

基于地图建立的无人地面车路径规划

张之瑶

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,北京 100191

摘要 提出一种同时完成地图建立与路径规划的算法。该算法为两层控制结构,其上层实现子目标点的生成,下层完成局部路径规划及运动控制。根据系统实时性的要求,以 N 个系统周期为触发条件执行子目标点生成程序。其中无人地面车通过传感器不断获取环境信息并进行处理,完成网格占据方式的地图建立与实时更新;将地图建立的结果作为数据输入,利用 A* 路径规划算法生成子目标点。根据子目标点生成结果,在每个系统周期内,通过基于模糊控制的底层快速算法完成无人地面车到子目标点的运动控制。以 Pioneer 3-AT 型无人地面车为试验平台在未知的复杂环境中对该算法进行验证,取得了良好的地图建立和路径规划效果,证明了该算法具有良好的实时性和准确性。

关键词 地图建立; A* 算法; 模糊控制; 路径规划; 运动控制; 无人地面车

中图分类号 TP24

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)21-0052-07

Path Planning for Unmanned Ground Vehicle Based on Map Building

ZHANG Zhiyao

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract This paper puts forward a two-layered path planning algorithm to be used for map building and path planning at the same time. The function of the upper layer is to create sub-goals, and the lower layer is to plan local routes. Based on the system real-time demand, the task of creating sub-goals is carried out at intervals of N system cycles. But at every system cycle, the algorithms of planning the local routes and motion controls are all carried on for the safety of system. The map building algorithm makes use of the information acquired by the Unmanned Ground Vehicle (UGV) and the environment information is processed by sonar, which is combined into the local map, to generate and renew grid-occupation based map. Based on the map, the A-star algorithm creates sub-goals and plans the route which makes the assessment function reach a minimum. At every system cycle, the "following-wall" strategy based on fuzzy control is implemented to avoid obstacles due to sub-goals. In this paper, the strategy is divided into the left following-wall and the right following-wall to decide which boundary of the obstacle to follow using the information from sonar synchronously. The algorithm is verified on Pioneer 3-AT UGV in an unknown and complicated environment. It is shown that the system can achieve practical map building and path planning with a good accuracy. The system supported in this paper is easy to extend and re-structure and to be transplanted to other systems.

Keywords map building; A-Star algorithm; fuzzy control; path planning; motion control; unmanned ground vehicle

0 引言

无人地面车作为信息化战场中一种极具前景的新型武器,必将成为未来战争中不可忽视的重要力量。地图建立与路径规划作为其两大重要研究方向,国内外学者已经分别开展了很多研究。Alberto Elfe 和 Hans P. Moravec^[1]提出了网格占据的地图建立方法,即采用带有概率的棋盘格表示环境信息。John Leonard^[2]利用基于几何信息的地图表示方法完成地图建立,即通过传感器得到周围环境的信息,并将其抽象为

几何图形(如线段、点、圆形等)。R. Toogood^[3]采用遗传算法进行路径规划,构造了一类随机化搜索算法。Min Gyu Park^[4]采用基于人工势场的路径规划方法基本思想,将无人地面车在环境中的运动视为一种虚拟人工受力场中的运动。David M. Bourg^[5]描述了利用 A* 路径规划算法进行路径规划的方法,并给出了实例。本文研究的重点在于实现单个无人地面车同时完成地图建立与路径规划两项任务,即无人地面车在进行路径规划的同时完成地图建立,这也是其完成信息交互、任务

收稿日期:2010-08-26;修回日期:2010-10-20

作者简介:张之瑶,研究方向为控制理论与控制工程,电子信箱:398670807@qq.com

分配、协同作战等任务的基础。

本文采用超声波测距传感器采集数据,利用网格占据方法建立地图。将地图建立分为两个步骤:通过网格表示,将声纳数据转化为局部地图上的占据概率;通过 D-S 数据融合算法,完成全局地图的建立与实时更新。采用 A* 算法,可以完成在已知部分环境信息情况下的路径规划(以若干子目标点的形式输出),其中地图中的未知部分在路径规划中视为没有障碍物的区域。根据 A* 算法产生的第一个子目标点,采用双输入、单输出的模糊控制器,通过直奔目标模态和避障模态的转换完成局部路径规划及运动控制。

1 基于声纳的地图建立

根据声纳传感器的精度,采用网格占据模式建立地图,并利用无人地面车的码盘和电子罗盘完成定位。

1.1 声纳特性

声纳发射声波,并通过测量从发射到接收回波的时间,计算传感器到目标的距离。但声纳具有广角性,且其发射的声波在各个方向上的强度是不一致的。Pioneer 3-AT 型无人地面车上配备的是 Polariod 声纳,其声波发射方向与声波强度的近似关系如下。设 θ 为声波方向与声纳轴向的夹角, $D(\theta)$ 为声波强度(单位: dB),其关系为

$$D(\theta) = 2 \frac{J_1(k\eta \sin\theta)}{k\eta \sin\theta} \quad (1)$$

式中, $J_1(\cdot)$ 为一阶贝塞尔函数; $k=2\pi/l$, l 为声波的波长, $m; l=v/\psi$, v 为空气中的声速, m/s ; ψ 为声纳频率, $\psi=49.410\text{kHz}$; 对于 Polaroid 公司的声纳, $\eta=0.01921$ 。声纳声波发射方向与其强度间的关系见图 1^[6]。

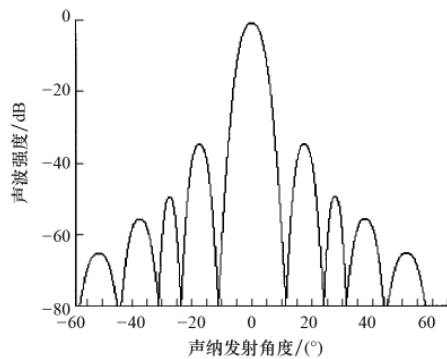


图 1 声纳声波发射方向与其强度的关系
Fig. 1 Relationship between sonar transmit direction and its intensity

声纳发射的声波的强度分布,在角度上具有中心强外弱的特点。实际使用中,仅对其强度较高的区域进行处理,即设定一个声纳传感器的锥角,只研究锥角内的特性。

1.2 地图建立步骤

网格占据方法对于无人地面车是一种高效的地图建立方法。整个地图被划分为 $M \times N$ 的网格,网格单元大小为 $\lambda \times \lambda$ 。引入某个网格的占据概率和空白概率 $m_0(i, j)$ 和 $m_E(i, j)$ 。

传统意义上讲,应有

$$m_0(i, j) + m_E(i, j) = 1 \quad (2)$$

在网格单元属性中引入网格信息“未知性”概念^[7]。即对于某个网格单元除了占据和空白之外,仍有一定的未知信息概率 $m_i(i, j)$ 。这样,就使得

$$m_0(i, j) + m_E(i, j) \leq 1 \quad (3)$$

$$\text{且} \quad m_i(i, j) = 1 - m_0(i, j) - m_E(i, j) \quad (4)$$

在网格占据模式的地图建立中,为了将声纳测距结果、声纳参数以及自身的定位数据转化为网格上信息(网格单元的空白和占据概率),需要建立一种映射关系,这种关系称为“网格表示”。对于多个声纳数据经网格表示得到的地图信息,可通过数据融合算法,完成全局地图的建立。

1.3 网格表示

由于声纳具有广角特性,声纳测距结果并不能直接代表障碍物的位置。但可以通过对多声纳多次探测的数据结果进行融合,减少声纳不确定性带来的影响^[8]。

在二维地图建立中,可以将声纳的探测范围简化成平面内的扇面,如图 2 所示,扇面的中心角为声纳的锥角。在已知声纳测距结果、声纳参数以及其定位信息的情况下,可将这些数据映射为扇面附近位置的“占据”或者“空白”概率。假设某次声纳的测距结果为 $R (R < R_0)$,对于声纳扇面内的部分,即与声纳源距离小于 R 的部分,由于声纳在这个范围未探测到障碍物,应具有空白概率;由于声纳的广角性,无法确定反射声波的障碍物的具体位置,所以与声纳扇面弧距离较近的部分均具有一定的占据概率。

声纳扇面参数极坐标表示如图 3 所示。其中,设 $P=(x, y)$ 为声纳扇面中某点的位置; R 为声纳测距结果, $m; \omega$ 为声纳的锥角, $(^\circ)$; $S=(x_s, y_s)$ 为声纳传感器的位置; ρ 为 P 点到 S 点的距离, m ; θ 为线段 SP 与声纳正向方向之间的夹角, $(^\circ)$ 。

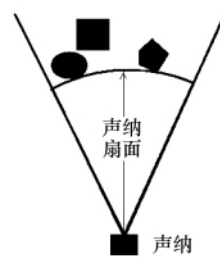


图 2 声纳扇面的建立
Fig. 2 Building of sonar sector

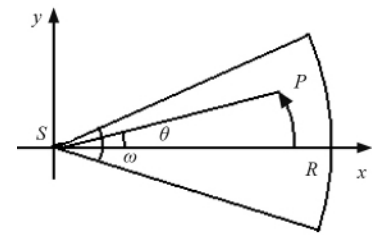


图 3 声纳扇面参数示意图
Fig. 3 Sonar sector's parameters

设声纳某次探测得到的数据为 R ,通过式(5)可以得到网格单元的两个参数 P_E 和 P_0 , 分别代表通过某个声纳数据得到的声纳扇面附近各个位置的空白概率和占据概率分布函数^[9]。有

$$\begin{aligned} P_E(\rho, \theta) &= f_E(\rho, R_{k,i})g(\theta)h(\rho) \\ P_0(\rho, \theta) &= f_0(\rho, R_{k,i})g(\theta)h(\rho) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $f_E(\cdot)$ 和 $f_0(\cdot)$ 为占据、空白概率的轴向分布函数, $g(\cdot)$

为占据、空白概率角度分布函数, $h(\cdot)$ 为阈值函数。其中,

$$f_E(\rho, R) = \begin{cases} k_E & 0 \leq \rho \leq R - \varepsilon \\ k_E \left(\frac{R - \rho}{\varepsilon} \right) & R - \varepsilon \leq \rho < R \\ 0 & \rho > R \end{cases} \quad (6)$$

$$f_O(\rho, R) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \rho \leq R - \varepsilon \\ k_O \left[1 - \left(\frac{R - \rho}{\varepsilon} \right)^2 \right] & R - \varepsilon \leq \rho < R + \varepsilon \\ 0 & \rho > R + \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中的 k_E 和 k_O 为空白和占据函数的最值。 ε 为扇面系数, 该值为声纳扇面确定的弧形长度的 1/2。

$$g(\theta) = \begin{cases} D(\theta) & 0 < |\theta| < \omega/2 \\ 0 & |\theta| > \omega/2 \end{cases} \quad (8)$$

根据图 3, ω 取 25° 。 $D(\theta)$ 为声纳的方向性函数, 有

$$D(\theta) = 2 \frac{J_1(k\eta \sin\theta)}{k\eta \sin\theta} \quad (9)$$

$$h(\rho) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \rho \leq \rho_t \\ 0 & \rho > \rho_t \end{cases} \quad (10)$$

式中 ρ_t 为阈值距离, 在此距离以外的声纳数据被认为是不可靠的。同样, 也可以设置平滑的阈值函数说明数据的可靠性。

1.4 基于 D-S 方法的数据融合

Dempster-Shafer 证据理论 (D-S 证据理论)^[10] 是 Shafer 在 Dempster 提出的上、下概率及其合成规则的基础上建立并逐步发展起来的。D-S 证据理论用取值在单位区间 $[0, 1]$ 中的信任函数与似然函数两个数值组成的区间表示决策者在给定证据下对假设或命题的信念, 并用 Dempster 规则对不同证据产生的信念进行综合。

定义 1 设 Θ 为识别框架, Θ 上的基本置信指派 (Basic Belief Assignment, BBA) 定义为 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 满足条件式:

$$\sum \{m(A) | A \subseteq \Theta\} = 1 \quad m(\phi) = 0 \quad (11)$$

对于任意 $A \subseteq \Theta$, $m(A)$ 称为命题 A 的基本概率指派。

定义 2 设 Θ 为识别框架, Θ 上由基本置信指派函数导出的置信函数 (belief function), 定义为 $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 且

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (12)$$

$Bel(A)$ 为给予命题 A 的全部置信程度, 亦即 A 中全部子集对应的的基本置信值之和。

定理 1 设 Θ 为识别框架, 集函数 $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 是置信函数当且仅当它满足:

- 1) $Bel(\phi) = 0$;
- 2) $Bel(\Theta) = 1$;
- 3) 对任意自然数 $n, A_1, A_2, \dots, A_n \subseteq \Theta$,

$$Bel(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \geq \sum_i Bel(A_i) - \sum_{i > j} Bel(A_i \cap A_j) + \dots + (-1)^n Bel(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \quad (13)$$

定理 2 (Dempster 结合规则) 设 Bel_1 和 Bel_2 是同一识

别框架 Θ 上的两个不同置信函数, 其基本置信指派为 m_1 和 m_2 , 焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_i 和 B_1, B_2, \dots, B_j , 如果

$$\sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) < 1 \quad (14)$$

那么, 函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 对于所有得非空集合 $A \subseteq \Theta$ 满足 $m(\phi) = 0$, 且

$$m(A) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)} = \frac{1}{N} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j) \quad A \neq \phi$$

$$m(A) = 0 \quad A = \phi \quad (15)$$

其中, $N = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) > 0$ (16)

根据 D-S 理论, 可以更详细地论述网格占据理论中某个网格中占据概率与空白概率之和不等于 1 的情况。在网格占据模式的地图中, 网格单元的属性由两个状态表示, 空白和占据。根据 D-S 证据理论, 这里定义识别框架 Θ , 而

$$\Theta = \{O, E\} \quad (17)$$

式中, O 和 E 分别为单元格空白和占据的可能性。 Θ 的全部子集是其幂集:

$$\Lambda = 2^\Theta = \{\phi, O, E, \{O, E\}\} \quad (18)$$

网格中每个单元格的状态, 通过对 Λ 中的元素基本概率指派的方式进行描述。对于在网格中的每个单元格, 有

$$m_{i,j}(\phi) = 0 \quad (19)$$

且

$$\sum_{A \subseteq \Lambda} m_{i,j}(A) = m_{i,j}(\phi) + m_{i,j}(O) + m_{i,j}(E) + m_{i,j}(\{O, E\}) = 1 \quad (20)$$

因为 $m_{i,j}(\phi) = 0$, $m_{i,j}(\{O, E\})$ 与 $m_{i,j}(\{O\})$ 和 $m_{i,j}(\{E\})$ 满足式(20)。实际应用时, 只储存 $m_{i,j}(\{O\})$ 和 $m_{i,j}(\{E\})$ 的值即可。

根据式(20), 可得相应的网格单元数据融合后的基本概率指派为

$$m_M \quad m_S(E) = \frac{m_M(E) m_S(E) + m_M(E) m_S(\{O, E\}) + m_M(\{O, E\}) m_S(E)}{1 - m_M(E) m_S(O) - m_M(O) m_S(E)} \quad (21)$$

以及

$$m_M \quad m_S(O) = \frac{m_M(O) m_S(O) + m_M(O) m_S(\{O, E\}) + m_M(\{O, E\}) m_S(O)}{1 - m_M(E) m_S(O) - m_M(O) m_S(E)} \quad (22)$$

式中下标 S 或 M 分别为声纳探测数据和地图中原有数据。为了简便起见, 没有标注下标 i 和 j 。设 CF 为判决结果, 即

$$CF = m_M(O) - m_M(E) \quad (23)$$

可以通过 CF 值判断该网格单元的最终属性是占据还是空白。

2 子目标点的规划

A* 算法 (A-Star/A*) 是一种高效的全局性路径规划算

法,常见于游戏编程当中。算法的输入是出发点 S , 目标点 T 和障碍区域; 算法的输出是从 S 到 T 的不经障碍区域的最短路径。算法的基本思想是寻找一条路径, 其综合代价为最小^[11]。综合代价函数由两部分组成, 即从出发点 S 到计算点 m 已走过路径的实际代价函数 $g(m)$ 和从计算点 m 到目标点 T 剩余路径将要付出代价的估计值 (启发值) $h(m)$, 代价评估函数可以表示为 $f(m)=g(m)+h(m)$ 。在算法中有两个重要的表, OPEN 表和 CLOSED 表, 分别包含当前尚未遍历的节点和已经被遍历的节点。算法描述如下。

1) 将起点 S 放入 OPEN 表中, 此时 $g=0$, 故 $f=h$, CLOSED 表为空表。

2) 重复以下过程, 直到找到目标点为止。若 OPEN 表为空, 则宣告失败。

3) 选取 OPEN 表中未设置过的具有最小 f 值的节点为最佳节点 BESTNODE, 并把它放入 CLOSED 表。

4) 若 BESTNODE 为一目标节点, 则成功求得一解。

5) 若不是目标节点, 则扩展之, 产生后继节点 SUCCSSOR。

6) 对每个成功的 SUCCSSOR 进行下列过程。

a) 建立从 BESTNODE 返回的指针;

b) 计算 $g(SUC)=g(BES)+g(BES+SUC)$;

c) 如果 SUCCSEN, 则称此节点为 OLD, 并把它填入 BESTNODE 的后继节点表中;

d) 比较新旧节点路径代价, 如果 $g(SUC)<g(OLD)$, 则重新确定 OLD 的父节点为 BESTNODE, 记下较小代价 $g(OLD)$, 并修正 $f(OLD)$ 的值;

e) 若至 OLD 节点的代价较低或相同, 则停止扩展节点;

f) 若 SUCCSSOR 不在 OPEN 表中, 则看其是否在 CLOSED 表中;

g) 若 SUCCSSOR 在 CLOSED 表中, 则转向 b);

h) 若 SUCCSSOR 既不在 OPEN 表又不在 CLOSED 表中, 则放入 OPEN 表中, 并填入 BESTNODE 后裔表, 然后转向 7)。

7) 计算 f 值。

8) GO LOOP。

A* 算法流程图如图 4 所示。

需要注意的是, A* 算法的节点和威胁区域都是以网格坐标表示的, 在 A* 算法之前和之后, 要进行网格坐标和客观世界坐标的转换。

3 底层控制的实现

3.1 模态设计和转换

将无人地面车的运动分为以下 2 种模态^[12]:

模态 I 直奔目标。即无人地面车向着目标点笔直前进;

模态 II 避障。即无人地面车应用模糊控制算法实现沿障碍物边界运动, 保证与障碍物不发生碰撞。

两模态之间的转换条件如下:

1) 无人地面车按照模态 I 运动, 并不断探测前方环境, 若发现与前方障碍物的距离小于某一阈值, 则认为发现障碍

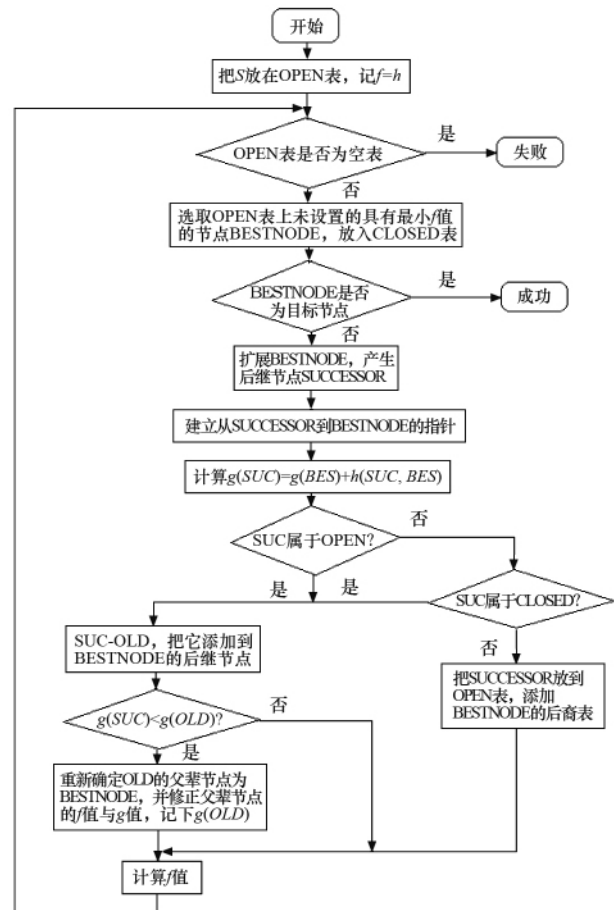


图 4 A* 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of A-star algorithm

物, 无人地面车进入模态 II;

2) 无人地面车按照模态 II 运动, 当满足一定条件时, 便转回模态 I。

本文采用下述的策略: 假设无人地面车在模态 I 状态下运动时, 发现前方有一障碍物, 那么无人地面车的当前运动方向必与障碍物相交, 如图 5 所示。图 5 中, H 点为模态 I 进入模态 II 的转换点, 称为进入点, 即在该点处无人地面车距离障碍物小于设定阈值; L 点为模态 II 进入模态 I 的转换点, 称作逃离点, 即无人地面车绕过障碍物回到原来的运动路径上。

为了使规划的局部路径尽量优化, 在无人地面车达到 H 点时, 让无人地面车沿到达目标点距离较小的障碍物一侧边界运动。设环境为一般情况, 为了描述方便, 在无人地面车上建立一个极坐标系 Σ , 其极轴与无人地面车的当前方向一致。无人地面车传感系统排布状况如图 6 所示, 因此以极轴为中心, 无人地面车的传感系统被分割成左右两个部分: 左半部分传感器为 4、5、6、7 号; 右半部分传感器为 0、1、2、3 号。将这 8 个传感系统分成 4 组: 0、7 号, 1、6 号, 2、5 号和 3、4 号。

将障碍物边界跟踪行为分为左边界跟踪和右边界跟踪, 即 follow-left 和 follow-right。无人地面车在向目标点运动的同时不断探测前方的环境, 通过传感系统可以获取周围环境信息的探测值, 当无人地面车发现障碍物时, 通过比较其传

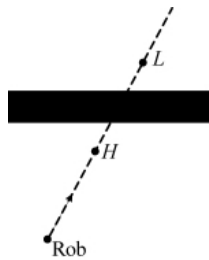


图5 无人地面车模式转换示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mode transition for UGV

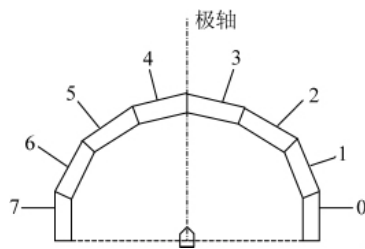


图6 极坐标系中传感系统分布

Fig. 6 Sensor collocation in polar coordinate

传感器的探测值确定无人地面车的行为。

假设障碍物为任意形状, 令无人地面车的 8 个传感系统中探测到障碍物的传感系统返回值为 1, 没有探测到障碍物的传感系统返回值为 0, 通过如下比较算法可以确定无人地面车的未来行为应为 follow-left 或 follow-right。具体算法如下。

比较 0 号和 7 号传感器的返回值:

- 1) 若 0 号返回值为 1, 7 号返回值为 0, 则说明障碍物在无人地面车的右侧, 那么选择行为 follow-right;
- 2) 若 0 号返回值为 0, 7 号返回值为 1, 则说明障碍物在无人地面车的左侧, 那么选择行为 follow-left;
- 3) 若两个传感器返回值均为 0, 则比较下一组传感器 1 号和 6 号的返回值, 判断方法相同。

依上述方法类推, 可以对 1、6 号, 2、5 号及 3、4 号传感器进行比较, 直至判断出其行为类型。如图 7 中的示例, O_{bi} 为无人地面车在向子目标点运动过程中遇到的任一障碍物, 无人地面车选择 follow-left 行为跟踪障碍物边界。

3.2 模糊控制算法的实现

根据无人地面车的实际工作情况, 本文做以下约定^[13-14]。

- 1) 无人地面车的传感器系统如图 6 所示。任意时刻无人地面车只能探测到以自己当前位置为中心, r 为半径区域 W 内的环境信息, 其探测边界为 ∂W , 如图 8 所示, 无人地面车当前方向为图中箭头方向, 并以 $\varphi(P_R(t))$ 表示。

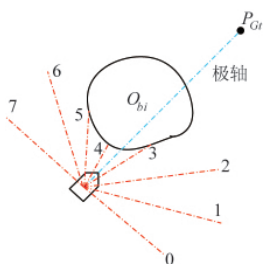


图7 障碍物边界跟踪行为的判断
Fig. 7 Judgment of following obstacle boundary

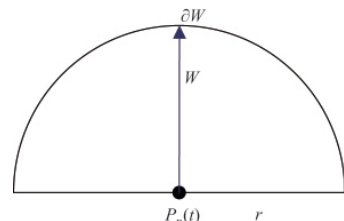
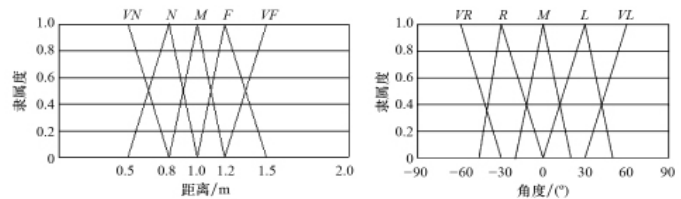


图8 无人地面车探测范围示意图
Fig. 8 Detection range of UGV

2) 无人地面车通过定位系统, 可以获知自己当前位置在工作区域 WS 内的坐标和目标点坐标。

3) t 时刻, $\forall p \in W(t), p \notin O_i (i=1, 2, \dots, m)$, 则称 p 为 t 时刻可行点, 所有 t 时刻可行点的集合称为 t 时刻可行域, 记为 $FD(t)$; $\forall p \in W(t), p \in O_i (i=1, 2, \dots, m)$, 则称 p 为 t 时刻障碍点, t 时刻所有障碍点集合称为 t 时刻障碍域, 记为 $NFD(t)$ 。

本文采用双输入、单输出的模糊控制器^[15]。两个输入分别是无人地面车与障碍物的距离和无人地面车与障碍物边界的相对角度。设无人地面车与障碍物距离的模糊变量语言集合为{很近, 近, 中, 远, 很远}, 其相应的语言变量分别记作: VN, N, M, F, VF 。设无人地面车与障碍物边界相对角度的模糊变量语言集合为{很右, 右, 中, 左, 很左}, 其相应的语言变量分别记为: VR, R, M, L, VL 。距离参数和角度参数的隶属函数分别如图 9 所示。



(a) 距离隶属函数 (b) 角度隶属函数
(a) Distance subject function (b) Angle subject function

图9 隶属函数

Fig. 9 Subject functions

模糊控制器的输出是无人地面车的动作, 即无人地面车旋转或者前进, 输出的模糊语言集合为{右转, 稍微右转, 前进, 稍微左转, 左转}, 其相应的语言变量记作: TR, TRL, GA, TLL, TL , 输出参数的隶属函数如图 10 所示。

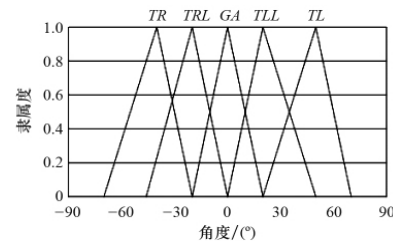


图10 输出隶属函数

Fig. 10 Output function

表 1 给出无人地面车跟踪左侧障碍物边界时的控制规则。同理, 可推出跟踪右侧障碍物边界的控制规则。

由控制规则表得到的输出经非模糊化转换成精确量便可用于控制被控对象。本文采用最大隶属度法。

3.3 局部路径规划算法

步骤 1 朝子目标点笔直行走, 直至以下任一情况发生:

- 1) 子目标点达到, 当前规划结束;
- 2) 遇到障碍物, 距离障碍物边界 1m 时, 转至步骤 2。

步骤 2 沿到达子目标点距离较小的障碍物一侧边界行走, 直至以下任一情况发生:

表 1 输出参数 U 的模糊控制规则 (障碍物在机器人左侧)

Table 1 Fuzzy control rules of output parameter U (the wall is on robot's left)

无人地面车与障碍物边界的相对角度 W_r	无人地面车与障碍物的距离 S_r				
	VN (很近)	N (近)	M (中)	F (远)	VF (很远)
VR (很右)	GA (前进)	TLL (稍微左转)	TL (左转)	TL (左转)	TL (左转)
R (右)	GA (前进)	GA (前进)	TLL (稍微左转)	TL (左转)	TL (左转)
M (中)	TRL (稍微右转)	TRL (稍微右转)	GA (前进)	TLL (稍微左转)	TL (左转)
L (左)	TRL (稍微右转)	TRL (稍微右转)	TRL (稍微右转)	GA (前进)	GA (前进)
VL (很左)	TR (右转)	TR (右转)	TR (右转)	TRL (稍微右转)	GA (前进)

- 1) 达到当前规划边界,当前规划结束;
- 2) 绕过障碍物,并朝着子目标点笔直行走而不会碰到该障碍物,转步骤 1。

4 试验结果与分析

4.1 试验硬件平台

本实验采用 MobileRobots 公司的 Pioneer 3-AT 型无人地面车,该无人地面车安装 2 个声纳环,每个环 8 个声纳。声纳阵列可以为无人地面车提供 360°无缝探测,并提供障碍物的位置信息。Pioneer3-AT 载有基于 PC104 扩展总线支持的工控机。该工控机将为无人地面车的数据采集、处理、指令执行提供支持。无人地面车通过里程计测量车轮转动,间接计算无人地面车当前位置。罗盘可修正里程计的定位误差。

4.2 试验结果与分析

本文采用的试验环境如图 11 所示,为含有复杂障碍物的房间。设定路径规划的起点为该房间的右上角,在图 11(a)中以红色的“x”表示;终点为该房间的出口,在图 11(b)中以红色的“O”表示。

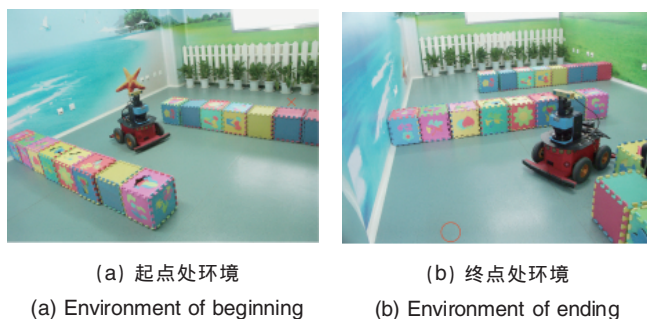


图 11 无人地面车试验环境
Fig. 11 Experiment environment of mobile robot

为了方便对试验结果进行分析,本程序在第 200、400、600、800、1000、1200 个循环周期中将地图建立的结果和 A* 算法规划的路径保存在 dat 文件中。利用 Matlab 对数据进行绘图、叠加,可得如图 12 所示结果。图中,黑色区域为地图建立中被障碍物占据的部分,白色区域为无障碍物部分,灰色区域为未知部分。红色曲线为 A* 算法的路径规划结果。

除此之外,在试验程序的每个执行周期中,采用模糊控

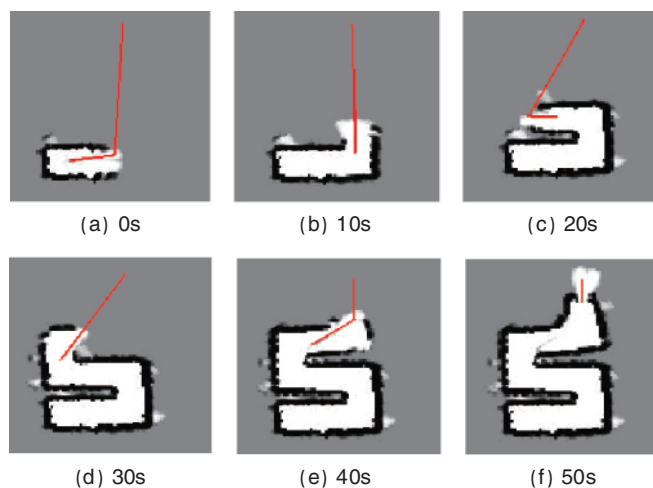


图 12 若干时间点上 A* 算法路径规划和地图建立结果
Fig. 12 Result of A-star path planning and map building at some time stamps

制算法进行局部路径规划并完成无人地面车的运动控制,将其运动结果记录在 dat 文件中,利用 Matlab 将其运动路径和地图建立的最终结果叠加,可得无人地面车在图 11 所示环境中路径规划和最终运动结果,如图 13 所示。

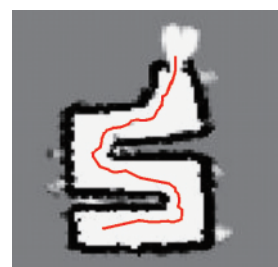


图 13 无人地面车运动路径和地图建立最终结果
Fig. 13 Ultimate result of movement and map building for UGV

5 结论

未知环境下,无人地面车的地图建立与路径规划是智能体自主控制领域的重要研究内容。本文提出了一种同时完成地图建立与路径规划任务的算法。通过在真实复杂环境中的试验,验证了该算法具有良好的实时性和实用性。

该算法可用于军事、工业生产、车辆自主控制等多个领域。无人地面车搭载任务设备可成为多功能的无人作战平台,用于完成侦查、扫雷、排爆、攻击等多种任务。该系统模块化的结构便于系统扩展与重构,在不同的系统中具有很强的可移植性。随着技术的进步,该系统在各个领域中必将得到更加广泛的应用。

参考文献 (References)

- [1] Elfes A. Sonar-based real-world mapping and navigation [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(3): 249-265.
- [2] Leonard J, Durrant-Whyte H, Cox I J. Dynamic map building for an autonomous mobile robot [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1992, 11(4): 286-298.
- [3] Toogood R, Hao H, Wong C. Robot path planning using genetic algorithms [C]/IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Intelligent System for the 21st Century, Edmonton: Alberta Univ, 1995: 489-494.
- [4] Park M G, Lee M C. Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept[C]/Proc of the 2003 IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Korea: Pusan Nat Univ, 2003: 735-740.
- [5] Nilsson N J. Principles of artificial intelligence [M]. New York: Tioga Publishing Co, 1980.
- [6] Moravec H P, Elfes A. High resolution maps from wide angle sonar[R]. Pittsburgh, PA: The Robotics Institute Carnegie-Mellon University, 1985.
- [7] 弋英民, 刘丁. 动态环境下基于路径规划的机器人同步定位与地图构建[J]. *机器人*, 2002, 32(1): 83-90.
Yi Yingmin, Liu Ding. *Robot*, 2002, 32(1): 83-90.
- [8] 连晓峰, 窦丽华, 陈杰. 基于概率模型的 2 维全局地图建立方法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(2): 98-100, 108.
Lian Xiaofeng, Dou Lihua, Chen Jie. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(2): 98-100, 108.
- [9] 郑宏, 王景川, 陈卫东. 基于地图的移动机器人自定位与导航系统[J]. *机器人*, 2007, 29(4): 397-402.
Zheng Hong, Wang Jingchuan, Chen Weidong. *Robot*, 2007, 29(4): 397-402.
- [10] 孟伟. 基于多传感器融合的机器人自主导航研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005
Meng Wei. The research on autonomous navigation for mobile robot based on multi-sensor fused[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [11] Laumond J P, Jacobs P E. A motion planner for nonholonomic mobile robots [J]. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1994, 10(5): 577-593.
- [12] Zhang C G, Xi Y G. Robot path planning in globally unknown environments based on rolling windows [J]. *Science in China*, 2001, 44(2): 131-139.
- [13] Zhang C G, Xi Y G. Robot rolling path planning based on locally detected information[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(1): 38-44.
- [14] 陈卫东, 李宝霞, 朱奇光. 模糊控制在移动机器人路径规划中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(31): 221-223.
Chen Weidong, Li Baoxia, Zhu Qiguang. *Computer Engineering and Application*, 2009, 45(31): 221-223.
- [15] 张卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
Zhang Weiguo, Yang Xiangzhong. The theory and application of fuzzy control[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2000.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



“第十六届木材、纤维、制浆化学国际会议”征文

中国造纸学会将于 2011 年 6 月 8—10 日在天津市召开“第十六届木材、纤维、制浆化学国际会议”。征文全文截止时间: 2011 年 1 月 31 日。

征文内容:(1) Chemistry of wood and non-wood species;(2) Chemistry and structure analysis of the fiber cell wall and its components;(3) Lignin biosynthesis and chemistry;(4) Genetic engineering;(5) Chemistry of biomaterials;(6) Pulping methods associated with wood bio-refinery;(7) New pulping and bleaching methods and processes;(8) Analytical methods on wood, fibers, pulping chemistry and bio-refinery;(9) Enzyme assisted pulping and bleaching technologies;(10) Cellulosic ethanol and biofuels;(11) Lignocellulosic-based biomaterial/composites;(12) Fiber-related Nanotechnology;(13) Nano- and micro-crystalline cellulose and applications;(14) Characteristics and utilization of secondary fibers;(15) Papermaking chemistry related to the using of high yield pulps and secondary fibers;(16) Effluent treatment/environmental remedy in pulping and bleaching processes。

联系人:张瑞霞;电话:022-60602510;电子信箱:iswfp@163.com。

会议网站:<http://www.iswfp2011.org>。