

doi: 10.7690/bgzd.2013.12.015

2D 仿真机器鱼协作过孔策略

徐林程¹, 史豪斌², 郭志巍³, 李小婷¹

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学计算机学院, 西安 710072;
3. 西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对目前国内对于多水中机器人协作的研究较少的问题, 提出一种双鱼高效协作控制方法。从尺寸因素、动力学因素和可控性因素 3 个角度详细研究了比赛平台的主要环境特点, 针对狭窄环境的特点, 设计了以水中机器人头顶球、肩抗球和头夹球 3 个带球动作, 分别以速度和稳定性为侧重点, 设计实现了速度优先策略和稳定性优先策略, 并分别对 2 套策略进行了实验验证。实验结果表明: 2 个策略的成功率都达到 100%, 但相比之下稳定性优先策略更佳。

关键词: 仿真机器鱼; 协作过孔; 策略设计; 动作设计

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Strategies of Collaboration Through Hole by 2D Simulated Robotic Fish

Xu Lincheng¹, Shi Haobin², Guo Zhiwei³, Li Xiaoting¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. School of Navigation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As domestic researches on collaboration of several robotic fishes are rarely seen, this article presents a high efficient cooperating control method for two robotic fishes. Firstly, major features of competing platform are analyzed in details from factors of size, dynamics and controllability. Then, designs three methods of carrying water polo according to the specific circumstances respectively including heading on, shouldering on and head pressing. After that, two sets of cooperation strategies according to the criterions of velocity and stability separately are designed analyzed and compared in details. Experiments prove that both strategies are adequate to the competing mission and the strategy taking the stability criterion prevails than the other one.

Key words: simulated robotic fish; collaboration through hole; strategy design; behavior designing

0 引言

人类进入 21 世纪后, 海洋逐渐成为各国竞逐最重要的平台之一, 而各国在机器人高科技领域的研究热潮则更是方兴未艾, 在此情况下, 开展水中机器人的比赛, 推广对水中机器人的研究, 意义深远。水中机器人技术涉及非常广泛的领域, 包括仿生机器鱼水动力学、机械电子学、机器人学、传感器信息融合、智能控制、通讯、计算机视觉、计算机图形学、人工智能等多种前沿科学技术领域, 是各种先进技术的综合性检验平台。

水的波动、水中障碍物等多种因素使水下环境变得复杂。这种复杂的动态环境要求水中机器人实时感知当前环境和自身情况, 并做出合理的分析和调整。单一水中机器人在多种不可预测、量级较大扰动的影 响下, 很难稳定地完成复杂任务, 而多机器人的协作控制, 不但可以弥补单体能力的不足,

而且有可能从根本上改善控制方式, 使系统具有个体所无法比拟的并行性、鲁棒性等^[1]。另外, 多实体之间的协作是完成高级应用任务(海域防卫, 水中侦察, 水中救援等)的理论基础与技术前提; 因此, 水中机器人的多实体协作控制的研究具有重要的理论意义和实际应用价值^[1-5]。

目前, 国内外学者对仿生机器鱼的研究主要集中于单体推进机理和运动控制性能改善, 对于多水中机器人协作的研究则较少。针对双鱼协作顶球, 文献[1]提出了双鱼头顶球平行游动的控制方式, 但是鱼尾之间可能存在的相互干扰会直接限制该种协作控制方式的速度和稳定性。与文献[1]面向相似的控制对象和不同的控制环境, 笔者针对水中机器人 2D 仿真协作过孔比赛项目, 在仿真比赛平台下, 充分利用环境特征, 另辟蹊径, 设计新颖的带球动作, 对 2D 仿真协作过孔环境下仿生机器鱼之间的高效协作方式进行探讨。

收稿日期: 2013-06-30; 修回日期: 2013-07-31

基金项目: 西北工业大学研究生创新基地项目(XJ10001); 国家自然科学基金(61003129)

作者简介: 徐林程(1990—), 男, 湖南人, 在读硕士, 从事流体力学、智能决策研究。

1 平台分析及机器鱼底层动作设计

1.1 仿真机器鱼协作过孔项目简介

2012 年 RobCup 大赛中, 水中机器人仿真组比赛包括水球 5vs5、抢球大作战、水球斯诺克、带球接力、协作过孔、花样游泳等项目, 比赛采用水中机器人比赛 2D 仿真平台 URWPGSim2D (underwater robot water polo game simulator 2D)^[2]。其中协作过孔的比赛环境如图 1 所示, 场地尺寸为 2 000 mm×3 000 mm, 标号为 1,2,3 的长条是刚性不可穿透障碍物。比赛要求 2 条鱼协作将球从右边门框内转移到左边门框内。并且要求在第 2 区(或者第 1 区), 第 3 区, 第 4 区, 第 5 区内, 2 条鱼必须都触球, 球每离开 1 个区(不包括第 1 区)后, 得 1 分。比赛时间共 5 min, 完成任务后, 得 4 分, 比赛停止, 记录剩余时间。得分多的队伍胜出。若得分相同, 剩余时间长的队伍胜出^[2]。以下将水中机器人简称为机器鱼, 边界和障碍物统称为为墙。

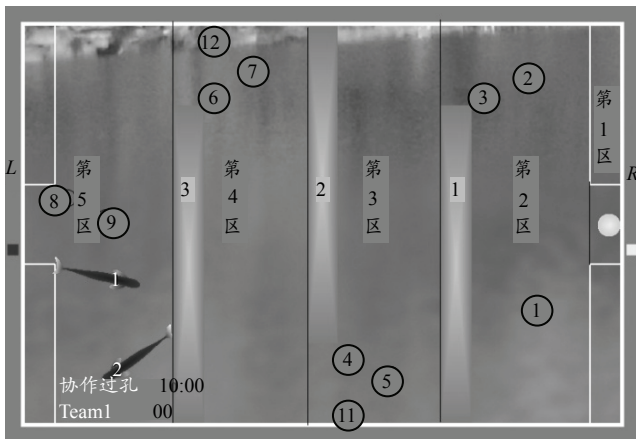


图 1 协作过孔比赛场地初始图

1.2 2D 仿真水中机器人协作过孔的环境分析

2D 仿真水中机器人协作过孔模拟的是在复杂水环境下, 双机器鱼穿过崎岖障碍, 到达指定区域寻找目标, 然后协同合作, 携带目标穿过崎岖障碍, 到达指定目标区域。高效的协作控制必定是与环境相适应的, 因此对 2D 仿真水中机器人协作过孔仿真环境进行分析是后续策略探究的重要基础。

如图 1 所示, 从尺度角度看, 整个场地被崎岖障碍分割成连通的狭窄条状区域, 经测量, 鱼体长 $L_{\text{fish}}=450$ mm, 水球直径 $R_{\text{ball}}=116$ mm, 第 2 区和第 5 区宽 $B_{2,5}=600$ mm, 第 3 区和第 4 区宽为 $B_{3,4}=525$ mm, 区域之间的孔道长 $T=400$ mm。

以鱼体长度和水球直径之和作为带球过程的特征尺度 $S_f=L_{\text{fish}}+R_{\text{ball}}=566$ mm, 显然, $B_{3,4}、T < S_f$, $B_{2,5}$ 只略大于 S_f 。这就是说, 机器鱼活动区域很狭窄, 在带球过程中, 不可避免地会与场地边界或者障碍物发生相互作用, 场地尺寸因素是带球过程必须予以充分考虑的干扰。

从动力学角度看, 比赛环境模拟的是动态水环境, 主要体现在如下 2 个方面:

1) 从平台采集到的信息包含了较大幅度的背景噪声。经实验测量, 在获取场上信息时, 如球、机器鱼的坐标信息以及速度信息等, 信息中包含了幅值为 30 mm 的均匀随机扰动。相对于鱼头半径 30 mm, 水球半径 58 mm 来说, 这个扰动给鱼头与水球接触点的确定带来了太大的不可确定性干扰, 水球和机器鱼头部的相互作用时, 很难定量预测水球和机器鱼的相对位置关系。

2) 水有向下侧的流动速度, 球和机器鱼有向下漂的趋势, 主要表现在: ① 自由环境下, 相同推动力时, 水球和机器鱼往上运动比往下运动的速度慢, 而且稳定性差; ② 机器鱼鱼头靠墙侧滑时, 相同推动力下, 往上运动比往下运动的速度慢; ③ 水球压墙滑动时, 相同推动力下, 往下运动速度很快, 而往上运动时, 速度很慢, 阻力特别大, 接近于发生了摩擦死锁。

从机器鱼的可控性角度看, 机器鱼的质心速度和绕质心的角度是完全可控的, 机器鱼鱼头在鱼体轴线两侧的摆动不可控, 机器鱼鱼尾的在鱼体轴线两侧的摆动不完全可控; 机器鱼鱼尾碰墙后, 鱼体受到的反弹力很大, 会发生瞬时位移, 可达到半个鱼体长, 并且瞬时位移的大小和方向不可控。

综合考虑尺寸因素和机器鱼的可控性, 在第 3 区和第 4 区时, 鱼尾碰墙后, 机器鱼可能会在两墙之间循环震荡, 从而导致无法完成继续控制机器鱼完成任务; 因此, 这种情况是必须通过选用合适的带球动作和协作方式来避免出现的。再考虑比赛环境的动力学特性, 机器鱼和水球都能够在一定条件下沿墙壁滑动, 墙的反作用力的可控程度很高。因此, 引入墙的反作用力, 为机器鱼带球动作, 双机器鱼的协作控制方法的设计开发开辟了新的空间。墙的反作用力的引入, 是笔者所做工作的重要基础和主要创新点, 接下来, 在带球动作的设计和协作策略 2 个层面分别详述。

1.3 机器鱼带球动作设计

机器鱼带球是机器鱼将自身动力传递给水球，控制水球运动的过程。好的带球动作意味着机器鱼控制水球快速稳定地向目标方向推进。

在宽敞条件下，如图 2(a)所示，由于没有物体可以借力，并且机器鱼只能向鱼体正方向游动，所以，只能用机器鱼头部顶着水球，使水球运动，以下简称“头顶球”。头顶球时，以水球中心为参考点，当机器鱼头部，通过点点接触，挤压水球时，显然，此时接触点处于不稳定平衡状态，加上背景噪声的干扰，机器鱼头顶球的稳定性是先天不足的，在狭窄区域需要谨慎使用。

当水球靠近墙时，让机器鱼鱼体向后倾斜，头部顶墙，将球置于墙和机器鱼胸鳍之间，机器鱼带球沿墙向前滑动，如图 2(b)所示，以下简称“肩扛球”。肩扛球时，机器鱼头部与墙，水球与鱼体，都是点线接触，接触点处于随遇平衡状态，所以肩扛球是绝对稳定的。

当水球贴近墙时，让机器鱼采用头顶球的方式，

使水球沿墙滑动，如图 2(c)，以下简称“头夹球”。头夹球时，水球与墙之间是线接触，接触点处于随遇平衡，水球与机器鱼头部之间是不稳定的点点接触，所以，水球的运动方向很稳定，但机器鱼与水球相对位置不稳定，而且机器鱼尾部容易碰墙，整体稳定性不足，需要谨慎使用。

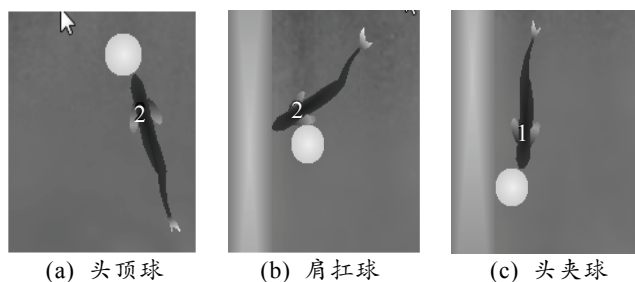


图 2 动作示意图

综上所述，笔者设计了 3 个机器鱼带球动作供协作策略选用：自由环境机器鱼头顶球(头顶球)，机器鱼头顶墙侧滑带球(肩扛球)，机器鱼头顶球靠墙(头夹球)。经大量的实验测试，3 个动作性能的定性比较如表 1 所示。

表 1 动作性能对比表

动作名称	往下性能		往上性能		备注
	速度	稳定性	速度	稳定性	
头顶球	中	狭窄域, 差 宽敞域, 中	中	狭窄域, 差 宽敞域, 中	狭窄环境中, 鱼尾循环碰墙, 情况不可预测
肩扛球	慢	好	快	好	必须靠墙, 接触均为点线接触
头夹球	快	中	慢	差	必须靠墙, 一个点点接触一个点线接触

需要说明的是，表 1 中的“快”、“中”、“慢”以及“好”、“中”、“差”都是在指定条件下(如“向上”)相对而言的，尤其要说明的是，“往下性能”的“速度”栏中的“慢”，比“往上性能”的“速度”栏中的“快”还要快。

2 机器鱼协作过孔策略设计及实现

随着球的位置推移，笔者将一个完整的比赛策略分为 5 个部分。在不同的区域，选择不同的协作方式，使用不同的动作，可以组合出无数种比赛策略。笔者分别以速度和稳定性为侧重点，设计实现

2 种比赛策略。

为方便描述，笔者将正在执行带球的鱼称为主鱼，另一条称为辅鱼。并且，将主鱼转变辅鱼，辅鱼转变主鱼的过程简称为角色转换。

2.1 速度优先策略

如前文所述，完成任务后剩余的时间是协作过孔比赛的判决胜负的最终标准，因此，快速性始终是策略的重心所在。速度优先策略旨在牺牲一些稳定性，冒一定的风险，尽可能选用最快的带球动作，走最短的带球路线。

表 2 速度优先策略

球所在区域	策略		过渡策略
	主鱼	辅鱼	
1 区	跑到 2 区, 把球从 1 区内抠出	快速跑位置①, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换
2 区	采用头顶球, 把球带到位置②	快速跑位置③, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换, 主鱼采用头顶球, 带球到 2 号障碍物右侧, 辅鱼静止
3 区	采用头夹球, 把球带到位置④	快速跑位置⑤, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换, 主鱼采用头顶球, 带球到 3 号障碍物右侧, 辅鱼静止
4 区	采用肩扛球, 把球带到位置⑥	快速跑位置⑦, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换, 主鱼采用头顶球, 带球到赛场左侧墙, 辅鱼静止
5 区	采用头夹球, 把球带到位置⑧	快速跑位置⑨, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换, 主鱼采用头顶球, 带球到目的地, 辅鱼静止。策略完成。

如图 1 所示, 在第 2 区和第 4 区, 机器鱼把球往上带, 查阅表 1, 不难发现, 往上带球时, 头顶球速度最快, 路径最短, 并且, 当水球贴近墙时, 肩扛球最快; 在第 3 区和第 5 区, 机器鱼把球往下带, 查阅表 1, 不难发现, 向下带球时, 头夹球速度最快。综合权衡策略的连贯性, 得到如表 2 所示的速度优先策略。

2.2 稳定性优先策略

2.1 节所述的速度优先策略旨在挑战 2D 仿真水中机器人协作过孔项目的极限速度, 选用最快的带球动作, 走最短的路线, 同时也冒了最大的风险。

也就是说, 稳定性不够可能导致速度优先策略的整体速度很慢; 因此, 笔者又以策略的稳定性为侧重点, 设计一套新的策略。

重新查阅表 1, 不难发现, 机器鱼在往上带球和向下带球时, 肩扛球始终绝对稳定, 不论是往上带球还是往下带球, 肩扛球相对于相同情况下速度优先策略所选用的带球动作并没有明显的速度劣势。毫无疑问, 肩扛球必定是新策略的最佳选择, 其他要做的就是将水球尽快置于靠近墙的位置。在综合权衡策略的连贯性之后, 得到如表 3 所述的稳定性优先策略。

表 3 稳定性优先策略

球所在区域	策略		过渡策略
	主鱼	辅鱼	
1 区	跑到 2 区, 把球从 1 区内抠出	快速跑位置①, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换
2 区	采用头顶球, 把球带到位置②	快速跑位置③, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换, 主鱼采用头顶球, 带球到 2 号障碍物右侧, 辅鱼静止
3 区	采用肩扛球, 把球带到位置④	快速跑位置⑤, 调整位姿, 准备肩扛球	角色转换, 辅鱼向上跑开, 主鱼采用肩扛球, 带球到 3 号障碍物右侧
4 区	采用肩扛球, 把球带到位置⑥	快速跑位置⑦, 调整位姿, 准备肩扛球	角色转换, 辅鱼向下跑开, 主鱼采用肩扛球, 带球到赛场左侧墙
5 区	采用肩扛球, 把球带到位置⑧	快速跑位置⑨, 调整位姿, 准备头顶球	角色转换, 主鱼采用头顶球, 带球到目的地, 辅鱼静止。策略完成。

3 仿真实验

为了验证上述策略的性能, 笔者采用 2012 年 11 月 RoboCup 大赛所采用的比赛平台和比赛规则对上述 2 个策略进行实验。表 4 记录了 2 个策略在相同环境下, 各自连续比赛 10 次的性能。

从表 4 可以看到, 速度优先策略与稳定性优先策略相比较而言, 2 个策略的成功率都达到 100%, 前者的最好成绩 43 s 比后者的 40 s 高 7.5%, 但前者的平均成绩 28.8 s 比后者的 37.1 s 低 22.37%, 更令人吃惊的是, 前者的标准差是后者的 3.81 倍。

表 4 对比实验部分数据

策略	成绩/s										均值	标准差
	(均获得 4 分, 剩余时间超出 1 分的部分)											
速度优先	43	42	35	33	31	28	26	23	17	10	28.8	10.39
稳定性优先	40	40	39	39	39	37	36	35	33	33	37.1	2.73

4 结束语

实验结果表明: 2 个策略的成功率都达到 100%, 但速度优先策略的整体速度明显不如稳定性优先策略, 稳定性则相差很远, 爆发力没有明显的优势。这是因为 2 种策略稳定性的差距导致了整体速度的差距, 牵制了策略爆发力的发挥。总的来说, 速度优先策略的综合性能不如稳定性优先策略。此外, 还可以肯定的是, 稳定性对 2D 仿真水中机器人协作过孔策略的整体性能具有关键性的影响, 策略设计时应予以充分满足。

在 2012 年 11 月的 RoboCup 大赛中, 该稳定性优先策略在 2D 仿真水中机器人协作过孔项目的比

赛中获得冠军。

参考文献:

- [1] 张进, 李淑琴, 侯霞. 仿真机器鱼双鱼协作过孔策略的研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 344-347.
- [2] 李佑兵. 2012 中国机器人大赛暨 Robocup 公开赛水中机器人 2D 仿真组规则[OL]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [3] 魏清平, 王硕, 谭民, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10).
- [4] 李庆春, 高军伟, 谢广明, 等. 基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(12): 65-69.
- [5] 覃勇, 李宗刚, 谢广明. 机器鱼比赛中的协作策略[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 56-58.