

一种自主水下航行器路径规划算法

崔荣鑫, 徐德民, 严卫生

(西北工业大学水下信息处理与控制国家重点实验室, 西安 710072)



摘 要: 提出了一种自主水下航行器穿越雷区的路径规划算法。将路径规划分为全局路径规划和局部路径规划两个部分, 建立了水雷分布的 Voronoi 图, 采用遗传算法规划出初步的全局最优路径。自主水下航行器按照全局最优路径航行时, 利用前视声纳作为探测仪器。根据所测得的障碍物相对于自主水下航行器的位置关系设计出一个模糊推理系统(FIS)求解其避障角度, 完成局部路径规划。仿真结果表明了这种算法的有效性。

关键词: 自主水下航行器; 路径规划; Voronoi 图; 模糊推理系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2006) 12-3373-04

Path Planning Algorithm for Autonomous Underwater Vehicle

CUI Rong-xin, XU De-min, YAN Wei-sheng

(National Key Lab of Underwater Information Processing and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A path-planning algorithm for Autonomous Underwater Vehicle (AUV) while going across a minefield was proposed. The path planning includes two parts, global path planning and local path planning. The Voronoi diagram of mine distribution was established, and then global optimal path was planned using genetic algorithm. Looking forward sonar is used as measuring instrument while AUV tracks the global optimal path. A fuzzy inference system (FIS) was designed to derive the obstacle-avoiding angle based on the position relationship of the AUV and the obstacle, and then the local path planning was achieved. Simulation results show the efficiency of the algorithm.

Key words: Autonomous Underwater Vehicle; path planning; Voronoi diagram; fuzzy inference system

引 言

路径规划是自主水下航行器(AUV)导航系统的一个重要组成部分,它是AUV进行水下作业的基础^[1]。对于AUV来说,路径规划的任务按照一定的评价标准,寻找一条满足AUV的航行特性、任务规划要求、安全的可航行路径。解决该问题的办法是由两部分组成:(1)建立适当的环境模型来表示工作空间的几何结构;(2)在所建立的环境模型中搜索出一条无碰路径。通常,一些学者用栅格法建立环境模型^[2],在此基础上,Nikolos等人利用遗传算法进行了无人机的路径规划^[4],A. Alvarez等人也利用遗传算法进行了自主水下航行器的路径规划^[1]。K. P. Carroll提出利用A*搜索的方法进行全局路径规划,C. Vasudevan等人则提出了基于案例的路径规划方法^[3]。这些方法都必须完全掌握环境的先验信息,而通常情况下海洋环境是未知的或者部分未知的,因此AUV在按照全局路径规划的路径进行航行时还不可避免地遇到一些先前未知的障碍物。因此还要考虑实时避障问题,也即局部路径规划问题。

本文考虑AUV穿越某个雷区的路径规划问题,将路径规划分为全局路径规划与局部路径规划两部分。首先以水雷

的位置建立水雷分布的Voronoi图,获得备选路径,通过遗传算法求解出AUV的全局最优路径。再利用前视声纳^[5]作为测量仪器,当AUV的“视线”内存在先前未知的障碍物时,通过一个模糊推理系统来计算出AUV的避障角度,进行实时避障,实现AUV的局部路径规划。并作出如下假设:

- 1) AUV在同一水平面内以定常速度航行;
- 2) 水雷分布已知;

1 全局路径规划

1.1 水雷分布的Voronoi图建立

根据已知的水雷分布情况,水雷分布的Voronoi图如图1所示。

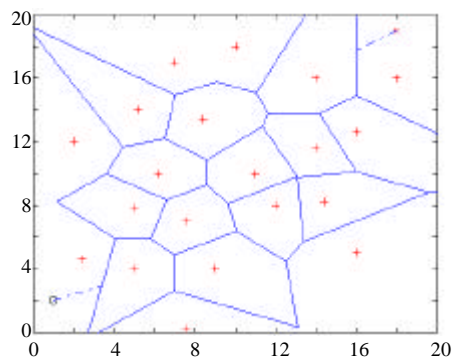


图1 水雷分布的Voronoi图

图中,用“+”表示水雷,“o”表示水下航行器的出发点,“×”表示目标点,再将出发点和目标点分别与距离自身最近

收稿日期: 2005-09-02

修回日期: 2006-09-25

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助(教技司[2005]290号)

作者简介: 崔荣鑫(1982-),男,江苏东台人,博士生,研究方向为水下航行器控制,多机器人协调;徐德民(1937-),男,陕西三原人,博导,中国工程院院士,研究方向为水下航行器导航、控制;严卫生(1968-),男,江苏启东人,博导,研究方向为水下航行器导航、控制与仿真。

的 Voronoi 边相连接, 用虚线表示, 各产生一个交点。图中的边便构成了水下航行器的备选路径集。

可以看出, 建立水雷分布的 Voronoi 图, 将路径规划问题从无限维空间的搜索问题已经简化到有限维的搜索问题, 与用栅格法建立环境模型相比, 所需的存储的路径节点少, 而且直观、简单, 简化了建模的复杂性。这样, 路径规划则要在上面所确定的路径集合中进行搜索。

1.2 全局路径规划算法

1.2.1 编码方式与种群初始化

将起始点标识为 P_1 , 目标点标识为 P_n , Voronoi 图的各个顶点以及新增的两个点作为自主水下航行器的中途航路点, 按顺序标识为 P_2, P_3, \dots, P_{n-1} , 这些点便构成了水下航行器的备选航路点。从起始点出发, 随机选取与起始点相邻的下一个点作为下一个航路点, 直到找到终点为止, 在产生某一条路径的过程中, 为了避免产生重复的路径, 规定当一个航路点产生后, 随后的随机选点操作将该点忽略, 也即认为该点与其它点的边长为无穷远, 若选择一点后, 尽管该点不是终点, 但该点的所有邻接点都已经在前面的步骤中选择过, 那么该点就作为无效点, 再退回到前一点, 重新进行选择。

1.2.2 自主水下航行器航行路径的代价方程

水下航行器沿着 Voronoi 图的每条边航行都有着一定的危险性代价和路径长度, 当不存在水雷时, 水下航行器的最优路径必然是连接起始点与目标点的线段, 而为了避免水雷的威胁, 水下航行器的路径都要偏离这个线段, 因此, 我们取每段航线上的 M 个离散点偏离这个线段的距离作为每段路径的代价, 定义为

$$f_p = \sum_{n=1}^M \Delta l_n \quad (1)$$

其中, Δl_n 表示第 n 个离散点到连接起始点与目标点线段的距离。

水下航行器路径上的某一点危险性代价可以用该点到水雷距离的 4 次方的倒数成正比^[1], 因此可以用每条路径上的 M 个离散点的到 N 个水雷的距离来量化得到, 表示为^[6]

$$f_{TA} = \sum_{n=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_{nj}^4} \quad (2)$$

其中, R_{nj} 表示第 n 个离散点到第 j 个水雷的距离。

因此, 水下航行器路径的总的代价方程可以表示为

$$C = \sum_{i=1}^k (w_1 f_{pi} + w_2 f_{TAi}) \quad (3)$$

w_1, w_2 为待定系数。

1.2.3 遗传算法

采用保留最优个体策略的改进遗传算法进行交叉和变异操作, 当适应值的最小值基本不再变化时, 算法结束, 全局路径规划的结果如图 2 所示。

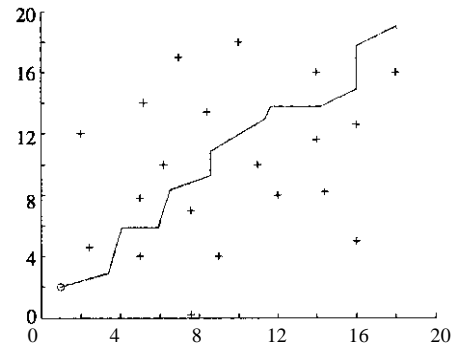


图 2 全局路径规划结果

2 局部路径规划

2.1 避障策略

AUV 在按照全局最优路径航行的过程中, 有可能会遇到一些先前未知的障碍物, 利用前视声纳作为测量仪器, 返回其探测信息, 当探测到先前未知的障碍物时, 可以根据障碍物相对于 AUV 的方位和距离来选择如何避开障碍物, 也即选择从哪一个方向以多大的角度避开障碍物。通常, 障碍物与 AUV 的相对位置有如图 3 所示的四种情形。

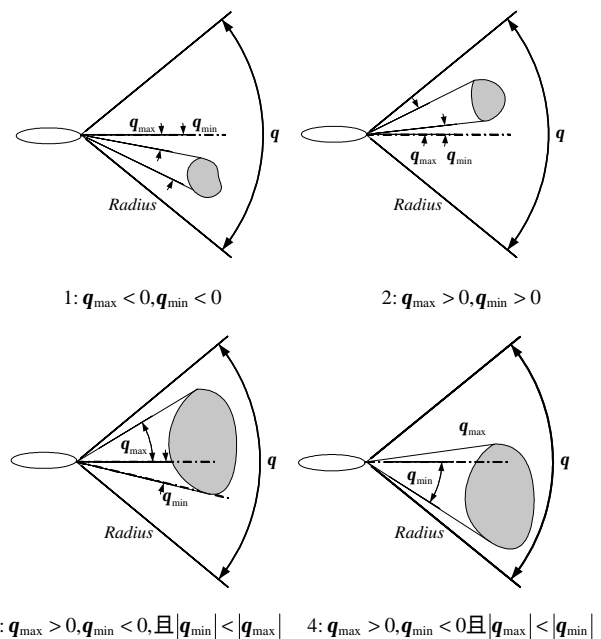


图 3 障碍物 AUV 位置关系示意图

图中, q 为声纳水平面内的探测角度, $Radius$ 为声纳的探测半径。本文中, 声纳的探测半径为 100 米, 探测角度为 120° 。图中阴影部分为障碍物, 点划线方向为 AUV 当前的航向, 为了便于分析障碍物与 AUV 的位置关系, 令在 AUV 正前方, 也即当前航向上的角度为 0° , 正前方偏左角度为正, 偏右角度为负, 从而声纳返回的障碍物上某点的角度在 $[-q/2, q/2]$ 区间内。障碍物最左端偏离当前航向的角度为 q_{max} , 障碍物最右端偏离当前航向的角度为 q_{min} , 则可以根据 q_{max} 、 q_{min} 以及 AUV 与障碍物的距离 D 确定障碍物相对于 AUV 的方位和距离。通过分析可知, 当障碍物位

于 AUV 当前航向的一侧时 (图中的第 1、第 2 两种情形), 障碍物并不在 AUV 当前航向上, 但为了确保 AUV 的安全, AUV 可以从另一侧避开障碍物。可根据 q_{\max} 和 q_{\min} 中绝对值小的角度 (第 1 种情形中的 q_{\max} , 第 2 种情形中的 q_{\min}) 与 AUV 距障碍物的距离来确定 AUV 的避开角度; 当障碍物处于 AUV 正前方时 (图中的第 3、第 4 两种情形), AUV 可以选择从左右两个方向大角度避开障碍物, 为了使 AUV 的航路达到最优或者次优, 可以选择从偏向 q_{\max} 和 q_{\min} 中绝对值小的那一方 (第 3 种情形的 q_{\min} , 第 4 种情形的 q_{\max}) 避开障碍物。这样, 在 AUV 探测到障碍物时, 可以先根据 q_{\max} 和 q_{\min} 的值判断其避开障碍物的方向, 即确定避开角度的符号, 再根据 q_{\max} 和 q_{\min} 中绝对值小的角度与 AUV 距障碍物的距离进行模糊推理, 确定 AUV 避开障碍物的角度。每次进行推理时只要求两个模糊变量的输入, 即 $\min(|q_{\min}|, |q_{\max}|)$ 和 D , 这样可以减少模糊推理规则的条数。

2.2 模糊推理系统

如上所述, 该模糊推理系统的输入为决定避障角度的 $\min(|q_{\min}|, |q_{\max}|)$ 及 D , 令

$$\Phi = \min(|q_{\min}|, |q_{\max}|)$$

输出为 AUV 避开障碍物的角度 y_{avd} , 如图 4 所示。

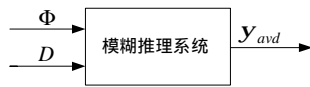


图 4 模糊推理系统框图

模糊推理系统中, 方位角信号的语言变量为 Φ , 其论域为 $X = [0, 60^\circ]$, 其相应的模糊子集为 $A_i (i=1, 2, 3, 4)$, 对应的语言取值为{“小”, “较小”, “较大”, “大”}, 取梯形隶属函数, 如图 5 所示。

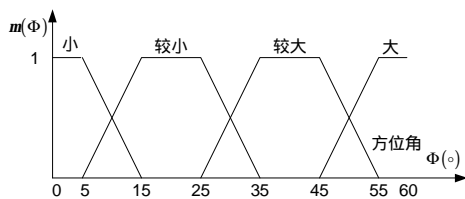


图 5 方位角隶属函数

障碍物与 AUV 距离的语言变量为 D , 其论域为 $Y = [0, 100]$, 其相应的模糊子集为 $B_j (j=1, 2, 3)$, 它的语言取值为{“近”, “较远”, “远”}, 取梯形隶属函数如图 6 所示。

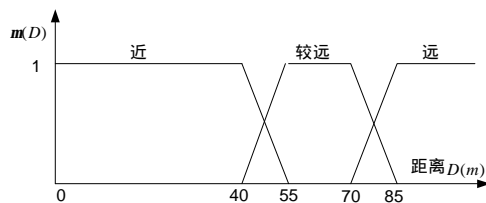


图 6 AUV 距障碍物距离隶属函数

AUV 避开障碍物角度的语言变量为 y_{avd} , 其论域为 $Z = [0, 90]$, 其相应的模糊子集为 $C_k (k=1, 2, 3, 4, 5)$, 它的语言取值为{“小”, “较小”, “较大”, “大”, “很大”}, 取梯形隶属函数, 如图 7 所示。

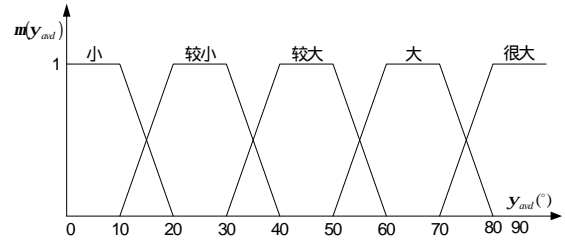


图 7 AUV 避障角度隶属函数

根据上面的分析, 障碍物与 AUV 的位置关系为第 1、2 种情况时, 制订如表 1 的模糊推理规则

表 1 情形 1、2 时的模糊推理规则

方位角 距离	小	较小	较大	大
近	很大	大	较小	小
较远	大	较大	小	小
远	较大	较小	小	小

当障碍物位于 AUV 正前方时, 如上面的第 3、4 种情况所示, 制订如表 2 的模糊推理规则

表 2 情形 3、4 时的模糊推理规则

方位角 距离	小	较小	较大	大
近	很大	很大	很大	很大
较远	大	大	大	很大
远	较大	较大	大	大

模糊推理系统中采用 Mamdani 模糊推理方法^[7], 即用 MIN-MAX-重心法进行模糊推理进行解模糊。

由前提“方位角为 Φ_0 和距离为 D_0 ”和各模糊规则 $A_i \text{ and } B_j \Rightarrow C_k$, 可以得到推理结果 C'_n 为

$$m_{C'_n}(r) = m_{A_i}(\Phi_0) \wedge m_{B_j}(D_0) \wedge m_{C_k}(r) \quad (4)$$

其中, \wedge 为 MIN, 即最小值。

C' 是由综合推理结果 C'_n 得到的

$$m_{C'}(r) = m_{C'_1}(r) \vee m_{C'_2}(r) \vee \dots \vee m_{C'_n}(r) \quad (5)$$

其中, \vee 为 MAX, 即取最大值。

解模糊, 得到模糊集合 C' 对应的避障角度为

$$y_{avd} = \frac{\int_Z r m_{C'}(r) dr}{\int_Z m_{C'}(r) dr} \quad (6)$$

即精确量 y_{avd} 为模糊集合 C' 的隶属函数的“重心”。

3 仿真结果

某型 AUV 航向系统的状态方程为^[8]:

$$\begin{bmatrix} \dot{b} \\ \dot{w}_y \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.3536 & 0.228 & 0 \\ 11.742 & -5.381 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ w_y \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.113 \\ -1.883 \\ 0 \end{bmatrix} d_r \quad (7)$$

其中, b 为侧滑角, w_y 为偏航角速度, y 为偏航角, d_r 为舵角输入。

AUV 的初始位置为 (100,100), 状态为 $[0,0,0.3491]'$, 即初始航向为 20° 。速度为 10m/s 。采用文献[9]所给出的路径跟踪控制律, 仿真结果如图 8、图 9 所示。

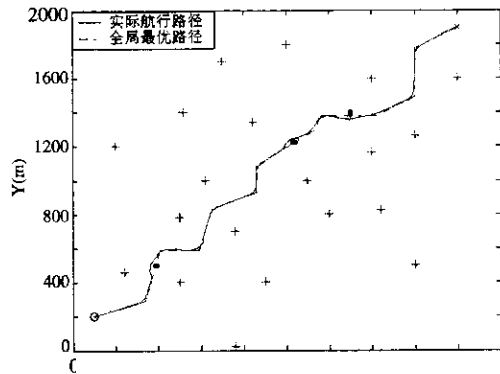


图 8 仿真结果图

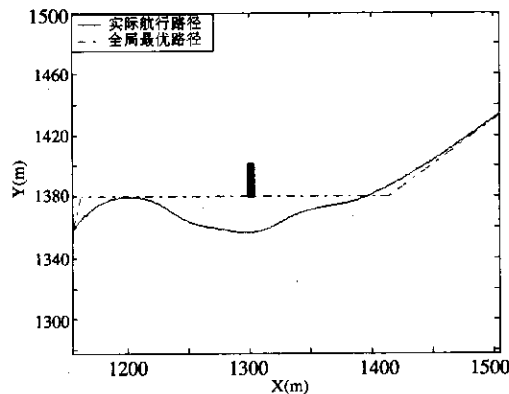


图 9 仿真结果图

图 8 为 AUV 航迹曲线与全局最优路径的对照图, 图 9 是图 8 的部分放大。由图可以看出, 当不存在障碍物时, AUV 按照全局最优路径航行, 当路径上存在障碍物时, AUV

能够避开障碍物并回到全局最优路径上去。

4 结论

本文考虑了 AUV 穿越雷区的路径规划问题, 将问题分为全局路径规划和局部路径规划两部分, 并分别用遗传算法和模糊推理系统来规划出 AUV 的安全路径。这种算法适用于部分未知环境的路径规划问题。仿真结果说明了这种算法是有效的。当然, 文章所针对的是一类定常速度的 AUV, 并且没有考虑海流对路径规划的影响, 事实上, 在考虑 AUV 的速度和海流影响时, 可以通过增加模糊推理系统的输入变量的个数以及推理规则的条数来确定 AUV 避障的角度。

参考文献:

- [1] A Alvarez, A Caiti, R Onken. Evolutionary Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in a Variable Ocean [J]. IEEE J. Ocean Engineering (S0364-9059) 2004, 29(2): 418-429.
- [2] Lee S, Park J. Neural Computation for Collision-free Path Planning [J]. J. Intel. Manu. (S0956-5515). 1991, (2): 315-326.
- [3] Autonomous Underwater Vehicles [J]. Autonomous Robots (S0929-5593). 1996, 79-89.
- [4] I K Nikolos, K P Valavanis, N C Tsourveloudis. Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation [J]. IEEE Trans. System man and cybernetics (S1083-4419), 2003, 33(6): 898-912.
- [5] Y Petillot, I T Ruiz. Underwater Vehicle Obstacle Avoidance and Path Planning Using a Multi-Beam forward Looking Sonar [J]. IEEE J. Ocean Engineering (S0364-9059), 2001, 26(2): 240-251.
- [6] 符小卫, 高小光. 一种无人机路径规划算法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 20-21.
- [7] 诸静. 模糊控制原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [8] 徐德民. 鱼雷自动控制系统 [M]. 第 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
- [9] J J Keegan. Trajectory path planning for the Aries AUV [D]. Master Thesis of Naval Post Graduate School. 2002.

(上接第 3372 页)

- [3] Liu B, Iwamura K. Chance Constrained Programming with Fuzzy Parameters [J]. Fuzzy Sets and Systems (S0165-0114), 1998, 94(2): 227-237.
- [4] 王万良. 生产过程的智能调度方法及其应用[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [5] Pawlak Z. Rough Sets [J]. International Journal of Computer and Information Sciences (S0091-7036), 1982, 11(5): 341-356.
- [6] Pawlak Z. Rough Sets and Their Applications [J]. Microcomputer Applications (S0820-0750), 1994, 13(2): 71-75.
- [7] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough Sets Theory for Multicriteria Decision Analysis [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2001, 129(1): 1-47.

- [8] Padmini S, Donald H. Vocabulary Mining for Information Retrieval: Rough Sets and Fuzzy Sets [J]. Information Processing and Management (S0306-4573), 2002, (37): 15-38.
- [9] Pawlak Z. Rough Sets, Rough Function and Rough Calculus [C]//In: Pal S K, Skowron A, eds. Rough-Fuzzy Hybridization: A New Trend in Decision-Making. Singapore: Springer-Verlag, 1999, 99-109.
- [10] Lingras P. Unsupervised Rough Set Classification Using Gas [J]. Journal of Intelligent Information Systems (S0925-9902), 2001, 16: 215-228.
- [11] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial System [M]. Michigan University Press, 1995.
- [12] Taillard E. Benchmark for Basic Scheduling Problems [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 1993, (64): 278-285.