

基于多 Agent 的人工鱼群自组织行为算法

班晓娟¹, 吴崇浩², 王晓红¹, 曾广平¹

(1. 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 在基于认知的人工鱼行为模型的基础上, 增加实现鱼群个体间通信及鱼群与环境交互的互操作行为模块, 建立面向群体行为的人工鱼体系结构与模型。提出了一种基于多 Agent 的人工鱼群自组织行为的研究方法: 将基于这种体系结构的人工鱼作为 Agent, 其能感知环境信息, 产生意图, 规划行为。建立鱼群中 Agent 的运动、捕食、逃逸模型, 通过个体间的相互作用涌现出群体的自组织行为, 从而实现对鱼群的逼真模拟。

关键词: 自组织; 认知; 集群; 捕食; 逃逸

Self-organization Behavior Algorithm of Artificial Fish School Based on Multi-agent

BAN Xiao-juan¹, WU Chong-hao², WANG Xiao-hong¹, ZENG Guang-ping¹

(1. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

【Abstract】 Add an inter-operated behavior module that can fulfill the communication among fishes and interact with environments to cognition-based behavior model of artificial fish, in order to build up architecture and model of artificial fish oriented schooling behaviors. A method which studies the school of artificial fish based on multi-agent system is given. Each artificial fish in school based on that kind of architecture is modeled as an agent, which can perceive information from the virtual environment, generate appropriate intentions, manage rational behaviors, and create motion to realize the intention. Through building up the model of locomotion, pursuit and evasion of agent in school, self-organized behaviors of school can be emerged by the interaction among individuals, so as to realize vivid simulations of artificial fish schooling.

【Key words】 self-organization; cognition; schooling; pursuit; evasion

1 概述

在海洋世界的动画创作中, 如何逼真地刻画鱼群的行为是十分重要的问题。这些相对简单的鱼类个体在没有一个集中控制的情况下, 通过相互作用产生复杂的群体行为, 属于复杂系统研究的范围, 因此, 本文也将从复杂系统的角度以基于认知的“人工鱼”为基础来研究人工鱼的群体行为的动画实现。

华人女学者涂晓媛博士将人工生命的方法引入到计算机动画的创作中, 利用动物形态、习性和行为模型成功地创作了“人工鱼”, 用计算机动画实现了“人工动物”共有的基本特征——生物力学、运动、感知和行为, 被学术界称为“Xiaoyuan's Fish”。人工鱼由3部分组成(如图1所示): 运动系统, 感知系统和行为系统。

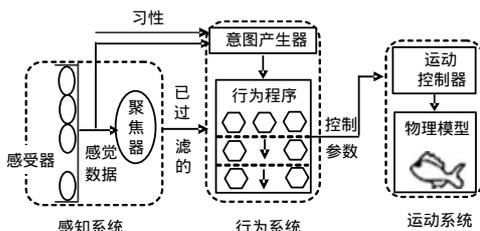


图1 人工鱼的组成

(1)运动系统包括基于物理的人工鱼模型和一组运动控制器, 这些运动控制器构成人工鱼脑中的运动控制中心。

(2)感知系统依靠一组在线的虚拟传感器, 提供有关动态环境的感知信息。

(3)人工鱼的行为系统介于它的感知系统和运动系统之间。“意图产生器”是人工鱼的思维器官, 它支配着“感知-行动”循环的动态特性。

而基于认知的“人工鱼”是将认知的观点引入计算机动画的创作上, 建立人工鱼的认知模型, 提高人工鱼的智能水平, 实现基于“动物逻辑”与“感知反馈”相结合的具有认知能力的高级行为规划功能^[1-2]。

目前群体行为模拟研究工作主要集中在对群体角色进行建模。1986年Craig Reynolds提出了一个集群行为计算模型。在这个模型中, 每个个体只需遵循以下3条规则: 避免碰撞, 速度一致以及向中心聚集。

此外, 涂晓媛提出了基于自然生命模型的动画自动生成方法, 把鱼作为自激励的自主智能体, 创作了生动逼真的人工鱼群。但是以往这种通过简单的规则产生类似生命的群体行为并不能保证真实的生态系统的确遵循这些简单的规则。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于认知的人工动物高级行为规划研究”(60503024)

作者简介: 班晓娟(1970 -), 女, 副教授、博士, 主研方向: 人工智能, 人工生命; 吴崇浩, 硕士、工程师; 王晓红, 硕士; 曾广平, 教授、博士生导师

收稿日期: 2006-12-15 **E-mail:** blei6873@163.com

这就需要从新的角度来探讨鱼群的行为，因此本文将以涂晓媛等研究发展的人工鱼个体的自然生命模型为基础，通过复杂系统的理论来研究人工鱼的群体行为。

2 个体相互作用涌现出的群体行为

复杂系统的特点在于它具有涌现性，涌现性是指在客观世界的各个领域，普遍存在这样一个现象：诸多个体一旦按照某种方式形成系统，就会产生出系统整体具有而部分或部分总和所不具有的属性、特征、行为、功能等，也就是说个体间通过相互作用产生出某种群体行为。研究鱼群复杂系统的自组织行为，就是研究它的演化规律，自然就需要建立系统的演化模型，以研究系统整体的涌现性。而群体的自组织行为是由个体间相互作用涌现出来的，下面首先定义个体的行为模型。

3 面向鱼群自组织行为的人工鱼体系结构及模型

自组织是一种极为普遍的现象。在系统实现空间的、时间的或功能的结构过程中，如果没有外界的特定干扰，仅是依靠系统内部的相互作用来达到，则称是自组织的。在鱼群的行为中无论是运动、逃逸还是捕食都不存在外界控制，而是由鱼群个体的相互作用来实现的，因而是自组织行为。下面将从自组织行为的角度研究人工鱼体系结构及模型。

3.1 体系结构

复杂的群体行为是由个体行为以及个体间相互作用的结果，下面为建立的人工鱼个体行为的总体框架(如图2所示)，定义了鱼群中个体的属性、内部状态激发的自主行为和外部互操作行为模块及其活动的特征^[3-4]。

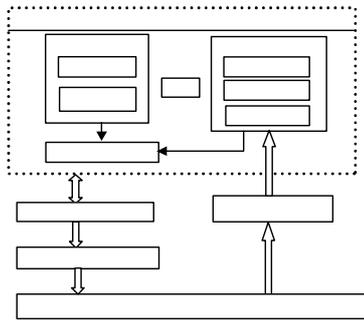


图2 人工鱼体系结构

其中，自主行为模块由领域知识和内部状态组成。领域知识通过自学习获得，主要指当前海底世界的状态。内部刺激主要指人工鱼的内部状态。

互操作行为模块由消息、约束、规则组成，消息是指人工鱼间的通信内容。约束指人工鱼个体间以及个体与海底环境间互操作行为的限定条件。规则是指消息执行的依据。

推理机制根据自主行为和互操作行为决定采取何种预定义行为。每执行一步预定义行为或随意性行为，都要进行领域知识的感知，以便接受新的突发事件。群体行为首先是从个体的感知和内部状态开始。个体从虚拟环境中感知其他的个体的消息、静态对象、环境等交互信息，合成全局行为约束，作用到互操作行为模型，并与自主行为模型和属性等信息形成相应的个体行为模型。个体通过行为选择和规划选择，作用到相应的运动模型上，产生运动，从而实现群体行为的变换。

3.2 行为模型

为了准确地刻画采用上述框架结构的人工鱼自组织行为，下面将每个人工鱼(记为 Fish)行为模型 FishBehModel 定

义为一个五元组 FishBehModel= \langle ID, Atb, Listate, AutoBehCon(), IntOptBehCon() \rangle 。

其中，ID 是 Afish 的标识名，用于区别鱼群中不同的个体鱼；Attribute={Sex, Age, Mass, Type}是 Fish 的属性，包括鱼群中个体性别、寿命、质量、类别等；Listate 是 Fish 诱发集群自组织调度行为发生的内部状态集合，包括饥饿度 $S(t)$ 、疲劳度 $H(t)$ 等。其变化函数分别为

$$S(t) = S_{\max} * \exp(-t^2 / \delta^2), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

$$H(t) = \min[1 - \exp(u(1 - \rho_0 \Delta t^H) / C) + \alpha_h S^h(t), 1] \quad (2)$$

可以根据式(1)、式(2)计算任意时间内 Fish 内部状态的取值。只有当 $S(t)$ 、 $H(t)$ 不低于某一阈值时，人工鱼才可能参加集群；AutoBehCon()是自主行为约束，是局部约束，指与人工鱼内在状态、海底环境有关的执行规则；IntOptBehCon()是互操作行为约束，指该 Fish 与其他 Fish 或环境之间的行为消息执行规则。

4 基于多 Agent 系统鱼群自组织模型

复杂系统理论已经具有了相当成熟的模型与算法，下面针对人工鱼的特点采用多智能体系统建模。将每个人工鱼个体定义为一个 FishAgent，其行为模型为 FishBehModel。借助 FishAgent 之间的局部连接准则和局部细节模型，建立鱼群复杂系统的整体模型。

4.1 鱼群形成流程

Step1 判断 FishAgent 的内部状态是否符合集群的条件，符合则进入下一步。

Step2 寻找最近的同种类鱼并向其游去。如图3所示的R-A模型，当FishAgent i 与鱼FishAgent j 的距离为 $ra > r_{ij} > r_m$ 时，会表现出一种吸引力，这时FishAgent i 将加速向鱼FishAgent j 游去；当 i 与 j 的距离为 $0 < r_{ij} < r_r$ 时，表现为一种排斥作用，为防止它们出现碰撞冲突，FishAgent i 将与鱼FishAgent j 保持大致相同的运动速度和方向形成游动集群行为；当FishAgent i 与鱼FishAgent j 的距离为 $r_m \geq r_{ij} \geq r_r$ 时，这时处于一个相对平衡的状态， i 会与 j 进行速度匹配，避免打破这种平衡，出现潜在的冲突，保证鱼群朝着相同的方向前进。其中， $ra > r_m > r_r$ 。

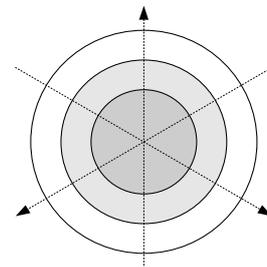


图3 R-A模型

Step3 按上述步骤反复执行形成最初的人工鱼群模型。

4.2 多 Agent 鱼群运动模型设计

生物学中动物群体，如鸟群、鱼群、兽群等，都是多个体系统的典型例子。生物学家对它们的飞行、游动和迁徙的机制进行了详细描述和探讨^[3]。在移动过程中，群体中的个体倾向于与自己的“邻居”保持一致。基于这种规律设计以下模型：

该模型由空间上的有限个人工鱼个体组成，每个个体以固定的速率运动。在给定时刻，个体的运动方向为上一时刻

它的“邻居”运动方向的平均，其中如果两个个体之间的距离小于某个给定的值 r ，则它们互相称为对方的邻居。将空间上 n 个 FishAgent 标号为 FishAgent1, FishAgent2, ..., FishAgent n 。个体以相同的速率运动，在 t 时刻，个体 k 的运动方向为它的全体邻居 $t-1$ 时刻运动速度矢量平均的方向。这里 t 时刻个体 k 的邻居定义为

$$N_k(t) = \{j: (x_k(t)-x_j(t))^2 + (y_k(t)-y_j(t))^2 + (z_k(t)-z_j(t))^2 < r_n^2\} \quad (3)$$

其中， $x_k(t), y_k(t), z_k(t)$ 为个体在三维空间上的横坐标、纵坐标和竖坐标， $r_n > 0$ 为邻域半径。记邻居个数 $n_k(t) = \# N_k(t)$ 。个体速度向量定义为 $V = |v| \{\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma\}$ 。其中， $|v|$ 为运动速率； α, β, γ 为速度向量与 3 条坐标轴的夹角即方向角。则个体 k 运动方向的迭代规则为

$$\alpha_k(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \alpha_j(t-1) \quad (4)$$

$$\beta_k(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \beta_j(t-1) \quad (5)$$

$$\gamma_k(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \gamma_j(t-1) \quad (6)$$

如式(4)~式(6)所示， $\alpha_k(t), \beta_k(t), \gamma_k(t)$ 分别为 t 时刻个体 k 全体邻居 $t-1$ 时刻运动速度矢量方向的平均值。

在个体运动速率为 $v_n = |v|$ ，个体 k 的位置迭代规则为

$$\begin{cases} x_k(t) = x_k(t-1) + v_n \cos \alpha_k(t-1) \\ y_k(t) = y_k(t-1) + v_n \cos \beta_k(t-1) \\ z_k(t) = z_k(t-1) + v_n \cos \gamma_k(t-1) \end{cases} \quad (7)$$

按照上述规则所有鱼群中的个体同步运动，这种运动是一个时步一个时步连续完成的。

4.3 鱼群觅食模型

鱼群的自组织研究中很重要的一部份是鱼群的觅食行为。鱼类在群体中比单独行动时能更多更快地找到食物。如果鱼群中的一个成员找到了食物，那么其他成员也可以捕食。当鱼群中各成员之间的距离勉强保持在各自视线之内，则搜索面积最大。针对群体觅食的特点，下面结合粒子群算法和群体运动模型来实现鱼群的觅食行为。

设鱼群在三维的目标空间搜索食物，群体规模为 n 。其中，第 k 个 FishAgent k 在空间中的位置 X_k ，运动速度 V_k 定义为

$$X_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3})^T \quad k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$V_k = (v_{k1}, v_{k2}, v_{k3})^T \quad k=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

FishAgent k 在空间中所搜索到的最佳食物位置记为 $P_k = (p_{k1}, p_{k2}, p_{k3})^T$ ，也称 pbest。在群体中所有 FishAgent 经历过的最佳位置，即整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置记为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, p_{g3})^T$ ，也称 gbest。

以搜索食物最优位置为目标调整 FishAgent k 在 $t+1$ 时刻的位置 X_k^{t+1} 和运动方向 V_k^{t+1} 为

$$V_k^{t+1} = \omega V_k^t + c1r1(P_k^t - X_k^t) + c2r2(P_g - X_k^t) \quad (10)$$

$$X_k^{t+1} = X_k^t + V_k^{t+1} \quad (11)$$

其中， $k=1, 2, \dots, n$ ； ω 为惯性权重； $c1$ 和 $c2$ 为加速常数； $r1$ 和 $r2$ 为两个在 $[0, 1]$ 范围内服从均匀分布的随机变量。迭代终止条件根据具体问题选为鱼群迄今为止搜索到的最优位置满足的预定最小适应阈值。

4.4 群体逃逸算法

基于多 Agent 系统的人工鱼群在遇到天敌时的逃逸通过个体逃逸及过程中相互作用表现群体逃逸行为。当某个 FishAgent 发现捕食者时将发送消息给其他的 FishAgent，设 FishAgent i 接收到危险信号，将分析捕食者的位置、方向及自身的心理、生理作出相应逃逸选择。下面将这个逃逸行模拟为：设 FishAgent i 的质量为 m_i ；其遇险时刻为 t ；速度为 $v_i(t) \in [V_{\min}, V_{\max}]$ ；逃逸是期望达到的速度为 $v_i^0(t) \in [V_{\min}, V_{\max}]$ ；其遇到捕食者需要旋转的角度为 $e_i(t)$ ；FishAgent 逃逸期间防止碰撞的排斥作用力为 f_{ij} 。则 T_i 时间内 FishAgent i 运动速度 $v_i(t)$ 、位置变化 $r_i(t)$ 的变化可用下式表示：

$$m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i(t) - v_i(t)}{T_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} \quad (13)$$

$$v_i(t) = dr_i / dt \quad (14)$$

同时定义人工鱼逃逸期间避免碰撞的斥力为 $f_{ij} = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij}) / B_i] n_{ij}$ 。其中， A_i, B_i 为常量； $d_{ij} = \|r_i - r_j\|$ 为两条人工鱼之间的距离。 $n_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2, n_{ij}^3) = (r_i, r_j) / d_{ij}$ 为指向 i 的法向量。 $r_{ij} = r_i + r_j$ 若 $d_{ij} < r_{ij}$ 则发生碰撞。其中遇到捕食者需要旋转的角度为 $e_i(t)$ ，其取值可由 FishAgent i 的运动速度 $v_i(t)$ 与捕食者 predator 的运动速度 $v_p(t)$ 共同决定：

$$\begin{aligned} \text{If } (v_k(t) \cdot v_p(t) \approx -1) \text{ then } e_i(t) &= 180^\circ \\ \text{Elseif } (v_k(t) \cdot v_p(t) \approx 0) \text{ then } e_i(t) &= 0^\circ \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{Else } e_i(t) = -[\pi/2 - \arccos(\frac{v_i(t) \cdot v_p(t)}{|v_i(t)| |v_p(t)|})]$$

其中，“-”表示背离 predator 运动方向，即 predator 在 FishAgent i 左侧，则 FishAgent i 向右转，反之亦然。

5 实现效果

图5~图7是采用 Microsoft Visual C++ .NET 作开发平台，辅助使用 3DSMax 6.0 作为建模工具，用 Direct3D9 作为渲染工具，创作出来的动画效果。



图5 人工鱼集群行为的动画实现画面



图6 鱼群逃逸动画实现画面



图7 鱼群觅食动画实现画面

(下转第 188 页)