

人工鱼群高级自组织行为研究

班晓娟¹ 宁淑荣¹ 涂序彦¹

摘要 在 Tu Xiaoyuan 和 John David Funge 研究工作的基础上, 进一步研究人工鱼群的高级自组织行为. 基于个体人工鱼的行为模型, 提出一种基于认知的人工鱼群高级行为自组织方法. 该方法中, 每条人工鱼被看作一个 agent. 通过感知外部虚拟环境信息, agent 产生行为意图. 人工鱼群的自组织行为通过多个 agent 间的相互作用涌现形成, 如人工鱼群的运动、捕食、逃逸等行为规划, 从而体现自然鱼群的生物特性, 实现对自然鱼群高级行为的逼真模拟. 我们设计和实现的基于认知的人工鱼群动画系统, 测试验证了所提出的高级行为自组织方法的有效性.

关键词 人工鱼群, 认知, 高级自组织行为, 行为规划

中图分类号 TP242.6

Research on Advanced Self-organization Behavior for Artificial Fish School

BAN Xiao-Juan¹ NING Shu-Rong¹ TU Xu-Yan¹

Abstract Based on research work of Tu and Funge, the advanced self-organization behaviors of fish school were further researched. An self-organization approach of advanced behavior for artificial fish school was presented based on cognition. In this approach, each artificial fish was regarded as an agent, the self-organization behaviors of artificial fish school were emerged from the interactions among many agents, such as behavior planning of motion, predation and escaping. The biologic characteristics of natural fish school were shown, and the advanced behaviors of natural fish school were simulated. A cognition-based artificial fish school animation system was tested efficaciously using the approach of the advanced self-organization in this paper.

Key words Artificial fish school, cognition, advanced self-organization behavior, behavior planning

Tu^[1] 利用计算机动画的人工生命方法, 创作了人工鱼——“Xiaoyuan’s Fish”, 以“Xiaoyuan’s Fish”为基础的相关研究有: 人工鱼的自繁衍、自学习、“情+智”协调研究^[2], 以及 John 的认知模型^[3]等, 这些研究大多集中在人工鱼的个体上, 旨在提高人工鱼个体的智能水平. 然而, 在鱼类的社会中, 除了人工鱼个体的行为以外, 还有一类特殊的行为——鱼群的自组织行为, 如: 鱼群移动时, 鱼趋向高度平行的方向; 若遭到捕食者攻击, 鱼群会相应地发生各种各样的结构变换, 如喷泉效应等. 对鱼群自组织行为的研究, 不仅是人工鱼群体模拟的一个难点, 也是本文关注的重点. 需要补充的是, 人工鱼群自组织行为有很多, 本文中仅对鱼群的运动、避障、逃逸、捕食等做了研究.

群体动画模拟的人工生命方法仅仅针对具体的个体建模, 群体行为通过个体之间的相互作用涌现而成. 比较著名的模型有 Reynolds 的 boid^[4] 和 Ariel dolan 的 floy. boid 和 floy 都可以看作是自主独立行为的智体 (agent).

与此类似, 鱼群中的每条人工鱼可以看作是一个单独的 agent. 此外, 相对简单的鱼类个体在没有集中控制的情况下, 通过相互作用产生复杂的群体行为, 是属于复杂系统研究的范围. 鉴于此, 本文从复杂系统的角度, 以基于认知的“人工鱼”为基础来研究人工鱼群高级行为的自组织方法. 从认知层次研究人工鱼群的自组织动态行为, 模拟人工鱼群的行为触发以及行为选择过程, 并通过计算机三维动画实现的真实效果, 验证研究思路与模型、算法的正确性和可行性.

1 鱼群相关定义

自然鱼的行为主要表现为背鳍、尾鳍的摆动和身体的前进、转向等^[5]. 这些行为在形式上无法展示它们对环境变化的感知和响应, 更难以表现它们的生理和心理状态、行为偏好和认知能力. 因此, 我们采用“路径规划——人工鱼在动画中位置的变化”来体现人工鱼复杂的行为选择过程和内部状态的微妙差异.

如图 1, 人工鱼通过感知模块感知外部环境, 感知模块通过协调控制系统将人工鱼当前感兴趣的信息输出给路径规划模块. 路径规划模块综合处理感知模块和内部状态信息, 将决策结果输出给运动系统, 由运动系统执行人工鱼的各级行为, 人工鱼的行为对环境状态产生影响, 从而形成一个闭环系统.

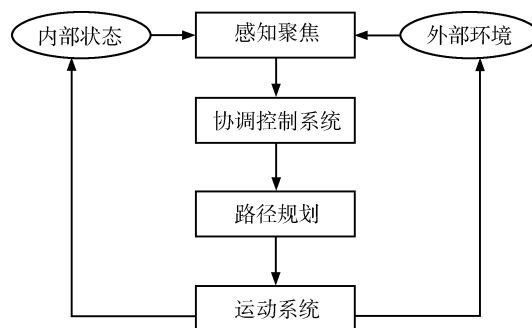


图 1 人工鱼动画实现结构图

Fig. 1 Structure plan of artificial fish school animation implementation

鱼群的行为通过人工鱼个体之间的相互作用涌现而成. 根据对环境信息的掌握程度的不同, 鱼群路径规划分为两种: 1) 基于环境完全信息的全局路径规划; 2) 基于传感器信息的局部路径规划. 海洋环境中, 有静态障碍物 (如岩石), 也有动态障碍物 (如其他鱼), 环境是动态变化的, 同时, 鱼群不可能对环境有一个先验的完全信息, 因此, 鱼群的路径规划是基于传感器信息的局部路径规划.

下面是有关鱼群高级自组织行为的一些定义

定义 1. 高级行为是将“动物逻辑 (Animal logic)”与“感知反馈”相结合而形成的具有认知能力的行为.

鱼群的行为从行为层次上来说, 觅食、求偶是高层行为; 躲避障碍物、追逐目标等则属于相对低层的行为. 高层行为可以继续向下分解成多个低层行为的组合. 以觅食为例, 可以将其分解成追逐目标、躲避静态障碍物、躲避动态障碍物和逃逸几个低层行为. 求偶行为的分解与觅食一样, 只不过在追逐目标行为中所追逐的目标是异性鱼, 而不是食物.

定义 2. 高级行为的自组织是指系统在实现空间、时间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的行为.

收稿日期 2007-09-11 收修改稿日期 2007-12-12
Received September 11, 2007; in revised form December 12, 2007
国家自然科学基金 (60503024) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60503024)

1. 北京科技大学信息工程学院 北京 100083
1. Information School of Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01327

定义 3. 人工鱼的行为函数是指用来度量各行为的参数度量描述.

如, 疲劳度、饥饿感、恐惧感属于鱼的内部心理状态, 用以下几个公式进行量化

$$H(t) = \min \left[1 - \frac{n^e(t)r(\Delta t^H)}{n^\alpha} + \alpha_h S^h(t), 1 \right] \quad (1)$$

$$S(t) = \min [1(\Delta t^L)(1 - H(t)) + \alpha_1 S^1(t), 1] \quad (2)$$

$$F(t) = \min \left[\sum_i F^i(t), 1 \right] \quad (3)$$

其中

$$F^i(t) = \min \left[\frac{D_0}{d^i(t)}, 1 \right] \quad (4)$$

其中, 带上划线的部分表示人工鱼的内部冲动部分, t 表示时间, $n^e(t)$ 是所消耗的食物量, 按实物颗粒数或被捕食鱼的数目来衡量, $r(x) = 1 - P_0x$ 是消化率, 其中 P_0 为常数; Δt^H 是自上次进食以来的时间; n^α 是一个常数, 它表明鱼的胃口大小 (大鱼具有较大的 n^α 值); $\alpha_h S^h(t)$ 体现外部刺激的影响, 如对邻近食物感知; 包含常数 P_1 的 $l(x) = P_1x$ 是性欲函数; Δt^L 是自上次交配以来的时间; $\alpha_1 S^1(t)$ 计算对潜在交配的感知的影响; $D_0 = 200$ 是一常数; F^i 和 $d^i(t)$ 分别表示对所发现的捕食者 i 的恐惧感和距离; $P_0 = 0.00067$, $P_1 = 0.0025$ 是标称值.

2 鱼群高级行为自组织模型

人工鱼个体高级自组织行为模型分为三个级别: 协调级、规划级、运动级, 如图 2 所示.

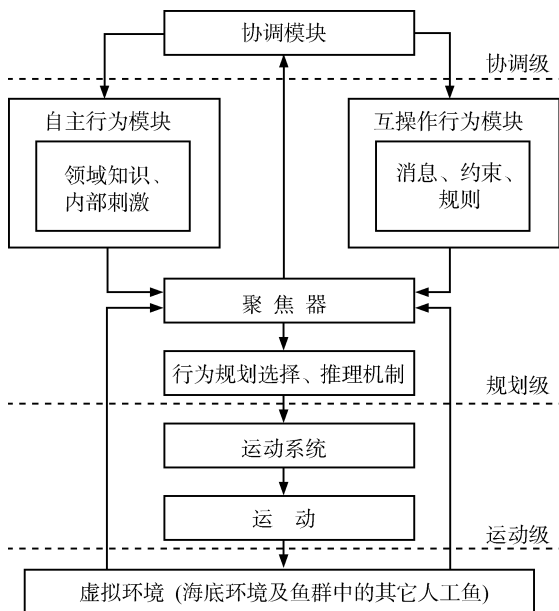


图 2 人工鱼个体高级行为的框架结构

Fig. 2 Frame construction of advanced behavior about individual artificial fish

协调级由协调控制模块构成, 在功能上相当于人工鱼的大脑, 即控制器, 负责将人工鱼感知到的信息和当前要实现

的意图、目标进行协调, 以期达到当前外部环境与内部状态下的最优.

规划级由自主行为模块、互操作行为模块、聚焦器、行为规划选择、推理机制等组成.

自主行为模块由领域知识和内部刺激组成. 领域知识通过自学习获得, 主要指当前海底世界的状态, 例如, 是否有鲨鱼游来. 内部刺激主要指人工鱼的内部状态, 例如, 是否处于饥饿状态等. 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环境间互操作行为的限定条件. 规则是指消息执行的依据. 互操作行为模块决定个体的全局行为约束. 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.

运动级主要由运动系统构成, 它的主要功能是根据行为规划的结果为人工鱼选择适合所选择行为的运动.

为了准确地刻画采用上述框架结构的人工鱼高级自组织行为, 下面给出人工鱼个体的行为模型.

定义 4. 人工鱼的行为模型描述如下:

AFishBehModel = < ID, Atb, Listate, AutoBehCon(), IntOptBehCon () >

ID: AFish 的标识名.

Atb = (Sex, Age, Mass, Type): AFish 属性, 包括性别、寿命、质量、类别等信息.

Listate: AFish 诱发集群自组织调度行为时的内部状态集合, 包括疲劳度 $H(t)$ 、饥饿度 $S(t)$ 、恐惧感 $F(t)$ 等, 其变化函数分别见式 (1)~(3).

AutoBehCon(): 自主行为约束, 为局部约束, 指与人工鱼内在状态、海底环境有关的执行规则.

IntOptBehCon (): 互操作行为约束, 为人工鱼与其它人工鱼或环境之间的行为消息执行规则. 消息类型为危险 (I_{danger})、障碍物 (I_{avoid})、求偶 (I_{mate}). 根据紧迫程度, 消息发送和接收处理的优先级为: $I_{danger} > I_{avoid} > I_{mate}$. 危险度越高, 优先级越高.

定理 1. 当 $S(t) \geq \alpha$ 且 $H(t) \geq \beta$ 时, 即均不低于阈值 α, β 时, 个体人工鱼可加入集群, 形成鱼群. 证明略.

定理 2. 人工鱼内部状态实时调整权值存在优先关系如下: $w_{avoid} > w_{repulsive} > w_{attractive} > w_{match}$

证明. 根据实时行为需要, 人工鱼内部状态的权值会实时进行调整, 进而调整其行为. 各权值之间存在着优先级差别. 结合“动物逻辑”与“感知反馈”的统计信息可知, 尽管存在随机性和不确定性, 但一般地, 人工鱼的 avoid 行为优先于 repulsive 行为, 而 repulsive 行为优先于 attractive 行为, attractive 行为优先于 match 行为. □

根据人工鱼的行为特性, 经过研究, 得到如下推论:

推论 1. 若人工鱼觅食、集群、行为路径规划等高级行为中存在符合某阈值个数的行为具有自组织特性, 则可认为该人工鱼的高级行为是自组织的. 证明略.

3 基于智体 (agent-based) 的自组织算法

针对人工鱼高级行为的特点, 结合推论 1, 我们基于 agent 来设计其自组织算法. 每条人工鱼被定义为一个 AFishAgent, 其行为模型为 AFishBehModel. 借助 AFishAgent 之间的局部连接准则和 AFishAgent 的局部细节模型, 建立鱼群复杂系统的整体模型.

3.1 鱼群集群算法

集群算法设计如下:

1) 判断 AFishAgent 的内部状态是否符合集群的条件, 读取 Listate 的值, 自主行为约束计算 AutoBehCon(), 如果 $S(t)$ 、 $H(t)$ 不低于阈值; $w_{\text{attractive}}$ 权重较大则符合集群的条件, 进入下一步。

2) 寻找最近的同种类的鱼并向其游去。如图 3 所示的 R-A 模型, 当 AFishAgent_i 与 AFishAgent_j 的距离 $r_a > r_{ij} > r_m$ 时, 会表现出一种吸引力, 这时 AFishAgent_i 将加速向 AFishAgent_j 游去; 当 AFishAgent_i 与 AFishAgent_j 的距离 $0 < r_{ij} < r_r$ 时, 表现为一种排斥作用, 为防止它们出现碰撞冲突, AFishAgent_i 将与 AFishAgent_j 保持大致相同的运动速度和方向, 游动集群行为形成; 当 AFishAgent_i 与 AFishAgent_j 的距离 $r_m \geq r_{ij} \geq r_r$ 时, 这时处于一个相对平衡的状态, AFishAgent_i 会与 AFishAgent_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 $r_a > r_m > r_r$ 。

3) 反复执行 1) 和 2), 形成最初的人工鱼群。

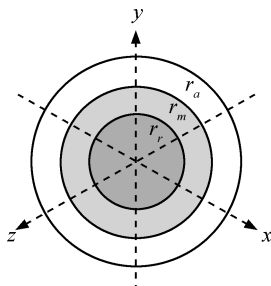


图3 R-A 模型
Fig. 3 R-A model

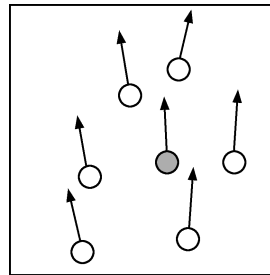


图4 运动形式
Fig. 4 Motion type

3.2 鱼群移动算法

鱼群移动过程中, 群体中的个体倾向于与自己的“邻居”^[5-9] 保持一致。基于此, 鱼群运动方法设计如下:

约定讨论空间上存在有限个人工鱼个体, 每个个体以固定速率运动。给定时刻, 个体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 , 则它们互为对方的邻居。将空间上 n 个 AFishAgent 标号为 AFishAgent₁, AFishAgent₂, ..., AFishAgent_n。如图 4, 在 t 时刻, 个体 k (黑点) 的运动方向为它的全体邻居 (白点) $t-1$ 时刻运动速度矢量平均。 t 时刻个体 k 的邻居定义为

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

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, $r_n \geq 0$ 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 $\mathbf{V} = |v|[\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma]$, 其中 $|v|$ 为运动速率, α, β, γ 为速度向量与三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

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

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

$$\gamma(t) = \frac{1}{n_k(t-1)} \sum_{j \in N_k(t-1)} \gamma_j(t-1) \quad (7)$$

$\alpha_k(t)$ 、 $\beta_k(t)$ 、 $\gamma_k(t)$ 分别为 t 时刻个体 k 的全体邻居在 $t-1$ 时刻运动速度矢量方向的平均值。

个体运动速率为 $v_n = |v|$, 个体 k 的位置迭代规则为

$$\begin{cases} x_k(t) = x_k(t-1) + v_n \cos \alpha_k(t-1) \\ y_k(t) = y_k(t-1) + v_n \cos \beta_k(t-1) \\ z_k(t) = z_k(t-1) + v_n \cos \gamma_k(t-1) \end{cases} \quad (8)$$

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。

3.3 鱼群觅食算法

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, 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 3 维的目标空间搜索食物, 群体规模为 n , 其中, 第 k 个 AFishAgent_k 在空间中的位置 \mathbf{X}_k , 运动速度 \mathbf{V}_k 定义为:

$$\mathbf{X}_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3})^T, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_k = (v_{k1}, v_{k2}, v_{k3})^T, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

AFishAgent_k 在空间中所搜索到的最佳食物位置记为 $\mathbf{P}_k = (p_{k1}, p_{k2}, p_{k3})^T$, 也称 $pbest$ 。在群体中所有 AFishAgent 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 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, p_{g3})^T$, 也称 $gbest$ 。

以搜索食物最优位置为目标, 调整 AFishAgent_k 在 $t+1$ 时刻的位置 $\mathbf{X}_k^{(t+1)}$ 和运动方向 $\mathbf{V}_k^{(t+1)}$ 为:

$$\mathbf{V}_k^{t+1} = \omega \mathbf{V}_k^t + c1r1(\mathbf{P}_t - \mathbf{X}_k^t) + c2r2(\mathbf{P}_g - \mathbf{X}_k^t) \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_k^{t+1} = \mathbf{X}_k^t + \mathbf{V}_k^{t+1} \quad (12)$$

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。

$c1$ 、 $c2$ 和 ω 的取值会直接影响到算法的最终结果。对于具有认知能力的人工鱼群, $c1$ 、 $c2$ 和 ω 更是鱼群觅食行为算法中不可忽略的部分。

3.4 鱼群逃逸算法

导致鱼群逃逸的原因有很多, 如: 鱼群碰到生性残虐的鲨鱼, 通常会选择逃逸。这里以生存密度和躲避鲨鱼为例来说明鱼群的逃逸算法。

1) 生存密度导致逃逸

当物种生存密度过小时, 群体觅食搜索的速度就会降低。同样, 当鱼群觅食速度小于一定阈值时, 人工鱼自动分家并寻找新聚集地觅食、繁衍后代。即当速度小于一定阈值时, 给予速度一个变异操作——逃逸运动, 描述为

$$\text{if } (v_k(T) < v_d) \text{ then } v_k(t) = \text{rand} \cdot \mathbf{V}_{\max} \quad (13)$$

其中, $v_k(T)$ 为时间段 T 内 FishAgent 的平均运动速度, rand 为一个在 $[0, 1]$ 范围内服从均匀分布的随机变量, $v_k(t) \in [\mathbf{V}_{\min}, \mathbf{V}_{\max}]$ 。

同时它们将会忘记自身的历史最好位置而仅记住种群的最佳位置. 描述为

$$\text{if } (\mathbf{v}_k(T) < \mathbf{v}_d) \text{ then } \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_g \quad (14)$$

其中 \mathbf{P}_k 为 AFishAgent 在空间中所搜索到的最佳食物位置, \mathbf{P}_g 为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置.

2) 遇敌时的逃逸

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 AFishAgent 发现捕食者时将发送消息给其他的 AFishAgent. 假设 AFishAgent 接收到危险信号, 将分析捕食者的位置、方向, 自身的心理、生理作出相应逃逸选择. 下面将这个逃逸行为模拟为:

设 AFishAgent_{*i*} 的质量为 m_i ; 某遇险时刻为 t ; 速度为 $\mathbf{v}_i(t) \in [\mathbf{V}_{\min}, \mathbf{V}_{\max}]$; 逃逸时期望达到的速度为 $\mathbf{v}_i^0(t) \in [\mathbf{V}_{\min}, \mathbf{V}_{\max}]$; 其遇到捕食者需要旋转的角度为 $e_i(t)$; AFishAgent 逃逸期间防止碰撞的排斥作用力为 \mathbf{f}_{ij} . 则 T_i 时间内 AFishAgent 运动速度 $\mathbf{v}_i(t)$ 、位置 $\mathbf{r}_i(t)$ 的变化可用下式表示

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = m_i \frac{\mathbf{v}_i^0(t)e_i(t) - \mathbf{v}_i(t)}{T_i} + \sum_{j=i} \mathbf{f}_{ij} \quad (15)$$

$$\mathbf{v}_i(t) = \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} \quad (16)$$

同时定义人工鱼逃逸期间避免碰撞的斥力为 $\mathbf{f}_{ij} = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \mathbf{n}_{ij}$, 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. $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2, n_{ij}^3) = (r_i, r_j)/d_{ij}$ 为有指向的法向量. 其中遇到捕食者需要旋转的角度为 $e_i(t)$ (t 的取值可由 AFishAgent_{*i*} 的运动速度 $\mathbf{v}_i(t)$ 与捕食者 Predator 的运动速度 $\mathbf{v}_p(t)$ 共同决定), 如图 5 所示, 其中虚线为调整后的速度.

$$\text{if } \mathbf{v}_k(t)\mathbf{v}_p(t) \approx -1 \text{ then } e_i(t) = 180^\circ \quad (17)$$

$$\text{elseif } \mathbf{v}_k(t)\mathbf{v}_p(t) \approx 0 \text{ then } e_i(t) = 0^\circ \quad (18)$$

$$\text{else } e_i(t) = - \left[\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\mathbf{v}_i(t)\mathbf{v}_p(t)}{|\mathbf{v}_i(t)| |\mathbf{v}_p(t)|} \right) \right] \quad (19)$$

式 (19) 中 “-” 表示背离 Predator 运动方向, 即 Predator 在 AFishAgent_{*i*} 左侧, 则 AFishAgent_{*i*} 向右转, 反之亦然.

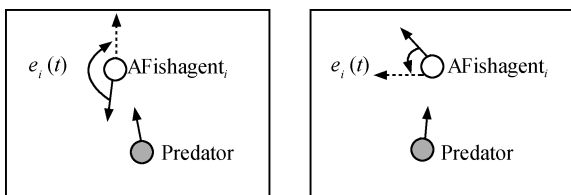


图 5 运动转角
Fig. 5 Angle of rotation

3.5 鱼群自组织主体算法

整合上述各行为的算法, 基于认知的自组织算法 AFishBeh_SelfOrganizing 设计如下:

AFishBeh_SelfOrganizing (α, β, x, y, z) {

1) 根据定理 1, 判定如下动作:

If $S(t) \geq \alpha$ && $S(t) \geq \beta$ then
call 鱼群集群算法

2) Call 鱼群移动算法并根据定理 2 设定人工鱼当前状态参数 x, y, z 的优先级别.

3) If 人工鱼 $S(t) \geq F(t)$ then

```
Begin
  call 高级行为的路径规划算法
  call 鱼群觅食算法
End
Else begin
  call 高级行为的路径规划算法
  call 鱼群逃逸算法
End
```

4) Call 高级行为的路径规划算法}

4 鱼群动画系统实现与高级行为测试

采用上述自组织算法, 我们对其进行了测试. 下面是各高级行为的部分程序截图.

图 6~8 所示为鱼群感知到静态障碍物 (礁石) 并躲避的过程. 图 6 中, 随着鱼群的游动, 礁石进入鱼群感知范围内, 即被鱼群发现并认定为 “前方有障碍”. 图 7 中, 根据上面提

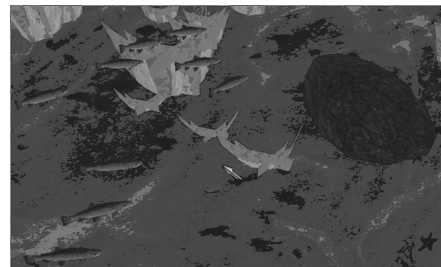


图 6 鱼群感知到静态障碍物
Fig. 6 Static obstacle was perceived

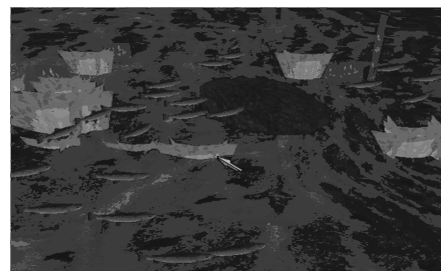


图 7 鱼群躲避静态障碍物
Fig. 7 Static obstacle was avoided

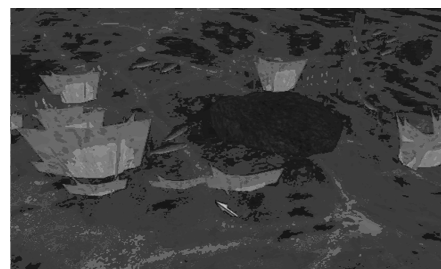


图 8 避障成功
Fig. 8 Static obstacle was avoided successfully

到的避障规则, 鱼群选择从礁石两侧游过礁石来躲避该静态障碍物. 图 8 中, 躲避静态障碍物成功, 鱼群继续向前游动.

图 9 和图 10 是人工鱼群看见天敌(鲨鱼)并逃逸的行为过程. 图 9 中, 随着鲨鱼的接近, 鲨鱼进入鱼群的感知范围, 即被鱼群认知为“有生命危险”. 图 10 中, 鱼群感知到鲨鱼接近的危险后采取了逃逸行为.

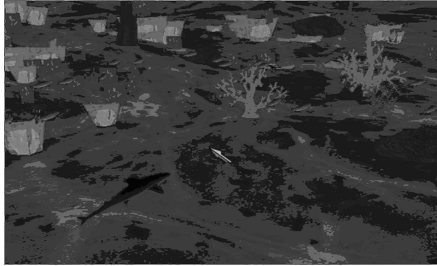


图 9 鱼群逃逸行为 1
Fig. 9 Escape of fish school 1

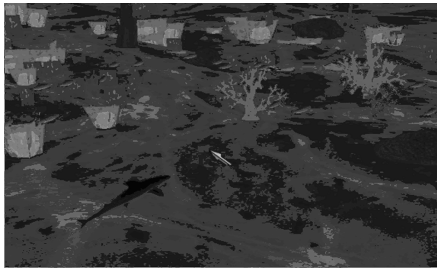


图 10 鱼群逃逸行为 2
Fig. 10 Escape of fish school 2

图 11 和图 12 为鱼群的觅食行为. 图 11 为鱼群发现周围的食物, 开始觅食, 其中白色的点表示食物; 图 12 为人工鱼群周围出现鲨鱼, 鱼群成为鲨鱼的觅食对象.

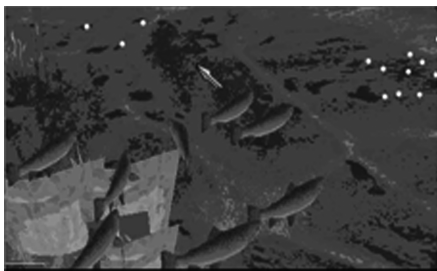


图 11 鱼群觅食
Fig. 11 Searching food of fish school

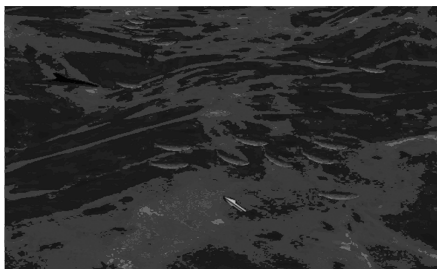


图 12 鲨鱼觅食鱼群
Fig. 12 Fish school was predated by shark

由于部分程序不能很好地表现集群时各人工鱼方向趋向程度, 我们采用 Matlab 仿真模拟鱼群集群时的方向趋向程度, 见图 13~15.

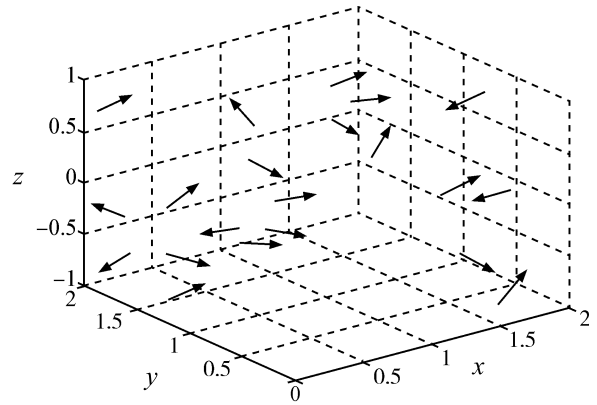


图 13 鱼群的初始状态
Fig. 13 Initialed state of fish school

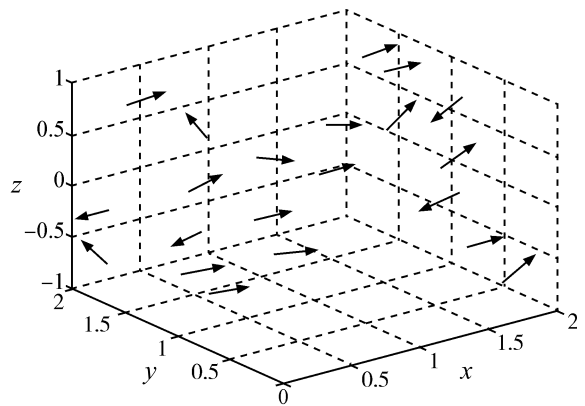


图 14 运行时间 20s 时鱼群的集群效果
Fig. 14 Collection of fish school at $t = 20s$

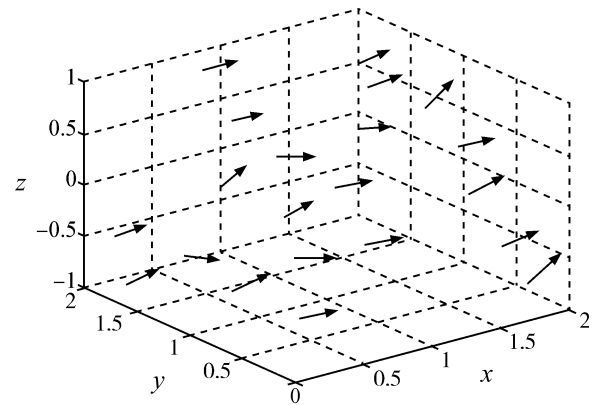


图 15 运行时间为 100s 时鱼群的集群效果
Fig. 15 Collection of fish school at $t = 100s$

5 结论

本文从复杂系统的观点研究了人工鱼群的自组织行为, 结合基于认知的人工鱼行为模型, 提出了一种基于认知的人工鱼高级行为自组织方法, 通过感知环境信息、协调控制外部信息与内部状态, 产生行为意图, 建立鱼群运动、捕食、逃逸的行为规划. 把人工鱼抽象为一个 agent, 通过个体间相互作用涌现出群体的自组织行为, 体现了自然鱼的生物特性, 从而实现对鱼群高级行为的逼真模拟. 在我们设计和实现的基于认知的人工鱼动画系统中进行测试, 验证了所提出的高级行为自组织方法的有效性. 本文所采用的方法对以后研究其他人工动物以及游戏中角色的路径规划都有借鉴意义.

References

- 1 Tu X Y. Artificial Animals for Computer Animation: Biomechanics, Locomotion, Perception, and Behavior [Ph. D. dissertation], University of Toronto, 1996
- 2 Ning Shu-Rong, Ban Xiao-Juan, Tu Xu-Yan. Intention produce and behavior control for artificial fish based on harmonic of emotion and intelligence. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(8): 835–839
(宁淑荣, 班晓娟, 涂序彦. 人工“情+智”协调的“意图产生”和“行为控制”. 自动化学报, 2007, **33**(8): 835–839)
- 3 John David Funge [Author], Ban Xiao-Juan [Translator]. *AI for Games and Animation: A Cognition Modeling Approach*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
(John David Funge [著], 班晓娟 [译]. 人工智能在计算机游戏和动画中的应用: 认知建模方法. 北京: 清华大学出版社, 2004)
- 4 Wang Shuo, Tan Min. *Robot Fish*. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006
(王硕, 谭民. 机器鱼. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006)
- 5 Reynolds C W. Description and control of time and dynamics in computer animation. *SIGGRAPH 85 Advanced Computer Animation Seminar Notes*. New York: ACM, 1985
- 6 Parrish J K, Viscido S V, Grunbaum D. Self-organized fish schools: an examination of emergent properties. *The Biological Bulletin*, 2002, **202**(3): 296–305
- 7 Kahn K M. Creation of Computer Animation from Story Descriptions [Ph. D. dissertation], MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1979
- 8 Chen J, Pan F, Cai T. Acceleration factor harmonious particle swarm optimizer. *International Journal of Automation and Computing*, 2006, **3**(1): 41–46
- 9 Toner J, Tu Y H. Flocks, herds and schools: a quantitative theory of flocking. *Physical Review E*, 1998, **58**(4): 4828–4858

班晓娟 博士. 主要研究方向为人工智能、计算机动画、人工生命.
E-mail: banxj@ies.ustb.edu.cn
(BAN Xiao-Juan Ph. D.. Her research interest covers artificial intelligence, computer animation, and artificial life.)

宁淑荣 博士. 主要研究方向为人工智能、计算机动画、人工生命. 本文通信作者. E-mail: ningngu@yahoo.com.cn
(NING Shu-Rong Ph. D.. Her research interest covers artificial intelligence, computer animation, and artificial life. Corresponding author of this paper.)

涂序彦 教授. 主要研究方向为人工智能和人工生命.
E-mail: tuxuyan@126.com
(TU Xu-Yan Professor. His research interest covers artificial intelligence and artificial life.)