

doi: 10.7690/bgzdh.2015.12.024

基于遗传算法的机器鱼水中路径规划

李连鹏^{1,2,3}, 苏中^{1,2,3}, 解迎刚^{1,2,3}, 刘福朝^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学, 北京 100192; 2. 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100101;
3. 智能控制研究所, 北京 100101)

摘要: 针对机器鱼水中路径寻优的具体要求, 提出一种以遗传算法为基础的机器鱼路径规划方法。通过介绍遗传算法的 3 种基本操作, 将遗传算法应用到试验场景中规划出最优路径, 分析研究了一种根据目标点与机器鱼的距离变化而改变机器鱼运动速度的策略, 并进行仿真分析和实验。仿真结果表明: 采用遗传算法的水中救援路径规划可将救援时间缩短 30% 以上, 提高了寻优效率。说明遗传算法对机器鱼的路径规划具有积极效果和快速寻优特性。

关键词: 机器鱼; 遗传算法; 水中救援; 路径规划

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Path Planning of Robot Fish's Based on Genetic Algorithm

Li Lianpeng^{1,2,3}, Su Zhong^{1,2,3}, Xie Yinggang^{1,2,3}, Liu Fuchao^{1,2,3}

(1. Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100101, China; 3. Institute of Intelligence Control, Beijing 100101, China)

Abstract: Aiming at requirements of the robot fish water path searching, a new method of robot fish path planning based on genetic algorithm is proposed. By introducing 3 basic operations of genetic algorithm, the genetic algorithm is applied to the test scene to plan the optimal path, and analyzed a strategy to change the speed of the robot fish. Simulation analysis and experiment are carried out. Simulation results show that the use of genetic algorithm in the water rescue path planning can shorten the rescue time of more than 30%, improving the search efficiency. The genetic algorithm has positive effects on the path planning of the robot fish and the fast optimization of the genetic algorithm.

Keywords: robotic fish; genetic algorithm; the water rescue; path planning

0 引言

随着近年来机器人技术、控制技术、人工智能、水动力学以及新型材料、传感器和执行机构的发展, 各式各样的水下机器人将以更快的速度发展起来。未来的仿生机器鱼将在水下环境中进行海底勘探、海洋生物观察、水下施工和军事侦察、水中救援等艰巨工作, 这也吸引了越来越多的科研工作者进行仿鱼型机器人的研究^[1]。

由于水下情况复杂, 环境恶劣, 水上事故频发, 水中机器人救援成为近年来研究的热点。在救援过程中, 怎样在最短的时间内完成救援任务显得尤为重要; 因此路径规划成为水中救援研究的重中之重。

在现有的水中救援赛中, 没有明确的路径规划方法及策略, 仅凭人的判断进行规划不能充分利用时间完成救援任务。作为一种新的全局优化搜索算法, 遗传算法 (genetic algorithms) 因其简单易用, 适用于并行分布处理等特点, 得到了深入发展和广泛应用。笔者将遗传算法应用于路径寻优, 充分利用距离判断, 在众多可选择路径中, 选择最短救援距离, 并且针对救援目标的重量问题提出了一种通过

改变机器鱼速度来改变冲击力量的策略, 配合遗传算法规划出的最优路径, 从而在最短的时间内完成救援任务。

1 遗传算法描述

1.1 遗传算法介绍

遗传算法是一种模拟自然生物进化过程的全局随机搜索算法, 由美国 Michigan 大学的 Holland 教授于 20 世纪 60 年代提出。它将计算机科学与进化论思想有机结合起来, 借助生物进化机制与遗传学原理的根优胜劣汰和适者生存原则, 通过模拟自然界中生物群体由低级、简单到高级、复杂的生物进化过程, 使所要解决的问题从初始解逐渐逼近最优解或准最优解^[2]。作为一种新的全局优化搜索算法, 遗传算法简单易用, 对很多优化问题能够较容易地解出令人满意的解, 且适用于并行分布处理, 已在科学研究和工程最优化领域中展现出独特魅力^[3]。

1.2 遗传算法的 3 种基本操作

1.2.1 选择

选择即是在种群中选择一个个体, 它是随机映

收稿日期: 2015-08-22; 修回日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金 (61261160497); 北京市科技计划课题 (Z131100005323009); 研究生教育质量工程 (5111524102)

作者简介: 李连鹏 (1991—), 男, 河北人, 硕士, 从事高旋载体姿态角解算、救援机器人研究。

射： $T_s : S^N \rightarrow S$ 。特别地，按照概率如下式所示：

$$P\{T_s^a(\mathbf{X}) = X_i\} = f^a(X_i) / \sum_{k=1}^N f^a(X_k) \quad (1)$$

其中： N 为种群规模； $f(X_i)$ 表示个体 X_i 的适应值，适应值越大选中概率越大，复制多，否则相反。

1.2.2 交叉

交叉是母体的操作，是母体空间到母体空间的映射，记做

$$T_c : S^2 \rightarrow S^2 \quad (2)$$

单点交叉：等概率地随机确定一个基因位置作为交叉点，再把一对母体从交叉点分为前后 2 部分，交换 2 个个体的后部分，得到 2 个新个体。若以概率 P_c 交换 2 个个体的后半部分，得到 2 个新个体，称为单点随机交叉，称 P_c 为交叉概率。如果确定 2 个基因位置将一对母体分成 3 部分，交换中间部分，则称为两点交叉。同样有两点交叉与两点随机交叉之分^[4]。

一致随机交叉：独立地以概率 P_c 把母体的一个个体想要分量交换为第二母体相应分量，从而得到交叉结果。其数学表述如下：

对于长度为 l 的 2 个个体 $x_1, x_2 \in S$ ，设置长度为 l 的二值交叉串 $t \in S$ ，定义

$$\begin{cases} x'_{1i} = x_{1i}, x'_{2i} = x_{2i}, & \text{if } t_i = 0, \\ x'_{2i} = x_{1i}, x'_{1i} = x_{2i}, & \text{if } t_i = 1, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

当交叉字串 t 以一定概率 P_c 选取，上式的交叉也以一定概率发生时，称为一致随机交叉，记为

$$(x'_1, x'_2) = C_t(x_1, x_2) \quad (4)$$

1.2.3 变异

变异是个体空间到个体空间的随机映射 $T_m : S \rightarrow S$ ，其独立地以概率 P_m 改变个体分量的取值。

一致变异：等概率地对个体的每个基因，改变个体分量的取值。一致随机变异：等概率地对个体的每个基因以概率 P_m 改变个体分量的取值^[5-6]。数学表达式如下：

对于个体 $X \in S$ ，设置二进制变异字串 $t \in S$ ，则 X 的一致变异 $X = m_t(X)$ 定义为

$$\begin{cases} x'_i = x_i, & \text{if } t_i = 0, \\ x'_i = |x_i - 1|, & \text{if } t_i = 1, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

其中： x_i, x'_i 分别表示个体 X, X' 的第 i 位基因值； t_i 表示二进制变异字串 t 的第 i 位值。当变异字串一

定概率 P_m 选取，上式的变异也以一定的概率发生时，称为一致随机变异。

1.3 遗传算法规划路径及流程图

路径规划路线图如图 1。图中是机器鱼随机地选择了一条完成任务的路线，4→1→2→3→5。

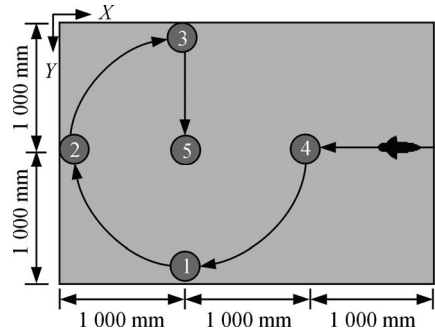


图 1 路径示意图

实施水中救援有 5 个待救援目标，通过比赛平台的图像获取各待救援目标的坐标位置，通过 Matlab 仿真，将机器鱼可以救援的所有路径距离计算出来，通过比较大小，选择距离最小的救援路径，其遗传算法基本流程如图 2 所示。

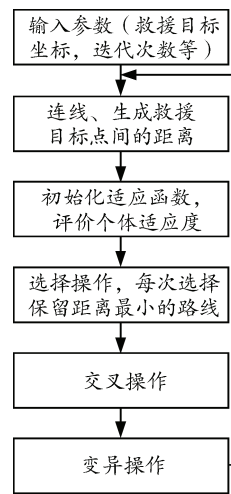


图 2 遗传算法基本流程

2 机器鱼速度变化策略描述

2.1 机器鱼的动力学方程

用于参加水球比赛的机器鱼方向档位共有 15 个 (0~14 档)，其中 7 档为直游档，0 档位左转弯最大档，14 档位为右转弯最大档^[7-9]。档位的变化伴随着鱼尾鳍摆动幅度变化，相应的鱼速度和推动力也会相应的变化。

下面为机器鱼的推动力方程：

$$N = \rho s \cos[\alpha_0 \cos(2\pi f) - \varphi] \times \{h_0 \times 2\pi f \sin(2\pi f) - \tan[\alpha_0 \cos(2\pi f) - \varphi] \times fh_0/st'\} \times h_0 2\pi f \sin(2\pi f) \quad (6)$$

式中： ρ 为流体密度； s 为尾鳍面积； φ 为尾柄和尾鳍的相位差； h_0 为摆动幅； α_0 为摆动角度； $st' = st/2$ (st 为斯特劳斯哈尔数)。

阻力方程：

$$D = 0.5C_d \rho s U^2 \quad (7)$$

式中： ρ 为流体密度； S 为尾鳍面积； U 为鱼体前进速度。

可得出机器鱼的游动方程为

$$M_a = \rho s \cos[\alpha_0 \cos(2\pi f) - \varphi] \times \{h_0 \times 2\pi f \sin(2\pi fat) - \tan[\alpha_0 \cos(2\pi f) - \varphi] \times fh_0/st'\} \times h_0 2\pi f \sin(2\pi ft) - 0.5C_D \rho s U^2 \quad (8)$$

式中 M_a 为机器鱼的质量， a 为机器鱼在游动时的瞬时加速度。可得，加速度与机器鱼摆动幅度成正相关，摆动幅度增大摆动频率相应会减小，鱼速会减慢，而相应产生的向前推力会增加^[9-11]。

2.2 策略介绍

由于待救援目标有一定的质量，且有一个比较重，正常的摆幅产生的推力 N 不能将其推倒；所以需要变换摆动幅度 h_0 ，摆动幅度 h_0 的变大必然导致摆动频率的降低，从而降低游速，故不能一味地增加摆幅。笔者所介绍的这个新策略，是当实施救援的仿生机器鱼与待救援目标之间的距离 $d = \text{Distance}(\text{CPoint point}, \text{CPoint aimer}) > b$ (固定值)时，鱼的摆动幅度维持正常摆幅，这时鱼前进的速度 U 相对是最快的，能够在最短的时间内接近救援目标；当 $d \leq b$ 时，方向档变换到0或14，以最大的推力 N_{\max} 去触碰待救援目标。由于 b 取很小的值，所以游速 U 下降得不多，可以近似看成速度不变，造成的时间损失可忽略不计。并且在这种情况下基本保证触碰一次即可使待救援目标获救，从另一个方面讲节省了时间。其策略如图3所示。

图中当机器鱼与待救援目标之间的距离较大时，速度档选为最大档，直游接近救援目标，机器鱼位摆幅较小摆动速率较快，这样可以快速接近待救援目标。当机器鱼和待救援目标之间距离缩短到一定距离时，改变方向档使鱼甩尾幅度增大，产生较大的向前的推力，完成救援任务。

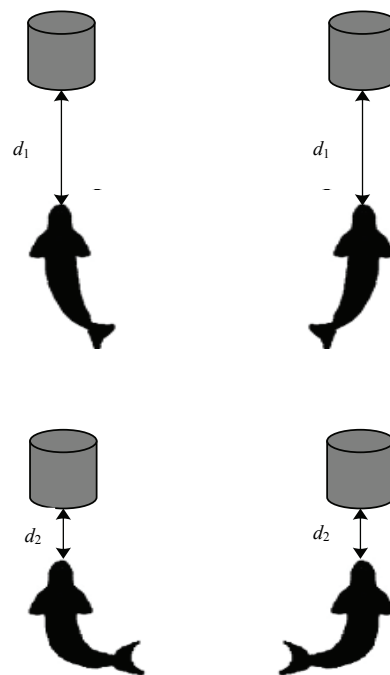


图3 策略示意图

3 仿真及实验结果分析

3.1 仿真结果及分析

为了验证遗传算法在机器鱼水中救援上的可行性和高效性，首先建立了整个流程的模型并进行了仿真。仿真此路径规划主要根据水球比赛的水中救援任务进行仿真设计。笔者采用 Matlab2012b 作为仿真工具，环境大小为 200 cm×300 cm 水池，最右侧点代表机器鱼，左边 5 点分别表示相应的待救援目标，机器鱼从所在点开始运动，并记录走过的路程。路径线经过待救援目标的坐标代表救援成功。

基于遗传算法的机器鱼路径规划仿真结果如图4~图6所示。

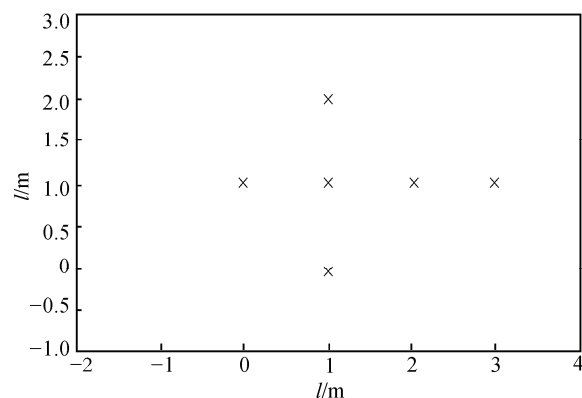


图4 机器鱼及5个待救援目标

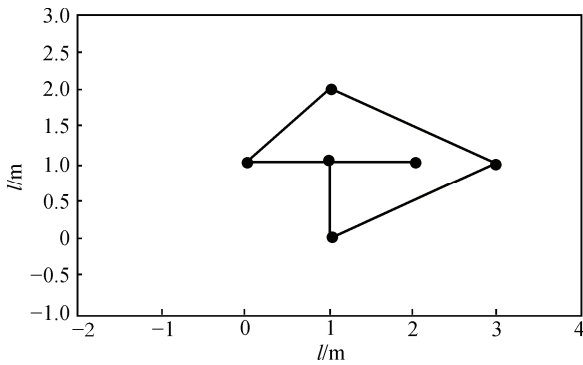


图 5 随机的路径选择

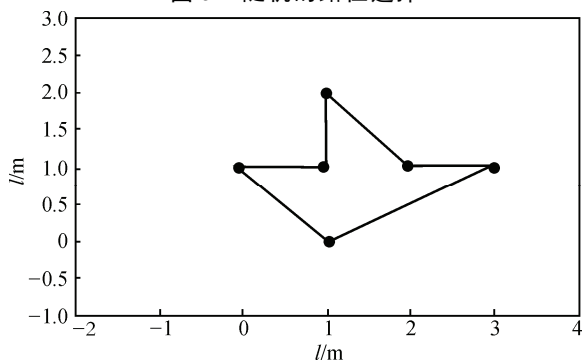


图 6 最优路径选择

在比赛中，待救援目标的位置坐标是一定的。图 4 为坐标点分布图，图 5 给出了一张随机选择的路径，图 6 是经过遍历比较得到的距离和最短的路径即最优路径。机器鱼按图 5 所给路径完成救援所走过的路程为 7.506 m，按图 6 所给路径完成救援所走过的路程为 5.828 m。不仅路程差距较大，而且选择最优路径完成救援所用时间也较短。仿真结果清楚地显示出基于遗传算法对路径的规划有积极效果和快速寻优特性，是最优的路径。

3.2 实验结果分析

为了检验仿真结果的可靠性，进行了如下实验操作：

1) 按照水中救援比赛待救援目标的标准位置进行实验，分别按图 5 和图 6 所给的路径进行救援，记录时间。

2) 改变待救援目标的位置，通过平台得到 5 点的坐标，输入到程序中，仿真出最优路径。记录随机选择一个路径和规划的最优路径完成水中救援的时间。

3) 重复 2)6 次。部分实验结果如表 1。

实验结果表明，基于遗传算法的水中救援的路径规划方法在比赛中有重要应用。机器鱼按照遗传算法规划出的路径完成救援任务所用的时间要小于随机选择路径所用的时间，救援时间缩短了 30%以

上，充分体现了此方法的高效性和合理性，验证了仿真的结果。

表 1 实验结果

组别	$t_{\text{最优/s}}$	$t_{\text{随机/s}}$	节约时间 t_f/s	节约率/%
1	130	184	54	41.5
2	115	173	48	41.7
3	123	132	9	7.3
4	148	208	60	40.5
5	142	191	49	34.5
6	121	161	40	33.1

4 结束语

实验结果表明：笔者提出的基于遗传算法的机器鱼水中路径规划，在机器鱼完成水中最短路径寻优中发挥了重要的作用，极大地缩短了目标点寻优时间，提高了寻优效率。另外，笔者提出的基于距离改变机器鱼摆尾幅度的控制方法在场景实验中也起到了积极的效果。然而在实际的应用中，机器鱼所处环境是非线性、动态变化的，无法建立精确的数学模型，有待做进一步分析和研究。

参考文献：

- [1] 许允喜, 蒋云良, 陈方. 基于点线对应的多摄像机全局位姿估计迭代算法[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1881-1888.
- [2] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008(10): 2911-2916.
- [3] 李华昌, 谢淑兰, 易忠胜. 遗传算法的原理与应用[J]. 矿业, 2005(1): 87-90.
- [4] 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.
- [5] 肖权, 孔峰, 谢广明. 基于动态角色的多机器鱼协作顶球研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 29(7): 24-28.
- [6] 孙凯. 机器鱼 2D 游动的动力学建模与仿真[D]. 北京: 北京大学, 2010.
- [7] 俞经虎, 竺长安, 邱欲明, 等. 仿生机器鱼的动力学仿真[J]. 机器人, 2003, 25(3): 610-613.
- [8] 肖洋, 蒋玉莲. 三关节机器鱼的动力学建模及其关键运动参数的研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2011(S1): 247-250.
- [9] 王晨, 谢广明, 王龙. 基于全局视觉的机器人水球比赛[C]//中国自动化学会智能自动化专业委员会、江苏省自动化学会. 2009 年中国智能自动化会议论文集(第二分册). 中国自动化学会智能自动化专业委员会、江苏省自动化学会, 2009: 7.
- [10] 陈言俊, 李果, 陈宏达, 等. 仿生机器鱼水球比赛策略系统的初步探究[J]. 机器人技术与应用, 2009(4): 29-32.
- [11] Yu Junzhi, Wang Shuo, Tan Min. Simplified propulsive model for biomimetic robot fish and its experimental validation[J]. 2005, 11(4): 135-139.