

フェロモン場を用いて誘引を行うロボット群の開発

藤澤 隆 介^{†1} 今村 光^{†1}
橋本 敬^{†2} 松野 文 俊^{†1}

蟻は、フェロモン・トレイルを用いて採餌することが知られている。フェロモン・トレイルとは、餌と巣の間に敷設されたフェロモンの道のことである。蟻はフェロモンを用いて環境に情報を付加することによって他の蟻とのコミュニケーションを図っている。フェロモン・トレイルを用いたコミュニケーションは、化学・可塑・間接・局所的な特徴を有する。本研究では、ロボット群のコミュニケーション手段としてフェロモンを用いたコミュニケーションを提案する。我々は蟻の振舞いに基づいてフェロモンを用いる行動アルゴリズムを提案し、そのアルゴリズムの妥当性とフェロモン・トレイルを用いたコミュニケーション方法の有効性を検証するため、計算機シミュレーションによりその妥当性を検証し、群ロボットを開発した。実験結果から、フェロモン・トレイルを敷設し複数回にわたって強化（フェロモン・トレイルを再敷設）する行動が観測された。この事実は、フェロモンを用いたコミュニケーション方法が有効に働いたことを意味する。

Development of Multi-robots Communicating by Pheromone Trail

RYUSUKE FUJISAWA,^{†1} HIKARU IMAMURA,^{†1}
TAKASHI HASHIMOTO^{†2} and FUMITOSHI MATSUNO^{†1}

The ants forage about preys by using pheromone trails. They lay down the pheromone trails between preys and a nest. By detecting the pheromone trail, they can find the preys. Though they do not have excellent intelligence, they can communicate and cooperate with each other by appending information to the environment. This communication method has a merit that an agent does not need to memorize the place of the preys. We consider the problem that “How do the swarm robots communicate using the pheromone trail?”. We design a swarm behavior algorithm by using features of the pheromone trail communication, based on 4 perceptual cues (stimulus) and 3 effector cues (action). We demonstrate the effectiveness of the communication with the pheromone trail by computer simulations and experiments. From the simulation results, we can

find the effectiveness of the proposed behavior algorithm. In experiments, we set robots, a nest and a prey in the flat test experimental field. We observe robots' behavior and the state of the environment for 20 minutes. The robots laid down the pheromone trail between the nest and the prey, and reinforced it many times. This fact means that swarm robots can realize the function of the chemical, indirect, plastic and local communication like ants by using pheromone trail.

1. はじめに

1.1 研究背景

群れは自律分散系である。そして、一般的に以下のような特徴を有していることが知られている。

- 群れは自律的なエージェントで構成され、中央制御システムを持たない。
- エージェントは大域的情報を持たず、環境中の局所的情報のみで活動する。

群行動とは局所的な情報の相互作用によって全体の行動が創発される現象である。真社会性昆虫と呼ばれる蟻・ハナバチ・狩バチ・白蟻は、フェロモン (Pheromone) を用いて群れの仲間とコミュニケーションすることで高度な群行動を実現している¹⁾。彼らは、フェロモンによって環境に情報を付加している。また、この情報は、環境に一樣に分布しておらず、生物にとって意味のある箇所に適切に付加される。このフェロモンを用いて環境に付加された情報分布を「フェロモン場 (Pheromone field)」と定義する。

フェロモンとは、生物が体内で生成して体外に分泌後、同種他個体に一定の行動や発育の変化を促す化学物質の総称である²⁾。フェロモンは、リリーサ・フェロモンとプライマ・フェロモンの2種類に大別される³⁾。本研究では、リリーサ・フェロモンである「道標フェロモン」に注目して研究を行う。群れは多数の個体から構成され、広大な空間を探索し複数の対象物を収集することが可能である。蟻は道標フェロモンを用いることで群れで効果的に採餌する。道標フェロモンを用いたコミュニケーション方法には、化学・可塑・間接・局所的な特徴がある。道標フェロモンは、化学物質で揮発性物質であり時間とともに蒸散する。また、個体は環境中のすべての他個体と通信するわけではなくフェロモン・トレイル

^{†1} 電気通信大学

The University of Electro-Communications

^{†2} 北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology

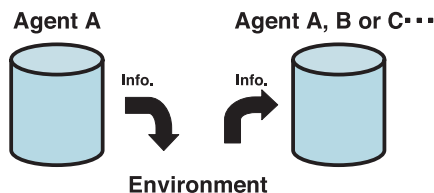


図 1 フェロモン・コミュニケーション概念図
Fig.1 Concept of pheromone communication.

(Pheromone trail, 道標フェロモンが敷設された経路) 上を通過する個体に情報伝達 (コミュニケーション) が行われる。

一般的に、コミュニケーションは「個体 A のなんらかの行動変化に対応して、個体 B (ないし個体 C, D...) になんらかの行動変化を生じさせる」と定義される⁴⁾。本論文で考えているフェロモン・コミュニケーションは環境を通して個体間のコミュニケーションが行われる。個体は環境に情報を出力し、環境から情報が入力される。つまり、図 1 に示すように、フェロモン・コミュニケーションとは単純なエージェント間のコミュニケーションではなく、環境を含んだエージェント間のコミュニケーションである。本コミュニケーション手法におけるコミュニケーションの成立条件を「個体 A が環境に及ぼしたなんらかの変化に対応して、自身を含む他個体 (個体 A, B, C...) になんらかの行動変化を生じさせる」と定義することができる^{*1}。

エージェントがフェロモン場を用いてコミュニケーションを利用する研究として、Dorigo らによる Ant Colony Optimization (ACO) がある^{5),6)}。ACO は、巡回セールスマン問題などの組合せ最適化問題を解くのに用いられている。巡回セールスマン問題におけるこの最適化手法の手順を説明する。

Step 1 多数のエージェントが環境に揮発性のある情報 (フェロモン) を残す。

Step 2 時間経過によってフェロモンが揮発する。

Step 3 フェロモン量に応じてエージェントが経路を選択する。

良質な解 (解空間上の経路) にはフェロモンが蒸発するよりも早く補強されるため、フェロモン濃度が高いまま保たれる。その結果、良質な解 (最短経路) が選択されるという手法である。環境が動的に変化する実世界では、このように自律分散に問題を解く手法は有効

な手法であり、フェロモン・コミュニケーションをロボティクスにおける個体間のコミュニケーション手段として積極的に検討する価値がある。

「環境に情報源を残す」という点において、化学物質を用いて環境に情報を残してロボット群にコミュニケーションさせることは、環境に無線モジュール (アクセスポイント) を設置することと等価である。後者の場合、広い環境を移動するためには非常に多くの無線モジュールを必要とする。これに対して、化学物質を用いたコミュニケーションでは物質を環境に撒くだけで済み、情報の持続時間のコントロールも化学物質の分子量や混合比によって選択可能である。また、フェロモン場は時間が経過することで蒸発・拡散し、消失していく。たとえば、採餌行動を考えた場合、運搬が完了した物体へフェロモン・トレイルを敷設しなければ、環境に残された情報の更新が行われなくなり、環境の情報は消えてなくなる。これに対し、無線技術を用いる場合は無線モジュールを再配置しない限り無駄になってしまう。本研究では、「環境に情報を付加し、相互にコミュニケーションを行う」という課題の簡単化のために無線モジュールではなく化学物質を用いる。

1.2 関連研究

本研究の最終目標は、群れによる物体の運搬である。このとき、エージェントには以下の機能が必要である。

(A) 物体の探索と他個体の誘引

(B) 運搬対象物体や他個体との力学的干渉

エージェントは運搬に必要なエージェント数を Prey 周辺に呼び集める必要がある。この目的に対して、蟻が採餌時に用いている道標フェロモンというコミュニケーション方法は非常に有効な手段である。蟻は、道標フェロモンを使うことによって自己の知能を高度に発達させることなく、環境に情報を付加することによって問題を解決している。

(A) の研究として、仮想的にフェロモン場を実現した研究と現実のフェロモンを用いた研究がある。仮想的なフェロモンを用いた研究として、Sugawara ら⁷⁾ や Nishinari ら⁸⁾ によるプロジェクトでフェロモン場を投影し、スクリーン上でロボット群の採餌行動を実現している研究がある。これらの研究では、仮想的なフェロモン場をうまく設定することによって衝突現象にとらわれることなく、ロボット群に仮想フェロモンを用いたコミュニケーションをさせることに成功している。この手法は、フェロモンの蒸発・拡散を任意に設定できることから計算機シミュレーションと同様に正確な実験条件を与えることができる。しかし、実際の化学物質の持つ環境依存性の強い揮発・拡散特性を無線・有線通信あるいはプロジェクトにより実現し、実環境を再現できる仮想フェロモン場として生成するためのソフトウェア

*1 フェロモン・コミュニケーションでは、個体 A が環境に残した情報を個体 A が取得することもありうる。

アやパラメータ設定は非常に困難である。

また、実際のフェロモンを用いたロボット研究として、下山ら⁹⁾は実際の昆虫の触覚とフェロモンを用いてフェロモン追従行動を単体のロボットで実現した。しかし、群行動については考察されておらず、また群ロボットにおいて生体材料を用いることには限界がある。Purnamadja¹⁰⁾は、2種類の化学物質と化学センサを用いて群ロボットを誘引させることに成功している。しかし、残念ながらリーダー・ロボットがフェロモンを発し、スレイブ・ロボットがそのフェロモンをトリガに行動するという機能分化されたシステムであり、単一の個体で構成される群がフェロモンによるコミュニケーションを行い相互作用するという機能を有していない。

(B)の研究として、ロボット群による協調運搬の研究がある。Kubeら¹¹⁾は、運搬対象物体を発光させ、ロボット群に物体を協調して運搬させることに成功している。また、Großら¹²⁾は、Kubeらの研究のように運搬対象物体を発光させるだけでなく、ロボット自身が発光し、他個体に情報を伝えることによって、ロボットたちが連結して物体を運搬させることに成功している。しかし、これらの研究では、フェロモン場のような化学物質を用いて間接的にコミュニケーションする方法をとっていない。

前述のように、フェロモン・コミュニケーションと同じく、「環境に情報源を残す」研究として、ユビキタス情報環境やセンサ・ネットワークの研究として無線モジュールなどを環境に設置し環境を知能化する研究が複数報告されている。具体的には、MICA MOTE、MillenialNet社のi-Bean、欧州におけるSmartIts、NASAによるSensorWeb、東京大学のU-Cubeなどがある¹³⁾。これらのデバイスに対して、化学物質を用いたコミュニケーションは非常にシンプルなコミュニケーションであり、それゆえ通信可能な情報量は現状の無線モジュールに比べて少ない。しかし、複数の化学物質を検出することのできる化学センサが開発されれば情報量の問題は解決可能であり、そのような研究成果も報告されている¹⁴⁾。

1.3 研究目的

本研究では、群れによる物体運搬に必要な機能のうち、(A)物体の探索と他個体の誘引について注目し、フェロモン場を用いて未知環境でコミュニケーションを行うロボット群の実現を目的とする。本研究の独創性は、ロボット群がフェロモンを用いて環境を積極的に改変する点にある。つまり、図1に示すように、ある個体が環境に残した情報が他個体にとっての情報になる。この機能は、シロアリの研究で発見され、GrasséによってStigmergyと呼ばれている¹⁵⁾。ロボット群は、活動環境を「餌を探す」というタスクに都合の良いようにフェロモン場を生成し、自身らの活動環境を積極的に改変し、他個体と間接的にコミュニ

ケーションする。群行動アルゴリズムを設計し、計算機シミュレーションを用いてアルゴリズムの妥当性を検討し、実際にロボットを開発し群ロボット実験を行うことでフェロモン・コミュニケーションの実証を行う。

2. フェロモン・コミュニケーションを実現するアルゴリズム

本章では、各エージェントが道標フェロモンによるフェロモン場を用いて互いにコミュニケーションをする行動アルゴリズムを設計する。蟻コロニにおいては、各エージェントは単純な規則に従って活動している。しかし、コロニ全体としての行動は環境の様々な変化に柔軟に対応している¹⁶⁾。

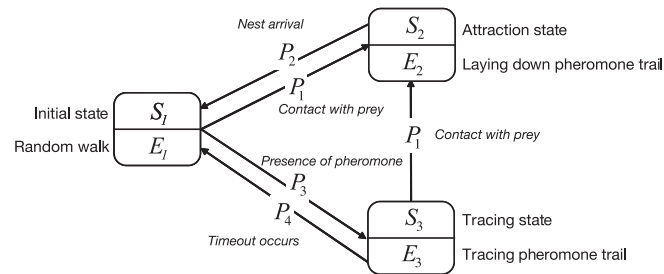
2.1 群行動アルゴリズム

フェロモン・コミュニケーションの実現のために、本研究の群行動アルゴリズムとして車谷¹⁷⁾の蟻の採餌行動モデルのうち、主に探索と誘引に関するアルゴリズムを適用する。以下、本論文では車谷のモデルと同様に、実験フィールドは有界な平面とし、フィールド内にはエージェント・餌(Prey)・巣(Nest)のみが存在するものとする。本研究の群ロボットシステムに適用するために車谷モデルを参考に、群行動アルゴリズムは探索・誘引・追従の3つの状態で構成する。前提条件として、すべてのエージェントはNest位置を知覚可能であるとする。実際にヒアリの一種(*S. invicta*)では太陽の方向を知覚しNest方向を判断することが知られている¹⁾。

決定性有限オートマトンで記述したアルゴリズムを図2に示す。アルゴリズム設計のために、3つの状態 S_i ($i = 1, 2, 3$)、4つの知覚標識(刺激) P_i ($i = 1, \dots, 4$)、そして3つの作用標識(行動) E_i ($i = 1, 2, 3$)を設定する。図2に示すように、状態 S_i のエージェントは行動 E_i を選択する。 S_i のエージェントが P_j を知覚すると、エージェントは自己の内部状態を S_k へ遷移させる。各エージェントの初期位置はランダムに選択され、初期内部状態は S_1 であり、ランダム・ウォーク E_1 を行う。以下に内部状態・知覚標識・作用標識を具体的に説明する。

E_1 : ランダムウォークでは、52%の確率で直進を選択し、16%の確率で左超信地旋回を選択、同様に16%の確率で左超信地旋回を選択する。また、16%の確率で後進を選択する*1。
 E_2 : フェロモン・トレイル敷設では、Nest方向を検出し、フェロモンを分泌しながらNestへ移動する。そして、 E_3 : フェロモン・トレイル追従では、フェロモンを検出したとき、エー

*1 直進、左右超信地旋回、後進の確率は試行錯誤の結果決定された。



内部状態 (State)	知覚標識 (Perceptual cue)	作用標識 (Effector cue)
S_1 : 探索	P_1 : Prey との接触	E_1 : ランダムウォーク
S_2 : 誘引	P_2 : Nest への到着	E_2 : フェロモン・トレイル敷設
S_3 : 追従	P_3 : フェロモンの存在	E_3 : フェロモン・トレイル追従
	P_4 : 時間経過	

図2 フェロモン・コミュニケーションのための群行動アルゴリズム
Fig. 2 Swarm behavior algorithm for pheromone communication.

エージェントは Nest 方向を検出し, Nest と逆方向に進行方向を向ける. そして, フェロモンを追従しながら Nest と逆方向, すなわち Prey 方向へ移動する.

2.2 主体・客体間接触処理

各エージェントがフェロモン・トレイルを生成する機能を有する群れでは, フェロモン・トレイル上にエージェントが誘引される. その結果, 多くのエージェントがトレイルに集まり, 渋滞が発生する. 車谷¹⁷⁾の研究は, マクロモデル^{*1}生成に関する研究であり, 実世界でロボット群を運用することを想定していない. Sugawara ら⁷⁾は, この問題を仮想フェロモン・トレイルの幅をロボット本体の幅と等しくなるよう設定し, トレイルから逸脱し難いシステムにすることによって解決している. しかし, 実際のロボットシステムにおいて, 太いフェロモン・トレイルを敷設するには大量のフェロモンを分泌する必要がある. そこで本研究では, エージェントは自身の幅の 1/10 程度のフェロモン・トレイルを敷設することとし, トレイル上でエージェントが渋滞する現象を考慮し, エージェントが衝突するときの行動をモデル化する.

表1 衝突後の行動選択テーブル

Table 1 Action rules when an agent detects collision.

エージェントの内部状態	接触対象	接触後のエージェントの行動
S_1	エージェント/壁	接触点から離れてから回転
	Prey	フェロモン・トレイルの敷設
S_2	エージェント	一時停止
	Prey/壁	(モデル外)
S_3	エージェント/壁	接触点から離れる
	Prey	フェロモン・トレイルの強化

エージェントが客体との接触を知覚したときの行動を表1に示す^{*2}. エージェントの State によって接触後の行動に差異がある. 群れの目的は, Nest-Prey 間にフェロモン・トレイルを敷設することである. そのため, 各 State の個体間接触後の行動継続の優先順位は, S_2 (誘引), S_3 (追従), S_1 (探索) の順とする. この優先順位を決定しないと, フェロモン・トレイル上でエージェントが接触を繰り返し, 群行動アルゴリズムが機能低下する. すなわち, 接触後表の規則に従い行動した後に, 一定時間経過後に接触前の行動を再開する. この客体との接触時の行動アルゴリズムにより群れは前述の群行動アルゴリズムを適切に機能させることができる. 以下に各 State の個体間接触時の行動を説明する.

個体間接触時の行動

S_1 Prey に関する情報を持たないため, 他個体との接触時に回避行動をする.

S_2 フェロモン・トレイル敷設中であるため, 他個体との接触時には回避行動をせずに他個体が自身を回避するのを待つ.

S_3 フェロモン・トレイル追従中であるため, 他個体と接触してもフェロモン・トレイルから大きく外れないよう後退, 一定時間待機後にフェロモン追従行動を開始する.

エージェント間の衝突処理の一例を紹介する. 内部状態 S_2 (誘引) のエージェント A がフェロモン・トレイルを敷設しているとき, 内部状態 S_3 (追従) のエージェント B が接触したとする. 群れにとって優先度の高い内部状態であるエージェント A はその場で一定時間停止する. エージェント A に比べて優先度の低い内部状態であるエージェント B は, 接触後にただちに一定時間後進し, フェロモン追従行動を開始する. つまり, エージェント A が停止している間にエージェント B が接触位置から後進することによって離れることになる. エージェント B は, 後進することで群れにとって最も重要な行動をしているエージェ

*1 対象システムで生じている現象, マクロ挙動を発現させる動的システムとしての構造.

*2 状態が同じエージェントどうしが接触した場合でもこの規則に従う.

ント A の行動可能な空間を確保している。フェロモン・トレイルが直線であった場合でも、エージェント A は直線的に移動するのに対して、エージェント B はフェロモン・トレイルを追従する場合、左右のフェロモン・センサを用いてジグザグ走行するので後進するとトレイルから離れるため再度の衝突は回避され、フェロモン・トレイル上の渋滞も回避されることになる。

3. シミュレーション・モデル

3.1 エージェント・モデル

エージェントの外形は円柱型であり、直径は 150 [mm]、最大速度は 0.1 [m/s] とした。実際のロボット・システムにおいて、フェロモンの代用にエタノールを用いるのでシミュレーションではその特性を考慮する。ロボットを用いた実験系では、エタノールは、 S_1 (探索) のエージェントにとってフェロモンとして知覚標識となる。そして、エタノールセンサは、フェロモン・トレイルの追従のために用いられる。

3.2 フェロモン・モデル

エージェント群は、有界な平面フィールドで活動するものとする。フィールドは 10 [mm]×10 [mm] の計算格子 (グリッド) で分けられ、フェロモンの蒸発・拡散現象は中道らの提案する離散方程式¹⁸⁾ を基に蒸発・拡散現象をモデル化する。フェロモンの蒸発は以下の式によって計算される。

$$F_p(x, y, t) = \gamma_{vap} F_p(x, y, t-1) + \Delta F_p(x, y, t) \quad (1)$$

ここで、 $F_p(x, y, t)$ は、ある時刻 t のときのグリッド (x, y) でのフェロモン量であり、 γ_{vap} は蒸発係数である。第 2 項の $\Delta F_p(x, y, t)$ はフェロモン添加量であり、以下の式で定義される。

$$\Delta F_p(x, y, t) = \begin{cases} Q_p & \text{If a } S_2 \text{ agent is on the grid}(x, y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Q_p はフェロモン添加量である。

また、フェロモンの大気中への拡散は以下の式で計算される。

$$\begin{aligned} A_p(x, y, t) = & A_p(x, y, t-1) + \gamma_{dif} \{ A_p(x+1, y, t-1) + A_p(x-1, y, t-1) \\ & + A_p(x, y+1, t-1) + A_p(x, y-1, t-1) - 5A_p(x, y, t-1) \} \\ & + (1 - \gamma_{vap}) F_p(x, y, t) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $A_p(x, y, t)$ は、ある時刻 t 、グリッド (x, y) 直上の空間のフェロモン量であり、 γ_{dif}

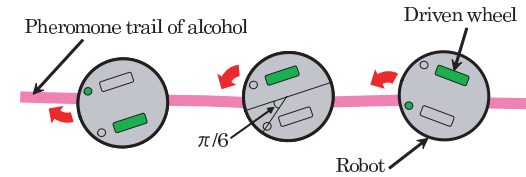


図 3 フェロモン・トレイル上のエージェントの行動
Fig. 3 Tracing behavior on the pheromone trail.

は拡散係数である。第 2 項は近接グリッドからの流入と流出・消失を表し、第 3 項はフィールドから蒸発してくるフェロモン量を表す。エージェントのフェロモン・センサは、センサ位置 (x, y) の現在時間のフェロモン量 $A_p(x, y, t)$ を検出する。

3.3 フェロモン・トレイルの敷設・追従

エージェントは、 S_2 (誘引) のときにフェロモン・トレイルを敷設する。誘引状態 (S_2) のエージェントは、Nest 方向を検出し、Nest 方向に向かって移動しながらフェロモン (式 (3) における Q_p) を分泌する。

追従のメカニズムは実際の蟻の行動を模倣する。蟻は、フェロモン・トレイルを左右の 2 つの触角で検知する。左 (右) の触角がフェロモン・トレイルを検知すると左 (右) 方へ移動する¹⁹⁾。この行動を模倣するため、フェロモン・センサをエージェントの底面に 2 つ搭載されていると設定している。図 3 に示すように、取り付け角は進行方向から $\pi/6$ に搭載されている。エージェントの進行方向右 (左) 側のセンサがフェロモンを検知すると左 (右) 車輪を駆動させる。そして、エージェントは右 (左) へ移動する。この行動アルゴリズムをエージェントに実装した。この行動は、つねに Nest 方向を参照しながら行われ、Nest 方向にフェロモン・トレイルを追従することはない。

4. シミュレーション実験

4.1 シミュレーション設定

シミュレーションにおいて、エージェント数は 1-40 [体] とし、フィールドサイズは 1,800 [mm]×1,800 [mm] とする。実験フィールド上の Nest と Prey は対角に設置する。Prey 半径は 160 [mm] とし、Nest 半径は 600 [mm] とした。また、シミュレーション時間は 20 分間とした。フェロモンの蒸発・拡散は式 (1)-(3) に基づく。各パラメータは、実機実験で用いるエタノールを想定して以下のように設定した。蒸発係数 $\gamma_{vap} = 0.999$ 、拡散係数 $\gamma_{dif} = 0.001$ とし、エージェントが敷設されたフェロモン・トレイルを検出不可能になるま

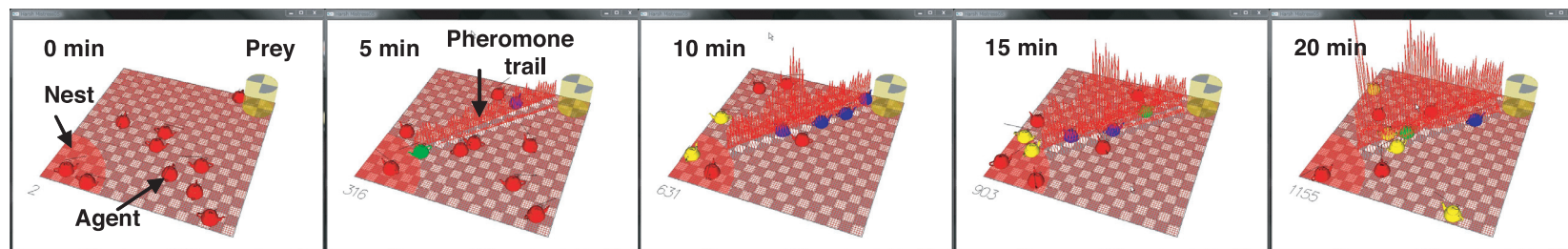


図4 エージェント数10体のときのシミュレーション実行例
Fig. 4 Typical simulation result for 10 agents.

での時間をフェロモンの揮発性を考慮して5分となるように検出可能なフェロモン量に閾値を設けた。また、計算における刻み時間は0.1[s]と設定した。

エージェントが S_1 (初期状態) のときにPreyを発見、フェロモン・トレイルの敷設を行う行動を“敷設 (laying down)”と定義し、フェロモン・トレイルを発見し、誘引された後にPreyを発見しフェロモン・トレイルの再敷設を行う行動を“強化 (reinforcing)”と定義する。強化が行われることは、エージェントが環境から情報を取得し、その情報に対応したことを示し、フェロモン・コミュニケーションが成立したことを示す。本研究では、敷設・強化回数をフェロモン・コミュニケーションのパフォーマンスの評価値としてカウントする。

4.2 シミュレーション結果

エージェントの初期位置をランダムに変更して20分間(12,000step)のシミュレーションを10回行った。図4にエージェント数:10体のときのシミュレーション例を示す。市松模様の平面は、実験フィールドを示す。実験フィールドの左下にNest, 右上にはPreyが存在し、この環境内でエージェントは行動する。また、実験フィールドの鉛直方向軸は、式(3)で示すフェロモン量 A_p を表現している。 $t=0$ [min] (図4:0min)は、計算機シミュレーションの初期状態であり、エージェントは実験フィールドにランダムに配置される。 $t=5$ [min] (図4:5min)では、エージェントがフェロモン・トレイルを敷設しているのが分かる。 $t=10, 15$ [min] (図4:10, 15min)では、エージェント群がフェロモン・トレイルを強化し、 $t=5$ [min]に比べてフェロモン・トレイルが強化されていることが分かる。最終的に、 $t=20$ [min] (図4:20min)ではフェロモン・トレイルが大きく強化され、エージェント群が相互にフェロモン・コミュニケーションしていることが分かる。

図5に計算機シミュレーションの結果を示す。縦軸は敷設・強化回数の平均を示し、横

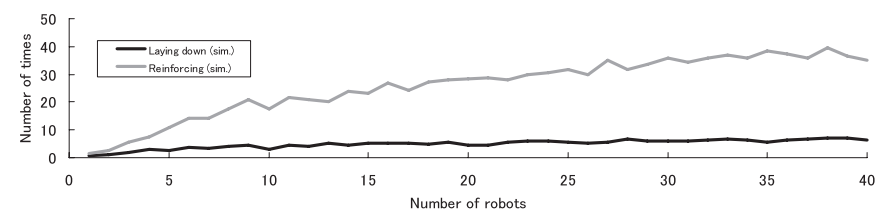


図5 エージェント数の増加と敷設・強化回数の関係
Fig. 5 Relationship between the number of agents and the number of “laying down” and “reinforcing” times.

軸はエージェント (ロボット) 数を表している。黒の実線は敷設回数の平均、灰色の実線は強化回数の平均の計算機シミュレーション結果を示す。図5に示されるように、エージェント数の増加にともない、強化回数 (フェロモン・コミュニケーション回数) は敷設回数と比較して大きく増加することが分かった。そして、投入とコミュニケーション回数 (強化回数) はエージェント数に比例せず、エージェントを多数投入したとしてもコミュニケーション回数は単純増加しないことが分かる。また、エージェント数が1-10程度でも十分にフェロモン・コミュニケーションを実現できることを確認できた。

5. ロボット群の構成

提案した群行動アルゴリズムの妥当性とフェロモン場を用いたコミュニケーション方法の効果を実機を用いて検証するために、ARGOS-01 (図6参照) と呼ばれるロボット群を開発した。ロボットは、2つの車輪と4つのキャスタを持つ。車輪はそれぞれ独立に回転し、

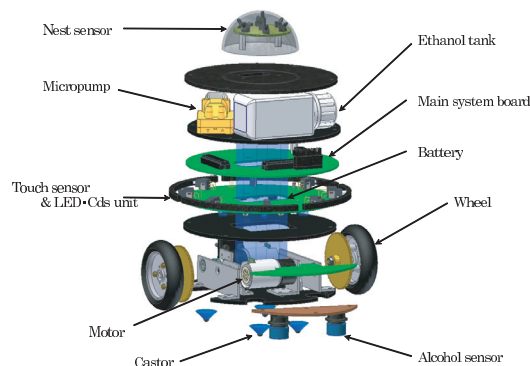


図 6 ARGOS-01 の構成図
Fig. 6 Construction of ARGOS-01.

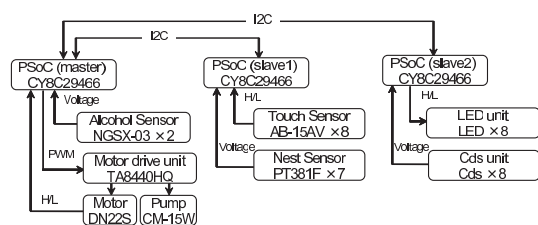


図 7 ARGOS-01 のシステム概略図
Fig. 7 System diagram of ARGOS-01.

平坦な環境を自由に移動することができる。また、ロボットは、ボディ直径 150 [mm]、高さ 195 [mm]、重量 1.26 [kg]、速度 0.1 [m/s] である。

ロボットのシステム構成を図 7 に示す。ロボットは 3 つのマイクロ・コンピュータ、合計 5 つの回路基板上で構成され、Nest センサ、フェロモンセンサ、接触センサ、受光センサとフェロモン・トレイル敷設機構を有する。全システムは、1 つのマスタ、2 つのスレイブで構成され、マスタ・スレイブ間の通信は、I²C で行われる。以下に各センサと機構の構成・概略を述べる。

・Nest センサ

本研究では、Nest の代用として赤外線電球を実験フィールドから高さ 600 [mm] の場所に設置し実験フィールドに赤外線照射することによって、計算機シミュレーションと同様に半

径 300 [mm] の Nest を実現した。Nest センサは最上層にあり、半球面上に取り付けられた 7 つの赤外線フォトトランジスタ（以下 IR-PT）で構成される。Nest 方向検知用に IR-PT が水平面から仰角 30° の位置に等間隔に 6 つ配置され、それぞれの計測値を AD 変換し、それらの値の最大値を参照することでロボット自身が Nest 方向を判断する。また、Nest への到着検知用に IR-PT が半球上の頂点（水平面から 90°）の位置に 1 つ配置されている。ロボットが Nest に十分接近し、すべての IR-PT 内でこの IR-PT の値が最大ならば Nest に到着したと判断される。

・フェロモンセンサ

フェロモンの代用にエタノール (C₂H₅OH) を用い、昆虫の触覚の代用に日本セラミック株式会社製のアルコールセンサ (NGSX-03) を用いる。図 6 に示すように、アルコールセンサはロボット底面に 2 つ搭載されている。左右のアルコールセンサの反応からフェロモン・トレイルの位置を推定する。

・接触センサ・受光センサ

ロボットは、本体の周囲に接触スイッチを持つ。接触スイッチが接触を検知したとき、ロボットは接触対象が発光しているを判断する。接触相手が発光していれば Prey、発光していなければ接触相手を（他ロボット・壁）と判定する^{*1}。

・フェロモン・トレイルの敷設機構

フェロモン・トレイル敷設のための機構を設計した。ロボットにエタノールタンクを搭載し、マイクロ・ポンプによって排出し、実験フィールドにトレイルを敷設する。フェロモン・センサとしてのアルコール・センサは、エタノールを知覚しフェロモン・トレイル追従するために用いられる。

6. ロボット群実験

6.1 ロボット群実験設定

計算機シミュレーションと同様に実験フィールドのサイズを 1,800 [mm]×1,800 [mm]、Nest 半径を 600 [mm]、Prey 半径を 160 [mm] とし、実験フィールドの対角に設置した。また、投入ロボット数は 1, 2, 3, 4, 7, 10 体とし、それぞれ 10 回（合計 60 回）の実験を行った。

まず、実験環境に適切なフェロモン濃度を調べるために、フェロモン・トレイルの追従行動の予備実験を行った。低濃度エタノールを用いると、フェロモンの持続時間は上がる

*1 Prey は LED により発光する。

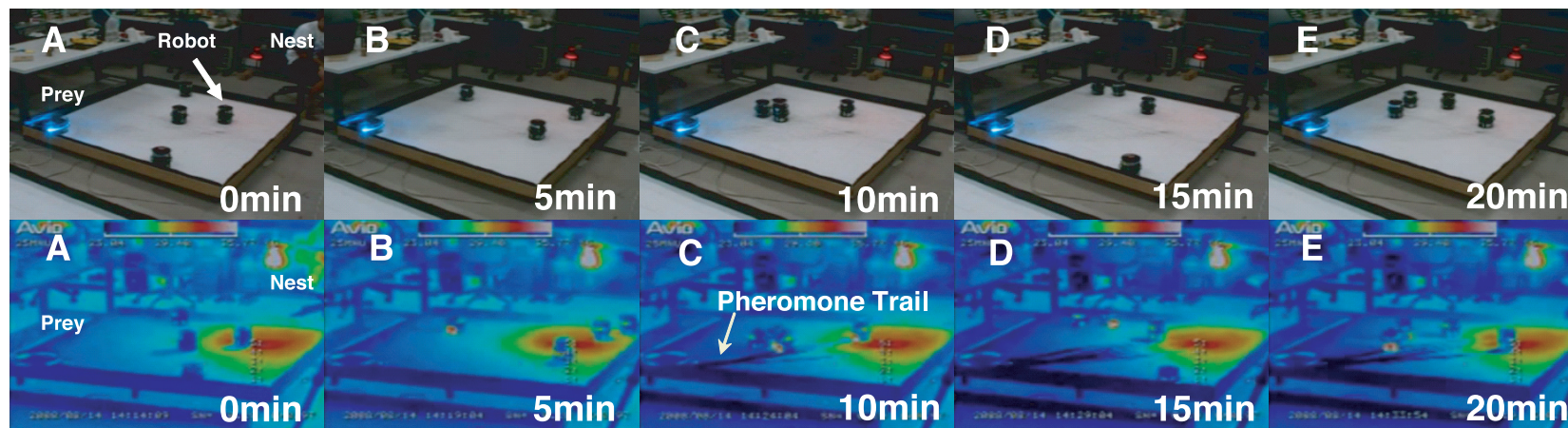


図8 ロボット数4体のときの実験環境の温度分布
Fig.8 Snapshots of experimental results for 4 robots.

が、アルコールセンサが十分にフェロモンを検出できず、追従エラーが発生した。高濃度エタノールを用いると、アルコールセンサがフェロモンを検出するものの、フェロモンの持続時間が短く、情報が環境に継続して残らなかった^{*1}。試行錯誤の結果、エタノール濃度を40%に設定し、フェロモン・トレイルの持続時間を計算機シミュレーションと同様に5分程度保つことに成功した。

6.2 ロボット群実験結果

ロボットの初期位置をランダムに定め、20分間実験し、環境の状態とロボットの振舞いを観測した。図8に、ロボット数を4体としたときの通常のカメラで撮影した画像とサーモグラフィで計測（エタノールが存在する点では気化熱の影響で周辺より温度が低くなることを利用）した $t = 0, 5, 10, 15, 20$ [min]のときの実験環境の温度分布を示す^{*2}。 $t = 0$ [min]（図8：A, A'）では、実験者がロボットを実験フィールドに設置した初期状態であり、環

境中にフェロモン場は生成されていない。 $t = 5$ [min]（図8：B, B'）においても、環境に変化はなくロボット群はPreyを探索している。 $t = 10$ [min]（図8：C, C'）では、群れはトレイルの敷設を行う。複数体がフェロモン場を強化することによって $t = 15$ [min]（図8：D, D'）のようにフェロモン場のフェロモンが濃くなっていることが分かる。最終的に、 $t = 20$ [min]（図8：E, E'）では、ロボット群はフェロモン・トレイルを敷設・強化することによってフェロモン・コミュニケーションを行っていることが分かる。

図9に、ロボット数を10体としたときの通常のカメラで撮影した画像とサーモグラフィで計測した $t = 0, 5, 10, 15, 20$ [min]のときの実験環境の温度分布を示す。図8：A, A'と同様に、 $t = 0$ [min]（図9：A, A'）では、実験者がロボットを実験フィールドに設置した初期状態であり、環境中にフェロモン場は生成されていない。 $t = 5$ [min]（図9：B, B'）では、群れはトレイルの敷設・強化を行いフェロモン・コミュニケーションを始めている。 $t = 10$ [min]（図9：C, C'）、 $t = 15$ [min]（図9：D, D'）では、群れはトレイルの強化を進め、フェロモン・コミュニケーションを促進している。最終的に、 $t = 20$ [min]（図9：E, E'）では、ロボット群は4体のときよりも多くフェロモン・トレイルを敷設・強化することによってフェロモン・コミュニケーションを行っている。

実機の増加にともなう敷設回数・強化回数を図10に示す。縦軸は敷設・強化回数の平均

*1 100%のエタノールではフェロモン・トレイルの追従可能な時間は1 [min] 未満。

*2 本実験では、Nestには赤外線電球を用いており、実験中はフィールド表面温度が上昇する。特に、Nest直下付近は放射熱によって温度が上昇し、サーモグラフィでは白く表示されるが、ロボットはNestセンサ頂上の赤外線受光素子によってNestを検出している。サーモグラフィによって白く表示されている部分がNestになっているわけではないことに注意しておく。

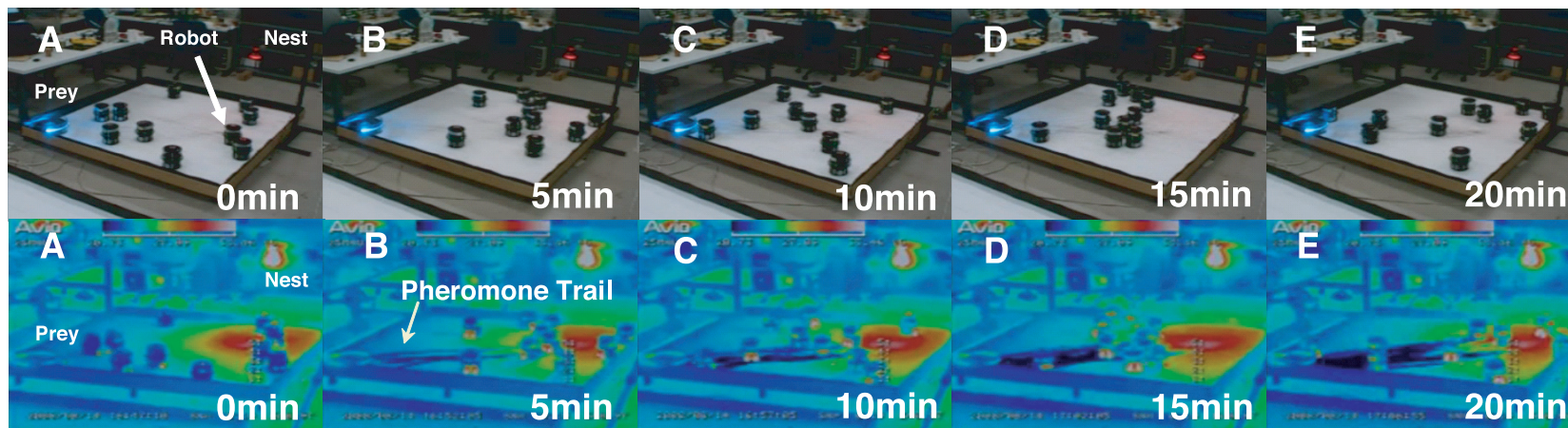


図9 ロボット数 10 体のときの実験環境の温度分布
Fig. 9 Snapshots of experimental results for 10 robots.

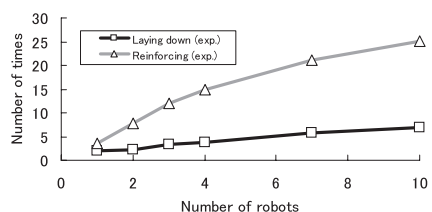


図10 ロボット数の増加と敷設・強化（コミュニケーション）回数の関係
Fig. 10 Relationship between the number of robots and the number of “laying down” and “reinforcing” times.

を示し、横軸はロボット数を表している。黒・灰色の実線は、それぞれ実機実験における敷設回数の平均、強化回数の平均を示す。計算機シミュレーション実験と同様にロボット数の増加にともなってコミュニケーション回数が増加する振舞いが観測された。この結果は、計算機シミュレーション結果と同様の傾向があり、計算機シミュレーションの妥当性も検証された。計算機シミュレーションと実機実験の結果の差異については、次章で詳しく解説する。

7. 議 論

エージェント数：1-10 体における計算機シミュレーション結果と実機実験結果を図 11 に示す。縦軸は敷設・強化回数の平均を示し、横軸はエージェント・ロボット数を表している。黒・灰色の実線は、それぞれ計算機シミュレーションの敷設・強化回数を示す。また、黒・灰色の破線は、それぞれ実機実験の敷設・強化回数を示す。

計算機シミュレーション結果と比較して実機実験のフェロモン・トレイルの敷設回数が多い原因として、計算機シミュレーションと実機実験の差が考えられる。計算機シミュレーションでは“Prey 接触後に Nest 方向を検出し、Nest 方向へ回頭後に Nest 方向へ移動する”という行動を行わせている。しかし、この行動を実ロボットで行わせると Prey に接触した状態で回頭し、ロボットを破損することが多々発生した。そのため、実ロボットでは一定距離（10 cm 程度）後進してから Nest 方向の検出、フェロモン・トレイル敷設・強化を行わせることとした。この設定では、フェロモン・トレイルと Prey の間に隙間が生じ、ロボットがフェロモン・トレイルを追従してきたにもかかわらず Prey 直前（数 cm）でフェロモン・トレイルを見失うという問題が生じた。この隙間を埋めるために Prey を発光させ、ロボットが直前で Prey を見失うことを防いでいる。つまり、実機実験において、Prey は計

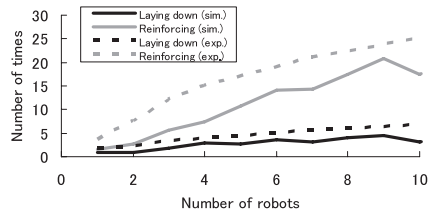


図 11 計算機シミュレーション結果と実機実験結果の比較 (Prey 半径: 160 [mm])

Fig. 11 Comparison of simulation and experiment results (Radius of prey: 160 [mm]).

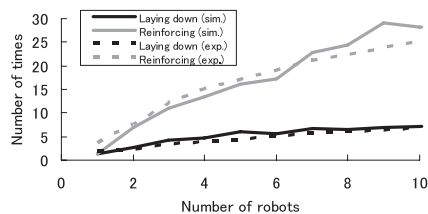


図 12 計算機シミュレーション結果と実機実験結果の比較 (Prey 半径: 260 [mm])

Fig. 12 Comparison of simulation and experiment results (Radius of prey: 260 [mm]).

算機シミュレーションよりもロボットが発光を検出する範囲 (10 cm 程度) だけ半径が大きくなっていると解釈することができる。そのため、計算機シミュレーション実験に比べて実機実験のフェロモン・トレイル敷設回数が増加していると考えられ、敷設回数の増加が強化回数の増加をもたらしていると考えられる。

上述の議論を考慮し、Prey 半径を 10 [cm] 増加させて Prey 半径を 26 [cm] としたときの計算機シミュレーション結果と実機実験結果の比較を図 12 に示す。縦軸は敷設・強化回数の平均を示し、横軸はエージェント・ロボット数を表している。黒・灰色の実線は、それぞれ計算機シミュレーションの敷設・強化回数を示す。また、黒・灰色の破線は、それぞれ実機実験の敷設・強化回数を示す。

図 12 が示すように、計算機シミュレーション結果と実機実験結果は、ほぼ同様の結果であった。実機実験に合わせ、Prey 半径を 10 [cm] 大きくしたため、エージェント群が Prey を発見する機会が増加し、フェロモン・トレイルの敷設回数が図 11 に比べて増加している。その結果、前述の議論にあるようにフェロモン・トレイルの強化回数が増加したものと考えられる。

本シミュレーション・実機実験における、フェロモン・トレイルの敷設・強化回数の和は、

Prey に接触した回数であり、それはすなわち採餌回数である。この個体数と採餌回数の関係は、非線形性を有しており、Sugawara らもその特性を報告している⁷⁾。Sugawara らの実験システムでは、仮想フェロモン場を用いておりフェロモン・トレイルの蒸発速度に関する操作を行うことができる。パラメータに蒸発係数を与えて実験を行っており、蒸発係数を操作すると採餌回数が増加することを報告している。

実世界でフェロモン・コミュニケーションを行うロボット群を開発するにあたって、エタノール溶液の濃度によるトレード・オフ問題が存在する。高濃度エタノール溶液は、シグナル強度（センサの電圧値）は高いが、持続時間が短い。低濃度エタノール溶液は、シグナル強度は低いが、持続時間が長い。このトレードオフ問題は、実際の化学物質を用いなければ現れなかった問題であり、現実の蟻においても同様にフェロモン・コミュニケーションするうえでフェロモンの混合比を調整していることを示唆する研究も複数報告されている^{20)–24)}。また、Sugawara らは、フェロモン・トレイルの物理的な条件を変化させることで群れのパフォーマンスが変化することを指摘している。我々の研究でも、フェロモン混合比を変化させることによってコミュニケーション回数が増加することが分かっている²⁵⁾。活動フィールドのサイズ、エージェント数が決定されれば最大のパフォーマンスを発揮するフェロモン濃度が存在する可能性がある。また、環境変化に対してフェロモン濃度を適応的に変化させ、コミュニケーションのロバスト性を確保する行動も可能であると考えられる。

8. 結 論

本研究では、我々はフェロモン・トレイルを用いて情報の共有を行うロボットのコミュニケーション方法に注目し、それを実ロボットで実現することを考えた。フェロモン・トレイルを用いたコミュニケーションは、化学・可塑・間接・局所的な特徴を有する。その特徴を活かした蟻の振舞いに基づいて、フェロモンを用いるロボット群の運用を考慮し、衝突アルゴリズムを含めた行動アルゴリズムを提案した。

計算機シミュレーションにより、群行動アルゴリズムと主体・客体間接触処理の妥当性を検証し、実機実験を行った。計算機シミュレーション実験の結果、提案したアルゴリズムでフェロモン・トレイルを敷設し複数回にわたって強化することが観測された。そして、計算機シミュレーション結果を基に、実機を開発し実機実験を行った。実機実験の結果、ロボット群においてもフェロモン・トレイルを敷設し複数回にわたって強化（コミュニケーション）することが観測された。この結果は、ロボット群においてフェロモン・コミュニケーションが実現したことにほかならない。また、本研究の成果は、ACO などで研究されている「多

エージェントが環境に揮発性のある情報を残す」という最適化手法の実ロボット群による実世界での実現可能性を示す。

今後の課題は、フェロモン・トレイルを用いて他個体と情報共有し、実際に Prey を群れとして運搬することである。また、ロボット群が社会性昆虫に見られるような作業分担や分業¹⁾を創発するメカニズムについて考察する。

謝辞 本研究は、日本サイプレス株式会社からデバイスと開発環境の提供を受けました。

参 考 文 献

- 1) エドワード・O・ウィルソン：社会生物学，新思索社 (1999)。
- 2) Karlson, P. and Butenandt, A.: Pheromones (Ectohormones) in Insects, *Annual Review of Entomology*, Vol.4, pp.39–58 (1959)。
- 3) 松香光夫，大野正男，北野日出男，後閑暢夫，松本忠夫：昆虫の生物学，玉川大学出版部 (1992)。
- 4) 鹿取廣人，斎賀久敬，篠原彰一，河内十郎，鳥居修晃，下條信輔，杉本敏夫，金城辰夫，丹野義彦，安藤清志，末永俊郎：心理学，第2版，東京大学出版会 (1996)。
- 5) Drigo, M., Caro, G. and Gambardella, L.: Ant Algorithms for Discrete Optimization, *Artificial Life*, Vol.5, No.2, pp.137–172 (1999)。
- 6) Dorigo, M. and Stützle, T.: *Ant Colony Optimization*, Bradford Books (2004)。
- 7) Sugawara, K., Kazama, T. and Watanabe, T.: Foraging behavior of interacting robots with virtual pheromone, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, Vol.3, pp.3074–3079 (2004)。
- 8) Nishinari, K., Sugawara, K., Kazama, T., Schadschneider, A. and Chowdhury, D.: Modeling of self-driven particles: Foraging ants and pedestrians, *Physica A*, Vol.372, pp.132–141 (2006)。
- 9) 下山 勲，神崎亮平：生物型マイクロマシン，バイオメカニズム学会誌，Vol.22, No.4, pp.152–157 (1998)。
- 10) Purnamadajaja, A.H. and Russell, R.A.: Guiding robots' behaviors using pheromone communication, *Autonomous Robots*, Vol.23, No.2, pp.113–130 (2007)。
- 11) Kube, C.R. and Bonabeau, E.: Cooperative Transport by Ants and Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.30, No.1-2, pp.85–101 (2000)。
- 12) Groß, R., Tuci, E., Dorigo, M., Bonani, M. and Mondada, F.: Object transport by modular robots that self-assemble, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2006)*, pp.2558–2564 (2006)。
- 13) 安藤 繁，田村陽介，戸辺義人，南 正輝 (編)：センサネットワーク技術，第1版，東京電機大学出版局 (2005)。
- 14) Brahim-Belhouari, S., Bermak, A., Shi, M. and Chan, P.: Fast and Robust Gas Identification System Using an Integrated Gas Sensor Technology and Gaussian Mixture Models, *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol.5, No.6, pp.1433–1444 (2005)。
- 15) Dorigo, M., Bonabeau, E. and Theraulaz, G.: Ant Algorithms and Stigmergy, *FUTURE GENERATION COMPUTER SYSTEM*, Vol.16, No.8, pp.851–871 (2000)。
- 16) Hölldobler, B. and Wilson, E.: *The ants*, The Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, Massachusetts (1990)。
- 17) 車谷浩一：蟻コロニーにおける協調採餌行動のマクロモデル (1) —単純モデルにおけるシミュレーションとモデル生成，人工知能学会誌，Vol.15, No.5, pp.829–837 (2000)。
- 18) 中道義之，有田隆也：フェロモン・コミュニケーションの起源に関する進化シミュレーション，数理モデル化と問題解決シンポジウム論文集，Vol.2004, No.12, pp.51–58，社団法人情報処理学会 (2004)。
- 19) Hangartner, W.: Spezifität und Inaktivierung des Spurpheromons von *Lasium fuliginosus* Latr. und Orientierung der Arbeiterinnen im Duftfeld, *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, Vol.57, pp.103–136 (1967)。
- 20) Evershed, R., Morgan, E. and Cammaerts, M.: 3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine, the trail pheromone from the venom gland of eight species of (*Myrmica*), *Insect Biochemistry*, Vol.12, pp.383–395 (1982)。
- 21) Calenbuhr, V., Chrétien, L., Deneubourg, J.-L. and Detrain, C.: A model for osmotropotactic orientation II, *Journal of theoretical Biology*, Vol.158, pp.395–407 (1992)。
- 22) Attygalle, A. and Morgan, E.: Trail pheromone of the ant (*Tetramorium caespitum*) L., *Naturwissenschaften*, Vol.70, pp.364–365 (1983)。
- 23) Billen, J., Beeckman, W. and Morgan, E.: Active trail pheromone compounds and trail following in the ant (*Atta sexdens sexdens*) (Hymenoptera, Formicidae), *Ethology, Ecology and Evolution*, Vol.4, pp.197–202 (1992)。
- 24) Janssen, E., Übler, E., Bauriegel, L., Kern, F., Bestmann, H., Attygalle, A.B., Steghaus-Kovac, S. and Maschwitz, U.: Trail pheromone of the ponerine ant (*Leptogenys peuqueti*) (Hymenoptera: Formicidae): A multicomponent mixture of related compounds, *Naturwissenschaften*, Vol.84, pp.122–125 (1997)。
- 25) Fujisawa, R., Dobata, S., Kubota, D., Imamura, H. and Matsuno, F.: Dependency by Concentration of Pheromone Trail for Multiple Robots, *Proc. 6th International Conference on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, pp.283–290 (2008)。

(平成 20 年 8 月 21 日受付)

(平成 20 年 10 月 8 日再受付)

(平成 20 年 10 月 29 日採録)



藤澤 隆介

昭和 55 年生。平成 18 年 4 月電気通信大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻博士後期課程入学。群行動アルゴリズム，群ロボット，群知能等の研究に従事。2008 年度情報処理学会第 71 回数理モデル化と問題解決研究会プレゼンテーション賞を受賞。



今村 光

昭和 59 年生。平成 19 年 4 月電気通信大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻博士前期課程入学。群行動アルゴリズムを用いた群ロボットの研究・開発に従事。



橋本 敬

昭和 42 年生。平成 8 年 3 月東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了。同年 4 月理化学研究所脳科学総合研究センター基礎科学特別研究員。平成 11 年 4 月北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教授となり現在に至る。複雑系，進化言語学の研究に従事。日本進化学会等の会員。学術博士。



松野 文俊

昭和 32 年生。昭和 61 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学，神戸大学，東京工業大学を経て，平成 15 年から電気通信大学（知能機械工学科）教授となり，現在に至る。主に，ロボティクス・制御工学・レスキュー学の研究に従事。1993 年度システム制御情報学会論文賞，2001 年度・2006 年度計測自動制御学会論文賞，2001 年度同学会武田賞，2006 年度船井情報科学振興賞等を受賞。IEEE，日本機械学会，日本ロボット学会等の会員。工学博士。