doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.11.017

基于合作博弈的多机器鱼路径规划

冯晓伟，曹友琴，邓彦松
（西南民族大学电气信息工程学院，成都 610041）

摘要：为更好地实现机器鱼之间的协作，避免只规划单个机器鱼的最优路径而使系统运动有失协调性，提出基于合作博弈的多机器鱼路径规划方法。利用博弈论中的合作博弈建立数学模型，将系统中的多机器鱼对应于博弈的参与者，对多机器鱼路径构造合作模型下的博弈方得益函数，求得系统的帕累托(Pareto)最优解，从而得到整个系统的最优路径。在水中机器人 2D 仿真平台上进行实验分析并用 Matlab 模拟机器鱼轨迹。分析结果表明，该路径规划理论应用在多机器鱼运动系统中是有效、可行的。

关键词：多机器鱼；合作博弈；得益函数；路径规划
中图分类号：TP301.6　　**文献标志码**：A

Path Planning of Multiple Fish Based on Cooperation Game Model

Feng Xiaowei, Cao Youqin, Deng Yansong
(*College of Electronic & Information Engineering*, *Southwest University for Nationalities*, *Chengdu* 610041, *China*)

Abstract: In order to make the robot fishes cooperate better between each other to complete the task with high efficiency, and avoid planning only a single robot fish's optimal path in the system leaving the movement of system beneath coordination, this paper presents a path planning method for multiple robot fish based on cooperative game model. Using cooperative game in game theory to establish a mathematical model, the robot fish in the system corresponds to the participants of the game, benefit function of the game player on the cooperative model of multiple robot fish path construction, get system Pareto optimal solution, then get the optimal path of the entire system. Using the above method's instance, simulate and analyze on the robot fish in water 2D simulation platform, and use MATLAB to simulate robot fish's track, results indicate: application of the path planning theory in the multiple robot fish movement system is effective and feasible.

Key words: multiple robot fish; cooperative game; benefit function; path planning

0　引言

在水中机器人比赛中，多机器鱼协作已成为理论研究的重点和趋势，而路径规划更是研究的核心。目前已有许多单机器鱼路径规划的研究成果并得到很好的应用，例如在静态环境中的连接图法、可视图法、Voronoi 图法和栅格法等，动态环境中的免疫算法、粒子群算法、遗传算法和蚁群算法等。但多机器鱼路径规划要比单机器鱼路径规划复杂得多，它涉及机器鱼间的避碰机制以及相互协作机制，即需要侧重考虑整个系统在协调合作下的最优路径，如系统在特定约束条件下总耗时间最少路径或是总路径最短等[1]。所以为了达到多机器鱼整体的运动协调且路径最优，就不能只“理性选择”让单个机器鱼路径最优，因为这样只会使系统陷入“囚徒困境”而未必得到 Pareto 最优解[2]，这一点在博弈论中的经典“囚徒模型”已得到很好的证明。

针对类似多机器鱼系统的多目标问题，严平等[3]提出了一种基于 Nash 均衡和进化计算多无人飞行器协调航迹规划算法；谢能刚等[4]基于 Nash 均衡模型和 Stackelberg 寡头博弈模型，建立多目标博弈设计的技术路线和关键指标。以上研究均采用非合作博弈理论。非合作博弈理论提倡各博弈方通过理性竞争方式实现各自目标利益，而合作博弈理论提倡在竞争中展开合作，以实现多个目标的整体利益得益[5]。笔者借鉴博弈论中合作博弈的思想，将其引用到多机器鱼系统路径规划研究中，并建立数学模型，通过构造合作博弈模型下的博弈方得益函数，得到 Pareto 最优解，即多机器鱼系统最优路径，并通过实验证明其有效性。

1　多机器鱼路径规划的数学模型

1.1　建立数学模型

在多机器鱼所在环境中根据任意第

收稿日期：2012-06-29；修回日期：2012-07-09
基金项目：西南民族大学科研项目(2012NFW002)；西南民族大学国家级大创项目(201210656006)
作者简介：冯晓伟(1989—)，女，河北人，本科在读，从事非线性控制、多智能体系研究。

$i(i=1,2,\cdots,m)$条机器鱼的起点 o_i 和目标点 x_i 建立坐标系，如图 1。对 o_ix_i 进行 n 等分，产生 $n-1$ 个路径点，分别过 $x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{i(n-1)}$点作平行于 y_i 轴的直线 $l_{i1}, l_{i2}, \cdots, l_{i(n-1)}$。在 l_{ij} 上任取一点 C_j，其坐标为(x_{ij}, y_{ij})，为第 i 条机器鱼的第 $j(j=1,2,\cdots,n-1)$个路径点。

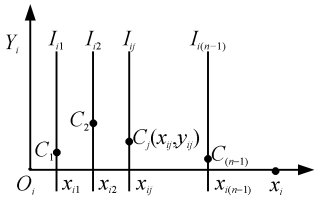

图 1　环境坐标

x_{ij} 可由等分算出，而 y_{ij} 由路径规划获得。因此，用设计变量 X 来表示 m 条机器鱼的规划路径 $X=\{y_{11},y_{12},\cdots,y_{1(n-1)},\cdots y_{i1}, y_{i2},\cdots,y_{i(n-1)},\cdots y_{m1}, y_{m2},\cdots, y_{m(n-1)}\}$。根据行走路径长短建立目标函数 $f_i=\sum[(x_{ij}-x_{i(j-1)})^2+(y_{ij}-y_{i(j-1)})^2]^{1/2}$，$m$ 条机器鱼的目标函数为 $F=\{f_1, f_2,\cdots, f_m\}\to\min$。

1.2　协调约束条件

在多机器鱼系统中，机器鱼除了受特定条件的单约束外，还要受整体运动协调的约束，即根据其他鱼的行为路径调整自己的路径，某些情况下，需要协调实现多鱼任务的同步。如图 2 所示：虚线为 2 条鱼的初始路径，实线为实际路径，由于未知障碍的出现，使得鱼 2 必须绕开障碍，拐大弯到达目标点；鱼 1 虽没有未知障碍干扰，但为了和鱼 2 同时到达目标点以实现同步，也必须改变原始路径。

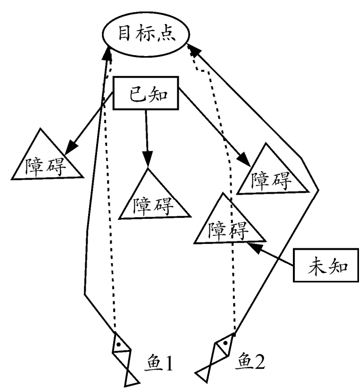

图 2　多机器鱼协调路径规划

要点归纳如下：

1) 路径点(x_{ij}, y_{ij})应位于路径规划的环境范围内；

2) 各路径点连线与障碍物严格不相交；

3) 满足避碰机制，即机器鱼之间要保持一定的安全距离，避免相撞，设最小距离为 $d_{\min}$，在第 j 个等分点上机器鱼 i 与 k 之间的距离为 d_{ik}，则满足 $[(x_{ij}-x_{kj})^2+(y_{ij}-y_{kj})^2]^{1/2}\geqslant d_{\min}(j=1,2,\cdots,n-1)$。

2　基于合作博弈的多机器鱼路径规划

2.1　合作博弈描述

博弈论是研究多个个体或团队之间在特定条件制约下，对局中利用相关方的策略而实施对应策略的学科[6]，根据相互发生作用的个体之间有无约束力协议而分为合作博弈和非合作博弈[7]。在非合作博弈中，通常采用 Nash 均衡去实现各自行为的最优，但纳什均衡并不是顾及团体利益的帕累托最优解决方案。在合作博弈中，个体之间以集体理性为基础，共同遵循某个具有合作性的约束协议，通过协商确定所要采取的策略，其结果对个体来说并不一定是最优结果，但一定是可以接受的相对较优的结果，即合作博弈结果是一个 Pareto 最优解[8]。

2.2　博弈分析

多机器人之间的运动协调规划主要采用基于数学规划理论的多目标优化方法进行[9]。笔者采用多目标优化法并将其转化为博弈问题求解。在博弈论中，G 表示一个博弈，若有 m 个博弈方，则用 S_i 表示任一第 i 方的其所有策略的集合，即策略空间。$s_{ij}\in S_i$ 表示博弈 i 方的第 j 个策略。u_i 表示博弈方的收益，是博弈方策略的多元函数，即 f_i。

1) 将 m 条机器鱼看作合作博弈的 m 方；

2) 设计变量 $X=\{y_{11}, y_{12}, \cdots, y_{1(n-1)}, \cdots, y_{i1}, y_{i2}, \cdots, y_{i(n-1)}, \cdots, y_{m1}, y_{m2}, \cdots, y_{m(n-1)}\}$分解为各博弈方的策略空间，$S_1=\{y_{11}, \cdots, y_{1(n-1)}\}, \cdots, S_m=\{y_{m1}, \cdots, y_{m(n-1)}\}$，并满足 $S_1\cup,\cdots,\cup S_m=X$, $S_a\cap S_b=0(a,b=1, \cdots, m; a\neq b)$；

3) 多机器鱼路径规划中的协调约束条件视为博弈中关于可选策略的约束条件；

4) 将 $F=\{f_1, f_2, \cdots, f_m\}\to\min$ 的求解转化为对博弈问题 $G=\{S_1,\cdots, S_m; u_1,\cdots,u_m\}$的求解。

2.3　构造合作博弈的博弈方得益函数

笔者采用合作模型，使各博弈方在自身得益函数构造中考虑其他博弈方的收益，以达到一种权衡方式。笔者引入权衡系数，将自身绝对收益和相对收益组合起来，作为博弈的得益函数 u_i，如式 (1)

$$u_i=w_{ii}u_i^*+\sum_{j=1,j\neq i}^{m}w_{ij}\hat{u}_{ij} \tag{1}$$

或表示为：$f_i=w_{ii}f_i^*+\sum\limits_{j=1,j\neq i}^{m}w_{ij}f_{ij}^{\wedge}$。

式中：u_i^*和 f_i^*分别为博弈方 i 采取某策略时自身的绝对收益和绝对路径长度；$u_{ij}^{\wedge}$ 和 $f_{ij}^{\wedge}(j=1,\cdots,i-1,i+1,\cdots,m)$分别为博弈方 i 采取策略时其他博弈方的收益和路径长度。它们均是规格化的无量纲值。$\sum\limits_{j=1}^{m}w_{ij}=1$，$w_{ij}=w_{ji}$，为权系数，它的取值反映各博弈方之间的合作程度，$w_{ii}$ 取值越大，表示彼此间竞争力度越大。

3　合作博弈算法及步骤

1) 在各博弈方的策略空间中设置初始可行策略，形成策略组合，$S_0=\{S_{01}, S_{02},\cdots,S_{0m}\}$；

2) $S_{01}^{c},S_{02}^{c},\cdots,S_{0m}^{c}$ 为 $S_{01},S_{02},\cdots,S_{0m}$ 在策略组合 S_0 中相应的补集。任意第 i 个博弈方，以该博弈方的收益 u_i 为目标，固定 S_{0i}^{c}，在隶属该博弈方的策略空间 S_i 中进行相应的单目标优化设计，求最佳对策 S_i^*使博弈得益 $u_i\to\min$。

3) 令策略组合 $S_1=S_1^*\cup\cdots\cup S_m^*$，计算前后的 2 个策略组合之间的距离，是否满足收敛准则 $\|S_1-S_0\|\leqslant\varepsilon$，若满足，则博弈结束；若不满足，则 S_1 替代 S_0，转步骤 2)进行循环。图 3 为此算法的流程图。

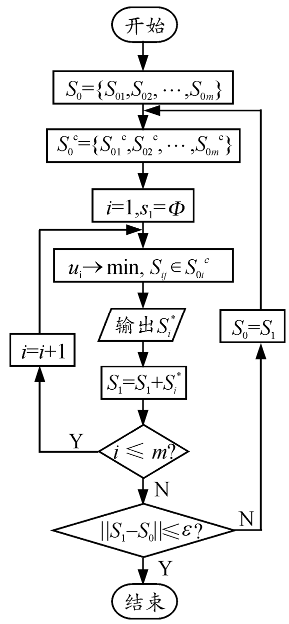

图 3　合作博弈算法流程

4　实验与分析

为了更加明晰地验证理论的正确性和有效性，笔者将此理论应用于 2D 仿真机器鱼双鱼协作过孔比赛项目中的一段赛程中。任务要求多机器鱼在环境中无碰撞的从起点到达终点。在 2D 仿真平台上进行多组仿真实验，将较好的结果作为最终实验结果。同时，为了更清晰地显示实验结果，笔者使用 Matlab 仿真工具，在误差允许的范围内，模拟绘画机器鱼的路径并计算其长度。

实验内容设计如下：取机器鱼数目为 2 条，分别命名为 A 和 B，任务为 2 条机器鱼同时从起点出发，行进过程中不能与静态障碍物相碰，同时 2 条鱼之间要时刻保持安全距离，最后尽量同时到达球所在位置即目标点。实验分为 3 组：第 1 组不采用合作博弈算法，后 2 组采用合作博弈算法，分别进行 6 次和 15 次博弈。在 2D 仿真平台上得到 3 组实验结果，分别记录每组任务完成的时间，并用 Matlab 仿真工具模拟其路径，作图并记录每组实验下每条鱼的路径长度。将第 1 组实验与第 2 组实验路径结果图模拟合成到一幅图中，如图 4 所示。

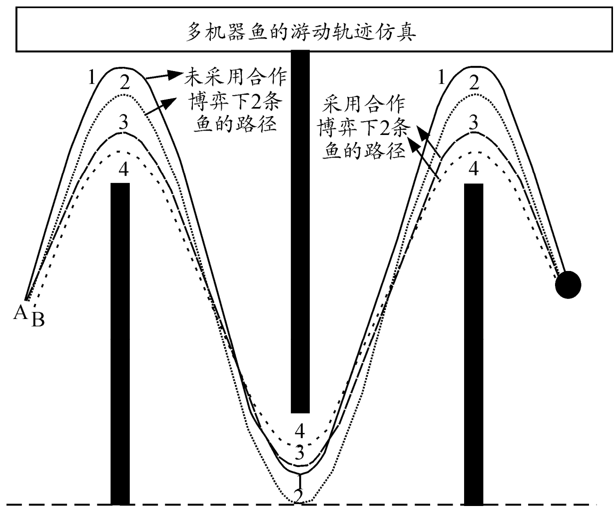

图 4　路径结果对比

图 4 中，1 和 2 曲线为第 1 组试验实验路径结果，鱼 A、鱼 B 未采用合作博弈，在满足上述约束条件的前提下，只图各自路径最优，相互争先以求最快达到目标点但是却未能同时到达，2 条机器鱼路径长度分别为 5 022.3 mm 和 5 009.7 mm；3 和 4 曲线为第 2 组实验路径结果，鱼 A、鱼 B 采用合作博弈，在合作博弈模型下，令 $w_{11}=w_{22}=0.7$，$w_{12}=w_{21}=0.3$，行进过程中 2 条鱼协调运动，时而同步前进，时而有前有后，力求使系统整体的路径最优，并且最终也同时到达目标点，2 条机器鱼路径长度分别为 4 112.2 mm 和 4 067.9 mm。

（下转第 72 页）