

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0462-07

论文索引信息: 叶秀芬, 关红玲, 张哲会, 杨博文. 用于避障研究的微型仿生机器鱼3维仿真系统[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 462-468

# 用于避障研究的微型仿生机器鱼3维仿真系统

叶秀芬<sup>1)</sup>, 关红玲<sup>1)</sup>, 张哲会<sup>1)</sup>, 杨博文<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001) <sup>2)</sup>(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 基于 VC++ 6.0 开发环境和 OpenGL(open graphics library) 国际图形标准, 在 Windows 系统下开发了微型仿生机器鱼 3 维仿真系统。该系统可以降低用实体机器鱼进行机器鱼避障能力研究的成本和减少在研究过程中对实体机器鱼造成的损害。采用多边形建模的方法构建了虚拟微型仿生机器鱼模型, 模拟了鱼类尾鳍的摆动。提出了一种模拟红外传感器探测障碍物的虚拟射线方法。并采用实时模糊决策算法设计了基于多传感器信息的复合模糊控制器, 决策微型仿生机器鱼的避障行为。仿真实验表明, 复合模糊控制器实时性好、效率高; 无论是单个任意形状的障碍物还是多个连续障碍物, 复合模糊控制器都能有效地引导仿生机器鱼避开障碍物, 到达目标点。微型仿生机器鱼 3 维仿真系统为研究仿生机器鱼的自主避障能力提供了可靠、逼真、便利的平台。

**关键词:** 微型仿生机器鱼; 复合模糊控制器; 自主避障

## 3D simulation system of micro robotic fish for obstacle avoidance research

Ye Xiufen<sup>1)</sup>, Guan Hongling<sup>1)</sup>, Zhang Zhehui<sup>1)</sup>, Yang Bowen<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001 China)

<sup>2)</sup>(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001 China)

**Abstract:** A 3D simulation system of micro robotic fish was developed in windows operation system with VC++ 6.0 developing environment and OpenGL international graphic standard, in order to reduce the cost of obstacle avoidance research using real robotic fish and reduce the damage to the real robotic fish. A virtual robotic fish was built using polygon modeling method and the swing of fish tail was simulated. A virtual ray method which simulated infrared sensor detecting obstacles was proposed. Based on the information of multiple sensors, a composite fuzzy controller using real time fuzzy control algorithm was designed to decide the avoidance behavior of micro robotic fish. The simulation results demonstrate the composite fuzzy controller is of real-time and has high efficiency. Micro robotic fish was efficiently conducted by the composite fuzzy controller to avoid both single arbitrary shape obstacle and multiple continuous obstacles and achieved the targeting result. A reliable, realistic and convenient platform was provided for researching the autonomous obstacles avoidance capacity of micro robotic fish.

**Keywords:** micro robotic fish; composite fuzzy controller; autonomous obstacles avoidance

## 0 引言

自然界中, 鱼类经过数千年的进化具有惊人的

游动能力, 鱼类这种惊人的游动能力引起了科学界的广泛关注。随着仿生学、机器人学和材料学等科学的发展, 科学家们开始研究和制作水下仿生机器人(即仿生机器鱼), 仿生机器鱼的研制极大地加快

收稿日期: 2009-10-10; 修回日期: 2009-12-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA04Z248)。

第一作者简介: 叶秀芬(1966—), 女, 教授。2003年于哈尔滨工程大学获控制理论与控制工程专业工学博士学位, 主要研究方向为微型仿生机器鱼、虚拟现实、图像处理。E-mail: yexiufen@hrbeu.edu.cn。

了水下机器人研究的步伐。微小型仿生机器鱼以其体积小、机动性高、噪声小、灵活性好和适应性强等特点成为仿生机器鱼研究的热点。微小型仿生机器鱼具有广阔的应用领域,在很多特殊场合具有极高的应用价值。比如,水下管道检测、狭缝探测、鱼类生活习性及鱼群特性研究等,多个微小型机器鱼通过群体协作还可完成更复杂的任务。

目前,对机器鱼的研究主要集中于对机器鱼的游动特性和运动控制的研究以及利用新型材料、新科技对机器鱼的机构和驱动特性进行改进,提高机器鱼的综合性能<sup>[1-4]</sup>。自主导航和避障能力是机器鱼完成水下环境作业任务的前提和关键。对机器鱼避障能力的研究对推动机器鱼实际应用起着至关重要的作用。目前,对机器鱼自主导航和避障能力的研究主要表现在以下两方面:对实体机器鱼直接进行自主导航和避障试验<sup>[5-6]</sup>;采用摄像头和实体机器鱼并借助图像处理方法间接对实体机器鱼进行避障试验<sup>[7]</sup>。然而对实体机器鱼进行避障研究成本高、难度大、对实体机器鱼危害也大。而利用虚拟现实技术不仅可以检验避障算法的有效性,还能直观、全面地观察避障的整个过程,并且能较好地实现人机交互。因此,开发微型仿生机器鱼3维仿真系统,实现对实时避障算法的研究和直观逼真的演示,将为实体机器鱼避障能力的研究奠定基础。对机器鱼避障算法的研究主要有增强学习算法、规则法、基于视觉信息的栅格法、趋光算法和模糊神经网络等<sup>[5-9]</sup>。对于机器鱼避障作业,实时性是关键因素。模糊决策算法具有计算简单,实时性好的特点,被广泛用于水下机器人避障<sup>[10-11]</sup>。基于此,本文提出了基于多传感器信息的模糊避障算法,设计了包含两个转角模糊控制器和一个速度模糊控制器的复合模糊控制器,决策机器鱼的避障行为。

## 1 仿生机器鱼3维仿真系统总体结构

该3维仿真系统是以实验室研制的ICPF驱动的微型仿生机器鱼为原型<sup>[12]</sup>,普通PC作为硬件实验平台,在Windows系统下以VC++6.0作为开发环境、OpenGL作为仿真建模工具开发的。3维仿真系统的更新周期为250 ms。普通PC的配置为

CPU: Intel Celeron 2.80 GHz;

内存: 512 MB;

硬盘: 160 GB;

显卡: NVIDIA GeForce4 Ti 4600;

显示器: 三星17英寸彩色液晶显示器。

仿生机器鱼3维仿真系统由人机接口层、数据层和对象层以及人机接口模块、传感器模块、仿真环境模块和机器鱼模块组成。该仿真系统的总体结构如图1所示。

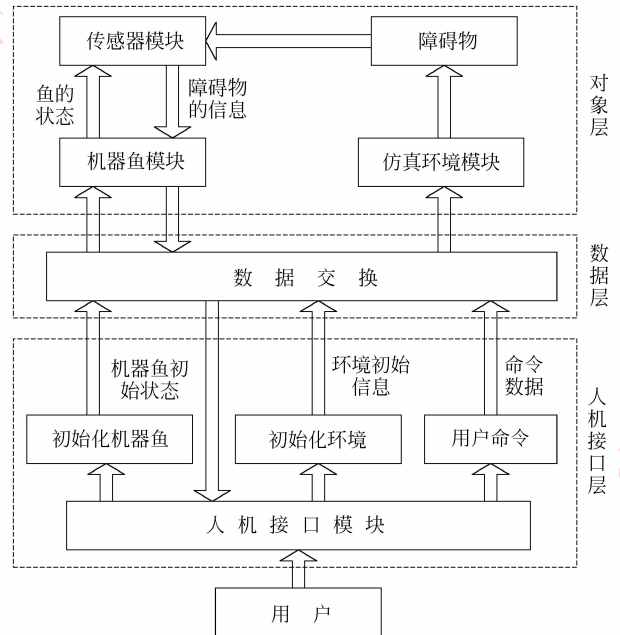


图1 仿真系统总体结构

Fig. 1 General structure of simulation system

人机接口层是用户和仿真系统的交互层。通过人机接口层,用户可以初始化仿真环境中的对象,包括机器鱼的位置姿态、目标的位置和仿真环境中障碍物的形状、大小和位置等以及控制实时仿真的过程,例如启动和暂停任务、复位、显示传感器和路径、加载地形等。图2为微型仿生机器鱼3维仿真系统的界面。

数据层是人机接口层和对象层的桥梁,该层主要负责数据的存储和交换。一方面,数据层将人机接口层中用户的初始化环境信息和控制命令传递给对象层,对象层根据用户的要求刷新仿真系统的环境和控制仿真过程;另一方面,数据层把对象层中实时的环境信息和仿真过程反馈给人机接口层显示,供用户监控仿真过程。

对象层包括传感器模块、机器鱼模块和仿真环境模块。该层主要负责仿真系统中机器鱼状态、仿真环境以及任务的实时刷新。仿真环境是指机器鱼游动的水下环境,包括障碍物和目标等。



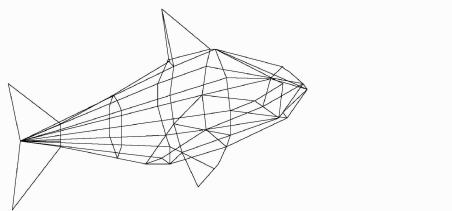
图 2 微型仿生机器鱼 3 维仿真系统界面

Fig. 2 Interface of micro robotic fish 3D simulation system

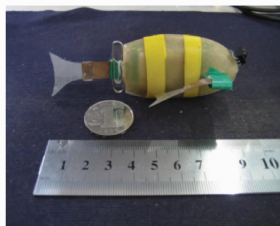
## 2 虚拟机器鱼模型的建立

### 2.1 微型仿生机器鱼建模

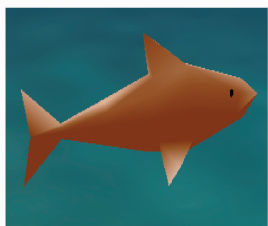
本文使用 OpenGL 作为本仿真系统的建模工具,采用多边形建模的方法构建虚拟机器鱼的模型。该方法计算简单、效率高、实时性好。虚拟机器鱼的结构如图 3(a)所示。然后,利用 OpenGL 提供的光照、材质和纹理等功能对构建的机器鱼模型进行渲染,使其更逼真、平滑。图 3(b)(c)为实体机器鱼和虚拟机器鱼效果图。



(a) 虚拟机器鱼结构



(b) 实体机器鱼



(c) 虚拟机器鱼

图 3 实体机器鱼和虚拟机器鱼

Fig. 3 Real and virtual robotic fish

### 2.2 微型仿生机器鱼尾鳍摆动特性

经过科学家们对鱼类游动时尾鳍摆动过程的长

期观察和研究发现,鱼类尾鳍的摆动近似为方程(1)描述的正弦波<sup>[13]</sup>:

$$y_{\text{body}}(x, t) = (c_1x + c_2x^2) \sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

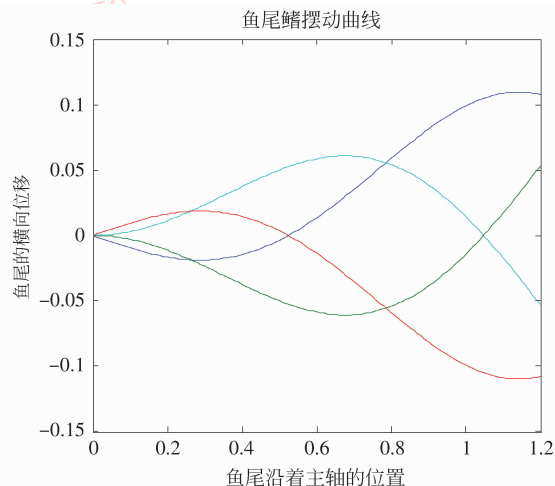
式中,  $y_{\text{body}}$  为鱼尾部的摆动位移,  $x$  为沿着鱼体主轴的位移,  $c_1$  为 1 次波振幅包络线系数,  $c_2$  为 2 次波振幅包络线系数,  $k = 2\pi/\lambda$  为正弦波的波数;  $\lambda$  为波长,  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  为正弦波的频率,  $f$  为尾鳍摆动频率,  $t$  是时间。

鱼类的游动是靠鱼体脊柱无数脊椎的推动实现的,鱼体的脊椎可看成微小的关节,每个关节的摆动都近似式(1)。ICPF 这种新型智能材料能够模拟鱼类的无数关节,从而能更平滑的模拟鱼类尾鳍的摆动。使用它作为尾鳍的机器鱼,在游动过程中,尾部的摆动非常近似方程式(1)。

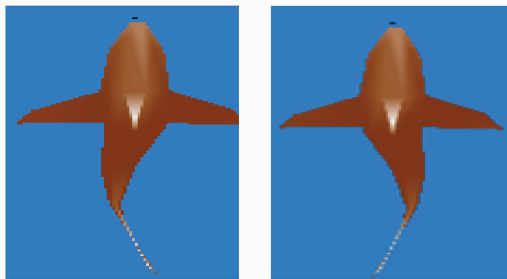
在仿真系统中模拟鱼尾的摆动特性,需将机器鱼尾部的摆动方程式(1)离散化为鱼尾摆动的离散方程

$$y_{\text{body}}(x, i) = (c_1x + c_2x^2) \sin\left(kx - \frac{2\pi}{M}i\right) \quad (2)$$

式中,  $i$  为一个周期内第  $i$  个离散点的序号;  $M$  为一个周期内的离散点数。图 4(a)为  $c_1 = 0.1, c_2 = 0.0$ ,



(a) 虚拟机器鱼尾鳍摆动曲线



(b) 虚拟机器鱼尾鳍摆动效果图

图 4 虚拟机器鱼尾鳍摆动特性

Fig. 4 Characteristic of virtual robotic fish tail swing

$k=3, M=4$  时一个周期内的尾鳍摆动曲线。虚拟机器鱼尾鳍摆动效果如图 4(b) 所示。因此,将式(1)分解成两部分:与时间无关的正弦波序  $y_{\text{body}}(x, i)$  ( $i=0, 1, \dots, M-1$ ) 和依赖于时间的鱼尾摆动频率  $f$ ,  $f$  在仿真系统中为  $y_{\text{body}}(x, i)$  和  $y_{\text{body}}(x, i+1)$  的时间间隔<sup>[14]</sup>。

### 3 障碍物探测

为使机器鱼具备自主避障能力,必须为其配备传感器。本文中的机器鱼使用红外传感器作为感知外部环境的工具<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 红外传感器模拟

根据机器鱼的尺寸在其头部安装 4 个红外传感器。4 个红外传感器位于机器鱼头部,左右两侧各两个,分别标记为  $L_1, R_1, L_2, R_2$ 。 $L_1$  和  $R_1$  位于机器鱼头部正前方,  $L_2$  和  $R_2$  位于距离机器鱼中心点  $d$  处。 $L_1, R_1, L_2, R_2$  分别偏离机器鱼体中轴线的角度为  $\eta, -\eta, 2\eta$  和  $-2\eta$ 。采用虚拟射线模拟红外传感器,即假设 4 个红外传感器以其在鱼体坐标系下的坐标为原点,其水平探测范围为张角向前发射  $n$  条射线,用这些射线来模拟红外传感器发射的红外线。该射线的长度即为红外传感器的探测距离,张角为其探测范围。根据虚拟射线的长度以及其与传感器中心线的夹角,可以计算出虚拟射线端点即传感器探测点在传感器坐标系下的坐标。虚拟射线法根据传感器探测点与障碍物的相对位置关系判断在传感器的探测范围内是否存在障碍物。

#### 3.2 坐标变换

使用虚拟射线法在仿真系统中探测障碍物时需使用同一坐标系下的坐标表示传感器探测点和障碍物的位置信息。但是,传感器探测点的坐标是由传感器坐标系下的坐标表示的,而障碍物的信息是用全局坐标系下的坐标表示的。因此,需要对传感器探测点与障碍物的坐标进行变换。本文将传感器探测点相对于传感器的坐标变换为全局坐标。在仿生机器鱼 3 维仿真系统中已知机器鱼的全局位置信息。为了简化计算,以 OpenGL 的坐标系建立全局坐标系。

##### 3.2.1 传感器坐标与全局坐标变换

传感器的位置坐标是在鱼体坐标系下的坐标,首先需要将传感器的鱼体坐标转换为全局坐标。建立如图 5 所示的全局坐标系和鱼体坐标系。

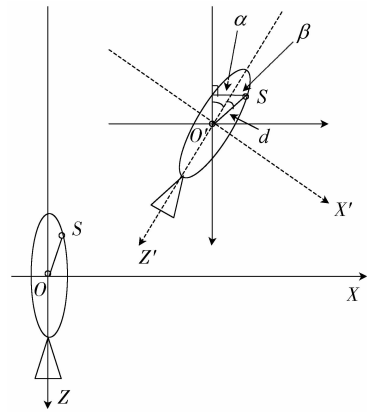


图 5 鱼体坐标系与全局坐标系

Fig. 5 Robotic fish coordinates and global coordinates

图 5 中,  $OXZ$  为全局坐标系;  $O'X'Z'$  为鱼体坐标系; 点  $S$  为传感器;  $\alpha$  为机器鱼的艏向角;  $\beta$  为传感器与机器鱼体中轴线的夹角。  $d$  为传感器到鱼体坐标系原点的距离。已知机器鱼的全局坐标  $(x, z)$ , 传感器在全局坐标系下的坐标  $(x_1, z_1)$  可由式(3)算出:

$$\begin{cases} x_1 = x + d \sin((-1)(\alpha + \beta)) \\ z_1 = z - d \cos((-1)(\alpha + \beta)) \end{cases} \quad (3)$$

##### 3.2.2 传感器探测点坐标与全局坐标变换

传感器探测点的坐标是相对于传感器坐标系的坐标,而障碍物的信息是相对于全局坐标系的,因此需要将传感器探测点相对于传感器坐标系的坐标转换为全局坐标。图 6 为传感器坐标系与全局坐标系。

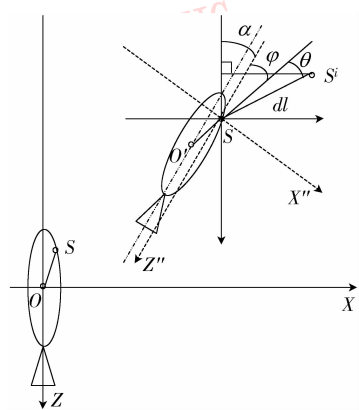


图 6 传感器坐标系与全局坐标系

Fig. 6 Sensor coordinates and global coordinates

图 6 中,  $OXZ$  为全局坐标系;  $SX''Z''$  为传感器坐标系;  $S^i$  为传感器探测点;  $\alpha$  为机器鱼的艏向角;  $\varphi$  为传感器的安装方向与鱼体中轴线的夹角;  $\theta$  为传感器探测点与传感器轴线的夹角;  $dl$  为传感器的探测

距离。已知传感器全局坐标  $(x_1, z_1)$ ，可由式(4)得传感器探测点的全局坐标

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + dl \sin((-1)(\alpha + \varphi + \theta)) \\ z_2 = z_1 - dl \cos((-1)(\alpha + \varphi + \theta)) \end{cases} \quad (4)$$

### 3.3 虚拟射线法探测障碍物

为了简化不同形状障碍物的探测难度,将仿真系统中的障碍物分为两类:球体类和柱体类,并提出了基于包围球的球体类障碍物的探测方法和基于包围盒的柱体类障碍物的探测方法。

#### 3.3.1 基于包围球的球体类障碍物的探测方法

包围球的意思是将球体类障碍物如球、圆柱、圆锥等用一个球体包围起来。包围球的球心为球体类障碍物的中心,半径为球体类障碍物的中心到其表面的最长距离。包围球法是根据传感器探测点的全局坐标与包围球球心的全局坐标之间的距离  $d$  和其半径  $r$  的大小来判断是否探测到障碍物。如果  $d < r$ ,则有障碍物,否则,没有障碍物。

#### 3.3.2 基于包围盒的柱体类障碍物的探测方法

包围盒的意思是用一个足够大的盒子将柱体类障碍物如长方体、三棱柱等包围起来。柱体类障碍物在仿真系统中是由顶点坐标表示其几何形状的。包围盒的确定依赖于柱体类障碍物顶点坐标各分量的最大值和最小值。根据传感器探测点的全局坐标  $(x_2, z_2)$  的  $x$  分量和  $z$  分量与包围盒顶点全局坐标的  $x$  分量和  $z$  分量的最大值  $x_{max}, z_{max}$  和最小值  $x_{min}, z_{min}$  的位置关系可以判断是否存在障碍物。即如果  $x_{min} < x_2 < x_{max}$  且  $z_{min} < z_2 < z_{max}$ ,则在传感器的探测范围内探测到障碍物,否则,认为在传感器的探测范围内没有障碍物。

## 4 基于多传感器信息的模糊避障算法

机器鱼的自主避障能力是指机器鱼游动时根据传感器信息采取有效的避障算法避开出现的未知障碍物的能力。实时性是机器鱼自主避障的关键。模糊决策法算法简单,实时性好,可以满足机器鱼自主避障的要求。

### 4.1 复合模糊控制器的设计

根据机器鱼红外传感器的配置,设计了由  $L_1, R_1$  转角模糊控制器、 $L_2, R_2$  转角模糊控制器和速度模糊控制器构成的复合模糊控制器,对机器鱼的避障行为进行决策。图 7 为复合模糊控制器结构图。

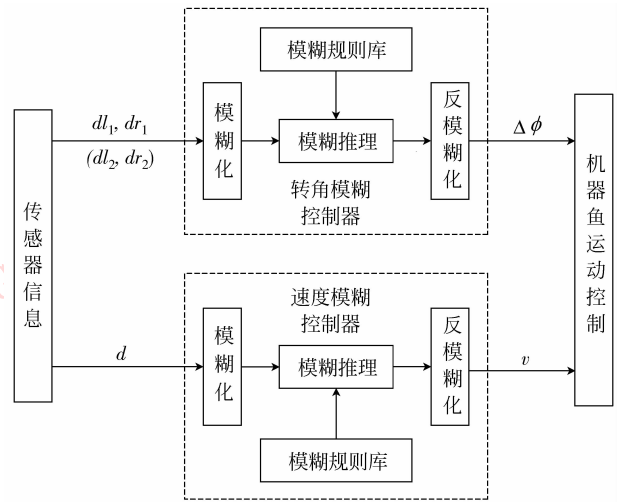


图 7 复合模糊控制器结构  
Fig. 7 Structure of composite fuzzy controller

两个转角模糊控制器的输入为 4 个红外传感器  $L_1, R_1, L_2, R_2$  探测到的障碍物相对于机器鱼的距离,输出为机器鱼转弯角度的增量  $\Delta\phi$  (向左转,逆时针为正;向右转,顺时针为负)。

4 个红外传感器  $L_1, R_1, L_2, R_2$  返回的障碍物相对于机器鱼的距离中以最近的距离  $d$  作为速度模糊控制器的输入,机器鱼的速度  $v$  作为输出。4 个红外传感器返回的障碍物信息既体现了机器鱼与障碍物的距离信息,也体现了二者的方位信息,它们全面的反映了环境信息。

$dl_1, dr_1, dl_2, dr_2$  这 4 个参数是根据虚拟红外传感器探测障碍物的信息计算得到。当探测到障碍物时,根据红外传感器虚拟射线的端点在传感器坐标系的坐标及坐标变换可计算出 4 个虚拟红外传感器探测到的机器鱼与障碍物之间的距离。

### 4.2 模糊子集和隶属度函数

模糊控制器的输入  $dl_1, dr_1, dl_2, dr_2, d$  的模糊语言变量分别为  $DL_1, DR_1, DL_2, DR_2, D$ ; 论域均为  $[0, 10]$ ; 模糊子集为  $\{NT, NR, N, M, F, FR, FT\}$ , 其中,  $NT$  为很近;  $NR$  为较近;  $N$  为近;  $M$  为中;  $F$  为远;  $FR$  为较远;  $FT$  为很远。输出转角的增量  $\Delta\phi$  和速度  $v$  的模糊语言变量为  $\Phi$  和  $V$ 。  $\Phi$  的论域为  $[-5, 5]$ , 模糊子集为  $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB, CANNOT\}$ , 其中  $NB$  为负大;  $NM$  为负中;  $NS$  为负小;  $O$  为零;  $PS$  为正小;  $PM$  为正中;  $PB$  为正大;  $CANNOT$  为不能决策。  $V$  的论域为  $[0.03, 0.5]$ , 模糊子集为  $\{VSB, VSM, VSS, VM, VBS, VBM, VBB\}$ , 其中  $VSB$  为最小;  $VSM$  为

较小;VSS 为小;VM 为中;VBS 为大;VBM 为较大;VBB 为最大。隶属度函数取三角形和梯形函数。

4.3 模糊规则库

机器鱼自主避障的转弯控制规则是:当  $DL_1, DR_1$  不相同,由  $L_1, R_1$  转角模糊控制器控制机器鱼采取何种避障措施。当左侧障碍物“较近”(NR)而右侧障碍物“较远”(FR)时,仿生微机器鱼向右转“中”角度(NM 为负)避障;当左侧障碍物“很近”(NT)而右侧障碍物“很远”(FT)时,机器鱼向右转“大”角度(NB 为负)避障。 $L_1, R_1$  转角模糊控制器规则库的规则形式如下:

If ( $DL_1$  is NR and  $DR_1$  is FR) then ( $\Phi$  is NM)

If ( $DL_1$  is NT and  $DR_1$  is FT) then ( $\Phi$  is NB)

当  $DL_1, DR_1$  相同时,不能由  $L_1, R_1$  转角模糊控制器做出避障决策,改由  $L_2, R_2$  转角模糊控制器决策机器鱼的避障行为。当左侧障碍物“很近”(NT),右侧障碍物也“很近”(NT)时,机器鱼右转“大”角度(NB 为负)避障。当左侧障碍物“很近”(NT),右侧障碍物“较近”(NR)时,机器鱼右转“中”角度(NM 为负)避障。 $L_2, R_2$  转角模糊控制器规则库的规则形式如下:

If ( $DL_1$  is NT and  $DR_1$  is NT) then ( $\Phi$  is NB)

If ( $DL_1$  is NT and  $DR_1$  is NR) then ( $\Phi$  is NM)

机器鱼自主避障过程中速度的控制规则为:当障碍物与机器鱼距离“很近”(NT)时,采用“最小”速度(VSB)结合转角模糊控制器决策出的转角增量实现转弯避障。速度模糊控制器规则库的规则具有如下形式:

If ( $D$  is NT) then ( $V$  is VSB)

表 1、表 2 和表 3 分别为  $L_1, R_1$  转角模糊控制器、 $L_2, R_2$  转角模糊控制器和速度模糊控制器的模糊控制规则表。

4.4 模糊推理及决策

采用 Mamdani(min-max) 决策方法建立模糊决

表 1  $L_1, R_1$  转角模糊控制器模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules of  $L_1, R_1$  turning fuzzy controller

$DL_1$	$DR_1$						
	NT	NR	N	M	F	FR	FT
NT	CANNOT	NS	NS	NM	NM	NB	NB
NR	PS	CANNOT	NS	NS	NM	NM	NB
N	PS	PS	CANNOT	NS	NS	NM	NM
M	PM	PS	PS	CANNOT	NS	NS	NM
F	PM	PM	PS	PS	CANNOT	NS	NS
FR	PB	PM	PM	PS	PS	CANNOT	NS
FT	PB	PB	PM	PM	PS	PS	CANNOT

表 2  $L_2, R_2$  转角模糊控制器模糊规则

Tab.2 Fuzzy rules of  $L_2, R_2$  turning fuzzy controller

$DL_2$	$DR_2$						
	NT	NR	N	M	F	FR	FT
NT	NB	NM	NM	NB	NB	NB	NB
NR	PM	NM	NM	NM	NB	NB	NB
N	PM	PM	NS	NM	NM	NB	NB
M	PB	PM	PM	O	NM	NM	NB
F	PB	PB	PM	PM	O	NM	NM
FR	PB	PB	PB	PM	PM	O	NM
FT	PB	PB	PB	PB	PM	PM	O

表 3 速度模糊控制器模糊规则

Tab.3 Fuzzy rules of velocity fuzzy controller

$D$	NT	NR	N	M	F	FR	FT
V	VSB	VSM	VSS	VM	VBS	VBM	VBB

策量表<sup>[16]</sup>。模糊控制器进行模糊推理时,通过查询模糊决策量表得到模糊控制量,然后采用重心法对模糊控制量进行反模糊化处理得到精确控制量以控制机器鱼避障。

5 仿真实例

在开发的微型仿生机器鱼 3 维仿真系统中,采用基于多传感器信息的复合模糊控制器对机器鱼自主避障能力和避障算法进行视景仿真实验。在仿真开始前,用户可通过人机接口层设置机器鱼的初始状态,包括位置和方向,目标点的位置,障碍物的个数、形状、大小、位置等信息。图 8 为微型仿生机器鱼在 3 维仿真系统中的避障实验图。

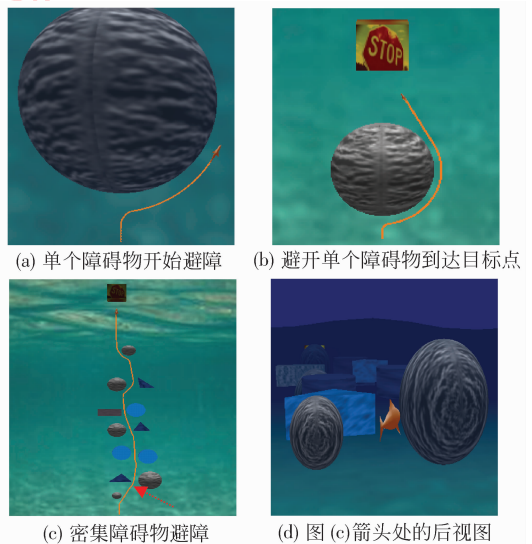


图 8 避障仿真实验

Fig.8 Obstacles avoidance simulation experiments

从仿真实验结果可以看出,3 维仿真系统中的虚拟红外传感器能使机器鱼全面感知外部环境;在该 3 维仿真系统中能全面直观地观察机器鱼的避障过程,有效地检验避障算法的可靠性和机器鱼的避障能力。无论环境中分布着单个障碍物还是多个密集的障碍物,复合模糊控制器都能有效地引导机器鱼避开障碍物到达目标点,在避障过程中机器鱼的路径也较平滑。

## 6 结 论

目前用实体机器鱼进行机器鱼避障能力研究和避障算法有效性检验的成本高、难度大,并且可能对实体机器鱼造成损害,与之相比,用于微型仿生机器鱼避障研究的 3 维仿真系统避免了这些问题。开发的 3 维仿真系统中虚拟机器鱼完全以实体机器鱼为原型,其特性符合实体机器鱼的基本特性,虚拟红外传感器也是根据实际红外传感器探测障碍物的特性模拟的,因此,它能逼真和可靠地模拟实际情况。而且仿真实验结果表明,该 3 维仿真系统能直观逼真地演示机器鱼的避障过程、全面地反映机器鱼的避障能力、有效地检验避障算法的可靠性。微型仿生机器鱼 3 维仿真系统为机器鱼避障能力的研究和避障算法的检验提供了可靠、便利的平台。由于仿真中没有考虑水流对机器鱼的影响,为此,在后续的研究工作中,将会在仿真系统中加入水流的因素。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhang Yimin, Zhan Xingqun, Zhang Yanhua. A study on the motion law of biomimetic robot fish[J]. Ship Building of China, 2006, 47(3): 90-94. [张义明,战兴群,张炎华. 仿生机器鱼的运动规律研究[J]. 中国造船,2006,47(3):90-94.]
- [ 2 ] Hang Guanrong, Wang Zhenlong, Li Jian, et al. Development of a caudal-fin-propelled micro robot fish based on flexible fins[J]. Robot, 2008, 30(2): 171-175. [杭观荣,王振龙,李健,等. 基于柔性鳍推进微型机器鱼设计研究[J]. 机器人,2008,30(2): 171-175.]
- [ 3 ] Yang Shaobo, Han Xiaoyun, Zhang Daibin, et al. Design and development of a new kind of pectoral oscillation propulsion robot fish[J]. Robot, 2008, 30(6): 508-515. [杨少波,韩小云,张代兵,等. 一种新型的胸鳍摆动模式推进机器鱼设计与实现[J]. 机器人,2008,30(6):508-515.]
- [ 4 ] Hu Huosheng, Liu Jindong, Dukes Ian, et al. Design of 3D swim patterns for autonomous robotic fish[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006; 2406-2411.
- [ 5 ] Sang Haiquan, Wang Shuo, Tan Min, et al. Autonomous obstacle avoidance of biomimetic robot fish based on infrared sensor[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1400-1404. [桑海泉,王硕,谭民,等. 基于红外传感器的仿生机器鱼的自主避障控制[J]. 系统仿真学报,2005,17(6):1400-1404.]
- [ 6 ] Sheng Zhizhong, Cao Zhiqiang, Tan Min, et al. Control of obstacle avoidance of biomimetic robot fish based on reinforcement learning[J]. Chinese High Technology Letters, 2006, 16(12): 1253-1258. [沈志忠,曹志强,谭民,等. 基于增强式学习的仿生机器鱼避障控制[J]. 高技术通讯,2006,16(12):1253-1258.]
- [ 7 ] Chen Erkui, Yu Junzhi, Wang Shuo, et al. Real-time obstacle-avoidance synthesized method for bionic robot fish based on visual information[J]. Control and Decision, 2004, 19(4): 452-458. [陈尔奎,喻俊志,王硕,等. 一种基于视觉的仿生机器鱼实时避障综合方法[J]. 控制与决策,2004,19(4):452-458.]
- [ 8 ] Shin Daejung, Na Seungyou, Kim Jinyoung, et al. Fuzzy neural networks for obstacle pattern recognition and collision avoidance of fish robots[J]. Soft Computing, 2008, 12(7): 715-720.
- [ 9 ] Zhou Chao, Cao Zhiqiang, Wang Shuo, et al. A miniature biomimetic robotic fish and its real time path planning[J]. Spring Tracts in Advanced Robotics, 2008, 42: 147-156.
- [ 10 ] Ma Wenjie, Yan Weisheng, Gui Zhihui. Obstacle avoidance for AUV in virtual environment[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(2): 21-24. [马文杰,严卫生,桂志辉. 虚拟环境下自主水下航行器的避障研究[J]. 鱼类技术,2008,16(2):21-24.]
- [ 11 ] Xu Hongli, Feng Xisheng. Research on the AUV fuzzy obstacle avoidance method based on event feedback supervision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 698-702. [徐红丽,封锡盛. 基于事件反馈的 AUV 模糊避障方法研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(8):698-702.]
- [ 12 ] Ye Xiufen, Su Yudong, Guo Shuxiang. Design and realization of a remote control centimeter-sale robotic fish[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 25-30.
- [ 13 ] Lighthill M J. Note on the swimming of slender fish[J]. Fluid Mech, 1960, 9: 305-317.
- [ 14 ] Liu Jindong, Hu Huosheng. A 3D simulator for autonomous robotic fish [J]. International Journal of Automation and Computing. 2004,1(1): 42-50.
- [ 15 ] Ye Xiufen, Su Yudong, Guo Shuxiang, et al. Infrared motion guidance and obstacle avoidance of an ICPF actuated underwater microrobot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1851-1856.
- [ 16 ] Zhu Jing. Fuzzy Control Theory and its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 35-147. [诸静. 模糊控制原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1999:35-147.]