

文章编号: 1002-0446(2002)05-0413-05

水下仿生机器鱼的研究进展 IV—— 多仿生机器鱼协调控制研究*

梁建宏 王田苗 魏洪兴 刘 淼 王晓君

(北京航空航天大学 机器人研究所 北京 100083)

摘 要: 本文探讨了多仿生机器鱼群体游动协调的问题,这是仿生机器鱼技术研究的一个新的方向,目前尚无人涉足.首先研制了一套具有高效、高机动性的微小型多机器鱼平台,提出了基于 AGENT 的网格算法进行多机器鱼的定位和协调控制,利用该实验平台,进行了多机器鱼对抗和多机器鱼协调过孔的实验研究.

关键词: 仿生机器鱼;多机器鱼平台;网格算法;协调控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCHFUL DEVELOP OF UNDERWATER ROBOFISH IV— RESEARCH OF CONCERTED CONTROL FOR THE MULTI-ROBOFISH

LIANG Jian-hong WANG T ian-m iao WEI H ong-x ing LIU M iao WANG X iao-jun

(Robotic Institute of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing, 100083)

Abstract: We concentrated on cooperation & coordination of multi-robotfish swimming in this paper. This is a new research field of robotfish, on which none has carried out any research works. We worked out a micro-robotfish platform with high efficiency and high maneuverability, giving a net algorithm based on AGENT for location and coordination. On this platform, we successfully performed two experiences: one is multi-robotfish chasing ball; the other is multi-robotfish passing channel with coordination.

Keywords: robotfish, multi-robotfish platform, net algorithm, cooperation control

1 引言(Introduction)

多机器人系统与协作是国际当前研究的前沿热点问题之一^[1,2].在自然界中,存在着很多这样的生物种群,它们单个的力量很弱小,但作为一个群体,却可以发挥出令人惊叹的力量.对于鱼也一样,鱼群可以发挥出比单条鱼大得多的能力.机器鱼虽然在整体的机动性和快速性上还远不能和真鱼相媲美,但它们也有其自身的特点.比如说,通过计算机控制,机器鱼的智能可以比真鱼高出许多,能够完成人们指定给它们的任务.同样,单条机器鱼的力量也远比不上机器鱼鱼群.所以,只有以鱼群的形式出现,机器鱼在未来的发展中才能逐渐显露出它的优越性.因此研究、探索多仿生机器鱼的群体游动协调控

制问题具有重要的理论价值和实际应用意义,对水上救护、海洋资源勘探、微小型多机器鱼武器平台和水下特种作业等研究将产生积极的推动作用.

目前仿生机器鱼技术的研究主要集中在仿鱼推进模式的水动力学模型和高效、高机动性仿生机器鱼的开发等方面^[3,4],对机器鱼的控制研究较少,而多机器鱼群体协调控制的研究更是空白,其主要原因之一是没有合适的高效、高机动性的多机器鱼的实验平台.本文针对这一现状,开发了一套微小型多机器鱼平台,小鱼具有足够高的推进效率和机动性,为多机器鱼协调控制提供了基础.建立了小鱼子系统的行为库,采用基于 AGENT 的网格算法实现了多机器鱼的定位和协调控制,通过多机器鱼争球对抗和多机器鱼协调过孔实验验证了多机器鱼实验平

* 基金项目:中国科学院机器人学开放研究实验室基金资助项目(项目编号:RL200011),国防基础研究项目(项目编号:J1300C1004);

收稿日期:2001-09-04

台的性能和控制算法的有效性。

本文的研究目的是在多机器鱼协调控制研究方面做出一些开创性工作, 为将来水下机器人的微小化、群体协同的人工智能技术提供必要的理论和技术基础。

2 微小型多机器鱼实验平台的研制(Development of microsmall multirobotfish experimental platform)

2.1 微小型机器鱼实验平台的体系结构

微小型机器鱼平台运用了集成电子芯片技术, 使体积大大缩小。如图 1 所示, 整个平台由小鱼子系统、图像采集与识别子系统、决策仿真子系统、无线控制子系统和电源子系统(包含在小鱼子系统中)五个主要部分组成。

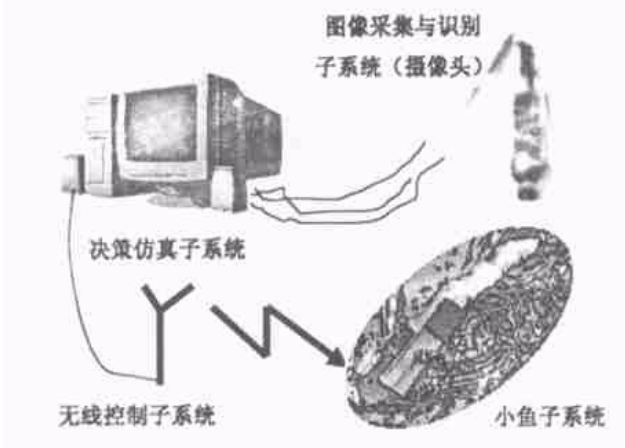


图 1 多机器鱼实验平台的结构

Fig. 1 Structure of multi-robotfish experimental system

与机器人足球系统类似, 摄像头将实时图像信号传送到采集卡, 采集卡将图像信号转换成以帧为单位的位图, 然后由图像识别算法进行识别, 最后将机器鱼的位置信息交给决策仿真子系统。决策仿真子系统对识别得到的机器鱼的情况进行分析处理后, 根据相应的决策算法, 发出相应的控制命令, 由无线控制子系统通过串行通讯将命令发出去, 机器鱼平台的无线接收端接到命令后进行相应的动作。摄像头起到了传感器的作用, 形成一个视频反馈的闭环系统。决策仿真算法可以根据不同的研究方向分别开发, 整个系统开放性较好。

2.2 各子系统的功能概述

2.2.1 小鱼子系统

小鱼子系统是整个系统中最有特色的环节。摄像头要采集小鱼的位置方向等信息, 无线控制子系

统发射的信号要控制小鱼的行为。因此对小鱼子系统提出的基本要求是可靠性高、集成度高控制精度高。如图 2 所示, 小鱼子系统由六个部分组成: 无线控制信号接收模块、控制单片机、CPLD 脉宽调制系统模块、伺服电机组、电源部件和整体防水鱼皮。其主要技术参数如表 1 所示。

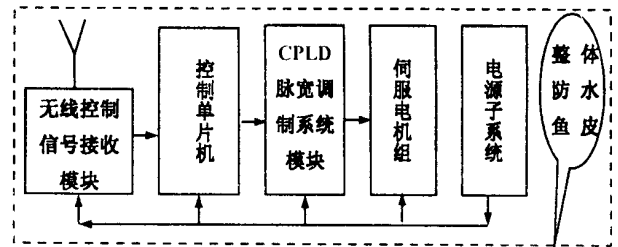


图 2 小鱼子系统的结构图

Fig. 2 Schematic of mini robotfish

表 1 机器鱼的主要技术参数

Table 1 Technical parameter of mini robotfish

| 鱼体长 | | 鱼体宽 | 最大游动速度 | 最小转弯半径 | 原地急转角速度 |
|------|------|-----|--------|--------|------------------------|
| 尾段长 | 全长 | | | | |
| 25cm | 39cm | 6cm | 23cm/s | 10cm | $(\pi/3 \sim \pi/2)/s$ |

2.2.2 图像采集与识别子系统

图像采集与识别子系统的主要任务是实时地把实验环境中的鱼的位置和方向快速地识别出来, 及时地传给决策仿真子系统, 对这一部分提出的要求是快速性和准确性。

系统中图像采集由图像采集卡完成。通过编程直接对图像采集卡得到的信号进行分析与处理。其主要处理过程如图 3 所示。

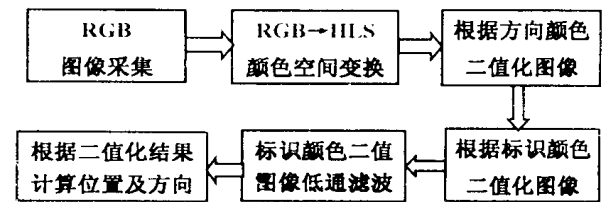


图 3 机器鱼的识别流程图

Fig. 3 Flow chart of identify robotfish

2.2.3 决策仿真子系统

决策仿真子系统是机器鱼平台的核心, 也是最具有灵活性和开放性的一个环节。由于图像识别的结果是给出多机器鱼在水中的位置和方位信息, 只要取得这些信息, 再按特殊的指令格式发出控制鱼的

决策内容. 就可以实现对机器人的运动控制, 并在此平台上实现决策内容的仿真. 决策仿真子系统的具体内容和理论是各不相同, 完全可以根据不同的要求自己设计出决策仿真子系统, 在我们的后续工作中, 研究了多机器鱼的协调问题, 其中提出的网格协调算法实际上就是我们自己的决策仿真子系统.

2.2.4 无线控制子系统

无线控制子系统负责将决策仿真子系统得出的控制要求按照规定的指令格式发射出去, 用以控制机器鱼的行为. 其核心部件为小鱼子系统中无线接收模块以及连接在计算机 RS232 口上的无线发射模块.

3 微小型机器鱼的机动控制研究(Research on maneuvering control of microsmall robofish)

要想使机器鱼发展到应用阶段, 必须能够对机器鱼的行为实现控制, 使其具有真鱼的某些机动性能. 在机器鱼的机动性研究方面, 首先要解决的问题

是实现机器鱼的定位控制, 即使机器鱼从起始点比较准确地到达目标点, 在非定常的流体力学约束条件下, 这一命题是具有挑战性的.

3.1 微小型机器人的机动性能参数

由于在水中, 受流体波动的影响, 机器鱼平台有其独特的性能参数: 速度、最小转弯半径、急转角度.

3.1.1 速度及其游动平稳性

机器鱼的速度是通过改变其运动组件——舵机的摆动频率来实现对速度的调节的. 但是, 受目前舵机功率的限制, 机器鱼运动的波形仅可以达到 2Hz/s. 我们将上限 2Hz 的机器鱼频率分成 7 个档次, 图 4 显示了在不同频率下机器鱼的运动速度.

但在某一频率下, 机器鱼与水波作用, 产生共振, 其游动稳定性极差, 出现摇摆(沿鱼体轴线转动)及晃动(沿垂直于水面的轴线转动). 机器鱼的运动频率与其游动的平衡性存在着一定的关系, 用鱼绕其在前进方向摇摆和在垂直方向晃动的角度来衡量其稳定性, 得到机器鱼的稳定性与频率之间的关系如图 5 所示.

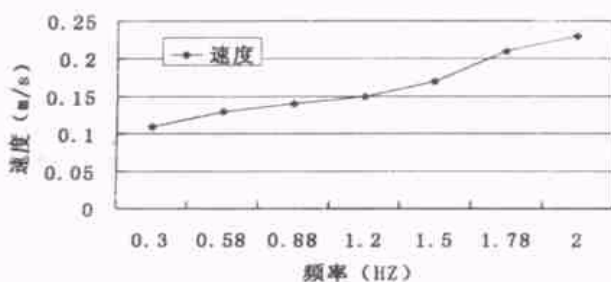


图 4 机器鱼运动速度与频率的关系曲线
Fig. 4 Velocity-frequency curve of robofish

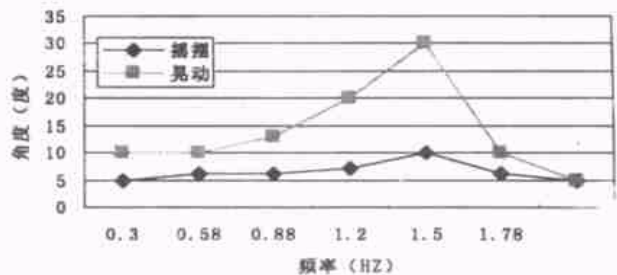


图 5 机器鱼稳定性与频率的关系曲线
Fig. 5 Stability-frequency curve of robofish

3.1.2 最小转弯半径

最小转弯半径 R 决定了机器鱼在高速航行情况下快速转弯的能力. 鱼的前进路径的曲率倒数定义为机器鱼的转弯半径. 需要说明的是, 在本机器鱼平台中, 实际上存在两种方式的转弯半径. 一种是保持扭动推进, 同时给某些关节偏转角而获得的转弯半径, 我们定义为 R_d ; 另外一种, 也是机器鱼所独有的, 那就是, 在快速游动的过程中, 突然停止扭动推进, 同时将鱼体完全弯曲, 这样, 可以获得更小的转弯半径, 这种方式下的转弯半径定义为 R_s . 这两种转弯半径的定义如表 2 所示.

在上表所示的两种转弯半径中, 各有其用途. 其中, 第一种用于路径优化时选择曲线路径, 而第二种

转弯半径用于处理紧急情况, 比如躲避前方突然出现的障碍.

表 2 机器鱼两种转弯半径示意图

Table 2 Sketch map of two rotating radius for mini robofish

| 转弯方式 | 图示 | 参数 |
|---------------|----|---------------------------|
| 快速运动中前进并转弯 | | 最小转弯半径 R_d : 61-68cm |
| 快速运动后靠惯性前进并转弯 | | 最小转弯半径 R_s : 15-20cm |

3.1.3 急转角度

急转是指在没有前进速度的情况下, 机器鱼在原位进行转弯, 这种转弯方式是机器鱼的鱼尾推进方式所独具的. 在这种方式下, 机器鱼可以实现在非常小的空间转向, 对于在空间有限的情况下机动性是不可缺的. 而且, 对于进行局部精确定位时, 这种能够在原位改变方向的本领也是十分有用. 一般急转调整角度在 50° ~ 80° 之间(图 6).



图 6 机器鱼的急转控制

Fig. 6 Rapid rotating control for mini robofish

3.2 机动控制

3.2.1 机器鱼的机动性及其定位控制

机器鱼研究最有价值的方面也在于其具有其它航行器所不能比拟的机动性. 利用机器鱼特有的机动作及其组合, 机器鱼可以表现出显著的灵活性. 在我们的系统中, 机器鱼目前具有三种基本的动作, 即直线前行, 原位急转弯, 转弯前行.

由于机器鱼的很多高级任务(如避障、编队)都可以拆解为点到点的游动问题, 所以在机器鱼的机动控制研究中, 我们主要考虑其定位能力, 为此我们提出了评估机动控制算法是否有效的两个依据: (1) 时间最短, (2) 路径最短.

定位控制是决策仿真子系统最底层的功能. 为了快速、精确的游到目标点, 系统不断的向机器鱼发出动作命令, 在什么时机、采用什么动作、多久修正一次动作才能达到最好的效果, 为此, 我们提出了一种机器鱼精确定位控制的学习算法.

3.2.2 学习算法在精确定位控制中的应用

由于机器鱼在水中受非常流体力学约束, 致使很难用一个动力学模型准确仿真或预测机器鱼控制的效果. 这种情形在近距离作精确控制时显得更加突出. 所以, 我们把各种控制命令下的鱼的行为记录下来, 在应用时, 根据当时的情况来选择具体的命令动作. 该学习算法应用了 ACCESS 数据库. 数据库建立好以后, 让机器鱼进行学习, 依次将相应的命令

组合应用于机器鱼, 然后由程序自动记录下它们的相对位移和偏差角. 学习过程结束以后, 当再次进行机动时, 首先计算得到当前点与目标点的位移和偏差角, 然后查表, 看那个命令对应的位移和转角值最接近, 然后就应用这个命令, 以达到最好的控制精度.



图 7 顶球中的机器鱼

Fig. 8 Robofish in sticking ball

3.3 机器鱼定位控制应用实例

我们设计了两个实例来检验以上定位控制算法的有效性. 一个实例是机器鱼定点游动, 另外一个实例是机器鱼顶球控制. 定点游动指在图形界面上为机器鱼指定一个目标点, 机器鱼能游向目标位置. 另一个实例是机器鱼顶球. 小球在水面上是一个移动的目标, 其位置不断的被识别和刷新. 实验获得了良好的效果, 机器鱼不仅能够找到皮球, 并将其运到指定地点, 而另一条鱼则可能追上并争抢小球, 图 7 为机器鱼顶球的图片.

4 机器鱼定位的网格算法(Network algorithm for robofish positioning)

多机器鱼协调的基础是机动控制, 在面向任务时, 协调表现为对不同个体赋予不同的行为. 对于协调时涉及的路径问题, 仍可以分解成定点控制问题来解决. 我们用网格算法较成功的完成了多机器鱼协调过孔任务.

4.1 多机器鱼协调过孔的环境

多机器鱼协调过孔的环境在宽 1.15m 长 1.75m 的小池中, 机器鱼须按照指定顺序比较准确地通过宽为 9cm 的通道(鱼体的最大宽度为 6cm).

4.2 多机器鱼过孔的网格协调算法

多机器鱼协调过孔的规则是, 水池中, 三条机器鱼按照一定的顺序通过方孔. 要求达到的效果是, 机器鱼能按照人为编定的优先级顺序(或是按谁离孔近产生的优先级顺序)通过小孔, 不能出现冲撞和拥挤.

我们采用基于 AGENT 的控制方法, 每一条鱼作为一个独立的实体, 用摄像机作为其统一的传感器. 图像识别后的信息对每一条鱼来说是可见的, 由于已经确定了过孔的顺序(对于按时间优先确定过孔顺序, 则须有一个顺序判断程序), 只需有一个主动权转换过程来完成每条鱼主动状态与等待状态间的切换, 其它工作即可由下面提出的网格算法来处理.

网格算法是针对每个 AGENT 提出的(在本例中为每条机器鱼), 其前提是已经得到了每条鱼当前的状态, 即是处于主动状态(当前过孔鱼)还是被动状态(等待过孔鱼). 网格算法的定义如下:

以鱼体长度的一半 L 作为长度单位, 把整个摄像头可视范围按此长度单位均分为一个矩阵, 如图 8 所示, 设此矩阵被分为 5 行 6 列的矩阵. 按照线性代数中对矩阵的元素的表达方式来表示各个方格及其

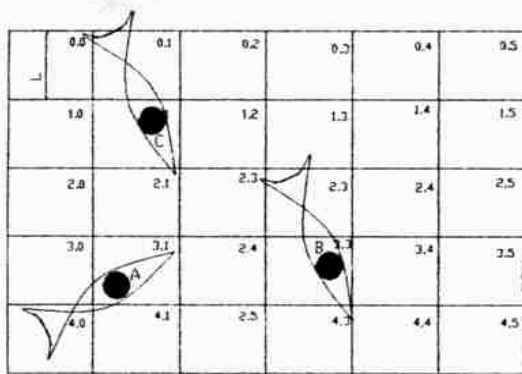


图 8 多机器鱼协调的网络算法

Fig. 8 Net algorithm multi-robotfish coordinate & cooperation

对应状态字: $X_{ij} = 0, i = 0, 1, 2, 3, 4; j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$. 状态字 X_{ij} 的值(初始化后为全零)表达了该元素对应区域的空闲状况, 若 $X_{ij} = 0$, 则表示此格为空, 没有任何东西占据; 否则若 $X_{ij} = 1$, 则表明该格被占据了.

在图 8 中, 当进行网格初始化后, 各个实际的图像区域和网格矩阵的每个格子之间的对应就建立起来了. 再进行图像采集后, 就把鱼的位置也识别出来了, 根据网格初始化中已经完成的工作, 就可以把鱼的位置映射到网格中, 根据鱼所占据的网格, 对相应的网格状态字置位 1.

如图 9 所示, 实验表明, 当实验开始后, 各机器鱼之间能够比较好地进行相互协调, 当第一条鱼向小孔游动时, 其余的鱼仅作调整方向的工作; 当第一条鱼通过小孔后, 下一条鱼才开始向小孔趋进.

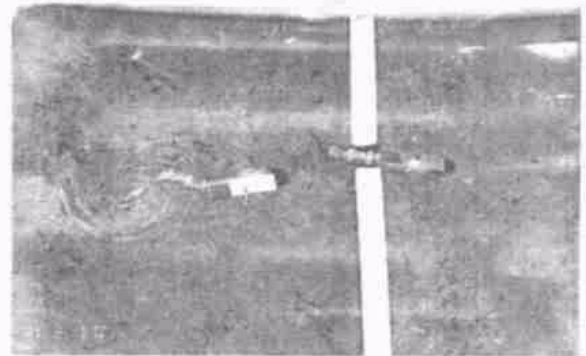


图 9 多机器鱼按顺序通过小孔

Fig. 9 Mini robotfish passing the channel in order

5 结论(Conclusion)

本文基于自主开发的多机器鱼实验平台, 首次对多机器鱼群体协调控制的方法进行了研究, 有以下结论:

(1) 研制的微小多型机器鱼平台具有较高的机动性和较好的开放性, 为多机器鱼的协调控制研究奠定了基础.

(2) 研究了微小型机器鱼的机动性能, 建立机器鱼的行为库, 可用于机器鱼的精确控制.

(3) 提出了基于 AGENT 的网格算法, 用于机器鱼定位控制, 实现了多机器鱼协调过孔控制.

参考文献 (References)

- [1] 谭民, 范永, 徐国华. 机器人群体协作与控制研究. 机器人, 2001, 23(2): 178- 182
- [2] 曹长江, 张琛, 冯建智. 多微型机器人系统的协调策略的研究. 机器人, 2001, 23(3): 285- 288
- [3] Triantafyllou M S, Barrett D S, Yue D K P. A New Paradigm of Propulsion and Maneuvering for Marine Vehicles. Trans. Soc. Naval Architects Marine Eng, 1996, 104: 81- 100
- [4] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An Efficient Swimming Machine. Sci Am, 1995, 272: 64- 70

作者简介:

梁建宏 (1977-), 男, 广西柳州人. 研究领域: 微小型机电系统.