

文章编号: 1001-0920(2011)09-1310-05

## 一种移动机器人的禁忌搜索自主导航算法

雷小康<sup>1</sup>, 刘明雍<sup>1</sup>, 闫茂德<sup>2</sup>, 李闻白<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2. 长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

**摘要:** 纯粹的反应式导航算法在复杂未知环境下易陷入局部极小, 为此提出一种基于局部子目标和禁忌搜索的自主导航算法. 以当前可视区域内障碍物的关键角点为搜索邻域, 利用禁忌搜索算法执行优化操作生成当前子目标, 进而采用反应式导航算法对其进行跟踪, 最终通过子目标的动态切换引导机器人驶达目标位置. 算法可有效克服局部极小, 显著提高机器人在复杂环境下的自主性. 理论分析和仿真实验验证了算法的可行性和有效性.

**关键词:** 移动机器人; 禁忌搜索; 自主导航; 子目标

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

## Tabu search based autonomous navigation algorithm for mobile robot

LEI Xiao-kang<sup>1</sup>, LIU Ming-yong<sup>1</sup>, YAN Mao-de<sup>2</sup>, LI Wen-bai<sup>1</sup>

(1. College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China. Correspondent: LEI Xiao-kang, E-mail: ray\_com@163.com)

**Abstract:** In complex environments, the sole reactive navigation algorithm is easily to be trapped in a loop, which is called the local minima problem. Therefore, an autonomous navigation algorithm based on sub-goal and tabu search algorithm is presented. Aiming at the critical vertex in the visible area as searching neighborhood, the optimization sub-goal is obtained by using the tabu search algorithm. Then the mobile robot tracks the sub-goal by means of reactive navigation and finally reaches the goal by updating the sub-goal positions gradually. The algorithm can overcome the local minima obviously and enhance the navigation ability of the robot in complex environments. Theory analysis and simulation results show the effectiveness and feasibility of the algorithm.

**Key words:** mobile robot; tabu search; autonomous navigation; sub-goal

### 1 引言

未知环境下移动机器人的既定目标导航是一个颇具挑战性的课题, 它要求机器人在无任何先验环境知识的情况下, 仅根据传感器获取的局部环境信息, 完全自主地由起始位置运行到目标位置. 大量研究表明, 基于“感知→动作”直接映射的反应式导航是解决该问题的有效方法, 已提出的典型方法包括人工势场法、模糊逻辑法和神经网络法等<sup>[1]</sup>. 反应式导航方法实现简单, 实时性好, 对环境变化适应能力较强, 但其侧重于避障, 未能充分利用局部信息进行路径优化, 机器人运动迂回较多, 难于在复杂环境下应用.

引入局部子目标被证明是一种有效的改进方法<sup>[2-5]</sup>. 文献[2]采用子目标选择算法和动态操纵控制算法实现了机器人的避撞导航. [3]以启发式方法滚

动生成优化子目标来使机器人提前避开障碍物, 减少了不必要的避障运动. [4]采用分层模糊控制生成子目标进行运动规划, 实现了未知环境下的自主导航. [5]提出的子目标搜索方法提高了反应式导航应对复杂未知环境的能力. 基于子目标的反应式导航具有灵活、高效的特点, 但在U型和类迷宫环境中机器人会陷入死循环, 即存在局部极小问题<sup>[6-7]</sup>.

局部极小问题是由于机器人缺少全局环境信息而引起的极端重复搜索, 可通过引入记忆功能识别已经搜索过的环境加以解决<sup>[7]</sup>. 比如, 文献[7]通过时空感知序列进行环境的分类识别. [6]采用包含环境信息和机器人经验信息的记忆栅格加以解决. 禁忌搜索算法(TS)是一种内嵌有自适应记忆结构的智能启发式优化算法, 能有效克服重复搜索<sup>[8-9]</sup>. [10]首次将其

收稿日期: 2010-06-11; 修回日期: 2010-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979093); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0877).

作者简介: 雷小康(1982-), 男, 博士生, 从事移动机器人自主导航的研究; 刘明雍(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 从事导航、制导与控制等研究.

用于路径规划,取得了较好的效果。

本文提出一种移动机器人的禁忌搜索自主导航算法(AN-TS),该算法利用禁忌搜索完成子目标择优,采用反应式方法跟踪子目标来实现自主导航,可有效克服局部极小,提高机器人在复杂环境下的自主性。理论分析和仿真实验验证了算法的可行性和有效性。

## 2 问题描述与预备知识

### 2.1 问题描述

如图1所示,考虑一个模型化为质点的移动机器人 $\mathcal{A}$ ,其运行区域 $\mathcal{W} \subset \mathbf{R}^2$ 为凸多边形,在 $\mathcal{W}$ 内建立全局参考坐标系,则 $\forall q \in \mathcal{W}$ 可唯一表示为 $q(x, y)$ 。 $\mathcal{W}$ 内部分布着有限多个静态障碍物 $O_i \subseteq \mathcal{W}(i \in \mathbf{N})$ , $O_i$ 为简单多边形,其角点的集合为 $\mathcal{G}_j = \{g_j \mid j = 3, \dots, m\}$ 。导航任务起点 $p_{\text{init}}$ 和目标 $p_{\text{goal}}$ 坐标已知。

将任一时刻 $t$ , $\mathcal{A}$ 的位姿记为 $p_t(x_t, y_t, \theta_t)$ ,其中 $(x_t, y_t)$ 为全局坐标, $\theta_t$ 为当前航向。 $\mathcal{A}$ 可感知半径 $r > 0$ 内障碍物的距离信息,当传感器视场为 $\text{fov} \in (0, 2\pi]$ 时,可视域 $\mathcal{V}_t = \{q(x, y) \mid \forall q \in \mathcal{W}, q \notin O_i, \text{dist}(q, p_t) \leq r, \text{deg}(p_t, q) \leq \text{fov}/2\}$ 。其中: $\text{dist}(q, p_t)$ 表示两点间的欧氏距离, $\text{deg}(p_t, q)$ 表示机器人当前航向与向量 $\overrightarrow{p_t q}$ 间的夹角。假设 $\mathcal{A}$ 进行信息处理的时间开销较其控制系统的更新周期 $\tau_{\text{rob}}$ 甚小,可忽略不计。

**定义1(关键角点)**  $\forall g \in \bigcup_{i=1}^n \mathcal{G}_i, g \in \mathcal{V}_t$ ,称 $g$ 为可视角点,记为 $g^v$ ,集合为 $\mathcal{G}_t^v$ 。 $\mathcal{V}_t$ 内障碍物边界的不连续点称为断点,集合为 $\mathcal{B}_t$ 。 $\forall g \in \mathcal{G}_t^v, g \in \mathcal{B}_t$ 称为关键角点,记为 $g^c$ ,集合称为关键角点集 $\mathcal{G}_t^c = \mathcal{G}_t^v \cap \mathcal{B}_t$ ,显然 $\mathcal{G}_t^c \subseteq \mathcal{G}_t^v$ 。定义 $g^c$ 的属性为 $g^c(x, y, h)$ ,其中 $(x, y)$ 为全局坐标, $h \in \{\text{right}, \text{left}, \text{null}\}$ 表示与 $g^c$ 对应的不可视区域的相对位置。定义 $\text{hint}(g^c)$ 为 $h$ 属性判断函数。由图1可知, $\mathcal{G}_t^v = \{g_1^c, g_2^v, g_3^c, g_4^c\}, \mathcal{G}_t^c = \{g_1^c, g_3^c, g_4^c\}, \text{hint}(g_1^c) = \text{left}, \text{hint}(g_2^v) = \text{null}, \text{hint}(g_3^c) = \text{right}$ 。

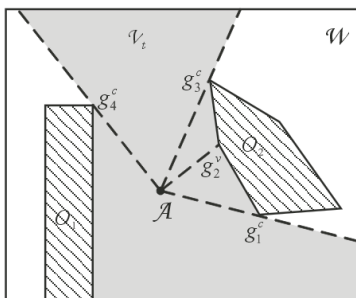


图1 可视域、可视角点和关键角点示意图

### 2.2 禁忌搜索算法

禁忌搜索算法模拟了人类的思维过程,即人对已搜索过的地方短期内不会再去搜索,若在其他地方未搜索到目标,可再去已搜索过的区域寻找。其搜索过

程可概要描述如下<sup>[8-9]</sup>:

设有可行解集 $\mathcal{X}$ ,定义移动(Move)为将可行解 $x_1 \in \mathcal{X}$ 变换为另一可行解 $x_2 \in \mathcal{X}$ 的操作或函数,记为 $x_2 = \text{move}(x_1)$ 。对任意解 $x \in \mathcal{X}$ 做的所有可行move产生的解集称为邻域 $N(x) \in \mathcal{X}$ ,即 $N(x) = \{x' \mid x' = \text{move}(x), x' \in \mathcal{X}\}$ 。禁忌搜索从一个初始可行解 $x_0$ 开始,在每一步迭代中,依据评价函数选择 $N(x)$ 中最优的解 $x_{\text{best}}$ 作为下一步迭代的初值。为避免仅得到局部最优解,算法中引入禁忌表 $\mathcal{T}_l$ 来记录已经进行的优化操作,以指导下一步搜索。 $\mathcal{T}_l$ 通常定义为长度为 $l \in \mathbf{N}$ 的定长或变长队列,其中保存了最近 $l$ 次迭代中已实现的move。 $\forall \text{move} \in \mathcal{T}_l$ ,在当前迭代中将被禁止,以防止算法陷入循环,帮助算法摆脱局部最优解;同时,为了保证搜索的多样性,禁忌搜索还引入特赦机制来解禁某些已执行过的优化操作。

以上仅是禁忌搜索的基本算法框架,在求解具体问题,需要依据问题的描述模型对移动、邻域、禁忌对象与禁忌表、评价函数和特赦准则等关键操作进行针对性设计,并据此设计具体的禁忌搜索算法。

## 3 基于禁忌搜索的自主导航算法

### 3.1 算法设计

针对未知环境下移动机器人自主导航任务的特点,进行如下算法设计:

1) 迭代周期。设禁忌搜索算法的迭代周期 $\tau_{ts}$ 为机器人控制系统更新周期 $\tau_{\text{rob}}$ 的整数倍,即 $\tau_{ts} = k\tau_{\text{rob}}, k \gg 1$ 。

2) 移动。 $\forall q \in \mathcal{V}_t$ , $\mathcal{A}$ 向 $q$ 运动一个周期 $\tau_{ts}$ ,即 $\mathcal{A}$ 在 $\tau_{ts}$ 内跟踪子目标 $q$ 。当 $q = p_{\text{goal}}$ 时, $\mathcal{A}$ 直接驶至终点。

3) 邻域。设 $\mathcal{A}$ 位于 $p_t$ 时的搜索邻域 $N(p_t)$ 为当前视场 $\mathcal{V}_t$ 内的所有关键角点,即 $N(p_t) = \mathcal{G}_t^c$ 。若 $p_{\text{goal}} \in \mathcal{V}_t$ ,则令 $N(p_t) = p_{\text{goal}}$ 。

4) 禁忌对象与禁忌表。禁忌表 $\mathcal{T}_l$ 定义为长度为 $l$ 的定长队列(First in, First out),禁忌对象 $\mathcal{A}$ 为已经探测过的关键角点的属性信息。 $\mathcal{T}_l$ 在 $\mathcal{A}$ 的运动过程中动态更新。 $\forall g^c \in \mathcal{G}_t^c$ ,判断规则为:

① 若 $g^c$ 的 $h$ 属性发生变化,即 $\text{hint}(g^c)$ 由right变为null或left,或 $\text{hint}(g^c)$ 由left变为null或right,则将 $g^c$ 加入 $\mathcal{T}_l$ ,记为 $\mathcal{T}_l \oplus g^c$ ;

② 若 $\mathcal{A}$ 与 $g^c$ 的间距小于阈值 $\varepsilon$ ,即 $\text{dist}(p_t, g^c) < \varepsilon$ ,则 $\mathcal{T}_l \oplus g^c$ 。

5) 评价函数。 $\forall g^c \in \mathcal{G}_t^c$ ,采用启发式函数 $\text{cost}(g^c)$ 进行量化,衡量通过 $g^c$ 规划出较短路径的可能程度,其值越小则可能性越大,否则相反。 $\text{cost}(g^c)$ 的定义为

$$\text{cost}(g^c) = \alpha \cdot \text{dist}(p_t, g^c) + \beta \cdot \text{dist}(p_{\text{goal}}, g^c),$$

其中  $\alpha, \beta \in [0, 1]$  为加权系数, 取值不同可影响  $\mathcal{A}$  的决策<sup>[10]</sup>. 当运行于结构化环境时宜取  $\alpha/\beta \geq 1$ , 非结构化环境时宜取  $\alpha/\beta \leq 1$ , 本文令  $\alpha = \beta$ .

6) 特赦准则. 特赦准则是防止某些有价值的键角点被禁忌, 其允许  $\mathcal{A}$  对部分过往区域再次探测, 有助于摆脱“死胡同”. 设需要判断的关键角点为  $g' \in N(p_t)$ , 若  $\forall g^c \in \mathcal{T}_l$ , 即  $N(p_t)$  内所有元素均被禁忌, 则赦免  $g'$ .

### 3.2 算法流程

设  $g^*$  为  $\mathcal{A}$  当前需要跟踪的子目标,  $\text{identify}(\mathcal{V}_t)$  为关键角点识别操作. AN-TS 算法用伪代码可描述如下:

```

Initialization:  $p_t \leftarrow p_{\text{init}}, \mathcal{T}_l \leftarrow \emptyset, g^* \leftarrow \emptyset$ 
while  $p_t \neq p_{\text{goal}}$  do           %主循环
   $\mathcal{G}_t^c \leftarrow \text{identify}(\mathcal{V}_t);$    %识别关键角点
   $N(p_t) \leftarrow \mathcal{G}_t^c;$ 
  while  $N(p_t) \neq \emptyset$  do     %子目标择优
     $g_{\min} \leftarrow \min_{g^c \in N(p_t)} \text{cost}(g^c);$ 
    if  $g_{\min} \in \mathcal{T}_l$  then
      if  $\forall g^c \in N(p_t), g^c \in \mathcal{T}_l$  then
         $g^* \leftarrow g_{\min};$ 
      else
         $N(p_t) \leftarrow N(p_t) \setminus \{g_{\min}\};$ 
      end if
    else
       $g^* \leftarrow g_{\min};$ 
    end if
  end while
   $\text{move}(g^*);$                    %跟踪当前子目标
  for  $\forall g^c \in \mathcal{G}_t^c$  do         %更新禁忌表
    if  $g^c$  满足禁忌规则 then
       $\mathcal{T}_l \oplus g^c;$ 
    end if
  end for
end while

```

### 3.3 收敛性分析

自主导航算法的收敛性是指存在通向目标的可行路径时, 导航算法能引导机器人在有限时间内到达. 理论上, 收敛性可通过完整的环境记忆(地图或路标)予以保证. AN-TS 算法的记忆结构(禁忌表)的存储对象(键角点)实际上是一种自然路标, 因此只要禁忌表的容量足够大, 即可使机器人获得完整的环境记忆, 进而保证 AN-TS 算法收敛. 此外, 对于禁忌搜索算法收敛性的理论分析已证明<sup>[9]</sup>: 若某一类问题的解空间为有限空间, 邻域结构满足对称性和连通性假设, 且禁忌表的大小充分大, 则禁忌搜索算法一定收

敛. 就机器人的自主导航任务而言, 其解空间为可行区域, 显然为有限空间; 同时, 对于可行空间内的任意两点, 机器人均可在有限时间内驶达, 故满足对称性和连通性条件. 因此只要禁忌表足够大, AN-TS 算法的收敛性即可得到保证.

## 4 实验验证

本文以配备 SICK LMS200 激光雷达的移动机器人 Pioneer3-DX 为实验平台进行算法验证. AN-TS 算法采用机器人控制类库 Aria2.2 在 VC++6.0 下编程实现, 环境地图使用 Mapper3 绘制, 实验在 MobileSim 仿真环境下进行.

### 4.1 算法实现

#### 1) 关键角点识别

关键角点识别操作  $\text{identify}(\mathcal{V}_t)$  的实现方法依赖于传感器类型(摄像头、激光雷达等). 对于 LMS200 激光雷达(Laser), 可通过检测相邻测距值的“跳变”来识别关键角点.

设 Laser 扫描数据的存储格式为  $R = \{(\varphi_i, r_i, x_i^G) \mid i = 1, 2, \dots, N_R\}$ , 其中  $\varphi_i$  为脉冲发射角,  $r_i$  为测距值,  $x_i^G$  为扫描点的全局坐标. 检测方法为

$$\text{if } |r_i - r_{i-1}| > \eta, \text{ then } g^c = \begin{cases} x_{i-1}^G, & r_{i-1} \leq r_i; \\ x_i^G, & r_{i-1} > r_i. \end{cases}$$

其中  $\eta$  为检测阈值, 可取固定值<sup>[12]</sup>. 本文采用自适应阈值<sup>[11]</sup>

$$\eta = \hat{\rho}_i \cdot \frac{\sin \Delta\varphi}{\sin(\gamma - \Delta\varphi)} + 3\delta_r,$$

$\gamma \in (0, \pi/2]$  为可接受的最大入射角,  $\delta_r$  为 Laser 的测距误差, 分别取  $\gamma = 0.175$ ,  $\delta_r = 5 \text{ cm}$ . 设 Laser 按逆时针方向进行扫描, 则有

$$\text{hint}(g^c) = \begin{cases} \text{right}, & r_{i-1} \leq r_i; \\ \text{left}, & r_{i-1} > r_i. \end{cases}$$

#### 2) 子目标跟踪控制

$\text{move}(g^*)$  行为需实现两项功能: ① 趋向子目标运动; ② 完成避障. 针对 Pioneer3-DX 移动机器人的运动学特性, 采用分层模糊控制实现该行为, 详细的模糊控制器设计方案请参见文献 [12-13].

### 4.2 实验结果与分析

#### 实验 1 克服局部极小实验.

凹形障碍物是研究克服局部极小问题的典型环境. 创建如图 2 所示的 3 种地图进行实验, 其中图 2(c) 的递归 U 型障碍物较难克服. 实验中, 机器人通过子目标(如\*所示, 亦是禁忌角点)的引导均抵达了目标.

类迷宫环境是容易出现局部极小的另一种典型环境. 创建如图 3 所示的地图, 从实验结果可看出, AN-TS 算法引导机器人成功地摆脱局部极小到达了

目标点. 图3(a)中,机器人在a1, a3, a5, a6四个子目标的引导下驶入了“死胡同”,此时识别出的两个关键角点a5, a6均被禁忌,由于赦免准则生效,机器人选择a6为子目标进行跟踪;待驶出局部极小区域后,子目标切换为b1(图3(b));图3(c)中子目标切换为c1;图3(d)给出了机器人最终的运行轨迹,导航过程中子目标的切换顺序为:d1, d2, d3, d4, d3, d5, d6, d7, d8, d9, d10.

该组实验说明 AN-TS 算法能有效克服局部极小问题.

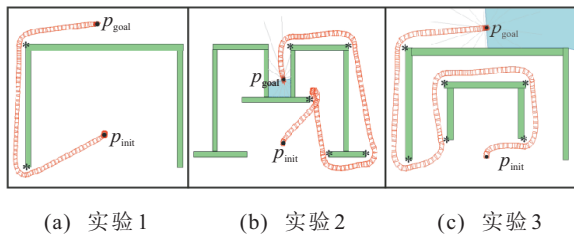


图2 简单和递归U型障碍物实验

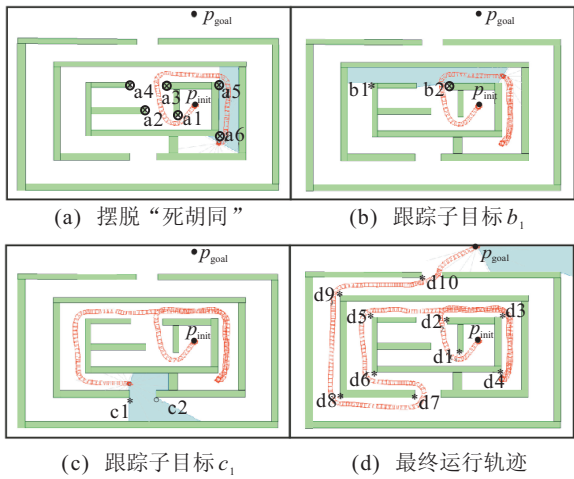


图3 类迷宫环境下的自主导航实验

实验2 复杂环境实验.

创建如图4所示的5种地图测试 AN-TS 算法在复杂环境下的导航性能,地图中包含多处凹形区域和狭窄通道.从实验结果可看出,机器人顺利通过了狭窄通道并摆脱凹形区域抵达了目标.导航过程中,机器人动作连续、稳定,最终的运动路径平滑,未出现过多迂回,说明 AN-TS 算法对各种复杂环境具有良好的适应性.

实验3 性能对比实验.

本组实验比较模糊逻辑法<sup>[13]</sup>、最短切线法<sup>[14]</sup>和本文 AN-TS 算法( $l = 10, \alpha = \beta = 1$ )的性能.机器人运行环境如图5所示,地图中障碍物随机分布,起点与目标间直线距离为10m.

从图5的运动轨迹和表1的统计数据可看出, AN-TS 算法的导航效果明显优于其他两种算法.实验

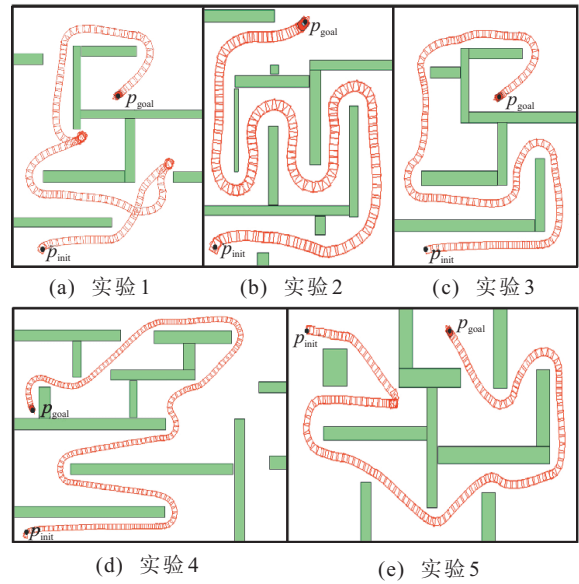


图4 复杂环境下的自主导航实验

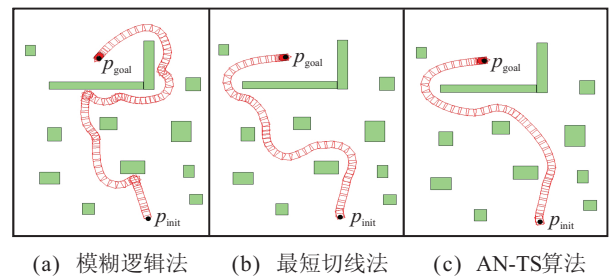


图5 模糊逻辑法、最短切线法和本文算法的对比实验结果

表1 图5对比实验的统计数据

导航算法	统计数据			
	路径长度/cm	总计转角/deg	平均速度/cm/s	运行周期/次
① 模糊逻辑法	2215	889	42.6	398
② 最短切线法	1747	567	52.6	258
③ AN-TS算法	1647	316	54.2	236

1中机器人运动迂回较多,路径较实验3长34%,总计转角多181%,平均速度慢21%.实验2引入子目标优化了路径,但基于最短切线的子目标选择策略效果不够理想,路径较实验3长6%,总计转角多79%,平均速度慢3%.可见 AN-TS 算法在减少运动迂回、提高导航的有效性方面具有优势.

5 结论

反应式导航算法很难单独完成复杂未知环境下的既定目标导航,存在运动迂回多和局部极小问题.鉴于此,通过引入局部子目标,提出了一种基于禁忌搜索的自主导航算法.该算法模拟人的寻路行为,通过禁忌搜索实现了局部感知信息的高效利用,能有效缩短运动路径,显著提高机器人对复杂环境的适应能力.3组不同条件下的实验验证了本文算法的有效性.本文的主要贡献在于:1)提出的 AN-TS 算法利用禁

忌搜索实现了当前感知信息和历史经验信息的有效融合,使得子目标的选择更加智能. AN-TS算法同时具有通用性,可依据需求与不同的反应式方法结合,完成未知(或已知)环境下的既定目标导航任务. 2) 引入了新的关键角点描述属性并据此设计了禁忌准则和特赦准则,与文献[10]相比,新准则更具启发性,可提高克服局部极小的效率. 如何将AN-TS算法应用于存在动态障碍物的未知环境将是下一步研究的重点.

### 参考文献(References)

- [1] Lavalle S M. Planning algorithms[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [2] Krogh B H, Feng D. Dynamic generation of subgoals for autonomous mobile robots using local feedback information[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1989, 34(5): 483-493.
- [3] Zhang C G, Xi Y G. Robot rolling path planning based on locally detected information[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 38-44.
- [4] Yang X, Moallem M, Patealn R V. A layered goal-oriented fuzzy motion planning strategy for mobile robot navigation[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 2005, 35(6): 1214-1224.
- [5] Ye C, Webb P. A sub-goal seeking approach for reactive navigation in complex unknown environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(9): 877-888.
- [6] Wang M, Liu J N K. Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment with dead ends[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(7): 625-643.
- [7] Krishna K M, Kalra P K. Solving the local minima problem for a mobile robot by classification of spatio-temporal sensory sequences[J]. J of Robotic Systems, 2000, 17(10): 549-564.
- [8] Glover F. Tabu search: A tutorial[J]. Special Issue on the Practice of Mathematical Programming Interfaces, 1990, 20(1): 74-94.
- [9] Hanafi S. On the convergence of tabu search[J]. J of Heuristics, 2001, 7(1): 1381-1231.
- [10] Masehian E, Amin-Naseri M R. Sensor-based robot motion planning — A tabu search approach[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2008, 15(2): 48-57.
- [11] Nunez P, Vazquez-Martin R, del Toroa J C, et al. Natural landmark extraction for mobile robot navigation based on an adaptive curvature estimation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(3): 247-264.
- [12] 张鑫, 闫茂德, 刘玉东, 等. 未知环境下基于禁忌搜索的机器人自主导航[C]. 第29届中国控制会议论文集. 北京, 2010: 3625-3630.  
(Zhang X, Yan M D, Liu Y D, et al. Autonomous navigation for mobile robot based on tabu search in unknown environment[C]. Proc of the 29th Chinese Control Conf. Beijing, 2010: 3625-3630.)
- [13] 李保国, 宗光华. 未知环境中机器人实时导航与避障的分层模糊控制[J]. 机器人, 2005, 27(6): 481-485.  
(Li B G, Zhong G H. A hierarchical fuzzy controller for real-time mobile robot navigation in unknown environments[J]. Robot, 2005, 27(6): 481-485.)
- [14] 江贵龙, 李晓明, 刘全浩, 等. 不确定环境下基于动态子目标搜索的机器人导航算法及其实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4248-4252.  
(Jiang G L, Li X M, Liu Q H, et al. Implementation of algorithms for mobile robot navigation based on dynamic sub-goal seeking in unknown environments[J]. J of System Simulation, 2007, 19(18): 4248-4252.)

(上接第1309页)

- [8] Haisheng Yua, Amy Z Zeng, Lindu Zhao. Single or dual sourcing: decision-making in the presence of supply chain disruption risks[J]. The Int J of Management Science, 2009, 37(4): 788-800.
- [9] Brian T. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks[J]. Management Science, 2006, 52(5): 639-657.
- [10] Brian T. Impact of supply learning when suppliers are unreliable[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2009, 11(2): 192-209.
- [11] Maqbool D, Nicholas C P, Leroy B S. A newsvendor's pro-curement problem when suppliers are unreliable[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2007, 9(1): 9-32.
- [12] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.  
(Li S Y. Fuzzy control neural network control and intelligent control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996.)