HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	人工生物の群れ行動のモデリングとその行動獲得
Author(s)	古川, 正志; 岩館, 健司; 鈴木, 育男 他
Citation	計測と制御, 52(3), 246-251
Issue Date	2013-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/64516
Type	journal article
File Information	urukawa2013.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

人工生物の群れ行動のモデリングとその行動獲得

古川正志*・岩館健司**・鈴木育男**
山本雅人*・渡辺美知子**

*北海道大学 大学院 情報科学研究科
北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目
**北見工業大学　北海道北見市公園町 165 番
*Faculty of Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan
**Faculty of Kitami Institute of Technology, Kitami, Hokkaido, Japan
*E-mail: {mack, masahito}@complex.ist.hokudai.ac.jp

キーワード：スワーム (swarm)，人工生命 (artificial life)，行動獲得 (behavior acquisition)，ニューロエボリューション (neuroevolution)，物理モデリング (physics modeling)，複雑ネットワーク (complex network).
JL 0003/13/5203–0246 ©2013 SICE

1. はじめに

群れは自然界のみならず，人工物の世界にも多く観察される．自然界では，鳥の飛翔，コロニー，蟻や蜂の集団生活，ライオンの群れ，蚊柱等，いたるところに観察される．群れに関する英語は，Flock，Herds，Schools，Mobs，Troops，等と表現が豊かである．一方，人工物の世界でも Web，Blog，Facebook，Twitter のコミュニティとして群れを観察できる．また，近年盛んなデータマイニングにおけるクラスタリングの問題は巨大なデータの中から群れを見つけ出す作業である．

動物がなぜ群れを作るのか，この疑問に対する解答は行動生態学，進化生態学にまかせることにして，群れのもつ有用性・非有用性を検討し，それを工学として技術に転換するのは意義がある．実際にそのような研究が多く行われ本特集号で扱われている．

工学で群れを取り扱っている分野は，おおむね 2 分野がある．1 つは，人工生命やロボテックスに見られるように群れを仮想空間あるいは実空間において実現し，群れの有用性をいかした行動の獲得あるいは制御方法を開発しようというものである．もう 1 つは，昆虫の群れの社会性や空間探索の能力をモデル化し，最適化の方法として活用するものである．後者はアントコロニー最適化法 (ACO) と粒子群最適化法 (PSO) が提案されている．

以下の解説では，特に人工生命の分野で研究されている群れのモデリングとその行動獲得に焦点を当て，2 章では Boid について述べ，3 章で群れを研究する上での仮想現実を実現する物理モデリングと著者等が開発した物理モデラー，4 章で群れの行動獲得方法，5 章で群れの同期現象を述べ，6 章にまとめを行う．

2. Boid

1985 年に開催された SIGGRAPH の電子劇場で上映された S. Amkraft と M. Girard による Eurythmy[1] は，イスラムの尖塔から鳥がゆっくりと羽ばたきながら飛び立ち，その尖塔を周回するショートムービ (**図 1**) であった．鳥の飛翔はゆっくりと同期してリズムがありあたかも群舞のようであるが，実際の鳥の飛翔とは違和感が漂っている．これを見ていたとされる C.W. Reynolds は 1987 年の SIGGRAPH において，分散行動モデル (Distributed Behavioral Model)[2] と名付けた，シミュレイテッド・フロックス (Simulated Flocks) による幾何飛行を支持する Boid モデルを発表した．Boid は Bird-oid の造語であり，bird-like の意味をもつ．幾何飛行とは平行移動，ピッチ，ヨーとバンキング (重力方向からの傾斜) を制御する飛行である．シミュレイテッド・フロックスは，幾何飛行の下に 3 つの行動規則をもつ．すなわち，

(1) 衝突回避 (Collision Avoidance)
(2) 速度一致 (Velocity Matching)
(3) 群集中化 (Flock Centering)

であり，各 boid は局所的な前方左右 150 度の扇状空間認識をもつ．Reynolds は，Stanley and Stella in: Breaking the Ice (1987) (**図 2** (b)) と名づけたショートムービーを boid の応用として製作し，これも SIGGRAPH'87 の電子劇場で公開された．また，Boid は Tim Burton film による Batman Returns において，コウモリの群飛翔やペンギンの行進に採用されている．Boid のアルゴリズムは，粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization) へと昇華されている．

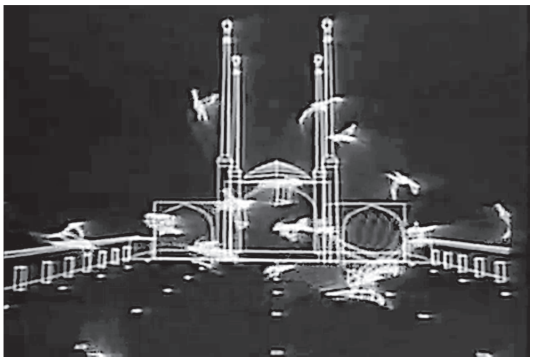
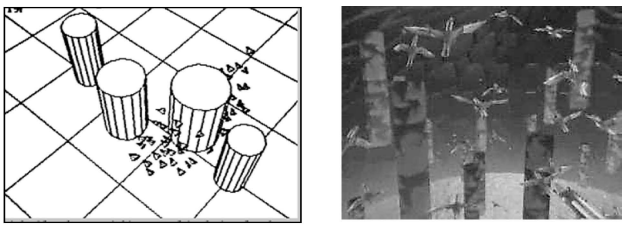


図 1　S. Amkraft と M. Girard による Eurythmy
ルールベースによる鳥が尖塔をゆっくりと群飛翔している



(a) Boid　(b) Breaking the Ice

図 2　Boid

(a) は，発表された当時の Boid[3]．(b) は，電子劇場で公開された Stanley and Stella[3]．

1995 年に，D. Terzopolos 等[4] も人工魚 (Artificial fish) で群泳 (School) をルールベースで実現している．この規則は，以下の 3 つである．

(1) 前方向近くに自身の長さの 2 倍以上の距離に魚が 2 匹以上いなければ，前方最近接の魚を見つけ，その方向へ速度を増加する．

(2) 横方向近くに自身の長さの 2 倍以上の離れた距離に魚が 2 匹以上いなければ，前方最近接の魚を見つけ，その方向へ方向転換する．

(3) 上記 2 つを満たさず，近隣に同方向に遊泳する魚がいれば，同じ速度で遊泳する．そうでなければ，近隣の魚の一般的な方向に一致するように方向転換する．

これら 2 つの群飛行や群遊泳は，個々が自律的に行動を決定している点であり，それまでのオーケストラの指揮に従うように全体の行動が規則で与えられたのとはまったく異なり，画期的であった．

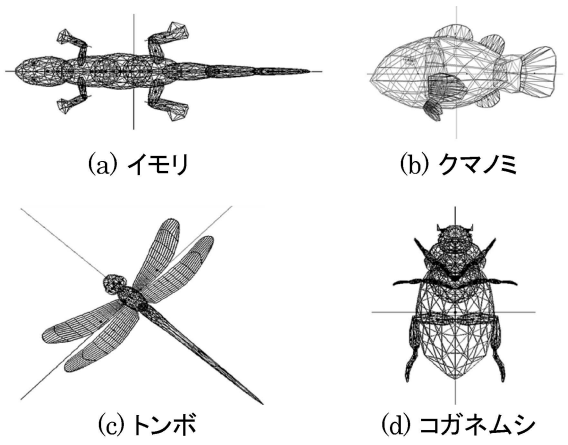
D. Terzopolos 等のショートムービーを見ると，日本の池で泳ぐ鯉の群遊泳を思わせる．同時に D. Terzopolos 等は，人工生命では普通の技術となった，水中環境での流体抗力の設定 (速度に比例した抗力)，魚のバネモデルの提案，遊泳の機械学習，学習結果をフーリエ解析し第 1 高長波を利用した遊泳制御，行動の意図モデル，等を開発した．

3. 物理モデリングによる群モデル

本章では，より現実世界に近い環境における群れのシミュレーションを実施するために導入された物理モデリングの概念と，群モデルの構築方法を述べる．

物理モデリングとは，計算機上に重力，摩擦，流体による抗力，浮力などを考慮した仮想の物理環境を構築し，現実世界の物体の挙動を再現することを示す．現実世界の生物の挙動は物理法則に支配されており，群れの形成においても物理法則が群れ全体の挙動に多大な影響を与えることは自明である．このため，現実世界の生物の群行動をシミュレートする場合，物理モデリングベースで実施することが望ましいと考えられる．また，物理モデリングベースの群行動研究の円滑な実施に於いて，以下の 3 点が求められる．

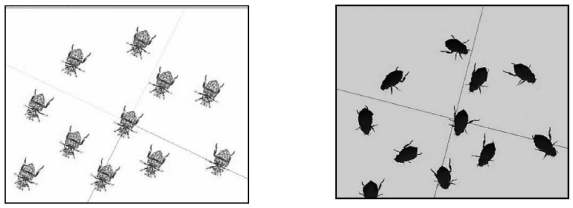
(1) 群を構成する個体のモデリングが容易であること



(a) イモリ　(b) クマノミ　(c) トンボ　(d) コガネムシ

図 3　三次元形状をもつ個体例

それぞれの個体は，GUI 上で複数の剛体を変形し，関節で結合することでモデリングできる．



(a) コガネムシのコピー生成　(b) 動き出したコガネムシ

図 4　群モデルのコピーによる生成

TIPS-PM を用いて図 3(d) が複数コピーされ，シミュレーションにより一斉に動き出す様子を示す．

(2) 個体の行動規則のモデリングが容易であること

(3) 環境の変更が容易であること

これらを実現するため著者等は，個体の形状モデリングから様々な物理環境下における群行動の生成までを統合的にサポートした物理モデラー「TIPS-PM」[5),6)] を開発した．TIPS-PM は，GUI 操作による個体 (人工生物) の三次元形状モデリング，個体の行動規則を生成する意思決定機能の自動生成，および，学習により行動済みのモデリングした個体を TIPS-PM のコピー機能を用いて，さまざまな物理環境における群行動シミュレーションを実施することが可能である．TIPS-PM により設計された個体例を**図 3**，コピーの機能を**図 4** に示す．

おのおのの個体は物理情報をもつ三次元の剛体により構成され，センサから取得した環境情報を入力，アクチュエータへの制御力を出力にもつ意思決定機能を備えている．群行動の獲得では，各個体は，物理環境下における目的地への移動，障害物の回避に必要な身体の動かし方を制御する意思決定機能を進化的手法 (遺伝的アルゴリズム，粒子最適化法，進化戦略 (各種 ES)) により獲得している．このとき，目的地，および障害物はポテンシャル P として

$$P = g \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (1)$$

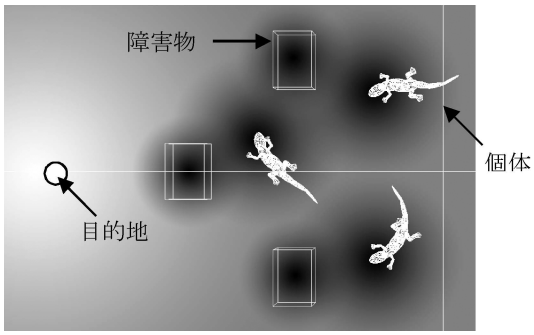
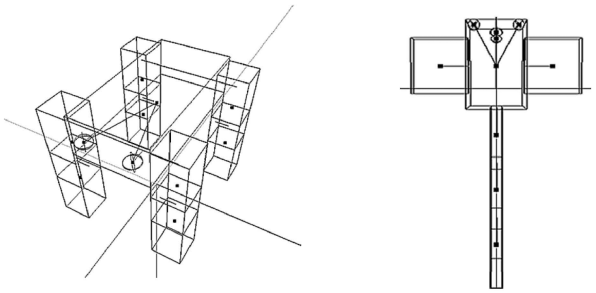


図 5　ポテンシャル場の例

群全体の目的地に正のポテンシャルが配置され，障害物と各個体の位置に負のポテンシャルが配置されている．それぞれのポテンシャルは独立に分散，ゲインを変更することが可能である．



(a) 四足ロボット　　(b) 魚ロボット

図 6　個体の外観

で与えられる．ここで，d はポテンシャルの中心座標からのユークリッド距離，σ はポテンシャルの分散，g はポテンシャルのゲインである．g は [-1,1] の実数であり，g が正の場合を目的地，負の場合を障害物とする．物理法則の支配下における個体の行動獲得方法については 4 章で述べる．

身体，および意思決定機能をモデル化された個体を環境中に複数配置し，**図 5** に示すように，群全体の目的地の位置に正のポテンシャル，障害物，および自分以外の個体の位置に負のポテンシャルを配置することで，さまざまな環境を想定した群行動を容易に生成することが可能となる．ポテンシャルの分散 σ，ゲイン g を調節することで，個体の視野，各個体間，個体–障害物間の回避距離の調節が可能である．

以下に，四足ロボット (**図 6** (a))，魚ロボット (図 6 (b)) を用いた群行動生成の例を示す．四足ロボット，および魚ロボットはそれぞれ，地上，水中を模した仮想物理環境下に置かれ，四足ロボットは地面と四肢の摩擦を利用した歩行，魚ロボットは水から受ける抗力を推進力として利用した遊泳により，目的地 (正のポテンシャル) の追従，障害物 (負のポテンシャル) の回避を行うことができる．

図 7 に四足ロボットによる群行動，**図 8** に魚ロボットによる群行動の一例を示す．(a) に初期位置，(b)–(d) にそれぞれ 5 秒後，10 秒後，15 秒後の群の様子を示す．

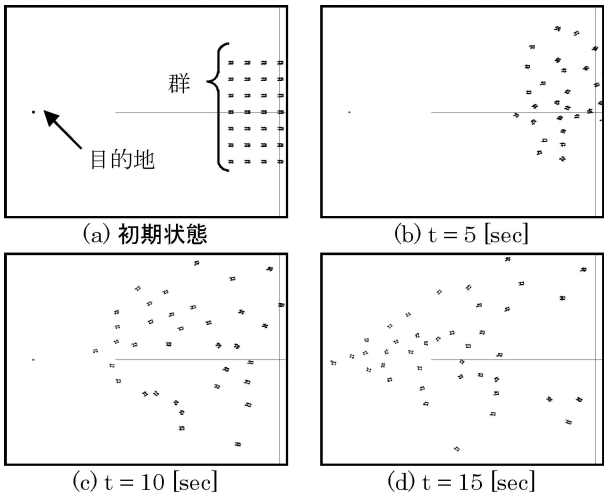


図 7　獲得された四足ロボットの群行動例

群を真上から捉えた図であり，**(a)** に初期状態，**(b)–(d)** に時間経過後の群の様子を示す．各個体が衝突を避けて一定の間隔を保ちながら目的地へ向かう様子が確認できる．

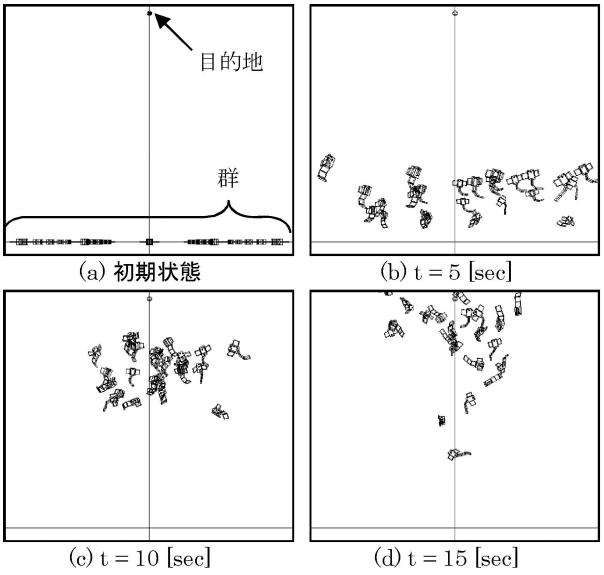


図 8　獲得された魚ロボットの群行動例

群を真横から捉えた図であり，目的地は群の上方に設定した．**(a)** に初期状態，**(b)–(d)** に時間経過後の群の様子を示す．各個体が衝突を避けながら目的地へ向かう様子が確認できる．個体が重なって見える箇所は個体間の奥行に差があり，衝突している個体は存在しない．

以上の実験から，提案手法によりおのおののモデルが物理環境に働く摩擦，抵抗を利用し，自分以外の個体との接触を避けながら目的地へ向かう群行動を獲得可能であることが示された．従来手法では，群を形成するための軌跡のみが求められ，軌跡通りに移動するための手段については人間が与える必要があった．提案手法を用いることにより，おのおのの個体が自律的な意思をもち，物理法則に従った動きをとることで，軌跡と移動手段の双方が自動的に生成され，より現実世界に近い環境下で群行動を作り出すことを可能とした．

4. 個体の行動獲得

生物の群行動は，個々の個体が自律的に行動しつつ，他の個体との相互作用によって自身の行動を変化させることで群としての行動が創発される．このような群行動を人工生物で実現するためには，大きく 2 つの方針があるであろう．1 つは，個々の人工生物が環境の中での自律的に行動することが可能である状況で，メタなレベルでそれら複数の個体の行動を制御して群行動を生成する方法である．もう 1 つは，個々の行動制御機構の中に，位置情報など他個体の情報を入力して加え，他個体との相互作用を陽に記述することなく，群行動を生成する方法である．

Boid などの群行動生成手法は，個体はある方向への飛行を前提としており，個々の個体自身で自律的行動を行うことができない．そのため，群行動生成のための手法ということができる．

著者らは，人工生物が自身で自律的行動が可能であり，その上で，他の人工生物との相互作用の結果，群行動を創発させる手法について開発している．そのために，個体の行動生成が必要である．群行動の生成も視野に入れた個体の行動生成を考えたとき，環境情報の他に，他の人工生物の情報を取り入れる必要があることから入力から出力を生成する行動コントローラが柔軟性をもつことが必須である．そこで，著者らは，人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) を行動コントローラとして使用している．

人工生物は，物理環境の下で環境の情報を自身のセンサから入力として受け取り，各関節角度の変化量を出力として生成し，その出力に基づいて行動を行う．数個から 10 数個ある関節すべてについて，時刻ごとにあるタスクを実行する行動のために適切な出力を事前にデザインすることは非常に困難である．

このような観点からも，人工生物の行動コントローラとして，入力に対する汎化性をもつ ANN の使用することは有効である (**図 9**)．また，近年では，行動 ANN のその結合重みを遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) で進化させる Neuroevolution(ニューロエボリューション) が主流となってきた．ニューロエボリューションによる人工生物の行動生成では，ANN の構造とすべての結合重みが遺伝子にコード化され一個体を形成する．その ANN を用いてある時点における「環境入力から行動出力」を決定し実際に仮想物理環境でシミュレーションを行う，という過程をあるステップ数繰り返した結果から個体の評価を行う．たとえば，人工生物がより目的地に近づいている場合に高い評価を与えるなどとする．この評価の結果から，次世代の個体群を GA に基づいて生成する．このような過程を数世代繰り返すことにより，徐々に評価の高い ANN が生成される．すなわち，評価値を高くするような行動を実現する ANN コントローラが生成できる．

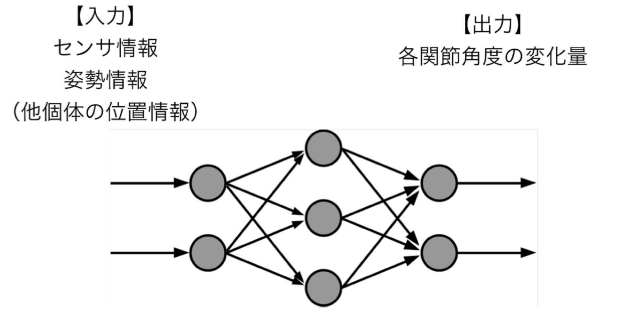


図 9　人工ニューラルネットワークによる行動制御
人工生物のセンサから環境の情報，もしくは，自身の姿勢情報を入力して関節角度の変化量を出力する様子．

ニューロエボリューションは，ANN の結合重みや結合そのものの構造を GA で進化させるものと捉えられるが，近年では，PSO によっても ANN の結合重みを最適化する手法の有効性も示されている．したがって，ANN の結合重みを GA や PSO により進化，または，最適化することを広義のニューロエボリューションと定義でき，著者らはこの広義のユーロエボリューションによって行動獲得を行っている．

単一の ANN は，人工生物の歩行や遊泳，飛行などの行動獲得が可能になるが，たとえば，鳥などの羽ばたきと滑空，バッタなどの歩行とジャンプ，などといった複数種類の異なった行動を生成することは非常に困難である．そのため，著者らは，このようなより複雑な行動を生成するための手法として，複合的人工ニューラルネットワークを提案している (**図 10**)．

たとえば，バッタの行動を生成するためには，「ジャンプするために姿勢を整える」，「ジャンプする」，「倒れた際に起き上がる」，「歩行をする」といった複数の単純な行動を

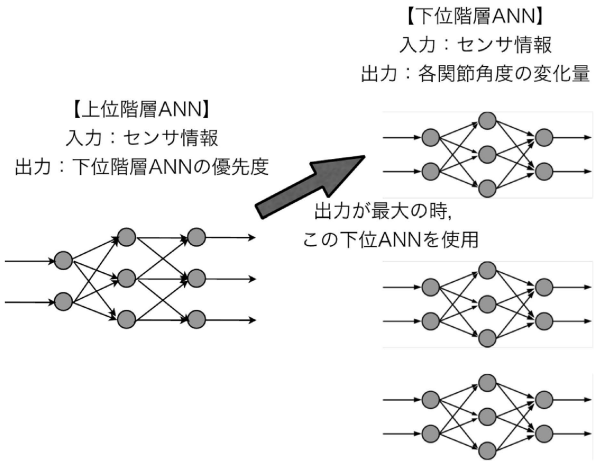


図 10　複合的人工ニューラルネットワーク
単純な行動を可能とするコントローラを下位階層 **ANN** として複数用意し，上位階層 **ANN** では，ある状況のときにどの下位階層 **ANN** を使用するかを出力する．

それぞれ単一の ANN(下位階層 ANN) で行動コントローラを生成し，その後，ジャンプや歩行をするために，それら複数の行動を組合せる必要がある．そのため，それらの単一 ANN の上位階層として，もう一つ ANN を用意し，入力された環境情報に対応する行動を生成するためにどの下位階層 ANN を使用するかを出力することとする．このような行動の ANN を複合的人工ニューラルネットワークと呼び，より生物らしい複雑でリアルな行動生成が可能であることを示している[7]．

5. 群れの同期現象

東南アジアのある地方では，ホタルがいっせいに点滅することが 1900 年代初頭から知られていた[8]．S. Strogatz とその指導を受けていた D.J. Watts は，コオロギを防音した箱に 1 匹づつ入れ，他のコオロギの鳴き声のスピーカと自分の鳴き声を他のコオロギに聞かせる実験装置を箱に取り付け，コオロギのすだく音の同期実験を行った．これらの実験に基づいて，S. Strogatz と D.J. Watts[8),9)] は，ネットワークの中にいくつかのショートカットとネットワークのかたまり (クラスター) が存在するスモールワールドネットワークにおいて同期が起きることを推論した．その後，彼らは Kuramoto 振動子を用いて グラフ上の同期モデルを調べた．Kuramoto 振動子は，

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{\lambda}{n}\sum_{j=1}^{n}\sin(\theta_j - \theta_i) \qquad (2)$$

で表わされる．ここで，θ_i は i 番目の振動子の位相，ω_i は i 番目の振動子の固有振動，λ は振動子間の結合強度，n は全振動子数である．振動子の集団が円周上を周回する n 個の点と考えるとその重心は以下のベクトルで表現される．

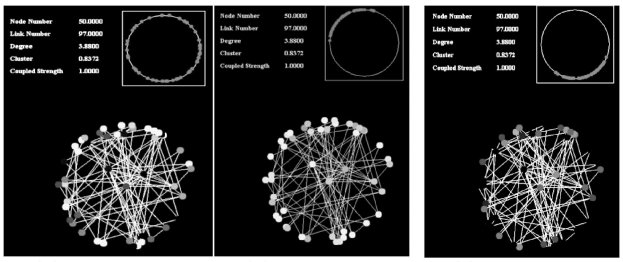
$$Re^{i\Psi} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} e^{i\theta_j} \qquad (3)$$

ここで R は周波数秩序変数と呼ばれるこのベクトルの大きさであり，Ψ はその偏角である．円周上に振動子が一様，ランダムに分布する場合は $R = 0$ であり，完全に同期する場合は $R = 1$ である．ある条件を与えると，β グラフ上で $\lambda > \lambda_c$ のとき，相転移が起こり，同期が生じることが周波数秩序変数 R により示された．

著者等も Kuramoto 振動子を修正した

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{\lambda}{k_i}\sum_{j=1}^{n}\sin(\theta_j - \theta_i) \qquad (4)$$

のモデルを使用し，2 種類のスケールフリーネットワークモデルにおいて，やはりある条件の下では同期が生じることを示した[10]．ここで，k_i は振動子 i に結合されている振動子の数である．



(a) 初期状態　(b) 同期発光　(c) 同期消光

図 11　ネットワーク上の振動子の同期
ネットワーク上にホタルを設置すると，**(a)** では点滅がまちまちだが，時間進行と共に発光 **(b)** と消光 **(c)** が交互に同期して起きる．

図 11 (a)–(c) は，(4) 式のモデルの下にホタルの点滅をネットワーク上でシミュレーションした例である．図の円周上には各ホタルの位相を示してある．図 11 (a) は，振動子の集団が円周上を周回する初期の状態であり，図 11 (b) は振動子が同期し発光したホタルの状態，図 11 (c) は振動子が同期しホタルが消光した状態を示す．

同期現象は，Boid における速度の一致や一部の飛翔する鳥の群れの羽ばたき速度の一致，軍隊の行進，等に見られ，ネットワークを介した同期の生成は，群れの行動獲得に今後も重要となると考えられる．

6. おわりに

本稿では，3 次元の物理環境の中で行動する人工生物について，その個体の行動獲得，および，群行動の獲得の方法について，群行動モデリングの歴史的背景を含めて紹介した．特に，個体の行動獲得においては，人工ニューラルネットワーク (ANN) を用いたニューロエボリューションを用いている．また，より複雑な行動を生成するために，ANN を階層的に用いる複合的ニューラルネットワークについて説明した．群行動の生成においては，障害物や他個体をポテンシャル発生源と捉えることで他個体との相互作用を実現するモデルについて説明し，その結果創発された群行動について紹介した．さらに，振動子の同期現象が，個体間の相互作用を記述する上で有用であることを紹介し，今後の群行動生成における重要な役割を果たす可能性について言及した．

(2012 年 11 月 19 日受付)

参 考 文 献

1) Eurythmy, http://datagarden.org/3676/eurythmy-motion-studis-1985/ (2012.10.11)
2) C.W. Reynolds: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, Computer Grphics, **21**–4, 25/34 (1987)
3) http://www.red3d.com/cwr/boids/ (2012.10.11)
4) D. Terzopolos, X. Tu and R. Grzesczuk: Artficial Fishes: Autonomous Locomotion, Perseption, Behavior, and Learning in a Simulated Physics World, Artificial Life, **1**–4, 327/351 (1995)
5) TIPS-PM, http://autonomous.complex.ist.hokudai.ac.jp/

research/physics-modeling/tips-pm/ (2012.11.15)
6） 岩館健司，米陀佳祐，鈴木育男，山本雅人，古川正志：Animated Robot の研究—剛体モデリングツールの開発とその応用—，精密工学会誌，**76**–2, 232/237 (2010)
7） Y. Umemura, I. Suzuki, M. Yamamoto and M. Furukawa: Acquisition of Jumping Behavior on the Artificial Creature under Virtual Physical Environment, Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Computational Intelligence, 311/314 (2011)
8） S. Strogatz: SYNC The Emerging Science of Spontaneous Order, Brockman, Inc. (2003) (長尾力訳：SYNC なぜ自然はシンクロしたがるのか，早川書房 (2005))
9） D. ワッツ (栗原聡，ほか訳)：スモールワールド ネットワークの構造とダイナミックス，東京電機大学出版局 (2006)
10） 村田賢太，鈴木育男，山本雅人，古川正志：スケールフリーネットワークの生成方法およびベキ指数が結合振動子ネットワークの同期に与える影響，知能と情報，**21**–2，265/276 (2009)

［著　者　紹　介］

古川正志君（正会員）

1973 年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了．同年旭川工業高等専門学校助手．その後，助教授，教授を経て，2006 年北海道大学大学院情報科学研究科教授．12 年より同特任教授，現在に至る．1976–77 年コーネル大学 NSF 研究員．81–82 年イーストアングリア大学客員教授．人工生命とアニメーション，メタヒューリステックス，複雑ネットワークの研究に従事 (工学博士)．精密工学会，日本機械学会 (フェロー)，情報処理学会，日本ロボット学会などの会員．

岩館健司君

2012 年北海道大学大学院情報科学研究科博士課程修了．同年北見工業大学 情報システム工学科助教，現在に至る．ニューラルネット，人工知能の研究に従事 (博士 (情報科学))．精密工学会，情報処理学会の会員．

鈴木育男君

2004 年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了．同年室蘭工業大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー中核的研究機関研究員．07 年北海道大学大学院情報科学研究科助教，12 年北見工業大学情報システム工学科准教授，現在に至る．複雑系工学，感性の情報処理などに関する研究に従事．博士 (工学)．

山本雅人君（正会員）

1996 年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了．同年日本学術振興会特別研究員 (PD)．97 年北海道大学大学院工学研究科助手，2000 年同助教授，07 年同大学情報科学研究科準教授を経て，12 年同教授，現在に至る．進化型計算に基づく仮想ロボット開発，複雑ネットワークの研究に従事 (博士 (工学))．電子通信学会，人工知能学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会，精密工学会，日本機械学会などの会員．

渡辺美知子君

1994 年旭川経済学部経済学科卒業．78 年旭川工業高等専門学校技術職員を経て，2008 年北見工業大学准教授，現在に至る．知的工学システム，物理モデリング，機械学習，進化計算の研究に従事 (博士 (工学))．日本機械学会，精密工学会，情報処理学会の会員．