

doi: 10.7690/bgzdh.2013.12.016

水中机器人带球接力策略

黄伯峥¹, 董辉跃¹, 史豪斌²

(1. 浙江大学机械工程学系, 杭州 310027; 2. 西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

摘要: 为提高水中机器人带球接力效率, 提出一种水中机器人协作策略。分析水中机器人的运动特性, 通过采集场地环境信息, 对信息进行判断, 综合考虑机器人与球所处的位置来选择下一步动作。在确定机器人协作方案的基础上, 实现具体的机器人带球接力方法。仿真结果表明: 该策略是有效的, 能提高水中机器人的运动速率及完成效率, 在运动控制上更加灵活。

关键词: 水中机器人; 带球接力; 环境信息; 协作方案

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

The Relay Race Strategy of Underwater Robot

Huang Bozheng¹, Dong Huiyue¹, Shi Haobin²

(1. Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of relay race of underwater robot, a cooperation strategy of underwater robot was proposed. Analysis the kinematics of the robot, select the next action through analyzing the environment information and considering the location of robot and ball comprehensively. On the basis of determining the cooperation solutions, the specific method of relay race is achieved. Simulation results show that the strategy is more effective to improve the speed and efficiency of the robot, and it's more flexible in motion control.

Key words: underwater robot; relay race; environment information; cooperation solutions

0 引言

机器人技术是一项高度交叉的综合性前沿技术, 它融合了信息技术、电子工程、机械工程、控制理论、传感技术以及人工智能等前沿科学技术, 是各种先进技术的综合性平台^[1-4]。水中机器人作为机器人学的一个分支, 目前已成为一个研究热点^[5-6]。水中机器人集成了人工智能、水中目标的探测和识别、数据融合、智能控制以及导航和通信各子系统, 是一个可以在复杂水环境中执行各种任务的智能化无人平台。

目前绝大多数研究团队对于水中机器人(文中研究对象为机器鱼)的开发, 仅停留在提高机器鱼单独完成任务的能力^[7]。由于水环境的复杂性, 加上障碍物、边界及死角等多种干扰因素, 单机器鱼完成任务的难度较大, 对机器人运动控制的依赖性较强。如何在有障碍物的情况下长时间地维持平稳状态成为机器鱼开发的瓶颈。而提高任务成功率, 往往是以牺牲速度为代价的。速度、效率两者的权衡不仅增加了模型的复杂性, 还降低了机器鱼自身的反应速率。为解决上述问题, 笔者在分析典型机器

鱼策略的基础上, 提出了一种基于环境信息的机器鱼协作策略, 避开机器鱼自身的短板, 在运动控制上更加灵活, 同时提高机器鱼运动速率及完成效率。

1 平台模型与机器鱼运动特性

针对目前机器鱼研发中遇到的困难, 利用 2D 仿真平台作为一种实时仿真系统, 真实地模拟机器鱼各个关节的位姿变化、运动状态变化情况, 测试机器鱼各种运动学理论、水波扰动理论、碰撞理论、运动策略算法等体系结构, 既便于对其结构系统和控制策略系统进行改进, 又降低了实物研发成本。

1.1 平台模型

机器鱼 2D 仿真平台是基于 Microsoft Robotics Studio SDK 1.5 开发的, 充分利用了平台提供的仿真引擎服务。平台运行时能较为真实地反映水环境的复杂性。

2D 仿真带球接力平台模型如图 1。图 1 中, 平台被划分为 6 个区域, 位于平台中心的是一个工字型障碍物, 区域③为上方通道, 区域⑥为下方通道。

第一、三单程为仿真水球从初始位置, 依次经

收稿日期: 2013-08-07; 修回日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61003129); 国家大学生创新项目

作者简介: 黄伯峥(1991—), 男, 福建人, 在读硕士, 从事智能控制、飞机数字化装配研究。

区域①、②、③、④，最后到达区域⑤；第二、四单程，仿真水球从区域⑤出发，依次经区域④、⑥、②，最后到达区域①。

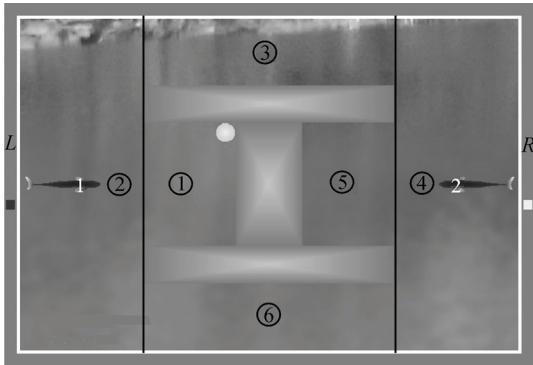


图 1 2D 仿真带球接力平台

区域③只允许机器鱼 1 通过，区域⑥只允许机器鱼 2 通过。

1.2 机器鱼运动特性

在水环境中的二自由度机器鱼，控制难度大于在平面上的轮式机器人。机器鱼各个关节的衔接机理并不是简单的铰链连接，机器鱼鱼尾的自由摆动及与障碍物的碰撞，将导致运动参数的突变，破坏运动的平衡性。从不平稳状态到平稳状态，需要较长的调节时间。平台中只能改变机器鱼的角速度、线速度参数，利用机器鱼顶球算法^[8]来实现较为复杂的动作。2 个参数值的选取以及变化，可构建出一个复杂的运动数学模型。平台返回的各项参数，并不是实际值，而是加了噪声处理的修正值，这无形中加大了运动控制的难度，因此在参数处理上，必须消除随机噪声的干扰。通过在平台中对机器鱼当前位置、角速度、线速度的监测，分析场上信息，预知下一周期的运动情况，同时与输入参数进行比较，实时反馈控制精度。

2 带球接力策略设计与实现

2.1 整体带球接力协作策略

第一单程与第三单程几乎一致，唯一区别是第三单程比第一单程少了将球从死角顶出的部分。而第二、四单程与第一、三单程类似，是互为对称的。具体协作策略如下：

步骤 1：机器鱼 1 将球顶出区域①后，运动至区域②上方；机器鱼 2 从区域④开始，经区域⑥运动至区域②合适的位置。

步骤 2：球被完全顶出区域①后，机器鱼 2 将球顶至区域③入口处。

步骤 3：机器鱼 2 静止，机器鱼 1 带球通过区域③；因机器鱼 1 的尾部可能会与机器鱼 2 的头部发生碰撞，会影响机器鱼 1 策略的执行，因此当机器鱼 1 完全进入区域③后，机器鱼 2 再加速运动至区域④上方，协作机器鱼 1 顺利将球顶进区域⑤内。

如果机器鱼 1 较快完成通过区域③的任务，将会出现机器鱼 1 等待机器鱼 2 的情况；此时采取机器鱼 1 静止，等待机器鱼 2 到达目标点的策略。

步骤 4：当机器鱼 1 完成区域③带球后静止，避开与障碍物的碰撞对其运动参数的影响；由机器鱼 2 将球从区域③终点处顶至区域⑤内。

步骤 5：机器鱼 2 运动至区域④中间处，等待下一单程的开始。

2.2 基于环境信息的带球接力策略

2D 仿真带球接力平台模型有个特殊的碰撞特性，就是当机器鱼的任何部位(特别是鱼尾)以一定力度、角度与障碍物发生碰撞后，会出现不可控制的“横向漂移”，导致机器鱼位移、线速度、角速度参数发生突变。机器鱼鱼尾的摆动幅度与角速度有关，可通过限制角速度来达到限制摆动幅度的效果；因此在容易与障碍物碰撞的位置，应限制机器鱼的角速度，减少横向漂移现象的发生。

在整体协作策略中，需要对边界、死角等位置进行特殊处理，笔者提出一种基于环境信息的带球接力策略。策略实现过程如图 2 所示。

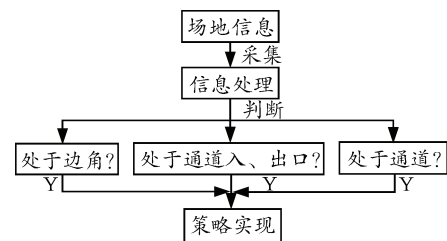


图 2 策略实现过程

场地环境信息判定的设计为 Corner、EntranceAndExit、Pass，分别代表边角、通道入口及出口、通道 3 种区域；BallPositon、FishPositon 分别代表球的位置、机器鱼的位置；Case1、Case2、Case3 分别代表 3 种基本情况。根据场地环境信息执行不同的策略。场地环境可分为以下 3 种情况。

Case1:

$$\text{BallPositon} \in \text{Corner}$$

Case2:

$$\text{BallPosition} \in \text{EntranceAndExit}$$

Case3:

FishPosition \in Pass

BallPosition \in Pass

2.2.1 边角

在策略执行时，经常遇到如图 3(a)所示的球位于边角内的情况。如果采用一般的头顶球策略，会因为与障碍物碰撞的关系，经常发生横向漂移现象。针对此现象，笔者提出了“肩扛式”（用鱼的鳍部）顶球策略，如图 3(b)所示。

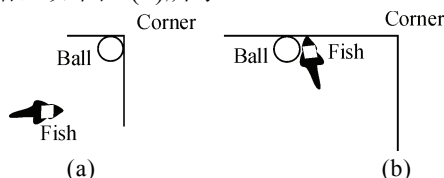


图 3 肩扛式顶球策略

步骤 1：精确控制机器鱼运动路径，垂直插入球的右边，挤出空间。

步骤 2：采用肩扛式顶球策略，将球从右边顶至左边，同时限制鱼尾摆动的幅度，避免与障碍物碰撞。

其他位置的边角顶球，也可通过相同的策略来处理。

2.2.2 通道入、出口

当机器鱼 1 带球进入通道时，如果线速度、位置参数调节不当，会出现把球顶回其他区域的情况，破坏策略的执行；如图 4，此时机器鱼 2 可从下方辅助顶球（但线速度参数不可过大）；或是在机器鱼 2 静止后，原地顺时针旋转一定角度，作为固定障碍物，较大幅度减小球被顶回的概率，使球顺利进入通道。出通道时，也可采取类似的辅助顶球策略。

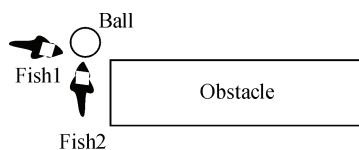


图 4 辅助顶球策略

2.2.3 通道

机器鱼在通道带球时，会与工字型障碍物或者场地边界发生碰撞，引起横向漂移，出现鱼头坐标超过球心坐标的情况；由于通道空间较狭小，几乎无法进行补救，反而长时间陷入局部调整循环。由于通道只允许单机器鱼通过，禁止另一条机器鱼进行辅助；针对规则的限制，笔者提出“反跑”策略。

步骤 1：鱼先反转（避免与球碰撞），转到合适的角度后，背离初始运动方向移动一段距离。

步骤 2：移动到一定位置后，原地旋转至合适

的角度。这样可以拉开足够的空间便于机器鱼方向、线速度参数的调整。

步骤 3：选择合适的参数，继续进行通道带球。

2.3 其他策略

在完成各个单程协作任务时，需要其中一条机器鱼从场地一边区域运动至另一边区域；如果各项参数调节合适，合理优化运动路径^[9]，能提高协作的效率。

在现有的策略框架下，速度的挖掘几乎到达极限。如果想进一步提高任务完成效率，除了完善运动控制之外，可跳离现有的框架，采取新的策略^[10]。

肩扛式带球与头顶式带球相比，稳定性更高；因此可将肩扛式带球策略运用到更多场合，例如通道带球及通道入口、出口的协作上，甚至可以全程采用沿工字型障碍物肩扛式带球策略。

3 实验分析

3.1 带球接力比赛规则

比赛开始后，仿真机器鱼按照项目规则完成带球接力任务。机器鱼 1(2)，初始状态位于左(右)球门前的仿真机器鱼；仿真机器鱼进入错误通道，则将犯规仿真机器鱼置于初始位置；仿真水球进入错误通道，则将仿真水球置于工字型凹槽内的初始位置。比赛时间为 5 min，比赛进行 2 次；每完成一个单程，得分增加 1 分；单次比赛，任务完成而结束比赛，记录得分和剩余时间；单次比赛，比赛时间递减到零，任务尚未完成而结束比赛，记录得分和得到最后 1 分时的剩余时间；整场比赛，记录 2 次比赛完成的总得分和总剩余时间。

3.2 策略效果

分别用协作策略(1 组)与普通策略(2 组)进行 10 次仿真实验，实验结果如表 1。普通策略即采取非协作策略算法，每一单程任务只由单机器鱼完成。

表 1 协作策略与普通策略的对比

序号 <i>i</i>	1 组比赛 得分	1 组比赛 剩余时间 <i>t/s</i>	2 组比赛 得分	2 组比赛 剩余时间 <i>t/s</i>
1	3	33.300	2	84.700
2	3	30.300	2	71.000
3	3	35.600	1	155.900
4	3	47.500	2	25.600
5	3	38.700	2	84.700
6	3	29.500	2	40.600
7	3	21.900	2	60.400
8	3	26.500	2	79.700
9	3	41.600	1	160.800
10	3	19.500	2	87.800

通过比较,协作策略各项指标均优于普通策略。在 10 次仿真实验中,采用协作策略的比赛得分均能达到 3 分,且剩余时间均超过 19 s,稳定性较好;采用普通策略,比赛得分达不到 3 分,甚至出现了 1 分的情况,剩余时间波动较大,稳定性较差。

实验过程中,有较多未知的因素干扰。特别是与障碍物的碰撞,易造成参数的突变,增加了调整自身稳定状态的时间。双机器鱼协作,在提高速度参数的前提下,能游刃有余地处理状态突变,使各种参数始终稳定在合理的范围内,提高任务完成率。

除平时实验测试之外,通过运用基于环境信息的协作策略,该版本在国内外比赛中均取得了较好的成绩,再次验证笔者设计的基于环境信息的带球接力策略的合理性与有效性。

4 结束语

笔者所叙述的带球接力策略是一种基本的算法,以协作思想为基础,构建一个复杂的机器鱼控制的数学模型。实验分析验证了所提策略的有效性。

2D 仿真平台为仿生机器鱼理论的研究提供了较为真实的环境,能促进实物机器鱼乃至更为复杂的水中机器人的发展。随着科学技术的不断进步,

智能水中机器人将会得到更为广泛的应用,而 2D 仿真平台将会在发展道路上扮演更加重要的角色。

参考文献:

[1] 李文斌,史豪斌,李伟华,等. 机器人足球进攻策略的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 187-191.

[2] 史豪斌,李伟华,王涤飞,等. 基于运动学原理的仿真机器人运动预测模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 18: 48-50.

[3] 史豪斌,覃杨森,娄云峰,等. 足球机器人仿真比赛中的进攻队形设计及控制研究[J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(6): 885-889.

[4] 胡宇,史豪斌,金若鹏. 足球机器人视觉系统光强自适应算法研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 132-139.

[5] 谢广明. 机器人水球比赛项目推介书[M]. 北京: 北京工业大学工学院, 2009: 1-5.

[6] 徐玉如,庞永杰,甘永,等. 智能水下机器人技术展望[J]. 系统智能学报, 2006, 1(1): 9-16.

[7] 谭敏,张新,唐霖,等. 机器鱼仿真 3 对 3 策略研究[J]. 兵工自动化, 2011, 37(5): 231-234.

[8] 陶金,孔峰,谢广明. 基于动作决策的机器鱼顶球算法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(11): 70-73.

[9] 谢超平. 仿生机器鱼路径规划研究[D]. 广西: 广西工学院, 2010: 40-47.

[10] 安永跃,李淑琴,龙海楠,等. 机器鱼仿真水球斯诺克比赛策略[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 51-55.

for Autonomous Underwater Vehicle Control[R]. Preprint submitted to 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012.

[18] Roberto Venturelli, Otar Akanyeti, Francesco Visentin, et al. Hydrodynamic pressure sensing with an artificial lateral line in steady and unsteady flows[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(3).

[19] 刘傲,蔡勇,谢广明. 一种机器鱼的位姿镇定控制算法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 46-50.

[20] Ahmad T. Abdulsadda, Xiaobo Tan. An Artificial Lateral Line System Using IPMC Sensor Arrays[J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2012, 3(3): 226-242.

[21] Ahmad T. Abdulsadda; Xiaobo Tan. Localization of a moving dipole source underwater using an artificial lateral line[J]. Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication. 2012.

[22] Ahmad T. Abdulsadda, Xiaobo Tan. Nonlinear Estimation-based Dipole Source Localization for Artificial Lateral Line Systems[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 8(2).

[23] Yang Yingchen, Nam Nguyen, Chen Nannan, et al. Artificial lateral line with biomimetic neuromasts to emulate fish sensing[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2010, 5(1).

[24] Taavi Salumäe, Maarja Kruusmaa. Flow-relative control of an underwater robot[J]. Proceedings of the royal society, 2013, 469(2153).

(上接第 45 页)

[10] Bleckmann H. 3-D. orientation with the octavolateralis system[J]. Journal of Physiology-Paris, 2004, 98(13): 53-65.

[11] Münz H. Morphology and innervation of the lateral line system in *Sarotherodon niloticus* L. (Cichlidae, Teleostei). Zoomorphol, 1979, 93: 73-86.

[12] 齐亮,杨宇,王悦,等. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012(4): 438-445.

[13] Fan Zhifang, Chen Jack, Zou Jun, et al. Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12(5).

[14] Liu P, Zhu R, Que R. A Flexible Flow Sensor System and Its Characteristics for Fluid Mechanics Measurements[J]. Sensors, 2009.

[15] Chen Nannan, Craig Tucker, Jonathan M. Engel, Member, IEEE, Yingchen Yang, Saunvit Pandya, and Chang Liu. Design and Characterization of Artificial Haircell Sensor for Flow Sensing With Ultrahigh Velocity and Angular Sensitivity[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007, 16(5): 999-1014.

[16] Liu Chang. Micromachined biomimetic artificial haircell sensors[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2007, 2(5).

[17] Xu Yiming, Erik Stegman, Bobby Hodgkinson, et al. Lateral Line Inspired Hydrodynamic Force Estimation