

# MitsuDomoe: バーチャル生態系の捕食連鎖 シミュレーション体験システム (第3報) 群集行動の拡張と空中像との力覚インタラクション

角園司<sup>†1</sup> 大島登志一<sup>†1</sup>

本研究では、学習用途を想定して多数の小さな仮想生物が捕食連鎖をなすバーチャル生態系のシミュレータの開発をおこなっている。幅広い年齢層を対象に、生物学や化学などの学習への興味を引き出すことを目的とし、システムの実現にあたっては、実際の理科の実験のような体験を楽しめるエデュテインメントを目指している。本第3報では、仮想生物を魚類に見立てて、その行動シミュレーションに群集行動を導入するとともに、ユーザインタフェースとして、空中像表示と力覚インタラクションを実装したので、これについて報告する。群集行動シミュレーションは、Boidアルゴリズムを基本として、群れ全体として捕食・被捕食に伴う追跡と逃避の挙動と群集化の挙動とが両立するよう、捕食・被捕食行動を機能拡張した。また、シャーレの水の中に空中像を提示し、力覚デバイスによって魚群の動態の力場を体感できるインタフェースの実装をおこなった。

## MitsuDomoe: Ecosystem Simulation System of Virtual Creatures in Mixed Reality Petri Dish (3) Aerial Tactile Interaction with Simulated Schooling Fish

TSUKASA SUMIZONO<sup>†1</sup> TOSHIKAZU OHSHIMA<sup>†1</sup>

This study aims to propose a new educational tool for interacting with artificial life (ALife). The proposed system consists of an ALife behavior simulation and a tactile aerial display with a combination of aerial imaging by retro-reflection and a force-feedback device. The content is mid-air interaction with a simulated school of fish-like ALife. The behavior is based on a modified BOIDS algorithm with a predator-prey relationship between different species. We tried to tune the parameters of the algorithm adaptively so that behaviors of schooling, chase and escape are combined naturally. A user can enjoy interaction with the fish through aerial imaging and haptic feeling. The user can feel the activity of ALife as a force field using haptics.

### 1. はじめに

本研究では、実際の実験に近いインタフェースを提供することで、体験的学習効果の高いバーチャル実験教材を提案するものであり、学習用途を想定して多数の小さな仮想生物が捕食連鎖をなすバーチャル生態系のシミュレータの開発をおこなっている。幅広い年齢層を対象に、生物学や化学などの学習への興味を引き出すことを目的とし、システムの実現にあたっては、ガラス製の実験器具をディスプレイ装置に組み込むなど、実際の理科の実験のような体験を楽しめるエデュテインメントを目指している。

第1報[1]のプロトタイプシステム(図1)では、仮想生物群の動態を小さなシャーレの中に表示して体験できることと、HMDを用いてミクロな世界の中に入り込んで体験できることを備えたバーチャルな実験システムのフレームワークを試行した。第2報[3]では、図2に示すように、仮想生物の挙動パラメータ調整のユーザインタフェースの追加実装、国際会議でのデモ展示[2]を踏まえた考察について示した。本システムではさらに、力覚デバイスの試用と小学校でのワークショップの実施を行い、所期の目的であるところの教育における有効性を確認した[4]。

次の試作段階では、本稿にいたる予備実験として、仮想生物群の挙動に関して、食物連鎖より群集行動に着眼したシミュレーションを試行し、併せて空中像表示と力覚提示を併用したディスプレイデバイスを試作した[5]。

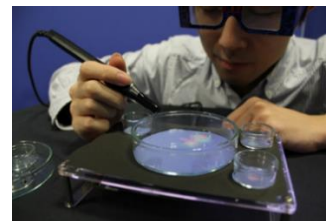


図1 MitsuDomoe 初期型システムでの体験の様子  
Figure 1 Appearance of the earlier MitsuDomoe system.



図2 シャーレ型フィジカルMRディスプレイ  
Figure 2 Petri dish MR display

<sup>†1</sup> 立命館大学 映像学部  
College of Image Arts and Sciences, Ritsumeikan University

先に実装した群集行動シミュレーションにおいては、挙動を制御するに關わるパラメータ群を手作業で調整するものであったが、そのバランスをとるのは非常に難しいことが課題のひとつとなった。本第3報では、捕食に關わる追跡と逃避、および群集化とが両立し、自然な行動に見えるよう、各行動要素のモデルをポテンシャル法で統合した。以下、バーチャル魚群の行動制御についてと、体験のインタフェースとして実装した空中像表示と力覚デバイスとの併用について述べる。

## 2. 仮想生物の行動モデル

### 2.1 MitsuDomoe での循環型生態系モデル

人工生命の行動は、一般的に各個体について、他の個体や環境などとの関係性から決定される。本研究は、生態系のシミュレーションにおいて、自然な仮想生物の行動を再現しようとするものであり、食物連鎖に關わる捕食対象に対する追跡行動と天敵からの逃避行動を基本行動としている。これらは各個体と天敵もしくは捕食対象との関係に基づいて、個体毎にルールベースで自律制御される。

生態系は、一般的に「生産者」「消費者」「分解者」という3種の構成要素の循環的關係によりモデル化される[6]。筆者らの先行研究[1-4]においては、平衡状態を保ちながら「循環」するという生態系の特質が子供らにも容易に理解され得ることを意図して、「消費者」だけで生態系を構成するという簡易化をおこなった。すなわち、植物などの「生産者」と微生物などの「分解者」を仮想の「消費者」として動物などの生命体になぞらえて、それらが循環的捕食關係をなすというモデル化をおこなった。

本システムでは3種類の生物種を用意し、それぞれの種に「ライフサイクル」と「行動状態遷移」という2種類の状態遷移層を設定した。「ライフサイクル」には「健康値」という内部パラメータを与え、誕生から一定の成長を経て増殖し、寿命を迎えて消滅するという内部的な状態遷移である。他方の「行動状態遷移」は外部的な行動の状態遷移であり、各個体はこれにもとづいて領域内を動き回り、天敵から逃避しつつ獲物を捕食する。寿命に関わらず天敵に捕食されれば消滅する。また、行動状態によって健康値は変化し、待機・探索や移動で減少、捕食で増加する。

各状態と状態遷移に關わり、各種に設定するパラメータは、下記の5種類とした。

- a) ライフサイクルに關連するパラメータ群
- c) 追跡・逃避時の移動能力に關連するパラメータ群
- d) 獲物や天敵の感知能力に關連するパラメータ群
- e) 探索行動に關連するパラメータ群
- b) 初期の個体数と生息分布

パラメータの変更については、アルゴリズムに關わる個別詳細なパラメータを直接ユーザに示すのではなく、直感的に分かりやすいよう、以下3種類のファクタを増減する

ことで制御する簡易なユーザインタフェースとした。

- A) 多産性（増殖時の数）
- B) 移動性（移動速度）
- C) 感知性（獲物や天敵を検知する視野範囲）

### 2.2 群集シミュレーションの導入

前述の先行研究[1-4]におけるモデルでは、個体と天敵および捕食対象との関係のみ考慮し、同種生物の他の個体とは無関係としていた。実世界の生物の縮図として捉えて、群れ行動など同種同士の関係性を導入すべきと考え、Tactile MicRocosm of ALife[6]では、仮想生物を魚とみだてて、水槽内での魚の群れのシミュレーションを実装した。図3は、各個体について、同種では群れをなし、天敵からは逃避し、捕食対象を追跡するという、他の個体の種類に寄る3種の間での挙動を示す。

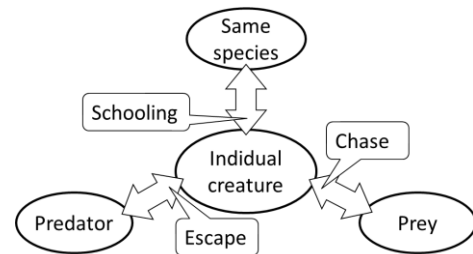


図3 3種の関係性における挙動

Figure 3 Behavior between three types of species.

本システムでは、群集行動モデルとして Boid と呼ばれる分散型行動モデル[7][8]の考え方を適用し、捕食・非捕食の關係に伴う追跡と逃避の挙動を拡張追加した。Boid モデルでは、実際の群集行動と同じように、個々の行動が群れを構成するよう各個体の行動を自律制御するルールベースの行動モデルである。Boid の基本行動ルールには、以下の3つの要素が含まれる。

- (1) 集中 (Cohesion; flock centering) : 群れの中心を目指して集まる挙動
- (2) 回避 (Separation; collision avoidance) : 他の個体との衝突を避けるために距離をとろうとする挙動
- (3) 整列 (Alignment; velocity matching) : 周囲の個体と進行方向を合わせようとする挙動

本システムでは、食物連鎖關係にある3種類の人工生物種を設定しており、それぞれについて、①群集行動に關わる Boid モデルでの上記3つの要因のほか、前述のように②捕食に關する追跡行動と、③天敵からの逃避行動とを複合して適用する。

### 2.3 行動制御

行動制御については、ロボットの経路計画などで提案されているポテンシャル法[9]を用いる。これは環境の情報に基づいてポテンシャル場を発生させ、その勾配によるバーチャルな引力と斥力の働きによって、制御対象を目標位置

に導く手法である。このポテンシャル法において、個体を誘引する「引力ポテンシャル」と、逆に遠ざける「斥力ポテンシャル」を用いてポテンシャル場を作り出し、各個体に対して設定した扇状の視野範囲内のものに対する3つの行動要素（群集行動、逃避行動、追跡行動）それぞれに関連するポテンシャルから3つの行動要素に働きかける行動制御ベクトルを求める。それらを重み付けした合成ベクトルを「操舵ベクトル」として用いることによって、各個体の速度ベクトルの大きさと方向に変位を与えるのである（図4）。操舵ベクトルの速度ベクトル方向の成分は加速度に寄与し、操舵ベクトルと速度ベクトルとがなす角度は速度ベクトル方向の角度変位に寄与する。

各ポテンシャルとその要因との対応を以下に示す。

- (1) 引力ポテンシャル: 同種の対象からは、群集行動における集中と整列に関する引力を受け、捕食対象にたいして追跡行動に関する引力を受ける。
- (2) 斥力ポテンシャル: 同種の対象や領域境界、障害物などから回避行動のための斥力を受け、天敵からは逃避行動に関わる斥力を受ける。

本手法は、捕食・被捕食関係に Boid モデルによる群れ行動を追加したというより、ポテンシャル法による行動制御を基本として、これに捕食のための追跡行動、天敵からの逃避行動、そして Boid モデルの3要素をポテンシャル法により統合したといえることができる。

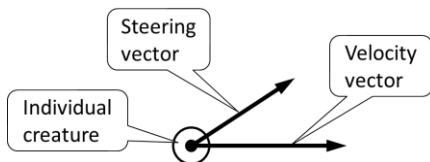


図4 操舵モデル

Figure 4 Navigation model.

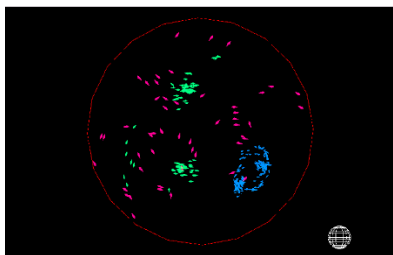


図5 シミュレーション結果の例

Figure 5 Simulation results.

本行動モデルによるシミュレーションの例を図5に示す。

## 2.4 パラメータ適応化の構想

本行動モデルには、多数の変数が含まれており、係数の設定や前記3種の行動要素（群集行動、逃避行動、追跡行動）に関わる行動制御ベクトルのバランスであったり、Boid

での集中・回避・整列の按配であったり、全体として自然な振る舞いとなるよう調整を行うのは容易ではない。魚がなぜ群れるのかの理由や、群れ行動の定式化などは実現できていない[11]。したがって、魚の種類ごとに観察して調整を繰り返すことになりそうである。図5に示したシミュレーション例も試行錯誤を重ねて得られたものである。調整の途上においては、逃避行動と追跡行動が群集行動に勝り群れをなさないという状況などがあつた。

本研究では、食物連鎖に関わって捕食・被捕食の関係にある複数種がそれぞれ群れ行動をなすことに着目しているので、群れ行動の度合い（仮に集合度）を指標として、これが適切な範囲となるよう適応化することが考えられる。このようなパラメータ適応化の構想を図6に示す。すなわち、「集合度」が低くなったときには、群集行動制御のベクトル生成を強めるなどである。

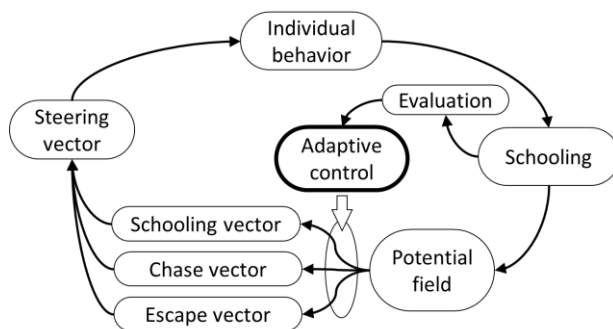


図6 パラメータ適応化の構想

Figure 6 Idea of the parameter adaptation.

人工生物の群れ行動をモデル化し適応的に制御しようとする方法には、本研究や Boid のようなルールベース手法以外にニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを用いて行動を進化させるニューロエボリューションも提案されている[10]。学習による適応化は非常に魅力的であるが、本システムでの群れ制御に関わる入力と出力の関係性を把握するためにも、本研究では、ひとまずルールベース手法の範囲でパラメータ適応化を試みることにしたい。

## 3. システムの実装

図7に本システムの外観を示す。本システムでは、再起反射型空中像表示方式[12]によるシャーレ型の空中像表示装置を試作した。図8に本システムの内部構造を示す。これにより、魚の群れは、あたかもシャーレ内の水の中に浮いて泳いでいるように、その奥行きを感じることができ、広い生實の縮図のようでありながら、理科の実験器具で観察しているような体験のリアリティを実現している。ユーザはシャーレの水中に提示される人工的な魚の群れの空中像の体験と併せて、図9に示すように力覚デバイスにより魚群とインタラクションすることができる。ユーザが魚群

をかき回すと散開し、えさを投げれば集まってくる。

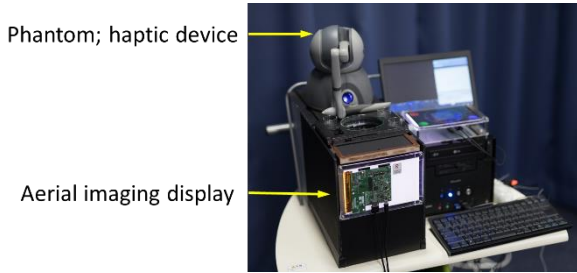


図 7 試作したシステムの外観  
Figure 7 Appearance of the system

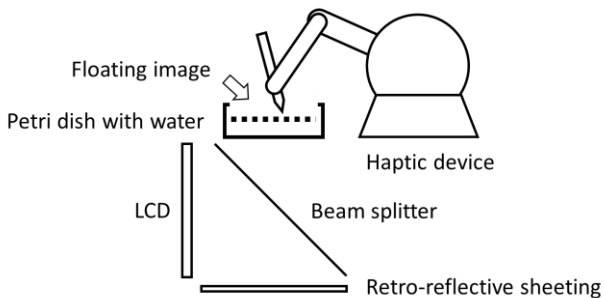


図 8 システムの構造  
Figure 8 Mechanism of the system.



図 9 バーチャル魚群との力覚インタラクション  
Figure 9 Haptic interaction with virtual schooling fish

力覚で感じられる情報は、仮想生物の行動制御にも用いているポテンシャル場である。すなわち、力覚デバイスのスタイラス先端位置における、シャーレ内に分布する各個体からの距離に応じたポテンシャルの総和を上方向の力ベクトルとして提示している。これにより、生物群がうごめく動態を視覚だけでなく力覚の感触として感じられる。

空中像提示と力触覚デバイスとの組み合わせは、その相乗効果を活用することにより新しい感覚体験を実現できるものとして研究が多くなされている[13]。本研究においては、空中像によってシャーレの底面と水面との間に魚が浮いているように見せることと、力覚デバイスによってその空中像に触れられることで、空中像がさらに実体感を持って感じられ、実際の理科の実験のような体験型教材を目指す目的に合致していると考えられる。

## 2. むすび

人工的な生物の生態系シミュレーションでの自然な行動を再現できるよう、ポテンシャル法による行動制御を基本として、これに捕食のための追跡行動、天敵からの逃避行動、そして Boid モデルによる群れ行動の 3 要素をポテンシャル法により統合し実装した。また、体験のインタフェース面でも、再起反射型空中像表示と力覚デバイスの相乗効果により、シャーレ内の水中にいる魚群と直接的に触れ合っているようなリアリティの高い体験ができるよう試みた。先の Laval Virtual 2018 での改良前の展示実験[6]を通じては、幅広い年齢層のユーザに対して、システムが十分効果的に機能することが確認されたが、本システムでの改良を踏まえて、改めて運用実験をおこなう。また、今回構想のみ言及したパラメータの適応的調整についての検討と具体的な実装をおこなっていく。

改良した行動シミュレーションにおいては、群集行動、捕食のための追跡行動、天敵からの逃避行動の 3 種で、これらは同種、捕食対象、天敵という他の個体との関係性で制御される「行動状態遷移」層で制御される。一方で「ライフサイクル」層との連動についても修正をおこない、群れ全体としての栄養状態といった要素によって、捕食行動の要素を強めるといったような改良ができると考えられる。生態系のシミュレーションに関しても、本モデルでは「消費者」のみとなっているので「生産者」と「分解者」も含めていく必要がある。

今回取り組んだ機能的な改善を含めて、生物学学習における実利用の観点から、初等教育現場での運用実験をおこない、実際に教育に有効でありかつ、小中学生や教員にも使いやすいものになるよう取り組んでいく計画である。

**謝辞** 空中像ディスプレイを試作するにあたってリフレクタ素材をご提供いただいた日本カーバイド工業株式会社に深く感謝申し上げます。また、日頃本プロジェクトに協力されている立命館大学映像学部 大島研究室各位に感謝します。本研究は、JSPS 科研費 16K00288 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 小島健三, 大島登志一: MitsuDomoe: バーチャル生態系の捕食連鎖シミュレーション体験システム(第 1 報), 情報処理学会シンポジウムインタラクション 2017 論文集, pp. 872–875 (2017)
- 2) Ohshima, T. and Kojima, K.: MitsuDomoe: ecosystem simulation of virtual creatures in petri dish, VRIC '17 Proceedings of the Virtual Reality International Conference - Laval Virtual 2017, Article No. 2, DOI: 10.1145/3110292.3110295 (2017)
- 3) 坂本恋, 和田勇氣, 大島登志一: MitsuDomoe: バーチャル生態系の捕食連鎖シミュレーション体験システム(第 2 報), 情報処理学会エンタテイメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, pp. 435–438 (2017)
- 4) Ohshima, T. and Kojima, K.: MitsuDomoe: ecosystem simulator of

- virtual creatures in mixed reality petri dish, Proceeding of SA '17 SIGGRAPH Asia 2017 Posters, Article No. 32, DOI: 10.1145/3145690.3145742 (2017)
- 5) 鈴木孝仁: 視覚でとらえるフォトサイエンス～生物図録, 数研出版 (2000)
  - 6) Ohshima, T.: Tactile MicRocosm of Alife: haptic interaction with artificial life by aerial mixed reality display, VRIC '18 Proceedings of ACM International Virtual Reality Conference – Laval Virtual 2018, DOI: 10.1145/3234253.3234320 (to be published)
  - 7) Reynolds, C. W.: Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model, Computer Graphics, Vol. 21, No. 4, pp. 25 – 34 (1987) DOI: 10.1145/37402.37406。
  - 8) Reynolds, C. W.: Boids: background and update <https://www.red3d.com/cwr/boids/> (2018年8月7日)
  - 9) Rimon, E. and Koditschek, D. E.: Exact robot navigation using artificial potential functions, IEEE Trans. on Robotics & Automation, Vol. 8, No. 5, pp. 501-518 (1992).
  - 10) 古川正志, 岩館健司, 鈴木育男, 山本雅人, 渡辺美知子: 人工生物の群れ行動のモデリングとその行動獲得, 計測と制御, Vol. 52, No. 3, pp. 246 – 251 (2013).
  - 11) 有元貴文: 魚はなぜ群れで泳ぐか, 大修館書店 (2007)
  - 12) Yamamoto, H., Tomiyama, Y. and Suyama, S.: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR). Optics Express. Vol. 22, No. 22 (Nov. 2014) pp. 26919 – 26924. DOI: 10.1364/OE.22.026919.
  - 13) Hoshi, T., Takahashi, M., Nakatsuma, K. and Shinoda, H.: Touchable holography. Proc. of SIGGRAPH '09. Emerging Technologies. Article No. 23. DOI: 10.1145/1597956.1597979.