

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.018

## 基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法

李庆春<sup>1</sup>, 高军伟<sup>1</sup>, 谢广明<sup>2</sup>, 许恩江<sup>3</sup>

(1. 青岛大学自动化工程学院, 山东 青岛 266071; 2. 北京大学工学院, 北京 100871;

3. 北京石油化工学院工程教育中心, 北京 102617)

**摘要:** 在具有复杂性与不确定性的水环境下, 针对无法建立精确的水下机器人控制数学模型问题, 提出基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法。将视线导航原理与模糊控制思想相结合, 进行水下机器人路径规划。通过专家经验, 设计一个模糊控制器, 实时调整水下机器人的运动方向, 并通过仿真实验验证该算法的有效性。仿真及实验结果表明: 该算法能实时、稳定地提供水下机器人的运动路径, 有效躲避障碍物, 安全达到目标点。

**关键词:** 仿生机器鱼; 视线导航; 模糊控制; 避障

**中图分类号:** TP249 **文献标志码:** A

## Obstacle Avoidance Algorithm of Bionic Robot Fish Based on Fuzzy Control

Li Qingchun<sup>1</sup>, Gao Junwei<sup>1</sup>, Xie Guangming<sup>2</sup>, Xu Enjiang<sup>3</sup>

(1. College of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Center of Engineering Education, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** As the environment of underwater is complex and uncertain, it is hard to found exact mathematical model to control autonomous underwater vehicles (AUVs). Fuzzy control is combined with line of sight in this paper for AUV. Based on fuzzy control of obstacle avoidance for bionic robot fish is proposed and this algorithm provide an important basis for the path planning for AUVs. Through expert knowledge and experience, a fuzzy controller is utilized to adjust the moving direction for an AUV in order to make the AUV avoid the obstacle and then reach the goal securely. Results show by simulation and experiment that this algorithm is effective and feasible for the path planning for AUVs.

**Keywords:** bionic robot fish; line of sight guidance; fuzzy control; obstacle avoidance

### 0 引言

为了使水下机器人 (anonomous underwater vehicle, AUV) 完成海洋环境检测、海底救捞及水下作业等复杂任务, 对其进行路径规划具有重要意义。水下机器人路径规划就是给定一定的水域和障碍环境, 求一条从起点到目标点的路径, 使该水下机器人能够无避碰地绕过障碍物到达目标点。Wang Na 等<sup>[1]</sup>建立基于网格模型的路径规划算法, 通过网格对环境进行建模, 并寻找安全路径; Ernesto P L 等<sup>[2]</sup>建立基于人工势场法的避障算法, 有效地对移动机器人进行导航, 但该方法容易陷入局部极小值点; 金久才<sup>[3]</sup>通过建立环境模型, 利用分层遗传算法对水下机器人进行路径规划, 但该方法不能很好地解决大规模计算量问题, 容易陷入“早熟”; Junfei Q 等<sup>[4]</sup>利用神经网络强大的学习能力, 实现移动机器人的动态避障, 但是在通常情况下较难获取此神经

网络的训练样本。因此, 笔者结合视线导航算法<sup>[5]</sup>与模糊控制算法, 对水下机器人进行路径规划。

### 1 视线导航

#### 1.1 视线导航原理

视线导航的基本思想就是将某个未来期望点作为当前控制的目标参考点, 其原理就是将水下机器人与参考点的位置误差作为闭环反馈控制量, 调节移动机器人的方向以实现路径跟踪控制<sup>[6]</sup>。在视线导航中, 在水下机器人与目标点之间建立视线导引角  $\theta_1$ , 如图 1 所示, 表示为:

$$\theta_1 = \arctan \frac{y_p(i) - y(t)}{x_p(i) - x(t)} \quad (1)$$

式中:  $[x(t), y(t)]$  为水下机器人当前点的坐标;  $[x_p(i), y_p(i)]$  为水下机器人前进方向上的视点, 作为期望点。

收稿日期: 2011-08-15; 修回日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金“海洋运动监测平台自适应采样关键技术研究”(41076062)

作者简介: 李庆春(1986—), 男, 山东人, 硕士研究生, 从事智能控制研究。

视线导引角  $\theta_2$ ，为水下机器人与距离障碍物最近点所成的夹角。

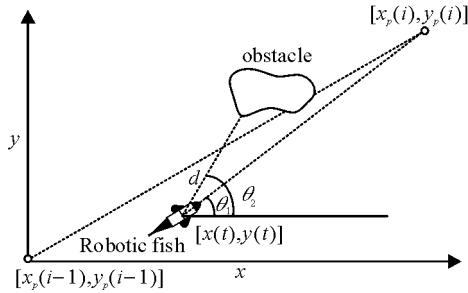


图 1 视线导航示意图

### 1.2 水下机器人与障碍物之间距离 $d$ 的求取

#### 1.2.1 障碍物为圆形

设圆形障碍物的圆心坐标为  $[x_0, y_0]$ ，半径为  $r$ ，则水下机器人与障碍物之间距离可以表示为：

$$d = \sqrt{(x(t) - x_0)^2 + (y(t) - y_0)^2} - r \quad (2)$$

式中， $[x(t), y(t)]$  为水下机器人当前点的坐标。

#### 1.2.2 障碍物为矩形

设矩形障碍物的中心点坐标为  $[x_c, y_c]$ ，长为  $l$ ，宽为  $w$ 。水下机器人与障碍物之间的距离跟两者之间的相对位置有关，水下机器人相对于矩形障碍物的位置如图 2 所示。则水下机器人与障碍物之间的最小距离可表示为：

水下机器人位于 I 区域，即  $x(t) \leq (x_c - l/2)$ ， $y(t) \leq (y_c - w/2)$  时：

$$d = \sqrt{(x(t) - (x_c - l/2))^2 + (y(t) - (y_c - w/2))^2} \quad (3)$$

水下机器人位于 II 区域，即  $(x_c - l/2) < x(t) \leq (x_c + l/2)$ ， $y(t) \leq (y_c - w/2)$  时：

$$d = y_c - w/2 - y(t) \quad (4)$$

水下机器人位于 III 区域，即  $x(t) > (x_c + l/2)$ ， $y(t) \leq (y_c - w/2)$  时：

$$d = \sqrt{(x(t) - (x_c + l/2))^2 + (y(t) - (y_c - w/2))^2} \quad (5)$$

水下机器人位于 IV 区域，即  $x(t) \geq (x_c + l/2)$ ， $(y_c - w/2) < y(t) \leq (y_c + w/2)$  时：

$$d = x(t) - (x_c + l/2) \quad (6)$$

水下机器人位于 V 区域，即  $x(t) \geq (x_c + l/2)$ ， $y(t) > (y_c + w/2)$  时：

$$d = \sqrt{(x(t) - (x_c + l/2))^2 + (y(t) - (y_c + w/2))^2} \quad (7)$$

水下机器人位于 VI 区域，即  $(x_c - l/2) \leq x(t) < (x_c + l/2)$ ， $y(t) \geq (y_c + w/2)$  时：

$$d = y(t) - (y_c + w/2) \quad (8)$$

水下机器人位于 VII 区域，即  $x(t) < (x_c - l/2)$ ， $y(t) \geq (y_c + w/2)$  时：

$$d = \sqrt{(x(t) - (x_c - l/2))^2 + (y(t) - (y_c + w/2))^2} \quad (9)$$

水下机器人位于 VIII 区域，即  $x(t) \leq (x_c - l/2)$ ， $(y_c - w/2) < y(t) < (y_c + w/2)$  时：

$$d = x_c - l/2 - x(t) \quad (10)$$

式中， $[x(t), y(t)]$  为水下机器人当前点的坐标。

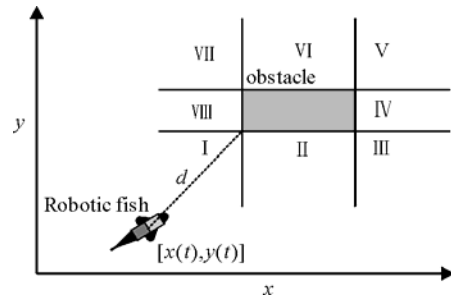


图 2 矩形障碍物与水下机器人最小距离示意图

当障碍物形状为不规则图形时，可根据障碍物的形态做近似变换，等价于圆形或矩形，以方便求取水下机器人与障碍物的最小距离。

在存在障碍物的情况下，水下机器人的路径规划需满足以下 2 个方面的要求：1) 向目标点前进；2) 有效地避开障碍物。

因此，笔者采用模糊控制来改变水下机器人的运动方向，结合视线导航原理为水下机器人进行路径规划。水下机器人应用视线导航原理向目标点方向前进，当障碍物与水下机器人的距离小于一定值时，水下机器人通过改变方向，有效地避开障碍物。

## 2 模糊控制器的设计

模糊逻辑法将模糊控制本身具有的鲁棒性与基于生理学的“感知-动作”行为结合起来，为移动机器人在未知环境中导航提供了新思路<sup>[7]</sup>。在设计模糊控制器时，根据被控对象的具体情况确定模糊控制器的结构。模糊控制器的结构指输入输出变量、模糊化算法、模糊推理规则和精确化计算方法。

### 2.1 模糊控制器的输入与输出

根据视线导航原理，取两视线导航角的夹角  $\theta$

与水下机器人与障碍物的最小距离  $d$ , 作为该模糊控制器的输入。其中,  $\theta = \theta_2 - \theta_1$ , 变量  $\theta$  的值可正可负, 当  $\theta$  为正值时, 障碍物位于导航线的左侧; 当  $\theta$  为负值时, 障碍物位于导航线的右侧。

根据水下机器人运动的实际需要, 输入变量  $\theta$  的论域为  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , 模糊集为 {NB, NS, Zero, PS, PB} (N: Negative, B: Big, P: Positive, S: Small), 输入变量  $\theta$  的隶属度函数为三角形, 输入变量  $d$  的论域为  $[0, 60]$ , 模糊集为 {Near, Medium, Far}, 输入变量  $d$  的隶属度为三角函数。

水下机器人在  $t$  时刻所需的偏转角  $\Delta\psi(t)$ , 作为该模糊控制器的输出。在  $t$  时刻水下机器人的运动方向角可以表示为:

$$r(t) = \Delta\psi(t) + r(t-1) \quad (11)$$

式中:  $r(t)$  表示  $t$  时刻水下机器人的运动方向角;

$r(t-1)$  表示  $t-1$  时刻水下机器人的运动方向角。

该模糊控制器输出变量  $\Delta\psi$  的论域为  $[-40^\circ, 40^\circ]$ , 模糊集为 {NB, NS, Zero, PS, PB} (N: Negative, B: Big, P: Positive, S: Small), 输出变量  $\Delta\psi$  的隶属度为三角函数。

## 2.2 模糊规则的建立

水下机器人运动过程中的避碰原则是: 若距离障碍物大于一定值, 则沿目标方向前进; 当障碍物位于导航线的左侧时, 水下机器人向右偏转; 当障碍物位于导航线的右侧时, 水下机器人向左偏转。由于该模糊控制器输入变量  $\theta$  模糊集合元素个数为 5, 输入变量  $d$  模糊集合元素个数为 3, 故模糊规则有 15 条。结合经验, 建立模糊控制规则<sup>[8]</sup>表如表 1。

表 1 模糊规则表

$\Delta\psi$	$d$			
	Near	Medium	Far	
$\theta$	NB	NB	NS	Zero
	NS	NB	NB	NB
	Zero	PB	PB	PB
	PS	PB	PB	PB
	PB	PB	PS	Zero

## 2.3 模糊推理

模糊推理是基于模糊逻辑中的蕴含关系及推理规则进行的, 是模糊控制器的核心<sup>[9]</sup>。笔者采用 Mamdani 推理, 用面积中心法去模糊化, 最终得到水下机器人所需的偏转角。

## 2.4 避障算法流程

避障算法流程如下:

- 1) 数据初始化, 包括水下机器人起点坐标, 目标点坐标, 移动步长, 障碍物的类型, 障碍物的初始坐标;
- 2) 判断该点坐标是否等于目标点坐标, 如果“否”, 继续进行; 如果“是”, 转到第 8) 步;
- 3) 计算该点到障碍物的最短距离  $d$ ;
- 4) 判断  $d$  是否大于障碍物的最小影响距离  $d_{min}$ , 如果“否”, 继续进行; 如果“是”, 转到第 7) 步;
- 5) 计算该点与目标点之间的角度  $\theta_1$ 、与障碍物之间的角度  $\theta_2$ , 并计算  $\theta = \theta_2 - \theta_1$ ;
- 6) 将  $d$  与  $\theta$  输入模糊控制器, 输出所需的偏转角  $\Delta\psi$ ;
- 7) 计算下一步位置, 返回第 2) 步;
- 8) 结束。

### 3 仿真及实验结果分析

#### 3.1 仿真结果分析

为了对该算法的有效性进行验证, 对该算法进行仿真实验。假定水下机器人的运动步长  $l=5$ , 分别在不同障碍物的环境下进行仿真, 包括圆形障碍物环境、矩形障碍物环境、动态障碍物环境。障碍物对水下机器人的最小影响距离为  $d_{min}=60$ , 也就是说当水下机器人离障碍物的距离大于  $d_{min}$  时, 可以认为此障碍物对水下机器人的运动不构成威胁, 可以按原先方向前进。水下机器人与障碍物、目标点所成角度之差  $\theta$  范围为  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , 模糊控制器输出偏转角  $\Delta\psi$  的范围为  $[-40^\circ, 40^\circ]$ 。

在静态障碍物的情况下, 水下机器人的运动路径如图 3、图 4。可以看出, 当水下机器人与障碍物之间的距离  $d > d_{min}$  时, 水下机器人向目标点方向运动; 当水下机器人与障碍物之间的距离  $d \leq d_{min}$  时, 水下机器人避开障碍物, 向目标点方向运动。

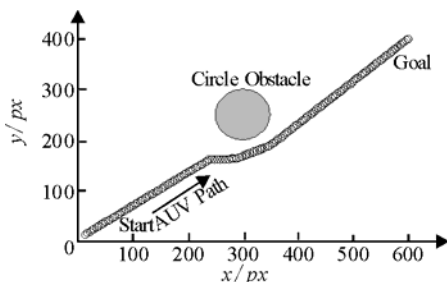


图 3 水下机器人在一静态障碍物情况下运动路径

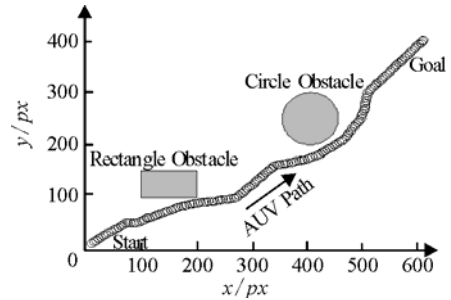


图 4 水下机器人在两静态障碍物情况下运动路径

在动态障碍物的情况下, 水下机器人的运动路径如图 5、图 6。假定水下机器人的运动步长  $l=5$ , 动态障碍物的运动步长  $l_{obs}=4$ , 且水下机器人与动态障碍物的运动时间间隔相同, 均为  $T=0.05$  s。由水下机器人的运动路径可知, 在满足以上假设的情况下, 水下机器人通过检测动态障碍物的运动信息, 提前调整运动方向, 可以有效地避开动态障碍物, 安全到达目标点。

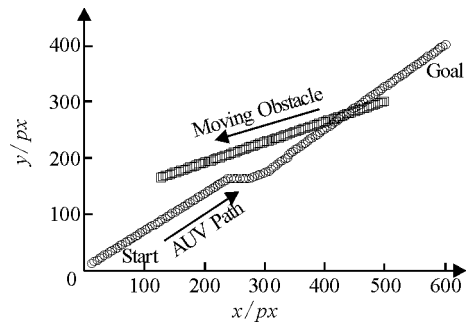


图 5 水下机器人在一动态障碍物情况下运动路径

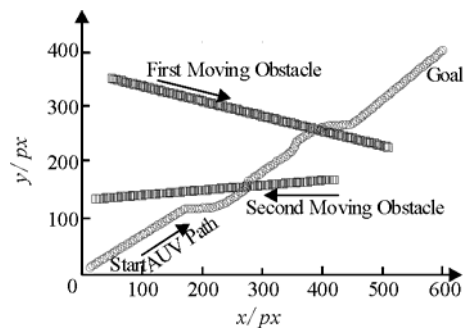


图 6 水下机器人在两动态障碍物情况下运动路径

#### 3.2 实验结果分析

实验平台采用北京大学研发的多水下机器人协作平台<sup>[10]</sup>, 通过此平台可以设计一定的水环境及障碍物环境(包括静态障碍物环境和动态障碍物环境), 笔者主要研究仿生机器鱼在动态障碍物环境下的路径规划及避障问题。该平台通过摄像头采集到的图像进行处理, 建立如图 7 所示实验环境, 图像尺寸为  $624 \times 416$ , 仿生机器鱼的起始点 Start 坐标为

(100, 50), 目标点 Goal 坐标为(580, 360), 动态障碍物使用该类型的水下机器人, 分别为 First Moving Obstacle 与 Second Moving Obstacle, 动态障碍物的最小影响距离  $d_{\min}=60$ 。

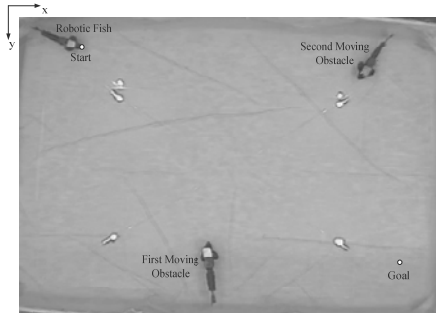


图 7 实验环境图

在该实验中, 仿生机器鱼速度档位为 15 档, 动态障碍物的速度档位为 12 档, 方向档位主要使用其中 5 个档位, 分别为 3 档、5 档、7 档、9 档、11 档, 经实验测定偏转角度分别为  $-40^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 。仿生机器鱼通过对动态障碍物进行实时检测(每隔 40 ms 检测 1 次), 采用该算法实时调整偏转档位, 以有效地避开障碍物, 安全到达目标点。

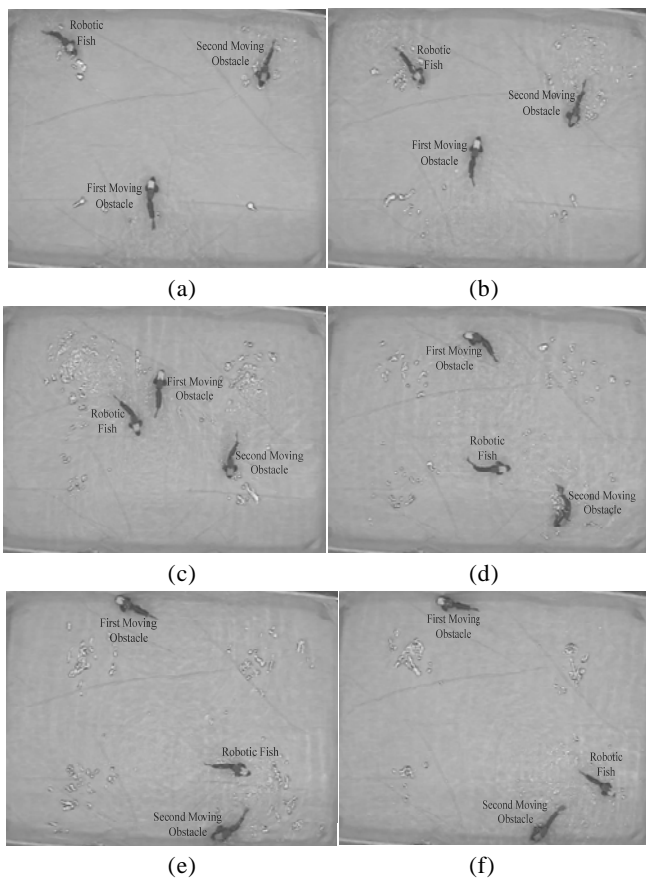


图 8 实验场景图

通过图 8 所示的实验场景图可以看出, 仿生机

器鱼从起始点 Start 出发, 当仿生机器鱼距离动态障碍物大于障碍物的最小影响距离  $d_{\min}$  时, 向目标点 Goal 方向前进; 当仿生机器鱼距离动态障碍物小于障碍物的最小影响距离  $d_{\min}$  时, 仿生机器鱼通过调整偏转档位, 有效的躲避动态障碍物 First Moving Obstacle 与 Second Moving Obstacle, 最终安全到达目标点 Goal。

#### 4 结束语

仿真及实验结果表明: 基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法可以实时、稳定地提供水下机器人的运动路径, 且对多动态障碍物具有良好的避障性能。但当模糊控制器输入变量的个数增多时, 会出现迭代时间过长的缺陷, 可以引入最小危险度来提高算法的运行效率, 这也是下一步研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] Wang Na, Chen Ping. Path planning algorithm of level set based on grid modeling [J]. 2010 International Conference on Computer Design and Applications, 2010(5): 508-510.
- [2] Ernesto P L, Eliana P L. Obstacle avoidance strategy based on adaptive potential fields generated by an electronic stick[J]. Intelligent Robots and Systems, 2005(12): 2626-2631.
- [3] 金久才. 无人水下自主航行器(AUV)避碰研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [4] Junfei Q, Zhanjun H, Xiaogang R. Application of reinforcement learning based on neural network to dynamic obstacle avoidance[J]. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, 2008: 784-788.
- [5] Xiaoping W, Zhengping F, Jimao Z, et al. Line of sight guidance with intelligent obstacle avoidance for autonomous underwater vehicles[J]. Oceans, 2006: 1-6.
- [6] 童艳, 徐德民, 石巨峰. 一种应用于移动机器人的路径跟踪控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 98-101.
- [7] 付宜利, 顾晓宇, 王树国. 基于模糊控制的自主机器人路径规划策略研究[J]. 机器人, 2004, 26(6): 548-552.
- [8] Mehdi Abbasi, Mohammad Danesh, Mostafa Ghayour. A path fuzzy planner for autonomous underwater vehicles to avoid moving unknown obstacles[J]. Proceeding of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010: 1264-1269.
- [9] 谢超平, 孔峰, 陶金. 基于模糊控制的仿生机器鱼转向控制研究[J]. 机器人技术与应用, 2009(4): 26-27.
- [10] Jinyan Shao, Junzhi Yu, Yimin Fang, et al. A hierarchical

framework for cooperative control of multiple bio-mimetic robotic fish[J]. IEEE International

Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005: 777-783.

\*\*\*\*\*  
(上接第 59 页)

参考文献:

[1] Zhang Jian-guo, Ni Yude, Sharma A B. Data buses take flight[J]. Circuits and Devices Magazine, IEEE. July 2002: 18-31.

[2] Hall I K, Stigall P D. Distributed flight control system using fiber distributed data interface[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE. June 1992: 21-33.

[3] 郑建林. 火箭控制系统总线传输技术研究[D]. 国防科技大学工程硕士论文, 2005: 1-4.

[4] 楼俊荣. 分布式虚拟靶试系统的实时数据通信与管理技术研究[D]. 西北工业大学硕士学位论文, 2006, 3: 40-46

[5] 车进辉, 薛曼玲, 姜丰. CAN 总线实时调度算法的应用[J]. 计算机工程, 2009, 35(24): 242-243.

[6] Chia Shen, Ichiro Mizunuma. RT-CRM: Real-Time Channel-Based Reflective Memory [C]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49(11): 1202-1214.

[7] 张益东, 杨一栋, 张树坤. 超高速实时光传操纵系统研究[J]. 航空计算技术, 2006, 36(5): 1-4.

[8] Nobuyuki Yamasaki. Design and Implementation of Responsive Processor for Parallel/Distributed Control and Its Development Environments[J]. Journal of Robotics and Mechatroni, 2001, 13(2): 125-133.