

doi: 10.7690/bgzdh.2019.03.020

基于水波建模的交替式顶球改进算法

陈 林, 王梅娟, 姚 奕

(中国人民解放军陆军工程大学指挥控制工程学院, 南京 210007)

摘要: 针对机器鱼比赛中出现的情况以及基本顶球算法的不足, 设计一种基于水波建模的交替式顶球算法。在经典顶球算法的基础上, 根据水波建模的相关理论, 给出了基于水波建模的交替式顶球算法的具体思想, 通过变换坐标系, 使球以曲线的方式向前推进, 利用水波建模对算法进行优化, 提高顶球点的精度, 从而减少误差, 并对算法进行验证。实验结果表明, 该算法可提高机器鱼顶球效率并缩短一次进球所需要的时间。

关键词: 机器鱼; 顶球算法; 水波建模; 水球比赛

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Alternating Ball-pushing Modified Algorithm Based on Water Wave Modeling

Chen Lin, Wang Meijuan, Yao Yi

(Command & Control Engineering College, PLA University of Army Engineering, Nanjing 210007, China)

Abstract: Based on water wave modeling, alternating ball-pushing modified algorithm is proposed to solve lack of the basic ball-pushing algorithms and some situations on the robotic fish water polo game. According to the classic ball-pushing algorithms and the theory based on water wave modeling, the modified algorithm transform the coordinate system and the robotic fish alternates to push ball and the ball forward in a curved manner. To improve the accuracy of the real-time geometry sites of the ball and reduce errors, the algorithm is optimized through water wave modeling. Results show that this ball-pushing algorithm can improve the efficiency of goals and shorten the goal time.

Keywords: robotic fish; ball-pushing algorithm; water wave modeling; water polo game

0 引言

随着我国水中战略的不断深入, 水中仿生技术得到越来越多的关注。水中仿生机器人以控制论、系统论为基础, 实现水下目标探测与识别、水下导航(定位)、水面战场模拟、能源收集等功能, 实际应用产品在水下科技应用领域越来越广泛。

近年来, 高科技领域机器人技术的快速进步推动了教育领域机器人比赛的发展。为更好地推动水下仿生机器人的应用和研发, 基于水下仿生机器人展开的项目也越来越多, 其中基于多关节仿生机器人全局视觉抢球博弈因其策略的多变性和对抗的激烈性, 是难度最大、技术性要求最高、观赏性最佳的项目之一。基于此, 笔者根据水波建模的相关理论基础, 提出一种基于水波建模的交替式顶球算法。该算法结合了基本顶球算法的不稳定性问题和水的波动性因素, 使机器鱼交替顶球, 并通过水波建模预测球的运动趋势, 修正顶球点的坐标, 使球曲线前进, 大大提高顶球的效率, 为多关节仿生机器人研究提供参考依据。

1 准备知识

1.1 项目介绍

1.1.1 全局视觉组抢球博弈

全局视觉组抢球博弈^[1]的比赛环境布局如图 1 所示。比赛开始时, 双方机器鱼分别位于己方球门前正中央处, 在场地中间均匀分布 3 个大小、质量一致的水球。比赛开始后, 双方可以通过策略控制机器鱼将水球顶入己方球门范围内(己方虚线内), 也可以将对方球门内的水球顶出或者阻碍对方机器鱼将水球顶入。比赛共 5 min, 待比赛时间终止, 双方机器鱼停止操作, 察看双方球门范围内(己方虚线内)水球的数量。球门内水球多的一方获胜, 若水球数量相等, 则先将水球顶入的一方获胜。比赛过程中禁止暂停, 双方可以更换机器鱼控制策略。

1.1.2 赛规分析

依据上述规则, 比赛博弈策略和顶球算法优良是直接决定比赛胜负的关键因素。前者根据当前比赛的局势(如进球数、双方顶球算法好坏等), 决定

收稿日期: 2018-11-09; 修回日期: 2018-12-28

作者简介: 陈 林(1996—), 男, 辽宁人, 满族, 本科, 从事指挥自动化研究。

机器鱼的动作：执行顶球进门、破坏对方球门内的球或阻止对方鱼的动作等。若将博弈策略比作战术的话，顶球算法则可以看作是机器鱼的执行策略能力。高效的顶球算法可以在短时间内让机器鱼顶球到目标点，完成博弈策略所要求执行的动作；而效率低的顶球算法则可能造成延误战机、耽误时间，甚至出现“乌龙球”“帮倒忙”的情况。

二者在比赛中相辅相成，重要性不分上下。而在比赛博弈策略的拟定和顶球算法的设计中，会出现很多问题。比如博弈策略考虑不周全，战术上出现失误，或者博弈策略拟定过程中，策略过散，需要不断切换顶球算法，这其中切换的时间差就会对比赛造成延误。

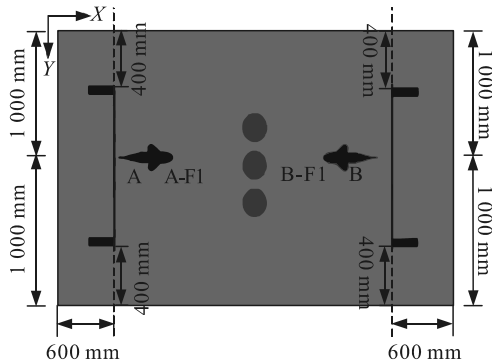


图 1 全局视觉抢球博弈布局

1.2 基本算法介绍

1.2.1 基础顶球算法

基础顶球算法^[2]是国际水中机器人全局项目官方标准仿生机器鱼底层自带函数实现的可调用顶球策略，是最基础常用的顶球算法之一，广泛应用于比赛之中。该算法使机器鱼首先运动到预设点。该预设点是球与球门反向延长线上一个顶球的准备点，保证机器鱼就有足够的距离调整方向，确保鱼头在顶球时与球和目标点角度近似，最终使球朝目标点运动，参赛者通过调整预设点、目标点之间距离及各项参数等进行算法改进和优化。

由于在应用过程中，鱼头的物理构造往往会使鱼在顶球过程中将球顶偏，偏离设定路线，效率很低。并且在实际场地中，水对球和鱼的影响很大，鱼在游到预设点和顶球点的过程中会造成误差，对算法的效率也有很大的影响。

1.2.2 圆切线顶球

切入圆顶球算法^[3]是基于基础顶球算法改进中较为突出的方案之一，其基本思路可描述为机器鱼先直线运动到切入圆上，再沿切入圆上的轨迹运动

到预设点(该预设点是球与目标点反向延长线上的一点)，最后以一定的速度顶球。该顶球算法是根据球和鱼的位置，运用几何知识，计算出机器鱼的运动轨迹，再与机器鱼的转弯半径进行匹配，从而得出机器鱼相应速度和角速度，到达预设点。

与基本顶球算法相比，切入圆顶球算法顶球更加稳定，因为圆的几何特性，可以保证鱼到达预设点时，鱼的方向与球和球门的方向近似，也省去了机器鱼调整的距离，预设点与球的直线距离可以很小，甚至为 0。

机器鱼在圆形轨道运动中，运动时间周期较长，在比赛中会出现还没碰到球，就被对方鱼顶走的问题。其次，受水波影响的约束，球的位置不断变化，鱼就需要不断进行路径规划，不断调整速度和角速度，会使顶球的成功率降低。

2 基于水波建模的交替顶球算法

以上介绍的算法是目前水中机器人对抗类项目比赛中常用的 2 种方法，思路都是事先为机器鱼设定好路线规划，按照路径到达预设点后，用机器鱼鱼头部分进行顶球，使球朝目标点运动。在实际比赛过程中笔者发现：在设计机器鱼时，为了让鱼更好地游动，将鱼头设计为类圆锥形，头部尖且四周光滑，导致直线顶球时会顶偏。其次由于水的波动性影响，使机器鱼在顶球的过程中，水推动球，这样就会产生误差，当该误差大到一定程度，鱼就会将球顶偏，影响整体策略的执行。

2.1 基本思想

根据上述 2 个问题，笔者给出了基于水波建模的交替式顶球算法的具体思想。算法流程如图 2。

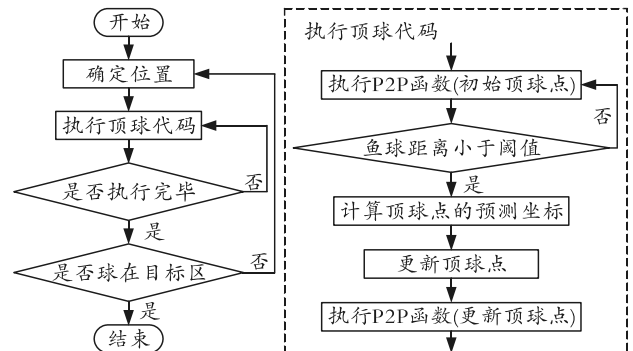


图 2 算法流程

算法的基本思想是：先根据机器鱼与球的距离，让机器鱼快速地趋近球^[4]，游到预设定的区域后，为解决上述基本算法中直线顶球会顶偏的情况，采取交替顶球的方法。根据当前球的位置和目标点的

几何关系，划分4个区域，当机器鱼处于相应区域时执行顶球策略^[5]，机器鱼先将球往左前方顶，再将球向右前方顶，依次交替进行，使球稳定地向前推进。在水池中，由于水流情况复杂多变，难以计算，但水的作用最终会影响到球的速度、加速度和方向，所以笔者通过计算球的速度、加速度等来变相对水的情况进行计算。根据开发环境获取球的位置，通过几次位置变换，得出球的速度和加速度，从而计算出球在几个周期后的位置。当球和机器鱼的距离小于阈值时，将球的移动考虑到机器鱼顶球的坐标中，从而提高精准度，减少误差。

2.2 算法分析

2.2.1 坐标变换

在实际比赛中，首先需要对坐标进行变换^[6]，将球与目标点进行连线，以球为原点做出法线，如图3所示。根据球与目标点的几何位置，设为4个区域，具体划分如下：

1号区域判定为鱼与球所成角在目标点与球所成角和目标点与球所成角 -90° 之间。

2号区域判定为鱼与球所成角在目标点与球所成角和目标点与球所成角 $+90^\circ$ 之间。

3号区域判定为鱼与球所成角在目标点与球所成角 $+90^\circ$ 和目标点与球所成角 $+180^\circ$ 之间。

4号区域判定为鱼与球所成角在目标点与球所成角 -90° 和目标点与球所成角 -180° 之间。

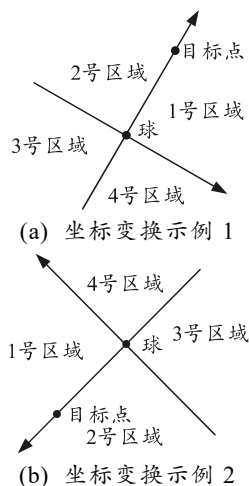


图3 坐标变化示例

2.2.2 执行顶球代码

为了提高顶球效率，在顶球过程中，笔者为4个区域编写相应的策略。这4个区域中：3号区域和4号区域位于球和目标点的外侧，是顶球区；而1号区域和2号区域位于球和目标点的内侧，是非

顶球区。

当机器鱼在非顶球区时，由于鱼顶偏、各种误差或者水波等因素，使机器鱼到了一个不利推球的位置，这时机器鱼所执行的命令应该是离开非顶球区，沿设定好的轨迹运动到顶球区(3号区域或4号区域)中重新执行顶球策略，如图4所示。

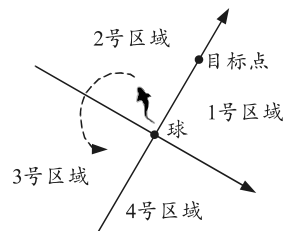


图4 非顶球区执行策略

当机器鱼在顶球区时，机器鱼采取交替顶球的方法。顶球区执行策略如图5所示。笔者假定目标点在球的右上方，机器鱼需要将球顶到目标点。此时鱼经过前面指令，到达4号区域，即可执行4号区域策略：顶3号区域球边上的点，使球朝1号方向运动。该动作完成后，机器鱼处于3号区域，即可执行3号区域策略：顶4号区域球边上的点，使球朝2号区域方向运动。这样机器鱼在3号和4号区间内交替顶球，球会以一个曲线的方式，稳定地向前运动。当球的速度设定在一定值时，可类似直线推球。

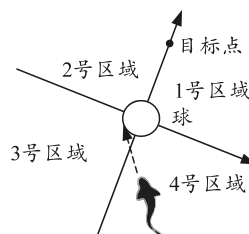


图5 顶球区执行策略

2.2.3 水波建模计算顶球点的坐标

顶球过程中顶球点的选定也是影响顶球效率的关键因素，在笔者所介绍的算法中，顶球点有2种选择方式：固定式和动态式。其中固定式是指顶球点的位置保持不变，适用一些特定情况(如有一些障碍物进行阻挡)。而动态式指顶球点的变化随着球与目标点连线的距离而变化，距离越大，顶球点越靠中间；距离越小，顶球点越靠中心。其中顶球点的角度视情况而定，一般随距离递增而递减。经过大量的编程实验分析，在上述算法的测试过程中，受水池内水的影响较大，会导致机器鱼顶错位置，造成误差，使机器鱼游到非顶球区，需要重新找位置顶球，使顶球效率降低。

为了解决上述问题，需要将水的波动性因素考虑进去。由于水池中水流情况复杂多变，测试水流速度困难，但水的作用最终影响到球，所以根据 MURobotSys^[7]平台提供的参数，得到当前球的位置，从而预测球的位置。

笔者假定：通过计算，在 3~4 个周期，机器鱼将会接触球，此时开始记录前 3 个周期的值，也就是 A 点、B 点和 C 点的坐标，D 点是预测机器鱼接触球的位置，如图 6 所示。

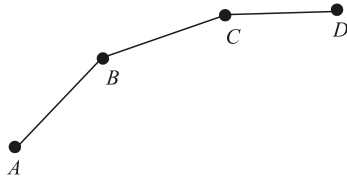


图 6 预测球坐标

其中：A 点为顶球点第 1 个周期获取的坐标，设为 (x_1, y_1) ；B 点为顶球点第 2 个周期获取的坐标，设为 (x_2, y_2) ；C 点为顶球点第 3 个周期获取的坐标，设为 (x_3, y_3) ；D 点为预测顶球点的第 4 个周期的坐标。

由于周期的单位在毫秒级，可以近似将 A、B、C、D 点看成一条直线，且 A、B、C、D 为均变速运动。先得出 AB 段和 BC 段的平均速度，再计算加速度，最终得出 CD 段的距离。

$$v_{ab} = \frac{X_{ab}}{T} \quad v_{bc} = \frac{X_{bc}}{T} \quad // \text{求解 AB 段和 BC 段速度}$$

$$a = \frac{2(X_{ab} + X_{bc})}{v_{ab}^2 - v_{bc}^2} \quad // \text{求解加速度}$$

$$v_{cd} = v_{bc} + aT \quad // \text{求解 CD 段速度}$$

$$X_{cd} = v_{cd}T \quad // \text{求解 CD 段距离}$$

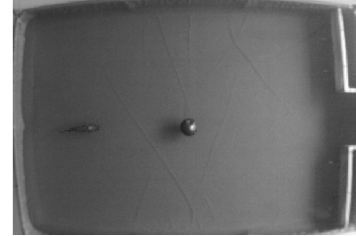
最终，求解获得 $D = (x_3 + X_{cd} \cos X_{cd} \cos \alpha, y_3 + X_{cd} \sin X_{cd} \sin \alpha)$ ，从而将水的误差考虑进去，得到更加精准的顶球点坐标。当球和鱼的距离小于阈值时，即可用预测的顶球点来代替原始顶球点，实现提高顶球效率。

3 实验结果

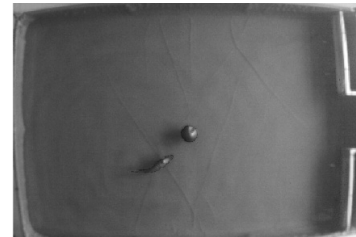
采用该算法在机器人水球比赛平台下进行单鱼顶球实验，对算法进行验证。实验情况如图 7。

图 7 中：(a)为实验初始，目标点为球门内处；(b)为机器鱼靠近球，处于 1 号区域，执行 1 号区域策略，顶 2 号区域的点；(c)为机器鱼游到顶球点，处于 2 号区域，执行对应 2 号区域策略；(d)为机器鱼顶球过程中顶偏，处于 3 号区域，重新将球调整到进攻区域，执行 3 号区域策略；(e)为机器鱼顶球

过程中顶偏，处于 4 号区域，重新将球调整到进攻区域，执行 4 号区域策略；(f)为调整位置后，继续执行相应区域策略；(g)为机器鱼把球顶入球门；这一过程用时 43 s。



(a) 实验初始



(b) 处于 1 号区域



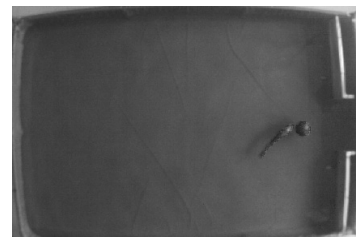
(c) 处于 2 号区域



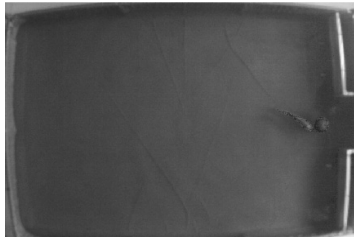
(d) 处于 3 号区域



(e) 处于 4 号区域



(f) 调整位置



(g) 顶入球门

图 7 实验行为

笔者采用算法进行顶球实验，记录进球时间。由 20 次实验结果可知：当算法中不考虑水的因素（不计算球的位置）时，机器鱼一次进球时间在 24~45 s 内；否则，机器鱼一次进球时间在 24~37 s 内，顶球时间更加稳定。上述实验过程中均未出现不能进球的情况，而用前面提及的基本顶球算法进行相同的实验，一次进球时间范围在 50~240 s 内，5 min 内还出现数次任务不能完成的情况，从而验证了该算法的优越性。

4 结束语

针对机器鱼的构造特性、比赛中出现的情况以及基本顶球算法的不足，笔者设计并优化了基于水波建模的交替式顶球算法。通过变换坐标系，交替

斜向顶球，使球更加稳定推进，再考虑水的因素，预测球的位置，从而减少误差，提高顶球算法的效率。目前，该算法在国际水中机器人大赛全局视觉抢球博弈项目中取得很好的成绩，证明这种算法提高了顶球效率，但该算法未涉及路径规划，需要在以后研究中进行改进。

参考文献：

- [1] 2015 国际水中机器人大赛全局视觉组比赛项目及规则 [Z]. 国际水中机器人联盟, 2015.
- [2] 韩学东, 洪炳镛, 孟伟. 机器人足球射门算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003(9): 1064-1066.
- [3] 喻俊志. 多仿生机器鱼控制与协调研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2003.
- [4] 谢超平, 孔峰, 陶金. 基于模糊控制的仿生机器鱼转向控制研究[J]. 机器人技术与应用, 2009(4): 26-28.
- [5] 陈远志, 李卫京. 半圆形尾鳍机器鱼在水球竞赛中的点到点路径规划算法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(11): 66-69, 78.
- [6] 韩虹飞, 谭文, 谢广明. 基于坐标变换的机器鱼顶球算法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 73-75, 79.
- [7] 北京大学. 机器人水球比赛项目推介书[M]. 北京: 北京大学, 2009: 9-11.

(上接第 82 页)

表 1 紧固件安装数据记录

序号	日期	时刻	目标力矩/(N·m)	实际力矩/(N·m)
1	18/4/14	13:41:16	5	5.1
2	18/4/14	13:46:38	5	5.0
3	18/4/14	13:47:18	5	5.1
4	18/4/14	13:48:15	5	5.1
5	18/4/14	13:49:27	5	5.0
6	18/4/14	13:50:35	5	5.2
7	18/4/14	13:51:49	5	5.0
8	18/4/14	13:53:32	5	5.0
9	18/4/14	13:55:18	5	5.1
10	18/4/14	13:56:06	5	5.0
11	18/4/14	13:58:24	5	5.0
12	18/4/14	13:59:52	5	5.1
13	18/4/14	14:02:49	5	5.1
14	18/4/14	14:05:02	5	5.0
15	18/4/14	14:07:09	5	5.2
16	18/4/14	14:08:17	5	5.0
17	18/4/14	14:10:27	5	5.1
18	18/4/14	14:13:35	5	5.0
19	18/4/14	14:14:51	5	5.0
20	18/4/14	14:16:28	5	5.1

5 结论

笔者面向航天器紧固件的自动化安装需求，研制出一套航天器紧固件机器人自动安装系统，实现了数据的自动采集及信息化管理。笔者针对 M5×

16 螺钉进行了自动安装试验，在设定拧紧力矩为 5 N·m 的情况下，实际拧紧力矩控制在 5~5.2 N·m 内，达到了航天器紧固件安装的力矩控制精度要求。下一步，笔者将根据航天器紧固件安装实际需求，优化系统软硬件设计，增强系统的灵活性、通用性。

参考文献：

- [1] 孙升, 孙小庆. 航天行业紧固件标准综合分析[J]. 航天标准化, 2015(4): 22-26.
- [2] 张珊, 华国强. 科学选用紧固件提高航天产品质量与可靠性[J]. 航天标准化, 2014(3): 28-32.
- [3] 卫月娥, 张成立, 孟伟, 等. 面向航天器装配的机械臂柔性力控研究[J]. 航空制造技术, 2014(21): 147-152.
- [4] 布仁, 孙刚, 胡瑞钦, 等. 航天器机械臂柔性力控辅助装配方法[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(4): 430-435.
- [5] 张明, 喻懋林, 张玉生. 自动化技术在卫星天线高精度装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2013(20): 26-29.
- [6] 邱铁成, 张满, 张立伟, 等. 机器人在卫星舱板装配中的应用研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 10(5): 579-585.