilities of mobile robots. The theoretical descriptions of some computational intelligence methods, including artificial neural networks (ANN), fuzzy logic (FL), and genetic algorithms (GA), were presented in sequence, and the joint between each solution and path planning method was analyzed in a general sense. Moreover, the realization principles and design schemes of these strategies were researched elaborately. Eventually, considering the evolution trend, the possible future direction of path planning was also discussed.

**Keywords:** computational intelligence; path planning; fuzzy logic; artificial neural network; genetic algorithm

著名学者蒋新松曾这样为路径规划定义: 路径规划是智能机器人的一个重要组成部分, 它的任务是在具有障碍物的环境内按照一定的评价标准(如工作代价最小、行走路线最短、行走时间最短等), 寻找一条从起始状态(包括位置和姿态)到目标状态的无碰路径<sup>[1]</sup>.

目前, 智能机器人的路径规划大致可以划分为传统方法和智能方法2类<sup>[2]</sup>. 前者由几何法、单元分解法、栅格法(Grids)、人工势场法(artificial potential field)以及数学分析、路径搜索算法、枚举技术(如A\*搜索、D\*搜索)等引申而来, 彼此之间不排斥, 因而可以结合起来共同实现路径规划问题. 对于后者, 随着人

工智能中计算智能(computational intelligence, CI)的长足发展, 一些分支学科, 如人工神经网络(artificial neural network, ANN)、模糊逻辑(fuzzy logic, FL)、遗传算法(genetic algorithm, GA)等逐渐应用于路径规划领域, 这些方法主要以数值数据为基础, 通过数值计算, 运用算法实现问题求解.

计算智能的许多理论与技术还在发展之中, 本文以其与路径规划领域的交叉融合为主要视角, 详尽探讨这些算法的实现机理与设计思想.

## 1 路径规划中的计算智能方法

### 1.1 人工神经网络与路径规划

移动机器人路径规划在一定条件下属于优化问题, ANN方法非常适合于已知环境的路径规划. 首先, 需将环境地图映射成神经元网络, 设置神经元的值来表征不同的地图状况, 利用网络对一系列的路

收稿日期: 2010-04-28

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(F200917); 黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(J11553046).

通信作者: 夏琳琳. E-mail: prettylin521@yahoo.com.cn.

经点进行规划;再通过对 ANN 的训练来获得最优的神经元集合以组成路径<sup>[3]</sup>.

### 1.1.1 能量函数的确定

整个训练过程的目标是使路径长度尽量短,同时尽可能远离障碍物.从数学观点来看:等效于优化或提取一个能量函数(优化函数)<sup>[4,5]</sup>.考虑到避障,在机器人路径的总长度上加一个惩罚函数,即能量函数由路径长度和碰撞惩罚函数2部分组成,表示为

$$E = E_g + E_c.$$

式中:  $E_g$  为机器人与目标点的距离,  $E_c$  为碰撞惩罚函数.因此,关注的主要是网络本身能量函数及其碰撞惩罚函数的选取.借助 BPNN、RBFNN 等典型有监督网络的算法思想,网络训练的目标是使能量函数达到最小,最直接的结论是:相碰的障碍越多、空间点与障碍物中心距离越大,施加的惩罚  $E_c$  越大,使得此路径生成的可能越小;反之,路径点越远离障碍物、路径的长度  $E_g$  越短,能量函数  $E$  也越小,生成此路径的可能越大.

### 1.1.2 网络结构、学习方法的改进

网络结构的多样性和改进的学习算法,为 ANN 在路径规划领域的研究提供了丰富的内容.有的学者引入了新的网络训练结构,如利用 4 层小波 RBF (WRBF) 网络进行路径规划,以机器人当前位置作为网络输入,下一时刻位置作为网络输出.此方法有效地避免了传统 AI 对每一个障碍物用一定的神经元表示,当障碍物较多、网络规模庞大、处理运动的障碍时,由于障碍物边界方程的不定性,因此要不断调整阈值<sup>[6]</sup>.有的学者借助 Hopfield NN (HNN) 结构,设计一种局部连接 HNN 规划器,分析了 HNN 的稳定性问题,并给出了存在可行路径的条件.同时,能够保证计算复杂度和神经元个数成线性关系<sup>[7]</sup>.这种方法将路径安全性在权值设计中体现出来,折衷处理了路径“过远”和“过近”因素,体现了路径的完整性.

庞大的训练样本数、冗长的学习训练的时间、复杂的网络拓扑结构以及不断增加的权值等参数的存储空间,也是 ANN 用于路径规划所面临的主要问题.有的学者融合了 2 类不同结构的网络类型,提出将自组织性能与 BPNN 结合,构造一类 LMBPNN (Levenberg-Marquardt BPNN).底层规划器实现局部路径规划,产生原始路径;借助 SOM 分类器将原始路径进行分类,以实现路径数据压缩;BP 学习器对分类后产生的路径进行学习<sup>[8]</sup>.该方法解决了存储空间及数据冗余问题,不断增多的关于未知环境的探索,促进了所构建地图的完整性. ANN 所具有的

自组织、自学习、联想记忆特性,促使机器人主动对路径进行学习,不断获取新的知识.此类方法特别适用于求解约束优化问题,在路径规划中的应用不断增多.目前,对于 ANN 本身的研究多集中在网络结构、学习算法和实际应用 3 个方面<sup>[9]</sup>,借此,必将不断丰富路径规划的内容.

### 1.2 模糊逻辑与路径规划

此类方法的实现机理是 FL 控制和机器人行为控制相结合,成为线性规划中通常采用的一种规划方法<sup>[10-11]</sup>.方法的本质是根据人工经验获得一系列控制规则,经模糊推理(如 Zadeh 推理、Mamdani 推理)得到控制响应表,通过查表得到规划信息,实现移动机器人局部路径规划的有效控制.总的来说,方法的难点体现在 2 个方面:一是如何选取行为和推理规则的输入、输出变量,使模糊控制器容纳这些不确定的信息;二是如何构造出一张实践效果较好的控制响应表,以产生平滑的控制输出.

#### 1.2.1 输入、输出信息的模糊化

一些文献构建了这样一类避障模糊控制器:它的输入是障碍物距离和速度,输出是机器人的运动速度和导向角变化<sup>[12]</sup>.具体地,方法将障碍物距离划分为近距、中距和远距;将速度划分为慢速、中速和快速;角度划分为负大、负、零、大或正大.模糊规则的形式为

$$\text{If } A \text{ and } B \text{ Then } C \text{ and } D.$$

还有一些文献将控制器的输入变量定义为机器人与障碍物之间的距离和障碍物相对目标方向的方位角,输出变量为机器人遇到障碍物后转动的角度<sup>[13]</sup>.采用经典的产生式规则形式,即

$$\text{If } A \text{ and } B \text{ Then } C.$$

归纳起来,此类方法将物体的运动状态用模糊集合的概念(即运动平面的二维隶属函数)来表达,每个隶属函数要包含了物体当前位置、速度的大小和方向等信息,而这些信息的获取在实际应用中是很难得到的.

有的学者提出一种在未知环境下智能机器人的模糊控制算法,它将障碍物信息分为 3 个方向,分别为正前方、左前方和右前方.行为和推理规则的输入变量设为 4 个,分别为机器人预定的目的地方向、前进方向的左、中、右 3 面障碍物状态,模糊输出为机器人的速度和方向.这种方法使机器人对定位精度不敏感,规划算法的鲁棒性较好.同时也应注意到,方法在地图构建、修改及路径规划方面还存在一定问题.

#### 1.2.2 模糊控制相应表的构建

对于文献[13]输入、输出信息的形式,设计一

个二维模糊控制器,设计过程包括输入、输出集的确定、相应隶属函数的定义、模糊控制规则及控制表的建立、模糊推理、反模糊化等.由于模糊规则为  $R = m \times n$  ( $m, n$  分别为模糊集合的维数) 条,推理过程需借助复杂的计算机实时计算,并且需要大量的存储空间,在此,可以采用处理经典多输入单输出的模糊“查表法”,离线获得一张模糊控制响应表,再通过查表法获得实时的机器人指令信息.

对于文献[11]的输入、输出信息形式,直接设计这种多变量模糊控制器(multiple variable fuzzy controller, MVFC)是相当困难的,可以利用控制器本身的解耦特点,即通过模糊关系方程求解,在控制器结构上实现解耦,将一个多输入多输出(MIMO)的模糊控制器,分解成若干多输入单输出(MISO)的模糊控制器,即文献[12]对应的模糊控制器,再利用“离线”查表法,获得实时的机器人指令信息.

同时还应注意到,模糊控制算法中,各变量模糊集合的选取、量化等级的划分、模糊推理采用的推理规则(一般认为 Zadeh 推理比 Mamdani 推理更符合人类的思维)以及反模糊化的确定(如最大隶属度平均法、取中位数法、重心法),哪种设计组合的效果最好,直接影响控制信息的准确性,即结果的有效性.这些尚待解决的问题,为 FL 在路径规划领域的应用提供了新的研究方向与思路.

### 1.3 遗传算法与路径规划

GA 是目前智能机器人路径规划研究中应用较多的一种方法,无论是单个智能机器人的静态工作空间,还是多个智能机器人的动态工作空间,GA 及其派生算法都取得了良好的路径规划效果<sup>[14]</sup>. 方法的机理是首先借助于栅格法对机器人工作空间进行划分,用序号标识栅格,并且以此序号作为机器人路径规划的参数编码;当准备工作完成后,再利用 GA 实现路径的优化算法.可以说,路径规划很好地体现了 GA“并行、随机、搜索、最优化”的特性.与 ANN 方法中能量函数选取的重要性一样,GA 中适应度函数(fitness function)的确定举足轻重.同时,从改善 GA 本身性能的角度来分析,又可以开展相应的研究工作.

#### 1.3.1 适应度函数的选取

由于零碰撞的最短路径规划相当于最小值的优化问题,GA 中搜索的结果,即每条路径的优劣,可通过适应度函数直接进行评价.有的学者这样设计适应度函数<sup>[15]</sup>:

$$\text{Fit}(f(x)) = C/\text{Length} - D \times \text{Collisionnum}.$$

式中:  $C, D$  为常数,  $\text{Length}$  表示路径的长度,  $\text{Colli-}$

$\text{sionnum}$  表示染色体与障碍物多边形的碰撞次数.对于长度短的、与障碍物多边形碰撞次数少的染色体,对应的适应度就高,此函数很好地反映了个体适应度的差异.

有的学者提出,可行路径的适应值需要考虑路径长度、安全性和平滑程度等因素<sup>[16]</sup>. 即

$$\text{Fit}(f(x)) = w_1 d(x) + w_2 h(x) + w_3 q(x). \quad (1)$$

式中:  $w_1, w_2, w_3$  分别为路径的长度、安全性和平滑度的权重;  $d(x)$  表示路径的总长度,决定机器人达到目标的快慢程度,在式(1)中权重最大,计算公式为

$$d(x) = \sum_{i=1}^{n-1} d(k_i, k_{i+1}).$$

式中:  $d(k_i, k_{i+1})$  表示点  $k_i$  到  $k_{i+1}$  的距离.  $h(x)$  表示路径的安全程度,是路径中各个线段距离障碍物的远近程度,最佳为距离所有障碍物的最小值,计算式为

$$h(x) = \sum_{i=1}^{n-1} l_i.$$

式中:  $l_i$  表示第  $i$  条线段与所有障碍物距离的最小值;  $q(x)$  表示路径的平滑度,即机器人要考虑运动的转弯半径,计算公式为

$$q(x) = \sum_{i=1}^{n-2} \alpha(l_i, l_{i+1}).$$

式中:  $\alpha(l_i, l_{i+1})$  是线段  $l_i$  和  $l_{i+1}$  间的夹角.

对算法做出评价时,得到的最优解应该对应适应度函数取得最大值,可以定义一个评价指标函数  $J(x)$ ,取适应度函数的倒数,即

$$J(x) = \frac{1}{\text{Fit}(f(x))}.$$

绘制一条评价指标函数曲线,以验证 GA 的收敛性能.

#### 1.3.2 GA 性能的改进

从改善 GA 性能的角度来分析,研究可以从以下 3 方面进行<sup>[17-18]</sup>: 1) 改善 GA 的 3 个基本操作方法,即复制(reproduction)、交叉(crossover)、变异(mutation); 2) 改善 GA 的编码方法; 3) 改善 GA 中种群的多样性,以提高解决问题的能力.

1) 以交叉和变异操作为例,可以引入“自适应(adaptiveness)”的理念.交叉概率  $P_c$  和  $P_m$  的选择是影响 GA 行为和性能的关键参数,直接关系到算法的收敛性<sup>[19]</sup>.  $P_c$  越大,新个体产生的速度就越快,而过大时,遗传模式被破坏的可能性也越大,使得高适应度的个体结构很快被破坏;  $P_c$  过小,会使搜索过程缓慢,以至停滞不前.对于变异概率  $P_m$ ,如果取值过小,就不易产生新的个体结构,如果取值过大,则 GA 变成了纯粹的随机搜索算法.借助于“自适应”的算法思想,希望算法实现  $P_c$  与  $P_m$  随适应度

自动改变.

当种群各个体适应度趋于一致或者趋于局部最优时,  $P_c$  与  $P_m$  同时增加,跳出局部最优;而当群体适应度比较分散时,  $P_c$  与  $P_m$  同时减小,以利于优良个体的生存. 并且,对于适应度高于群体平均适应度的个体,选择较低的  $P_c$  与  $P_m$ ,使得该解被保护进入下一代;对于适应度低于群体平均适应度的个体,选择较高的  $P_c$  与  $P_m$ ,使得该解被淘汰. 关于  $P_c$  与  $P_m$  的调整可采用 F-自适应方法、S-自适应方法及 C-自适应方法等<sup>[20]</sup>.

2)改进 GA 的编码方法,即采用“双倍体(double strings)”编码思想,采用“显性”和“隐性”2 个染色体同时进行进化. 这种模式提供了一种记忆以前有用的基因块的功能,保留可能称为最优解的局部基因块,有利于提高种群的适应能力,并提高了算法的收敛能力. 文献[20]给出了双倍体 GA 中,复制算子(operator)、交叉算子及变异算子的选择,在此不再累述.

3)改进种群的多样性,即引入“双种群(double population)”GA 思想. 对于单种群 GA,经过相当长时间后,他们将逐渐进化到某些特征相对优势的状态,称为平衡态. 当一个种群进入到这种状态,其特征就不会再有很大变化. 为了解决这个问题,可以使用多个种群同时进化,并交换种群之间优秀个体所携带的遗传信息,以打破种内的平衡态达到更高的平衡态,有利于算法跳出局部最优.

具体做法与基本 GA 相类似. 首先,建立 2 个 GA 群体,分别独立进行复制、交叉和变异. 然后,同时当每一代结束后,选择 2 个种群的随机个体和最优个体分别进行交换. 之所以选择最优个体,因为其代表所在种群中最大的适应度值,将其和另一个种群的随机个体进行交换(即引入了杂交算子的概念),有利于打破平衡状态.

计算智能的分支学科还在不断发展中,如免疫计算(immune computation)、蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)、粒子群计算(particle swarm algorithm, PSA)、自然计算(natural computation, NC)以及人工生命(artificial life, AL)等,这些方法也会逐渐应用于机器人路径规划领域,并极大地促进智能机器人的发展.

2 计算智能方法的融合

如何改进和融合各类算法,在提高计算效率的同时,取得融合算法的最佳效果,成为当前路径规划研究的一项重要内容.

从获取知识的途径、推理机制、容错性能、学习机制等方面,给出 FL、ANN、GA 性能的比较,见表 1 所示.

表 1 模糊逻辑、神经网络、遗传算法性能比较  
Table 1 Performance comparison of FL, ANN and GA

	模糊逻辑	神经网络	遗传算法
知识获取	专家经验	算法实例	算法实例
推理机制	启发式搜索	并行计算	并行计算
推理速度	低	高	高
容错性	低	非常高	较高
学习机制	归纳	权值调整	遗传操作
自然语言实现	明确的	不明显	不明显

在实际应用中,GA 较多地应用在与其它计算智能方法,如 ANN、FL 相结合进行路径规划上,汲取两者的优点有效地解决动态避障的问题.

2.1 遗传算法与模糊逻辑结合

在用 FL 处理路径规划问题时,构造所有模糊规则是比较困难的. 希望通过 GA 来改进机器人的模糊推理能力,体现为对行为参数进行优化,改进系统性能. 这种基于 GA 的 FL 控制器可以分为 3 类<sup>[21]</sup>:优化模糊隶属函数的参数、优化模糊控制规则、同时优化隶属函数的参数和模糊控制规则. 总结起来,GA 负责搜索和优化,而 FL 推理负责处理未知及不明确的情况.

2.2 遗传算法与人工神经网络结合

对于典型的 ANN 类型,如 BPNN,难以确定隐层及隐层节点数目. 目前,如何根据特定的问题来确定具体的 ANN 结构尚无很好的方法,仍需根据经验来试凑. 并且,网络待学习的参数较多(BPNN 需要更新各层权值矢量),收敛速度慢. 将 GA 用于 ANN 连接权的调整和结构的优化,极大地体现了 GA 用于大规模复杂问题的并行处理高效性特性. 这种采用 GA 设计的分类器系统可用于学习式多机器人路径规划问题.

2.3 模糊逻辑与人工神经网络结合

在 FL 系统中,模糊集、隶属函数和模糊规则的设计是建立在领域专家经验知识基础上的,这种设计方法存在很大的主观性. 将 ANN 的学习机制引入到 FL 系统中,将模糊化处理、模糊推理、反模糊化计算通过分布式的 ANN 来表示,是实现 FL 系统自组织、自学习的重要途径. 在模糊神经网络(fuzzy NN)中,ANN 的输入、输出节点用来表示 FL 系统的输入、输出信号,隐层节点用来表示隶属函数和模糊规则,利用 ANN 的并行处理能力使得 FL 系统的推理能力大大提升.

### 3 路径规划的发展方向

目前,移动机器人运动的路径规划问题已取得了长足的进展,但是尚无一种规划方法适用于各种环境和任何系统,特别对于差异较大的环境、性能不同的机器人来讲,不同的规划方法均有自己的优缺点.融合2种或多种方法的策略,往往可以取得最佳的规划效果.

#### 3.1 传统有效方法相结合

传统的人工势场法、栅格法、可视图法(visibility graph)等都不是适用于所有问题,可证明其在某特定环境下的规划有效性.一些综合传统有效方法的改进或派生方法相继提出.如基于势场栅格法的滚动路径规划,方法首先利用栅格法构建路径规划参考地图,并采用势场函数构建式来实时计算栅格的势场值,使得规划出来的路径具有很好的平滑性和安全性,借助斥力场的作用,使机器人总能远离障碍物的势场范围.

#### 3.2 多传感器信息融合

惯性导航(INS)、GPS、航迹推算(dead reckoning)地磁导航、地图导航、声呐导航、视觉导航、激光雷达导航、味觉导航,以及相互之间的最优化匹配,为机器人导航提供了诱人的解决方案.在机器人完成准确定位的基础上,对路径规划才有意义<sup>[22-24]</sup>.而成熟的信息融合方法,如Kalman滤波理论、Bayesian估计、Dempster-Shafe证据理论等为此项研究提供了有力的技术支持.

#### 3.3 传统方法与智能方法相结合

人工智能中计算智能方法日益丰富,也促使了传统方法和智能方法的融合发展.如栅格法与GA相结合,人工势场与ANN、FL相结合等.这些融合方法是利用智能方法来弥补栅格法或势场法不可避免的缺点,更突出地体现规划算法的实时性与实用性,可实现动态非确定环境的规划问题.

### 4 结束语

路径规划技术是智能足球机器人研究领域中的核心问题之一,也是机器人学中对人工智能进行研究的一个重要方面.本文重点探讨了人工神经网络、模糊逻辑、遗传算法3类计算智能方法用于路径规划的实现机理与设计思想,并指出设计中的关键环节.随着研究的深入,将实现更多计算智能方法与路径规划的有效融合.需要指出的是,目前的大部分方法都有其特定的应用条件,如“局部寻优”或静态环境等限制因素,在实际应用中,应结合运动环境的复

杂度、移动机器人自身处理能力的特点,选择最为有效的路径规划方法.

### 参考文献:

- [1] 肖南峰. 智能机器人[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2008: 140-145.
- [2] 赵海文. 基于多传感器的移动机器人行为控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 23-25.  
ZHAO Haiwen. Research on Mobile Robot Behavior Control Based on Multi-sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 23-25.
- [3] CHAN-DOO Jeong. Testing neural network crash avoidance systems in mobile robot[D]. Cleveland PasadenaUSA: Case Western Reserve University, 2001: 31-32.
- [4] KRIECHBAUM L K. Tools and algorithms for mobile robot navigation with uncertain localization[D]. USA: California Institute of Technology, 2006: 44-46.
- [5] FAJEN BRETT R. A dynamical model of visually-guided steering, obstacle avoidance, and route selection[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 54(1/2): 13-34.
- [6] 成伟明, 唐振民, 赵春霞, 等. 基于神经网络和PSO的机器人路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 608-611.  
CHENG Weiming, TANG Zhenmin, ZHAO Chunxia, et al. Path planning of robot based on neural network and PSO[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(3): 608-611.
- [7] 樊长虹, 陈卫东, 席裕庚. 未知环境下移动机器人安全路径规划的一种神经网络方法[J]. 自动化学报, 2004, 30(6): 816-823.  
FAN Changhong, CHEN Weidong, XI Yugeng. A neural network-based approach to safe path planning of mobile robot in unknown environment[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(6): 816-823.
- [8] 范红, 黄洪琼. 基于自组织LMBPNN的移动机器人路径规划器[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(25): 28-29.  
FAN Hong, HUANG Hongqiong. Obstacles avoidance path planning method based SOM-LMBPNN for mobile robot[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(25): 28-29.
- [9] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 117-123.
- [10] THONGCHAI S. Intelligent control and learning techniques for mobile robots[D]. Nashville, USA: Graduate School of Vanderbilt University, 2001: 35-37.
- [11] MUSTAFA S, KEMAL L, HALICI U. Multi-Agent system-based fuzzy controller design with genetic tuning for a mobile manipulator robot in the hand over task[J]. Jour-

- nal of Intelligent and Robotic Systems, 2004, 39: 287-306.
- [12] WAGNER O. A genetic algorithm based architecture for evolving type-2 fuzzy logic controller for real world autonomous mobile robots [C]//Proceedings of Fuzzy Systems Conference. London, 2007: 1-6.
- [13] 郝冬,刘斌. 基于模糊逻辑行为融合路径规划方法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(3): 660-663.  
HAO Dong, LIU Bin. Behavior fusion path planning method for mobile robot based on fuzzy logic[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(3): 660-663.
- [14] 蔡成涛,朱齐丹. 基于模糊控制器的移动机器人路径规划仿真[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 182-185.  
CAI Chengtao, ZHU Qidan. Simulation of path planning for mobile robot based on fuzzy controller[J]. Computer Simulation, 2008, 25(3): 182-185.
- [15] DUCKETT T. A genetic algorithm for simultaneous location and mapping[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei, China, 2003: 434-439.
- [16] 张帆,周庆敏. 基于遗传算法的移动机器人路径规划仿真[J]. 微计算机信息, 2008, 24: 267-269.  
ZHANG Fan, ZHOU Qingmin. A method based genetic algorithm for path planning of a mobile robot[J]. Microcomputer Information, 2008, 24: 267-269.
- [17] 谭宝成,廉春原,徐艾,等. 一种基于改进遗传算法的机器人路径规划方法[J]. 西安工业大学学报, 2008, 28(5): 456-460.  
TAN Baocheng, LIAN Chunyuan, XU Ai, et al. A method of improved genetic algorithm for robotic path planning [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2008, 28(5): 456-460.
- [18] 陈得宝. 进化计算中的若干问题及应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007:22-25.  
CHEN Debao. Research on some problems of evolutionary computation and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 22-25.
- [19] 张毅,罗元,郑太雄. 移动机器人技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2007: 226-228.
- [20] 张仰森,黄改娟. 人工智能教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2008: 323-327.
- [21] 王万良. 人工智能及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2005: 271-277.
- [22] 严勇杰. 多机器人系统协调与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 15-18.  
YAN Yongjie. Coordination and control of multi-robot system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 15-18.
- [23] ZHAO Yilin. Theoretical and experimental studies of mobile-robot navigation [D]. Detroit, USA: University of Michigan, 1991: 21-23.
- [24] PFISTER Samuel T. Algorithm for mobile robot location and mapping, incorporating detailed noise modeling and multi-scale feature extraction[D]. USA: California Institute of Technology, 2006: 16-17.
- [25] LOUCHE A, BOUGUECHAL N E. Indoor mobile robot local path planner with trajectory tracking[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2003, 37: 163-165.

## 作者简介:



夏琳琳,女,1980年生,副教授,博士,主要研究方向为机器人导航定位技术。



张健沛,男,1956年生,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机应用技术。



初妍,女,1979年生,讲师,博士,主要研究方向为数据挖掘、移动计算。