

文章编号: 1002-0411(2002)01-055-04

## ROV 模糊控制导航方法

赵晓光<sup>1</sup> 戴 炬<sup>2</sup> 赵经纶<sup>1</sup>

(1. 中科院沈阳自动化研究所 沈阳 110015; 2. 山东科技大学机器人研究中心 济南 250031)

**摘 要:** 本文提出一种水下 ROV(Remotely Operated Vehicles)的模糊导航方法和基于该方法的控制器结构. 通常由于水下环境光照不足或是水质混浊, 很难依赖摄像机准确地为 ROV 导航, 引导 ROV 到达预定目标, 尤其是工作空间存在障碍物时, ROV 很可能发生碰撞. 文中提出的模糊控制方法, 将 ROV 在 3D 空间运动的状态、局部环境信息以及导航规划数据表示为多重模糊条件, 然后结合 ROV 的导航特点, 建立了一个三级模糊控制器, 该控制器使用同一种控制模式完成 ROV 有障碍和无障碍的导航任务. 仿真实验结果验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 模糊控制; 导航与控制; 避碰

中图分类号: TP24

文献标识码: 13

### ONE METHOD FOR ROV NAVIGATION USING FUZZY CONTROL

ZHAO Xiao-guang<sup>1</sup> DAI ju<sup>2</sup> ZHAO Jing-lun<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, the Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015;

2. Shandong University of Science and Technology, Jinan 250031)

**Abstract:** This paper presents a fuzzy navigation method for underwater robot ROV. Usually it is difficult to navigate a ROV only depending on the underwater cameras because underwater is shallow and muddy. Especially if there are obstacles under the water, the ROV will be collided easily. In this paper the proposed method represents the states and local environmental information of ROV in 3D space to be multi-fuzzy conditions, then builds a three-layer fuzzy controller based on ROV navigation behavior. The effectiveness of proposed method is verified by the simulation results.

**Keywords:** fuzzy control, navigation and control, collision avoidance

### 1 引言(Introduction)

近年来, 许多研究者将模糊控制用于移动车体的导航控制. 因为车体移动时, 其周围的环境不断变化, 很难建立起控制对象和环境的精确数学模型, 采用模糊控制方法能够很好地解决这类问题. 目前多数模糊导航控制策略是应用在地面移动车的导航控制中, L. ACOSTA, G. N. MARICHAL<sup>[1]</sup>提出采用神经—模糊技术方法, 首先由操作员示教移动车在室内环境中运动, 然后以人给出的导航信息为样本, 训练神经网络, 经过多次训练后, 由模糊方式得到移动车回避障碍的规则和隶属函数. Homayoun Seraji<sup>[7]</sup>提出一种模糊截面索引表的方法, 将地表面特征用模糊逻辑表示为索引表的形式, 当车体移动时, 通过查询索引表, 实现基于地形的模糊导航策略. SHIGEKI ISHIKAWA<sup>[3]</sup>给出了一种基于传感

器信息的移动机器人模糊控制导航方法, 文中建立了一个移动机器人运动的仿真环境, 通过综合机器人携带的距离和接近传感器信息, 描述机器人和环境的当前状态, 得到一个高效的模糊导航规则库, 利用规则库中的规则, 控制机器人跟踪规划轨迹和回避障碍.

地面移动车的轨迹规划和回避障碍行为都是在平面上完成的, 车体与局部环境的状态在二维空间中得到表示. 而对于空间运动的飞行器或水下航行的潜器来说, 运动空间是三维的, 既可以改变水平方向, 又可以改变高度或深度, 飞行器或潜器与局部环境的状态信息较多, 需要在 3D 空间中采用某种表达方法将这些状态精确、简洁地表示出来, 形成具有较高效率的规则库.

水下 ROV(Remotely Operated Vehicles)就是

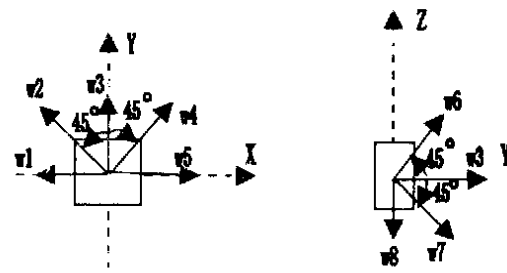
一个在三维空间运动的载体,而且工作环境更加恶劣,传统的导航方法是操作员通过观察摄像机图像,同时综合声纳传感器的数据,根据以往的经验引导 ROV 到达目标点.这种完全依赖操作员操作的导航方式已不能满足日益发展的海洋开发、水下仿生等的需要,所以研究开发高效实用的 ROV 自动导航方法非常必要.ROV 自动导航的主要困难是:1)因为水底黑暗、水质混浊或 ROV 运动搅起海底泥沙等原因,很难获得清晰的视觉图像,因此很少使用视觉传感器信息.2)声纳传感器的数据不可靠,存在干扰和数据失真,3)环境和 ROV 的数学模型不易得到,4)可获得的导航经验少等.这些困难的存在使得依赖数学模型导航的方法很难得到良好的导航效果,模糊控制恰好适合于解决这类问题.

本文以水下机器人检查海底采油钻井平台支撑导管架焊缝的工作为应用背景,结合 ROV(机器人载体)的实际结构,提出一种 3D 空间 ROV 的模糊控制导航方法.文中建立了一个三层模糊推理控制器,控制器基于传感器的信息,获得 ROV 当前的状态和所在位置的局部环境信息,将这些状态和信息表示为模糊条件,结合 ROV 导航的行为特征,获得模糊规则库,经过三层模糊推理,最终完成 ROV 自动导航控制.该控制方法最大特点是在导航过程中,无论是否有障碍,控制器都采用同一种控制模式,而不是将 ROV 运动状态区分成两种模式后分别加以控制,这种单模式控制器具有更好的稳定性和鲁棒性.

## 2 控制器结构(Structure of controller)

### 2.1 传感器

ROV 上的传感器分为内部传感器和外部传感器.内部传感器检测 ROV 自身状态,包括 ROV 的航向角、推进器马达的旋转速度、旋转方向,下潜深度等.外部传感器是指安装在 ROV 外表面的声纳传感器,它的作用是检测 ROV 周围的局部环境,测量 ROV 与障碍物之间的距离,显示障碍物的方向.我们在 ROV 上安装了能够测量八个方向距离的声纳传感器,八个方向的分布如图 1.图(a)显示的是水平面 X-Y 上传感器检测的 5 个方向,图(b)表示垂直面 Y-Z 上传感器检测的 4 个方向.由图中看出, X-Y 和 Y-Z 面上传感器测量范围分别呈半圆形, DW1-DW8 分别表示传感器在八个方向的读数,融合这些外部传感器的信息,可以完全了解 ROV 与它所在局部环境之间的关系.



(a) X-Y 面上传感器检测的方向

(b) Y-Z 面上传感器检测的方向

图 1 声纳传感器检测的方向

Fig. 1 The checked direction by sonar sensors

### 2.2 三层模糊推理控制器的结构

ROV 模糊控制器有三层推理结构,如图 2.每一层分别通过模糊推理形成模糊规则库和模糊查询表,上一层的输出作为下一层的输入,最后经过非模糊推理,将模糊论域中的控制量转化成潜器推进器的真实控制值,实现潜器的模糊控制导航.

#### 2.2.1 第一模糊推理层

第一模糊推理层(以下简称第一层)中包括一个传感器信息融合器,它的任务是检测 ROV 所在处的周围环境信息.第一层的输入模糊变量是  $d_i$ ,它的论域是外部传感器读数 DW1-DW8 的量化集, $d_i$ 的语言值为 LD, LD 的模糊子集为  $D = \{C(\text{很近}), N(\text{较近}), F(\text{远})\}$ .第一层的输出模糊变量是  $c_j$ ,表示障碍物的方向和距离, $j = 1 \sim 5$  分别表示五个方向:前、左、右、上、下, $c_j$ 的语言值 LC 的模糊子集  $C = \{NP(\text{不可能碰撞}), P(\text{可能碰撞}), HP(\text{非常可能碰撞})\}$ .

精确值量化为模糊值的方法为:

设:精确量  $X \in [a, b]$ ,模糊量  $Y \in [-N, N], N \geq 2$

$$\text{则: } Y = 2N(X - (a + b)/2) / (b - a) \quad (1)$$

$d_i$  和  $c_j$  的赋值如表 1.外部传感器信息融合器的规则库中共有 36 条规则,令  $LD_k, LC_k$  分别表示第  $K$  条模糊规则中  $d_i, c_j$  的语言值,第  $K$  条模糊规则的形式为:

$$\text{IF } (d_i \text{ IS } LD_k), \text{ THEN } (c_j \text{ IS } LC_k)$$

第一层的模糊关系  $R = D * C$ ,对于  $d_i$  和  $c_j$  的隶属函数值,对应所量化的等级上取 1,其余均取为零值,则规则  $K$  表示的隶属度

$\mu_{R(K)}(d_i, c_j)$  为:

$$\mu_{R(K)}(d_i, c_j) = \min[\mu_{LD(K)}(d_i), \mu_{LC(K)}(c_j)] \quad (2)$$

第一层的输出模糊变量  $\mu_C(c_j)$  按照取最大隶属度的原则计算得到:

$$\mu_c(c_j) = \max\{d_1 \circ R\} = \max_{d_i} \min[\mu_D(d_i), \mu_{R(k)}d_i, c_j] \quad (3)$$

表 1  $d_i$  和  $c_j$  赋值表

Tab. 1 Values of  $d_i$  and  $c_j$

量化等级		隶属度 $\mu$		
		1	2	3
语言变量	C	1	0	0
	HP	1	0	0
	N	0	1	0
	P	0	1	0
	F	0	0	1
	NP	0	0	1

2.2.2 第二模糊推理层

第二模糊推理层(以下简称第二层)的任务是根据 ROV 运动行为特点, 经过输入变量模糊关系合成, 得到控制 ROV 到达给定目标点的模糊控制输出. 设路径规划器的规划结果为: ROV 的期望航向角  $A_d$ , 期望速度  $V_d$ , 期望深度  $H_d$ . ROV 的实际航向角、速度和深度分别为  $A$ 、 $V$ 、 $H$ . 期望值与当前值的误差为:  $e_a = A - A_d$ ,  $e_v = V - V_d$ ,  $e_h = H - H_d$ . 则第二层的输入变量是  $e_a, e_v, e_h$  的量化模糊变量  $E_a, E_v, E_h$  和第一层的输出  $c_j$ .  $E_a, E_v, E_h$  分为 7 个等级, 语言变量分别为  $LE_a, LE_v, LE_h$ , 量化原则同式(1), 隶属度关系如表 2.

$E_a = \{PB(\text{向右偏的角度很大}), PM(\text{向右偏的角度较小}), PS(\text{向右偏的角度很小}), ZZ(\text{航向角没有差}), NS(\text{向左偏的很小}), NM(\text{向左偏较小}), NB(\text{向左偏的很大})\}$ ,  $E_v = \{PB(\text{很快}), PM(\text{快}), PS(\text{快一点}), ZZ(\text{正好}), NS(\text{慢一点}), NM(\text{慢}), NB(\text{很慢})\}$ ,  $E_h = \{PB(\text{向上很大}), PM(\text{向上较小}), PS(\text{向$

上很小), ZZ(正好), NS(向下很小), NM(向下较小), NB(向下很大)\}, 第二层的模糊输出是航向角、速度和深度修正值的模糊变量  $D_a, D_v, D_h$ , 对应的语言值分别为  $LD_a, LD_v, LD_h$ , 每个语言变量也分为 7 个等级, 量化原则和隶属度关系的确定方法与输入变量相同.

第二层规则库中的模糊规则形式如下:

$$\begin{aligned} & \text{IF } (c_j \text{ IS } LC) \text{ AND } (E_a \text{ IS } LE_a) \text{ AND} \\ & (E_v \text{ IS } LE_v) \text{ AND } (E_h \text{ IS } LE_h) \text{ THEN} \\ & (D_a \text{ IS } LD_a) \text{ AND } (D_h \text{ IS } LD_h) \\ & \text{AND } (D_v \text{ IS } LD_v) \end{aligned}$$

表 2  $E_a, E_v, E_h$  赋值表

Tab. 2 Values of  $E_a, E_v, E_h$

量化等级		隶属度						
		- 3	- 2	- 1	0	1	2	3
语言变量	PB	0	0	0	0	0	0.5	1
	PM	0	0	0	0	0	1	0.5
	PS	0	0	0	0	1	0.5	0
	ZZ	0	0	0	1	0	0	0
	NS	0	0.5	1	0	0	0	0
	NM	0.5	1	0	0	0	0	0
	NB	1	0.5	0	0	0	0	0

导航输出的模糊关系表示为  $N = A \times H \times V$ , 设  $IN_{AND}(c_j, E_a, E_v, E_h)$  表示四个输入模糊变量的共同输入,  $\mu(c_j, E_a, E_v, E_h)$  为四个输入模糊变量共同作用得到的隶属度,  $R_N(c_j, E_a, E_v, E_h, D_a, D_v, D_h)$  表示导航输出的模糊关系矩阵,  $\mu(c_j, E_a, E_v, E_h, D_a, D_v, D_h)$  为所有模糊规则得到的隶属度的统一表达式, 第二层的输出模糊隶属度依照隶属度取最大的原则为:

$$\begin{aligned} \mu_N(dA, dH, dV) &= \max\{IN_{AND}(c_i, A, H, V) \circ R_N(c_j, A, H, V, dA, dH, dV)\} \\ &= \max_{c_i, A, H, V} \min\{\mu(c_i, A, H, V), \mu(c_j, A, H, V, dA, dH, dV)\} \end{aligned} \quad (4)$$

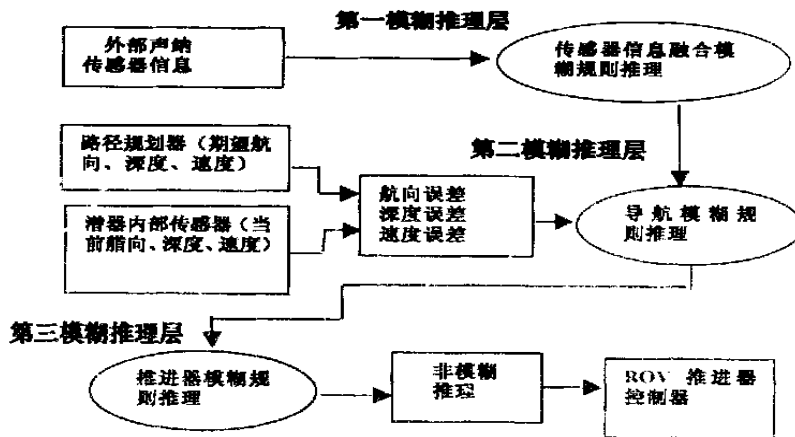


图 2 三层控制器的结构 Fig. 2 Structure of three layers controller

2.2.3 第三模糊推理层

第三模糊推理层(以下简称第三层)是对推进器实施底层控制,本文应用背景的 ROV 装有四个推进器,两个为水平推进,两个为垂直方向的推进.为了使 ROV 转到一个新的航线,可以通过调节推进器马达的转速和转动方向来实现.ROV 的水平航向和深度的控制是可以解耦的,ROV 的最终速度和航向角是二者的合成效果.第三层的输入是第二层的输出模糊变量  $D_a, D_v, D_h$ , 第三层的输出是推进器的模糊控制量:  $l_i$ (左边水平推进器),  $r_i$ (右边水平推进器),  $p_i$ (垂直推进器), 这三个控制变量的模糊语言变量分别是  $LL_T, LR_T, LP_T$ , 模糊子集为  $L_T, R_T, P_T$ .

$L_T = R_T = \{ \text{全速前进, 中速前进, 低速前进, 停车, 低速后退, 中速后退, 全速后退} \}$ ,

$P_T = \{ \text{全速上升, 中速上升, 低速上升, 停车, 低速下降, 中速下降, 全速下降} \}$ .

规则库中的控制规则形式如下:

IF( $D_a$  IS  $LD_a$ )AND( $D_h$  IS  $LD_h$ )AND( $D_v$  IS  $LD_v$ ),  
THEN ( $r_i$  IS  $LR_T$ ) AND ( $l_i$  IS  $LL_T$ ) AND ( $p_i$  IS  $LP_T$ ).

### 3 仿真结果(Simulation)

为了验证上述模糊控制方法,我们模拟海上钻井平台的水下支撑部份建立了一个水下 3D 仿真环境,要求 ROV 载着检测仪器在支架的空隙中穿行.环境中支架的几何参数和位置信息由两种形式得到,一是事先建立好的全局数据库,包含所有的环境知识,属于结构化环境;另一种形式是采用虚拟距离传感器信息,得到 ROV 所在位置的局部信息,这种形式更接近实际情况.图 3 给出规划器规划出的 3D 空间中的一条轨迹和采用三层模糊推理控制器控制潜器跟踪轨迹的运动结果.给定轨迹由航向角、运动速度和深度描述,设与 X 正方向一致的航向角为零,以 X 轴正向为起点,逆时针旋转为正向.设 ROV 所在的深度为相对零点,垂直向上为正.由图中看出,ROV 在跟踪给定轨迹过程中,遇到障碍时,成功绕开障碍物,最终回到预定的航向和深度.

### 4 结论(Conclusion)

本文提出 ROV 水下导航的模糊逻辑表达方式和多层模糊推理控制器的结构,基于传感器信息,给出三维空间模糊导航的控制方法.该方法的特点是模糊控制器采用单一控制模式导航 ROV,使 ROV

能够跟踪规划的轨迹,并且回避轨迹上的障碍.3D 图形仿真的结果验证了该方法的有效性.

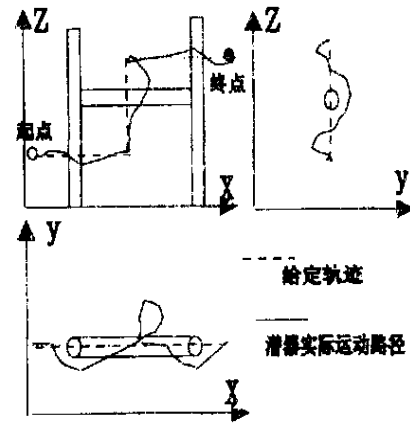


图 3 仿真实验结果

Fig. 3 The result of simulation

### 参 考 文 献(References)

- 1 L ACOSTA, G N MARICHAL, *etc.* Obstacle Avoidance Using the Hum an Operator Experience for a Mobile Robot, *Journal of Intelligent and Robotic System s*, 2000, **27**: 305~ 319
- 2 S Jagannathan, F L Lew is. Discrete-time Adaptive Fuzzy Logic Control Of Robotic System s, *Pro. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2586~ 2591
- 3 SH IGKEI ISH IKAWA, A Method of Autonom ous Mobile Robot Navigation by Using Fuzzy Control, *Advanced Robotics*, 1995, **9** (1): 29~ 52
- 4 D GRACANIN, K P VALAVANIS, *etc.* Virtual-environment-based Navigation and Control of Underwater Vehicles, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, June 1999, 53~ 62
- 5 P G ZAVLANGAS, S G TZAFESTAS. Industrial Robot Navigation and Obstacle Avoidance Employing Fuzzy Logic, *Journal of Intw lligent and Robotic System s*, 2000, **27**: 85~ 97
- 6 I J Rudas, A Szeghegyi, J F Bitó, *etc.* Improvement of Fuzzy Logic Robot Controllers Using Inverse Entropy Based T-Operations, *Pro. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2598~ 2603
- 7 Homayoun Seraji. Fuzzy Traversability Index: A New Concept for Terrain-Based Navigation, *Journal of Roboti\_c System s*, 2000, **17**(2): 75~ 91

### 作者简介

赵晓光(1970- ), 博士研究生. 研究领域为自动控制理论, 智能控制, 虚拟现实.

戴 炬(1946- ). 研究领域为机器人.

赵经纶(1936- ). 研究领域为机器人.