

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

1:電気通信大学 2:北陸先端科学技術大学院大学

概要: 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。我々は蟻の振る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。実機実験結果から、フェロモン・トレイルを敷設し複数回に渡って強化(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。

キーワード:フェロモン・コミュニケーション, 群ロボット, 自律分散システム

Development of Multi-Robots Communicating by Pheromone Trail

Ryusuke FUJISAWA¹, Hikaru IMAMURA¹, Takashi HASHIMOTO²
and Fumitoshi MATSUNO¹

1:University of Electro-Communication

2:Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: 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. We consider the problem that “How do the swarm robots communicate using the pheromone trail?”. 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.

Keywords: Pheromone communication, swarm robotics, distributed autonomous system

1 はじめに

1.1 研究背景

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。この情報は、環境に一様に分布しておらず、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。

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行う研究として、Dorigo による Ant Colony Optimization (ACO) がある [2, 3]。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。この最適化手法は、以下のステップを経る。

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

解の経路が短ければ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、短い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。

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

本研究では、(A) について言及する。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多数の個体で構成される群れにとって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[4]やNishinariら[5]によるプロジェクター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。

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。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。蟻コロニーにおいては、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、コロニー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[6]。

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[7]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・追跡の3つの状態¹で構成する。前提条件として、全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Fig. 1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。Fig. 1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。

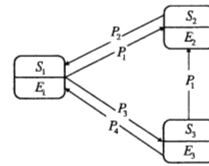


Fig. 1: フェロモン・コミュニケーションのための群行動アルゴリズム

内部状態 (State)

S_1 : 探索¹, S_2 : 誘引², S_3 : 追跡³

知覚標識 (Perceptual cue)

P_1 : Prey との接触, P_2 : Nest への到着, P_3 : フェロモンの存在, P_4 : 時間経過

作用標識 (Effector cue)

E_1 : ランダムウォーク, E_2 : フェロモン・トレイル敷設⁴, E_3 : フェロモン・トレイル追従⁵

2.2 主体・客体間接触処理

各ロボットがフェロモン・トレイルを生成する機能を有する群れでは、フェロモン・トレイル上にロボットが誘引される。その結果、多くのロボットがトレイルに集まり、渋滞が発生する。車谷[7]の研究は、マクロモデル⁶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[4]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生じる。そこで本研究では、ロボットは自身の幅の1/10程度のフェロモン(アルコール)トレイルを敷設することとし、トレイル上でロボッ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。

エージェントが客体との接触を知覚したときの行動をTable 1に示す⁷。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 , S_3 , S_1 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

¹Preyに関する情報を持たない

²Preyの位置に関する情報を持つ

³Preyの方向の情報のみを持ち、距離の情報は持たない

⁴フェロモンを分泌しながらNestへ移動

⁵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

⁶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

⁷状態が同じエージェント同士が接触した場合でもこの規則に従う。

表 1: 衝突後の行動選択テーブル

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

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。

3 シミュレーション・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。エタノールは、初期状態 (S_1) 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。

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 [8] 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。

$$\Delta F_p(x, y, t) = \begin{cases} Q_p & \text{If a } S_3 \text{ agent is} \\ & \text{on the grid}(x,y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 Q_p は実際の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} 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・センサの取り付け角は進行方向から $\pi/6$ に搭載されている。そして、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。

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 1800[mm]×1800[mm] とする。実験フィールド上の Nest と Prey は対角に設置する。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。各パラメーターは、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・トレイルを検出不能になるまでの時間を 5 分とした。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 (12000 step) のシミュレーションを 10 回行った。Fig.2 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。 $t = 0[\text{min}]$ (Fig. 2-0 min) 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。 $t = 5[\text{min}]$ (Fig. 2-5 min) 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わかる。 $t = 10, 15[\text{min}]$ (Fig. 2-10, 15 min) では、エージェント群がフェロモン・トレイルを強化し、 $t = 5[\text{min}]$ に比べてフェロモン・トレイルが強化されていることがわかる。最終的に、 $t = 20[\text{min}]$ (Fig. 2-20 min) 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わかる。

Fig. 3 に計算機シミュレーションと実験の結果を示す。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。

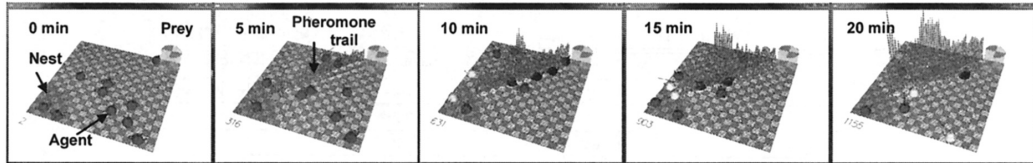


Fig. 2: エージェント数: 10 体のときのシミュレーション実行例

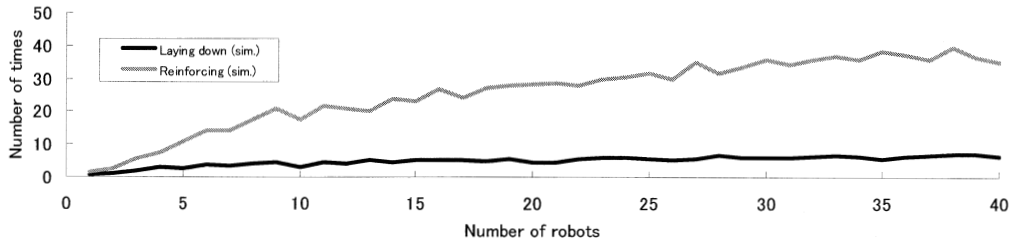


Fig. 3: エージェント数の増加と敷設・強化回数との関係

す。Fig. 3 に示されるように、エージェント数がの増加に伴い、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わかる。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

5.1 基本構成

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 (Fig. 4 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つのキャスターを持つ。車輪はそれぞれ独立に回転し、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。

ロボットは3つのマイクロ・コンピュータ、合計5つの回路基板で構成され、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。

5.2 フェロモン・トレイルの敷設・追従

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。S₂ の状態でフェロモン・トレイルを見失った場合は、Fig. 1 に示すように P₄ (時間経過) を知覚標識に S₁ (初

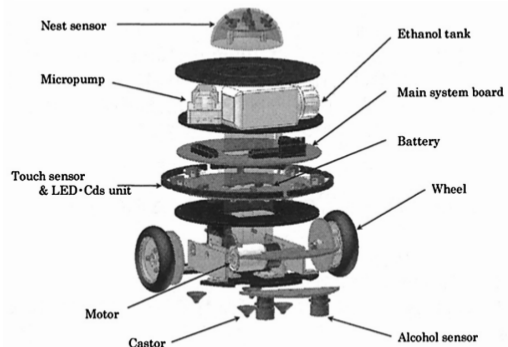


Fig. 4: ARGOS-01 の構成図

期状態) に状態を遷移させ E₁ (ランダムウォーク) をはじめる。

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 [9]。この行動を模倣するため、アルコールセンサを車体の底面に2つ搭載した。Fig. 5 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。ロボットの進行方向右(左)側のセンサがアルコールを検知すると左(右)車輪を駆動させる。そして、ロボットは右(左)へ移動する。この行動アルゴリズムをロボットに実装した。

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 1800[mm]×1800[mm]、Nest と Prey は実験フィー

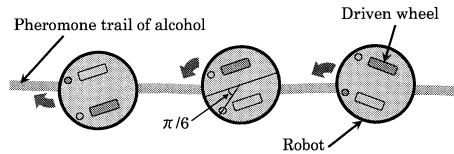


Fig. 5: フェロモン・トレイル上のロボットの行動

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。

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る舞いを観測した。Fig. 6 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 $t = 0, 5, 10, 15, 20[\text{min}]$ のときの実験環境の温度分布を示す⁸。 $t = 0[\text{min}]$ (Fig. 6-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。 $t = 5[\text{min}]$ (Fig. 6-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。 $t = 10[\text{min}]$ (Fig. 6-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 $t = 15[\text{min}]$ (Fig. 6-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わかる。最終的に、 $t = 20[\text{min}]$ (Fig. 6-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わかる。

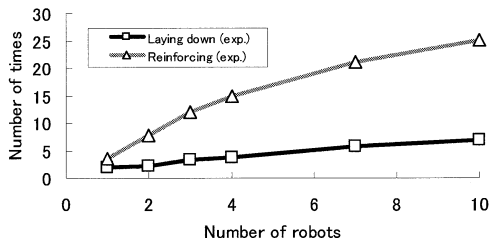


Fig. 7: ロボット数の増加と敷設・強化(コミュニケーション)回数の関係

実機の増加に伴う敷設回数・強化回数を Fig. 7 に示す。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伴ってコミュニケーション回数が増加する振る舞いが観測された。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

⁸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。

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 Fig. 8 に示す。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・トレイルの強化回数が多い原因として、アルコールセンサの特性が考えられる。計算機シミュレーション中では、トレイルが敷設されてから5分間他個体が追従できるように設定している。実機実験を行うにあたり、敷設後5分間のフェロモン・トレイルの追従を実現するために40%のエタノール溶液を予備実験結果から選択した。予備実験では、5分間の追従性能を満足する結果を得たが、5分間経過後も不完全ながらフェロモン・トレイルを追従していた。この振る舞いには不確定な要素が多数あり(例: センサ特性、実験フィールド上の風など)、本論文の計算機シミュレーションではモデルに導入していない。この実験における一定時間経過後の不完全な追従性能が計算機シミュレーション実験と実機実験の差異をもたらしたと考えられる。

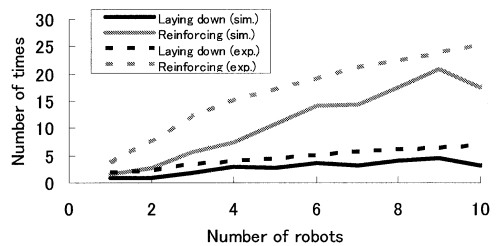


Fig. 8: 計算機シミュレーション結果と実機実験結果の比較

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、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上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 [10, 11]。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わかっている [12]。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。

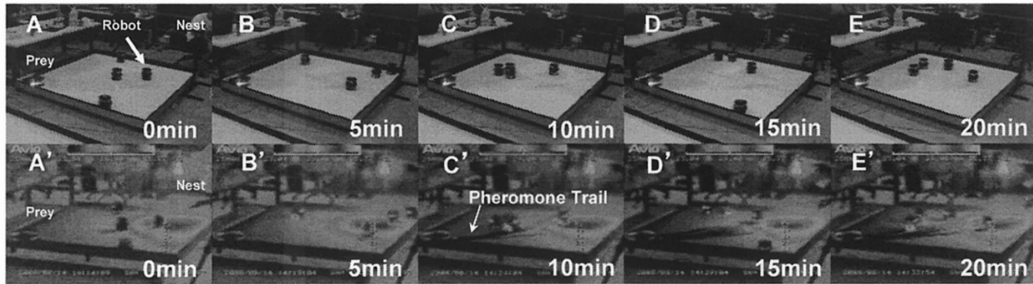


Fig. 6: ロボット数: 4 体のときの実験環境の温度分布

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る舞いに基づいて、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渡って強化することが観測された。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渡って強化（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他ならない。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。

参考文献

- [1] エドワード・O・ウィルソン. 社会生物学. 新思泉社, 1999.
- [2] M. Drigo, G.D. Caro, and L.M. Gambardella. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, Vol. 5, No. 2, pp. 137–172, 1999.
- [3] M. Dorigo and T. Stützle. *Ant Colony Optimization*. Bradford Books, 2004.
- [4] K. Sugawara, T. Kazama, and T. Watanabe. Foraging behavior of interacting robots with virtual pheromone. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, Vol. 3, pp. 3074–3079, 2004.
- [5] K. Nishinari, K. Sugawara, T. Kazama, A. Schadschneider, and D. Chowdhury. Modeling of self-driven particles: Foraging ants and pedestrians. *Physica A*, Vol. 372, pp. 132–141, 2006.
- [6] B. Hölldobler and E.O. Wilson. *The ants*. The Belknap Press of Harvard University Press Cambridge, Massachusetts, 1990.
- [7] 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.
- [8] 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, 第 2004 巻, pp. 51–58. 社団法人情報処理学会, 2004.
- [9] W. Hangartner. 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.
- [10] J. Billen, W. Beeckman, and E.D. Morgan. 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.
- [11] E. Janssen, E. Übler, L. Bauriegel, F. Kern, H.J. Bestmann, A. B. Attygalle, S. Steghaus-Kovac, and U. Maschwitz. Trail pheromone of the ponerine ant (*Leptogenys peuqueti*) (hymenoptera: Formicidae): a multicomponent mixture of related compounds. *Naturwissenschaften*, Vol. 84, pp. 122–125, 1997.
- [12] R. Fujisawa, D. Kubota, H. Imamura, T. Hashimoto, and F. Matsuno. Dependency by concentration of pheromone trail for multiple robots. In *Proc. Sixth International Conference on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, 2008. ACCEPTED.