

2種類の個体からなる不均質 Boids のパターン形成

中村 真理^{1,a)}

受付日 2012年11月6日, 再受付日 2013年2月4日,
採録日 2013年3月7日

概要: 筆者は協調作業を行う不均質 Boids の設計を目指している. その準備段階として本論文では 2 種類の個体からなる不均質 Boids を提案した. 不均質 Boids を構成する各個体は基本的に Boids の 3 動作に従うが, 周辺個体の種類を識別する能力を持ち, 周辺個体の種類に応じて異なる強さの個体間相互作用を受けるものとする. これらの個体は周辺の各種個体分布の不均質性を重要な手がかりとして行動する. 本論文では Boids が安定な群れを形成するための条件を整え, この条件下で個体間相互作用の強さを変えながら不均質 Boids の数値実験を行った. その結果この系が特徴的な分布パターンを数種類形成することを確認したので, 異種個体群間の境界面形成に注目してこれらのパターンを分類した.

キーワード: 不均質 Boids, パターン形成, 異種個体群間の境界面

Pattern Formation in Heterogeneous Boids Consisting of Two Type Agents

MARI NAKAMURA^{1,a)}

Received: November 6, 2012, Revised: February 4, 2013,
Accepted: March 7, 2013

Abstract: In this paper, I propose a heterogeneous boids model consisting of two type agents. An individual agent follows the three rules of boids, and distinguishes the type of neighboring agents. Weights of these rules differ with a combination of the types of the agent and of the neighbors. These agents act on the heterogeneity of neighboring agent types. I arrange conditions for boids to form a stable compact group, and simulate the heterogeneous boid model under them, varying the weights. This model forms several typical patterns, and I classify them based on interfaces between groups of different type agents.

Keywords: heterogeneous boids, pattern formation, interface between groups of different type agents

1. はじめに

1.1 この研究の背景と経緯

これまで筆者は, 多数の agent が詳細な通信なしで周辺状況から判断して行動する Multiagent system (MAS) を題材に, 「適切な分量の agent を適切な場所に配置して適切な動作を割り当て」 効率的に協調作業する MAS を設計する方法を考えた [9] (以下, agent を個体と表記する). この方法では各個体が何を手がかりに「自分がどこにいて何をすべきか」を判断するかが重要となる. 筆者は, 多数の個体が拡散信号 (フェロモン等) を介して間接通信する

蟻コロニーの数理モデル [8] に上記の方法を適用した. その結果, 信号分布を手がかりとして蟻個体に様々な動作を割り当てることにより, 採餌行動等のタスクを効率的に遂行する系を容易に構築できた [9].

次に筆者は, 近隣個体どうしが直接通信する系にこの方法を適用しようと試みた. そのような通信範囲を制限された系の簡単な例として Boids, 特に複数種類の個体からなる不均質な Boids モデルを取り上げた. このモデルで各個体は周辺個体の種類・位置・速度を識別し, 周辺の各種個体分布を手がかりに「自分がどこにいて何をすべきか」を判断して動作する. この判断に際して, 異種個体群間の境界面は特に重要な手がかりとなる.

この不均質 Boids に様々な動作を組み込んでみたが多様な挙動を生成するばかりで, 効率的に協調作業する系の構築には至らなかった. その原因の 1 つは後述のとおり,

¹ 独立行政法人産業技術総合研究所健康工学研究部門
Health Research Institute, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology (AIST), Ikeda, Osaka
563-8577, Japan

^{a)} tagami-nakamura@aist.go.jp

Boids の挙動が設定次第で多様に変化することである。そこで、本論文ではまず基本動作だけに簡略化した Boids にいったん立ち戻り、Boids が安定な群れを形成するための条件を整えた。そのうえで 2 種類の個体からなる不均質 Boids の数値実験を行い、個体間の不均質性が系の挙動、特に各種個体群間の境界面形成に及ぼす影響を調べた。

1.2 Boids 研究の経緯

Boids は群れの動きを模倣する単純な MAS で [12]、各個体は、i) 近隣個体と近づきすぎたら反発する、ii) 近隣個体の平均移動速度に合わせて並進する、iii) 近隣個体の重心方向に動く、という 3 つの動作の組合せに従って移動する。魚群モデルの研究 [1] ではじめて提案されて以来、この機構は下記のようなモデルに応用されてきた：各種生物・細胞・生体分子等の集団運動や集合現象 [3], [6], [11], [15]、特殊条件下の Boids と同様に振る舞う自己駆動粒子系 (Self-Propelled Particles, SPP) [14] および SPP に基づく Active matter の自己組織化 [15]、群集シミュレーション [3]、自律移動体群の編隊制御 [5], [10]、等。これらのモデルでは対象や用途に応じて Boids をアレンジしているため、その挙動には幅広いバリエーションが見られる。

1.3 本論文の構成

2 章では不均質 Boids の準備のため、まず均質な Boids の挙動を調べ、均質な Boids が安定な群れを形成するための条件を整える。

2 章の内容をふまえて、3 章では 2 種類の個体からなる不均質 Boids を提案する。各個体は周辺個体の種類を識別する能力を持ち、自他の種類の組合せに応じて異なる強さの個体間相互作用を受けるものとしたが、それ以外の設定は全個体一律に 2 章の均質 Boids の設定を用いる。数値実験の結果、この不均質 Boids が特徴的な分布パターンを数通り形成することを確認したので、異種個体群間の境界面形成に注目してこれらのパターンを分類する。

4 章では本論文の不均質 Boids と他の Boids モデルを比較し、Boids の各種設定が系の挙動に及ぼす影響について説明する。

2. 均質 Boids による安定な群れの形成

前述のとおり不均質 Boids の準備のため、本章では基本 3 動作に従う均質な Boids が安定な群れを形成する条件を絞り込んだ。そのうえで、個体間相互作用を変えて均質 Boids の数値実験を行い、群れ形成に及ぼす影響を調べた。

2.1 均質 Boids の定式化

2.1.1 Boids の基本 3 動作

はじめに 3 次元空間内を移動する均質な n 個体からなる Boids について考える。図 1 に示すように、各個体は自分

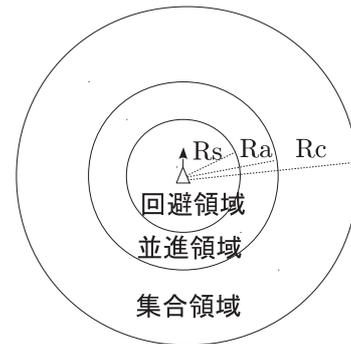


図 1 個体周辺の回避・並進・集合領域

Fig. 1 Zones of separation, allignment and cohesion around a boid agent.

の周辺にそれぞれ半径 R_s, R_a, R_c の球状の回避・並進・集合領域を持つ*1 (本論文では $R_s < R_a < R_c$ とした)。各個体は次の 3 動作の加重和に従って動作する。

- 回避動作：各個体の回避領域内に他個体が来たら、その反対方向へと回避する。
- 並進動作：各個体の並進領域内に存在する全個体の平均速度に合わせて移動する。
- 集合動作：各個体の集合領域内に存在する全個体の重心の方向へ移動する。

i 番目の個体の時刻 t の位置を $\vec{x}_i(t)$ 、速度を $\vec{v}_i(t)$ と表すと ($i = 1 \sim n$)、個体 i の運動方程式は次のように表される。

$$\frac{\vec{x}_i(t + \Delta t) - \vec{x}_i(t)}{\Delta t} = \vec{v}_i(t + \Delta t) \quad (1)$$

$$m \frac{\vec{v}_i(t + \Delta t) - \vec{v}_i(t)}{\Delta t} = \vec{F}_{s,i}(t) + \vec{F}_{a,i}(t) + \vec{F}_{c,i}(t) \quad (2)$$

式 (2) の $\vec{F}_{s,i}(t)$ 、 $\vec{F}_{a,i}(t)$ 、 $\vec{F}_{c,i}(t)$ の項はそれぞれ回避、並進、集合動作の寄与分である。個体 i と個体 j の間の変位を $\vec{\xi}_{i,j}(t) = \vec{x}_i(t) - \vec{x}_j(t)$ と表すと ($j \neq i, j = 1 \sim n$)、これらの項は次の式 (3)、(4)、(5) で書き表せる。

$$\vec{F}_{s,i}(t) = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_s} w_s \frac{f(|\vec{\xi}_{i,j}(t)|) \vec{\xi}_{i,j}(t)}{|\vec{\xi}_{i,j}(t)|} \quad (3)$$

ただし $f(d)$ は個体の回避領域内 ($0 \leq d \leq R_s$) に他個体が近接したときの反発作用を表す単調減少関数である (d : 個体からの距離)。 $f(d)$ の詳細は 2.1.3 項で説明する。

$$\vec{F}_{a,i}(t) = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_a} w_a \frac{(\vec{v}_j(t) - \vec{v}_i(t))}{N_{a,i}} \quad (4)$$

ただし $N_{a,i} = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_a} 1$ は個体 i の並進領域内にいる他個体の数を表し、 $N_{a,i} = 0$ のとき $\vec{F}_{a,i}(t) = 0$ とする。

$$\vec{F}_{c,i}(t) = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_c} w_c \frac{(-\vec{\xi}_{i,j}(t))}{N_{c,i}} \quad (5)$$

*1 ここでは Reynolds [12] にならって、回避 (Separation)、並進 (Alignment)、集合 (Cohesion) に s, a, c の添え字を当てた。

ただし $N_{c,i} = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_c} 1$ は個体 i の集合領域内にいる他個体の数を表し、 $N_{c,i} = 0$ のとき $\vec{F}_{c,i}(t) = 0$ とする。

2.1.2 安定な群れ形成を可能にする境界条件の設定

均質 Boids 個体は式 (1)~(5) に従って立方体状の 3 次元領域内を移動する。以下本論文では、この領域の境界を壁と表記する (3 章以降に出てくる「個体群間の境界面」と「移動可能領域の境界」を区別するためこのように表記した)。

均質 Boids 個体が安定な群れを形成するよう、壁では次の 2 つの条件を設定した。

- (1) 個体が壁に近づく (壁との距離が R_s 以下になる) と壁を避ける (壁回避動作の導入)。
- (2) 個体が壁を回避しきれず衝突すると、壁内部に跳ね返る (反射端)。

上記条件の下で、個体の群れは壁に衝突するたびに適宜減速し、かつ、衝突の衝撃で群れが崩壊しない程度に低速を保つため、安定な群れ形成が可能となる。その詳細については 4.1 節で説明する。

2.1.3 数値実験時の各種パラメータ設定

この均質 Boids の数値実験は下記条件下で行った。

- 個体は $20.0 \times 20.0 \times 20.0$ の 3 次元領域内を移動する。
- 各個体の回避・併進・集合領域の半径をそれぞれ $R_s = 1.0$, $R_a = 2.5$, $R_c = 4.5$ とした*2。
- 個体の重さを $m = 1.0$ 、個体が周辺の状況を認知してから行動に反映するまでの時間を $\Delta t = 1$ と定めた。
- 全個体数 $n = 300$ と設定した*3。
- 数値実験の初期状態では、各個体を壁から十分離れた位置にランダムに配置し、ランダムな向きにごく小さい初速を与えた。
- 安定に群れを形成させるため、回避領域内 ($0 \leq d \leq R_s$) で一律に $f(d) = 1$ と設定した。

多くの Boids モデルでは近距離で強く他個体を回避するよう $f(d)$ を設定している。 $\lim_{d \rightarrow 0} f(d)$ が急激に増加する設定下で Boids の数値実験を行ったところ、群れが連鎖的膨張と緩やかな収縮を反復して不安定に脈動する現象が見られた。本論文ではこの不安定な脈動を避けて個体を安定に配列するために、回避領域内で $f(d) = 1$ と設定した。

2.2 均質 Boids の数値実験結果

以上 2.1 節では、基本 3 動作に従う均質 Boids を定式化し、安定な群れを形成する条件を整えた。そのうえで本節では、回避動作の重みを $w_s = 0.05$ で固定し、並進および集合動作の重み w_a , w_c を一律に 10 倍ずつ変えながら、この均質 Boids の数値実験を行った結果を示した。図 2 に

あげた各数値実験例は、3 次元領域内の 300 個体の運動を 2 次元平面に投影したもので、5 step 間の各個体の軌跡を表している。この数値実験結果を以下にまとめた。

- (1) w_a が大きいとき ($w_a = 1.0$)、個体が向きを揃えて格子点状に整列した群れを形成する。 w_a を小さくするにつれ ($w_a = 0.1 \sim 0.01$)、個体の向きや位置が揃わなくなり、蚊柱状の群れを形成する。さらに w_a を小さくすると ($w_a \leq 0.001$)、個体は向きを揃えず領域中に散らばり、群れは不定形に広がる。
- (2) w_c が大きいとき ($w_c = 0.1$)、高速で移動する緊密な群れを形成する。 w_c を小さくするにつれ ($w_c = 0.01 \sim 0.001$)、群れが広がるとともに移動速度が低減する。 w_c が極端に小さい場合 ($w_c \sim 0.0$)、個体は領域中に散らばって明瞭な群れを形成しない。

ほか、図 2 では割愛したが w_a , w_c が極端に大きい場合 ($w_a \geq 10.0$, $w_c \geq 1.0$) には計算が発散する。また w_a , w_c が負の場合 ($w_a, w_c < 0.0$) には群れを形成しない。

以上、本章では均質 Boids が安定な群れを形成する条件やパラメータ範囲を調べた。次章では、この均質 Boids に個体間の不均質性を導入した不均質 Boids を取り扱う。

3. 不均質 Boids による特徴的なパターンの生成

前章の内容をふまえ、本章では 2 種類の個体からなる不均質 Boids を提案した。この不均質 Boids の数値実験を行い、数通りの特徴的な分布パターンが生成されることを確認したので、異種個体群間の境界面形成に注目してこれらのパターンを分類した。

3.1 不均質 Boids の定式化

不均質 Boids を構成する $n = 300$ 個体を確率 0.5 で種類 A , B に振り分けた。各個体は周辺個体の種類を判別し、自他の種類の組合せに応じて w_a , w_c を変えるものとする。それに従って、個体 i の周辺に個体 j が存在するときの並進・集中動作の寄与分 (式 (4), (5)) を次のように改めた ($j \neq i$, $i, j = 1 \sim n$)。

$$\vec{F}_{a,i}(t) = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_a} w_{a,I,J} \frac{(\vec{v}_j(t) - \vec{v}_i(t))}{N_{a,i}} \quad (6)$$

$$\vec{F}_{c,i}(t) = \sum_{j:|\vec{\xi}_{i,j}(t)| < R_c} w_{c,I,J} \frac{(-\vec{\xi}_{i,j}(t))}{N_{c,i}} \quad (7)$$

I および J は個体 i および j の種類を示す ($I, J = \{A, B\}$)。また $w_{a,I,J}$, $w_{c,I,J}$ は種類 I の個体の周辺領域に種類 J の個体がいるときの並進、集合動作の重みを表す。それらの組合せを次の W_a , W_c のように表記する。

$$W_a = \begin{pmatrix} w_{a,A,A} & w_{a,A,B} \\ w_{a,B,A} & w_{a,B,B} \end{pmatrix} \quad (8)$$

*2 速やかに群れが形成されるよう、移動領域の広さに対し大きめの R_c を設定した。

*3 個体の動きを妨げるほど個体密度が高くないようにするため、移動領域の広さに対しかなり小さめの個体数を設定した。

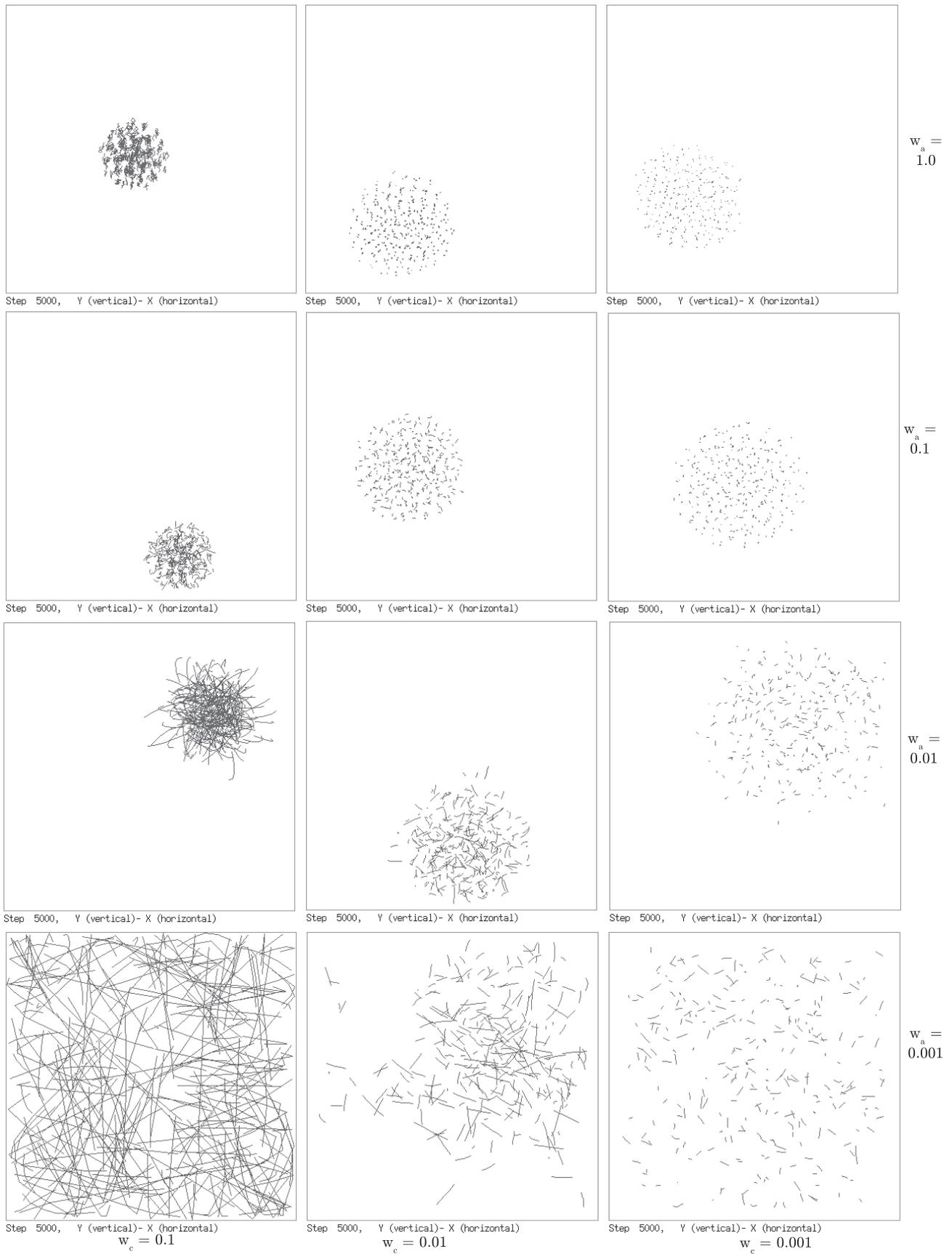


図 2 w_a と w_c を変えたときの均質 Boids の数値実験例
Fig. 2 Snapshots of simulations: homogeneous boids varying w_a and w_c .

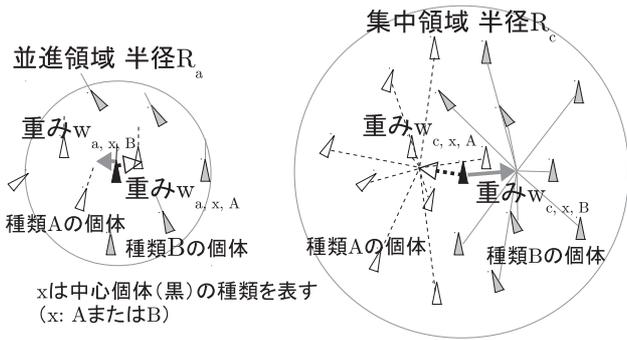


図 3 不均質 Boids における並進動作と集中動作

Fig. 3 Alignment and cohesion of a heterogeneous boid agent.

$$W_c = \begin{pmatrix} w_{c,A,A} & w_{c,A,B} \\ w_{c,B,A} & w_{c,B,B} \end{pmatrix} \quad (9)$$

不均質 Boids 個体の並進・集中動作を図 3 に図示した。 W_a, W_c 以外の設定については、全個体一律に 2 章の均質 Boids の設定を使用した。

3.2 不均質 Boids の数値実験結果

W_a, W_c を変えて不均質 Boids の数値実験を行ったところ、数通りの特徴的な分布パターンが生成されることを確認した。図 4 には種類 A, B の個体群の間に明確な境界面が形成される数値実験例をあげ、図 5 には境界面が形成されない数値実験例をあげた。図 4, 5 の数値実験例の赤と黄緑の線分はそれぞれ種類 A, B の個体の 5 step 間の軌跡を表している。

3.2.1 明確な種間境界面が形成されるパターン

図 4 にあげた特徴的なパターン 4 種について説明する。

(1) 同種個体間の並進・集中作用が強く、異種個体間の並進・集中作用が弱いとき、楕円球型の A, B 個体群が接触して小さい境界面を作るパターンを形成する。その一例として、下記の W_a, W_c を用いた数値実験結果を図 4a に示す。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.01 \\ 0.01 & 0.5 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.001 \\ 0.001 & 0.01 \end{pmatrix}$$

(2) 異種個体間で並進作用が強く、同種個体間で集中作用が強いとき、A, B 個体群の間に広い境界面を形成し、その両側に緩い蚊柱状の A, B 個体群をとまなうパターンを形成する。その一例として、下記の W_a, W_c を用いた数値実験結果を図 4b に示す。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.0 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.0 \\ 0.0 & 0.01 \end{pmatrix}$$

(3) 強い種間不対称な集中作用があるとき、片方の種類の個体群が残りの 1 種類の個体群を球殻状に包み込み、球面状の境界面を持つパターンを形成する。その一例として、下記の W_a, W_c を用いた数値実験結果を図 4c に示す。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.1 \\ 0.01 & 0.01 \end{pmatrix}$$

(4) 同種個体間の並進・集中作用がある程度強く、かつ、異種個体間で負の並進作用(逆進作用)と正の集中作用が拮抗するとき、全体が 1 つの球状の群れを形成し、その中で A, B 個体群が半球状に分極して広い境界面を作るパターンを形成する。その一例として、下記の W_a, W_c を用いた数値実験結果を図 4d に示す。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.15 \\ -0.15 & 0.5 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 \end{pmatrix}$$

3.2.2 明確な異種個体群間境界面が形成されないパターン
図 5 には様々な理由で異種個体群間に明確な境界面を形成しないパターンを列挙した。

(1) 種類 A, B の個体が混合して 1 つの群れを形成するパターンは広いパラメータ範囲にわたって観測される。その一例として、下記の W_a, W_c を用いた数値実験結果を図 5a に示す。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 \end{pmatrix}$$

(2) 異種個体間に強い負の並進・集合作用がある場合、A, B 個体群がそれぞれ分離して移動するため両者の間に境界面はできない。

- 図 5b には異種個体間で強い逆進作用(負の並進作用)を持つ系の数値実験例を示す。A, B 個体群は互いに引きあいつつ加速してすれ違い、それぞれ壁に衝突して減速する過程を繰り返す。この数値実験には下記の数値を用いた。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.2 \\ -0.2 & 0.5 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 \end{pmatrix}$$

- 図 5c には異種個体間で強い反発作用(負の集合作用)を持つ系の数値実験例を示す。A, B 個体群は球形を保って互いに無関係に動き回り、偶然衝突することがあれば反発する。この数値実験には下記の数値を用いた。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.01 & -0.005 \\ -0.005 & 0.01 \end{pmatrix}$$

(3) 弱い並進・集中作用を持つ系では不定型な A, B 個体群を形成する。これらの個体群は混在しないが個体群間に明確な境界面を作らない。その一例として、下記の W_a, W_c (図 2 では右やや下の例に相当) を用いた数値実験例を図 5d に示した。

$$W_a = \begin{pmatrix} 0.01 & 0.0 \\ 0.0 & 0.01 \end{pmatrix}, W_c = \begin{pmatrix} 0.001 & 0.0 \\ 0.0 & 0.001 \end{pmatrix}$$

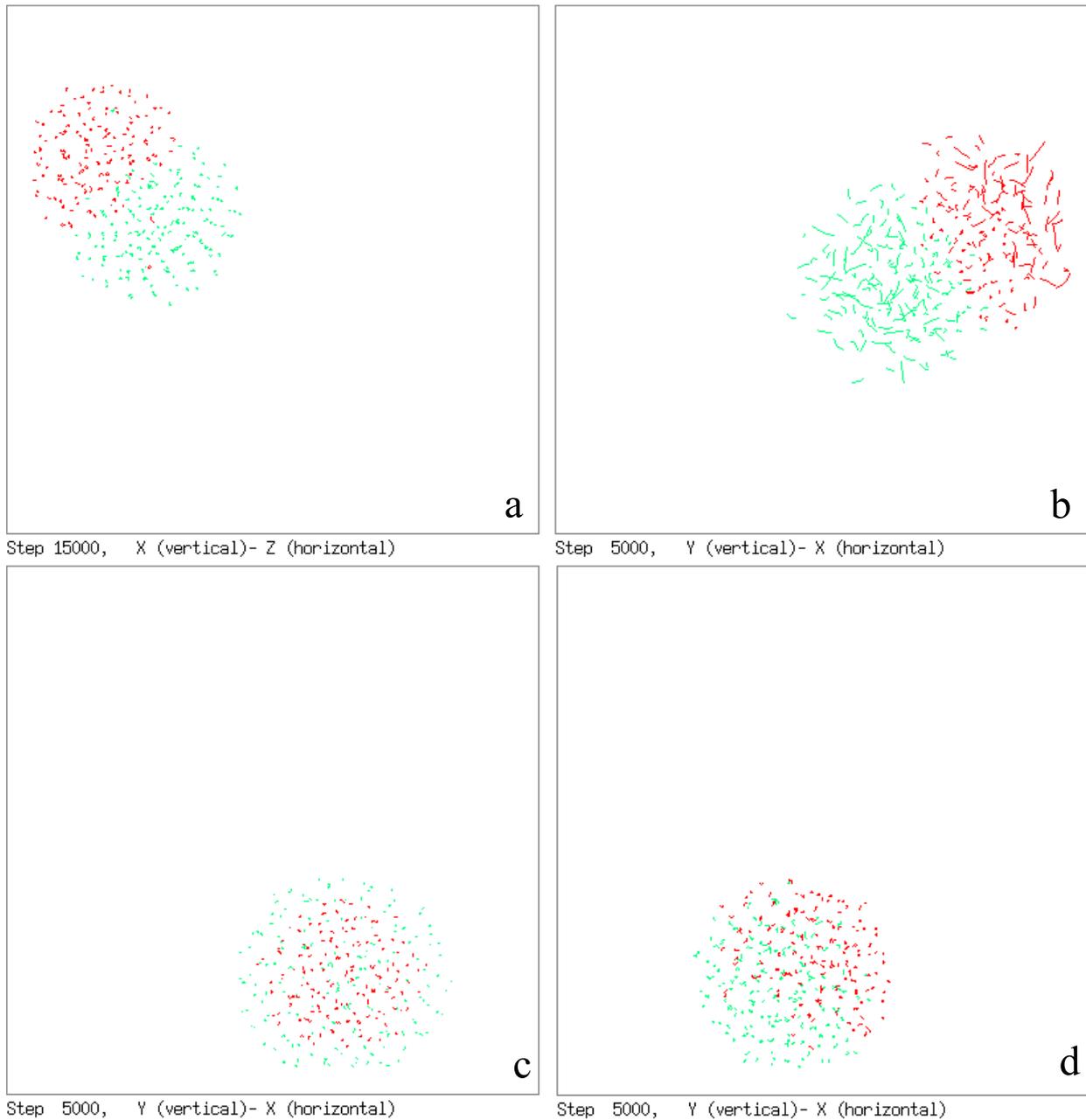


図 4 不均質 Boids の数値実験例：A, B 個体群間に明確な境界面を形成する場合

Fig. 4 Snapshots of simulations: heterogeneous boids with a clear interface between groups of type A and B agents.

3.2.3 不均質 Boids の生成する 8 種類のパターンの説明

3.2.1 項と 3.2.2 項では W_a , W_c を変えて不均質 Boids の数値実験を行い、明確な境界面を持つパターン 4 種類、持たないパターン 4 種類の生成を確認し、各パターンを生成する W_a , W_c の特徴について述べた。明確な境界面を持つパターンのうち、図 4a, b, c の 3 種類は W_a , W_c を多少変えても再現できるが、図 4d の分極したパターンを再現するには異種個体との集中作用と逆進作用（負の並進作用）を拮抗させるため W_a , W_c の細かい調整が必要となる。両作用の拮抗が崩れると、集中作用が勝る場合には図 5a の混合したパターンを形成し、逆進作用が勝る場合には図 5b のパターンを形成する。

不均質 Boids では幅広いパラメータ範囲で図 5a の混合パターンが生成される。図 4 にあげた 4 つのパターンは、 W_a , W_c の変化につれ連続的に混合パターンへと崩れていく。また異なる W_a , W_c の下で生成された混合パターンの間では A, B 個体群の混ざり方の粗さが一見して異なるように見える。この問題の追究には A, B 個体群の混合度の客観的指標が必要となるが、本論文ではそこまで至らなかった。指標の設定は今後の課題としたい。

4. 考察

筆者は複数パートからなる群舞の集団訓練を見たとき、下記の機構を不均質 Boids に応用できないかと考えた。

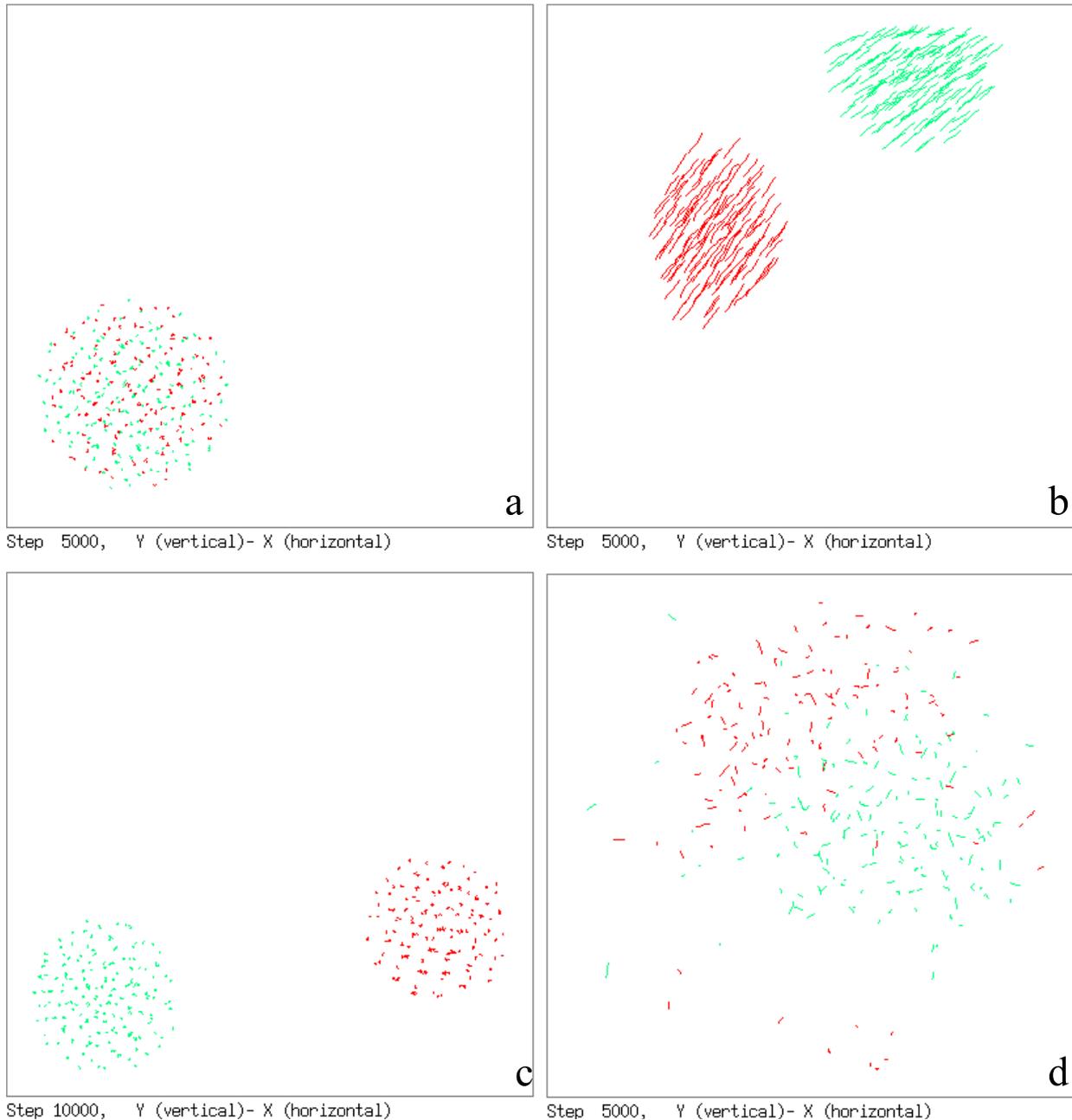


図 5 不均質 Boids の数値実験例：A, B 個体群間に明確な境界面を形成しない場合
Fig. 5 Snapshots of simulations: heterogeneous boids without a clear interface between groups of type A and B agents.

- 各演者は適宜に周辺の同じパートの個体と間隔をとり速度を合わせながら、パートごとに決められた振付けで同期して動作する。
- 集団演技時に異なるパートの演者を混在させないようにするため、各演者は周辺に別パートの演者がいるときパート間に単純な境界線を形成・維持するよう位置取りする。

これをヒントに、筆者は個体群間境界面を操作する目的で様々な動作を不均質 Boids の行動則に組み込んでみたが、多様に挙動が変化するばかりで、現段階では機能的に協調作業する系は構築できなかった。そこで、本論文では

基本 3 動作に従う単純な Boids にいったん立ち返り、Boids が安定な群れを形成する条件を絞り込んで不均質 Boids の数値実験を行った。その結果、不均質 Boids が特徴的なパターン数種類を生成することを確認したので、異種個体群間の境界面形成に注目してこれらのパターンを分類した。

以下、不均質 Boids における各種設定が系の挙動に及ぼす影響について、他の Boids モデルと比較しながら述べる。

4.1 安定な群れを形成する境界条件の設定

確認のため、壁を省略して周期境界条件下で Boids の数値実験を行ってみた。このとき個体は群れをなして徐々に

加速するが、高速移動する群れは他方向に移動する個体等と接触するたびに衝撃で弾け、さらに大量の個体を領域中に撒き散らして群れと離散個体の接触確率を増やす。そこで、このような不安定な挙動の原因となる群れの加速を避けるため個体に上限速度や標準速度を設定すると、個体の移動速度は制限値近辺に集中するようになり、定速移動する SPP モデル [14] と同様に離散集合を繰り返す。

本論文の Boids モデルは編隊移動が目的ではなく複数の個体群の安定な位置取りが目的であるので、本論文では移動速度制限の代わりに「壁回避行動+反射端」という境界条件下で Boids の数値実験を行った。この境界条件下では、個体の群れは壁に衝突するたびに適宜減速し、衝突の衝撃で群れが崩壊しない程度に低速を保つため、安定な群れ形成が可能となる。ただし壁回避行動と反射端のどちらかが欠けると、次の誤動作の可能性が生じる。

- 反射端なしで行動則に壁回避行動を付加した場合：一部の個体が壁を回避しきれずに壁に張り付く現象が生じる*4。
- 壁回避行動なしで壁を反射端とした場合：群れが高速で壁に衝突する事態が生じたときに、衝突前後の個体が混ぜ合わされるためパターン形成が妨げられる。

4.2 個体間の不均質性の導入

複数種類の個体からなる不均質 Boids の先行研究には、Sayama の Swarm Chemistry [13] や You の 2 成分 swarm [16] 等がある。これらのモデルの個体は Boids の基本 3 動作に従うが、個体の種類ごとに異なるパラメータセット（個体の重さや 3 動作の重み、周辺領域半径、標準速度やノイズ等）を与えられており、各個体は周辺個体の種類を識別せずすべて同等にカウントする。これらのモデルは複数の個体群を組み合わせた多様な分布パターンを自己組織する。

これに対し、本論文の不均質 Boids でも個体は基本 3 動作に従うが、各個体は周辺個体の種類を判別し、自他の種類の組合せに応じて異なる個体間相互作用 (W_a , W_c) を受けるものとした。また W_a , W_c 以外のパラメータは全個体一律に設定した。不均質 Boids 個体は周辺の各種個体分布の不均質性を利用しながら動作する。本論文では不均質 Boids が数種類の特徴的なパターンを生成することを確認し、各パターン形成時の W_a , W_c の特徴をまとめた。

他にも文献 [7] では、不均質 Boids の編隊制御 [5], [10] を Potts モデルにアレンジし直し、同種・異種個体間でポテンシャルを変形させて異種個体群を分離する数値実験例を示している。また文献 [4] の不均質 swarm では、上記のポテンシャルを個体群単位で変形して、異なる個体群が異方

的に成長する数値実験を行っている。

4.3 各種パラメータの設定

本論文では回避・並進・集中領域の半径 R_s , R_a , R_c を全個体共通とした。確認のため R_s を 1.0 に固定し、 R_a と R_c を 2.5 ~ 8.0 の間で変えて ($R_a > R_c$ の場合を含む) 不均質 Boids の数値実験を行ったところ、本論文であげた 8 種類のパターンと同様のパターンを再現した。

また本論文では Boids の移動可能領域を 3 次元とした。確認のため移動可能領域を 2 次元に制限して数値実験を行って見たところ、不均質 Boids は（次元数の変化分を考慮して各種領域の比率を補正すると）2 次元・3 次元ではほぼ同様の分布パターンを形成する。 W_a , W_c の変化にともなう分布パターンの変化も両者でほぼ同様の傾向を示した。

5. まとめ

本論文では A, B 2 種類の個体からなる不均質 Boids を提案した。各個体は Boids の基本 3 動作に従うが、周辺個体の種類を識別し、彼我の個体の種類の組合せに応じて異なる並進・集中動作の重みを受けるものとした（このときの並進・集中動作の重みの組を W_a , W_c と表記した）。また W_a , W_c 以外の設定は全個体一律に設定した。この不均質 Boids が安定な群れを形成できるよう次の 2 点を工夫した。1) 群れの高速移動を抑えるため、領域境界（壁）を反射端とし、個体の行動則に壁回避行動を組み込んだ。2) 個体を安定に整列するため、回避領域内で $f(d) = 1$ とした。この不均質 Boids の数値実験の結果、A, B 個体群の間に明確な境界面を持つパターン 4 種類、持たないパターン 4 種類の生成を確認し、各パターン生成時の W_a , W_c の特徴について述べた。この知見を参考に、今後は境界面操作を可能にする様々な動作や種間遷移を個体の行動則に組み込んで、効率的に協調作業する不均質 Boids の構築を目指す。

謝辞 今春この世を去った父に本論文を捧げます。

参考文献

- [1] Aoki, I.: A Simulation Study on the Schooling Mechanism in Fish, *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* (日本水産学会誌), Vol.48, No.8, pp.1081-1088 (1982).
- [2] Couzin, I. et al.: Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.218, pp.1-11 (2002).
- [3] Couzin, I. and Krause, J.: Self-Organization and Collective Behavior in Vertebrates, *Advances in the Study of Behavior*, Vol.32, pp.1-75 (2003).
- [4] Doursat, R.: Programmable Architectures That Are Complex and Self-Organized: From Morphogenesis to Engineering, *Artificial Life XI*, Bullock, S. et al. (Eds.), pp.181-188, MIT Press (2008).
- [5] 早川朋久, 藤田政之: マルチエージェントシステムとビークルフォーメーション, 計測と制御, Vol.46, No.11, pp.823-828 (2007).

*4 これを回避するには、1) 本論文のように壁を反射端に設定する、2) Couzin [2] のように回避動作を並進・集中動作より優先する、3) 壁回避行動を基本 3 動作より優先する、等が必要となる。

- [6] Inada, Y. and Kawachi, K.: Order and Flexibility in the Motion of Fish Schools, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.214, pp.371-387 (2002).
- [7] Kumar, M., Garg, D.P. and Kumar, V.: Segregation of Heterogeneous Units in a Swarm of Robotic Agents, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.55, No.3, pp.743-748 (2010).
- [8] Nakamura, M. and Kurumatani, K.: Formation Mechanism of Pheromone Pattern and Control of Foraging Behavior of an Ant Colony, *Artificial Life V*, Langton, C.G. et al. (Eds.), pp.64-77, MIT Press (1997).
- [9] 中村真理, 浅間 一: 進化計算による蟻コロニーモデルの自動設計, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.2, No.1, pp.47-56 (2009).
- [10] Olfati-Saber, R.: Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.51, No.3, pp.401-420 (2006).
- [11] Parrish, J.K., Viscido, S.V. and Grünbaum, D.: Self-Organized Fish Schools: An Examination of Emergent Properties, *Biological Bulletin*, Vol.202, pp.296-305 (2002).
- [12] Reynolds, C.W.: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics*, Vol.21, No.4, pp.25-34 (1987).
- [13] Sayama, H.: Decentralized Control and Interactive Design Methods for Large-Scale Heterogeneous Self-Organizing Swarms, *ECAL 2007*, LNAI Vol.4648, pp.675-684 (2007).
- [14] Vicsek, T. et al.: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles, *Physical Review Letters*, Vol.75, No.6, pp.1226-1229 (1995).
- [15] Vicsek, T. and Zafeiris, A.: Collective Motion, *Physics Reports*, Vol.517, pp.71-140 (2012).
- [16] You, S.K. et al.: Collective Behaviors of Two-Component Swarms, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.261, pp.494-500 (2009).



中村 真理

平成元年3月東京大学工学部計数工学科卒業。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。蟻コロニー等、生物の数理モデルの研究に従事。現在、独立行政法人産業技術総合研究所健康工学研究部門に所属。工学

博士。