Vol.2011-MPS-83 No.9
2011/5/17

フェロモン・コミュニケーションによるロボット群の協調運搬

藤澤 隆介[†1] 今村 光[†2] 松野 文俊[†3]

蟻は，フェロモン用いてコミュニケーションすることが知られており，その社会は高度に洗練されている．このコミュニケーションは，フェロモン・コミュニケーションと呼ばれている．群れは，個体の内部状態を遷移させることによって総体の状態を複雑に変化させることができ，外的な問題に対して柔軟に対応する．本論文では，我々はロボット群に焦点を当て，そのロボット群が化学物質を用いて協調運搬を実現する．新規に設計した群行動アルゴリズムによって現実のロボット群は餌を蟻の巣に模した場所まで協調運搬する．我々は，ロボット群が餌を発見して巣に持ち帰るまでの時間（タスク解決時間）に注目し実験をした．その結果，環境中の個体密度が低いときにフェロモン・コミュニケーションが有効に働くことを発見した．

Cooperative transportation of robot swarm using pheromone communication

Ryusuke Fujisawa,[†1] Hikaru Imamura[†2] and Fumitoshi Matsuno[†3]

Ants communicate with each other using pheromones, and their society is highly sophisticated. When foraging, they transport cooperatively with interplay of forces. The swarm is robust against changes in internal state, and shows flexibility in dealing with external problems. In this brief paper, we focus on the robot swarm that achieves cooperative transportation making use of ethanol as a substantial artificial pheromone. We also propose a swarm system with a newly developed algorithm that enables cooperative transportation of real robots. They will transport food to the nest analogous to the behaviour of a swarm of ants. Emphasis will be placed on the systematic task solution process. As the result, we found when low individual density, pheromone communication is effective.

1. はじめに

1.1 群れとは

一般に群れとは自律分散系であり，群れを構成する個体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[1)]．各個体は自律的に活動しているため，周囲の状況に応じて自己の行動を自律的に決定する．それらの個体間の局所的な相互作用により大局的な群れの振る舞いが創発される．したがって，群れを形成するためには個体間の相互作用が必須であり，実際に群れを形成する生物は相互作用を実現するために個体間でコミュニケーションを行っている．また，群れはその内部の変化に適応する特性であるロバストネス，群れ外部の変化に適応する特性である柔軟性を有する[2)]．

1.2 蟻のフェロモン・コミュニケーション

自然界で群れを形成する生物の一例として蟻や蜜蜂などの社会性昆虫が知られている[3)]．社会性昆虫は揮発性を有する化学物質であるフェロモンを用いてコミュニケーションし，群れを構成する．特に，蟻はフェロモン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，複雑な秩序を持った社会を形成することが知られている[3)–5)]．フェロモンとは，生物が体内で生成して体外に分泌後，同種の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[6)]．本研究では蟻のフェロモンを用いた採餌活動に着目する．ある個体が餌場を発見すると，その個体は餌 (Food) を巣 (Nest) へ持ち帰りながら環境に道標フェロモンを敷設する．この行動により，巣と餌の間には道標フェロモンの道（フェロモン・トレイル）が形成される．巣に残っていた個体や，餌を探索中の個体がフェロモン・トレイルを発見すると，彼らはフェロモン・トレイルを追従することで餌場にたどり着く．そして，餌がなくなると各個体はフェロモンを敷設しなくなるため，フェロモン・トレイルは揮発・拡散・消失し群れに対して不要な情報が消失する．この手法は簡素であるものの，フェロモンの特性を活かし環境に情報を残すことで，高度な個体間のコミュニケーションを行っている．環境を介してコミュニケーションする利点として，1) 局所的・分散的情報管理，2) 情報交換のための自己増殖効果，が挙げられており，自律分散ロボットシステムに

†1 八戸工業大学
Hachinohe Institute of Technology
†2 株式会社デンソー
DENSO
†3 京都大学
Kyoto University

© 2011 Information Processing Society of Japan

とって適切なコミュニケーション方法といえる[7].

餌場では，1 つの餌に複数の個体が取り付く場合がある．各個体は，餌の収集という群れの活動目的を互いに共有しているため，巣の方向へ力を相互作用し協調運搬を引き起こす．各個体の行動規範は単純でありながら，彼らは群れとして高度な活動を行う．したがって，蟻の群れによるフェロモン・コミュニケーションや力の相互作用による協調運搬の創発をロボティクスに適用することは有益であると考えられる．タスク解決に要求される機能をロボット群に与えれば，個体間の相互作用によりタスク解決のための解が導出されることは大きな利点である．また，ロボットに群れを形成させることで群れの特性である柔軟性とロバストネスを獲得できるとすれば非常に有益である．

1.3 関 連 研 究

フェロモン・コミュニケーションの研究として，仮想的にフェロモン場を実現した研究と実際に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[8] らによる V-DEAR，Garnier ら[9] による Alice がある．この研究ではフィールド上で行動するロボットの位置に連動させてフェロモン場をプロジェクタで実験フィールドに投影することで蟻の採餌活動を実現している．数式モデルに基づいた数値演算による仮想フェロモンを用いているため，環境の様々なパラメータを容易に設定することができる．群れの振る舞いを検証する上では非常に優れているが，実環境を完全に再現することは困難であると考えられる．さらに，プロジェクタで投影できる範囲内でなければロボット群は活動を行うことができないという問題もある．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[10] 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いない．Purnamadjaja ら[11] は，2 種類の化学物質と化学センサを用いてロボット群を誘引させることに成功している．しかし，この研究ではフェロモンを介して個体間の相互作用が考慮されておらず，Leader - Follower の関係で集団の制御を行うことを主眼にしている．したがって，このシステムは機能分化されたシステムと言えよう．

力の相互作用の研究として，ロボット群による協調運搬の研究がある．Großら[12] は，Swarm-bots と呼ばれるロボット群を開発した．各ロボットには把持機構が搭載され，それをうまく操ることで他個体との結合を行う．互いの身体を結合することで協調し，溝や段差の走破にも成功している[13]．ロボットや運搬対象物が発光することで，各ロボットは運搬対象を認識し，力の相互作用による協調運搬も実現している[13]．Kube ら[14] もまた，運搬対象物体を介した個体間の力の相互作用による協調運搬に成功した．運搬対象物体を発光させ，ロボットは自身の受光素子で運搬対象を認識し，互いに力の相互作用を行っている．しかし，これらの研究は力の相互作用による群行動のみに着目しており，本研究で用いるフェロモン・コミュニケーションのような力以外の個体間相互作用は考慮されていない．

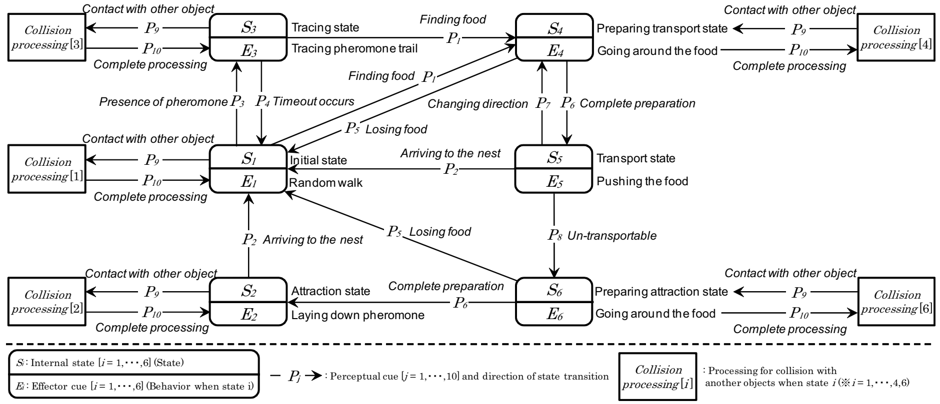

図 1 フェロモン・コミュニケーションを用いて協調運搬をするための群行動アルゴリズム
Fig. 1 Algorithm for cooperative transportation using pheromone communication

1.4 研究の目的

本研究では蟻の群行動を模したフェロモン・コミュニケーション[1] による他個体誘引および力の相互作用による餌の協調運搬アルゴリズムを提案する．開発したロボット群を用いて実験を行い，協調運搬におけるフェロモン・コミュニケーションの有効性を実証し，コミュニケーションに必要な個体密度を議論する．

2. 群行動アルゴリズム

2.1 状態遷移規則による群行動

藤澤ら[1] によって設計された他個体誘引アルゴリズムを拡張させ，他個体誘引を用いた協調運搬アルゴリズムを設計する．決定性有限オートマトンで記述したアルゴリズムを**図 1** に示す．本アルゴリズムは，ロボット群がフィールド内に存在する Food を探索し，発見した Food を Nest まで運搬することを想定している．本アルゴリズムは 6 個の内部状態 (State): S_i $(i = 1, \cdots, 6)$，10 個の知覚標識: P_j $(j = 1, \cdots, 10)$，そして 6 個の作用標識: E_i $(i = 1, \cdots, 6)$ を設定する．図 1 に示すように，内部状態が S_i のロボットは行動 E_i を選択する．S_i のロボットが P_j $(j = 1, \cdots, 8)$ を知覚すると，ロボットは自己の内部状態を

© 2011 Information Processing Society of Japan

S_k へ状態遷移させる．また，S_i のロボットが P_9(客体との接触) を知覚すると衝突処理を行い，P_{10}(衝突処理完了) を知覚すると E_i を再開する．以下に内部状態・知覚標識・作用標識を具体的に説明する．

内部状態 (State)

S_1：探索, S_2：誘引, S_3：追従, S_4：運搬準備, S_5：運搬, S_6：誘引準備

知覚標識 (Perceptual cue)

P_1：Food 発見, P_2：Nest への到着, P_3：フェロモンの存在, P_4：一定時間経過, P_5：Food 見失, P_6：回り込み完了, P_7：運搬方向修正の必要性, P_8：運搬不可能, P_9：客体との接触, P_{10}：衝突処理完了

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, E_3：フェロモントレイル追従 E_4：Food 回り込み, E_5：運搬, E_6：Food 迂回

各ロボットの初期位置はフィールド内にランダムに配置される．ロボットの初期内部状態は S_1 であり，ランダムウォーク (E_1) を行う．まず，State が S_1 の際に Food を発見した場合のアルゴリズムについて説明する．ランダムウォーク中にロボットが Food を知覚すると知覚標識 P_1 が現れ，State が S_1 から S_4 へ遷移する．State が S_4 に遷移すると Food の運搬方向と反対側の面へ回り込み (E_4) を開始する．ロボットは回り込み中に Food と Nest の方向を検知している．ロボットから見て Nest の方向と Food の方向が同じ方向（Nest とロボットを結ぶ直線上に Food が存在する状態）となるまでロボットは回りこみを続ける．そして，回り込みに成功すると知覚標識 P_6 が現れ，State が S_4 から S_5 へ遷移する．ロボットは Nest 方向に力を発生し，運搬 (E_5) を開始する．また，S_4 において回り込みに失敗した場合，知覚標識 P_5 が現れ，再びランダムウォーク (E_1) を開始する．

次に，State が S_1 の際にフェロモン・トレイルを発見した場合のアルゴリズムについて説明する．ランダムウォーク中にロボットがフェロモン・トレイルを知覚すると知覚標識 P_3 が現れ，State が S_1 から S_3 に遷移し，フェロモン追従 (E_3) を行う．この際，フェロモン・トレイルから外れてしまうと，知覚標識 P_4 が現れ，再びランダムウォーク (E_1) を開始する．そして，S_3 において，知覚標識 (P_1) が現れると，S_4 へ遷移する．S_4 における行動は，ランダムウォーク中に Food を発見したときと同様である．

次に，State が S_5 の際のアルゴリズムについて説明する．ロボットは一定時間 Nest 方向に力を発生し，運搬 (E_5) を試みる．一定時間内に Food が動かなかった場合，知覚標識 P_8 が現れ，State が S_5 から S_6 へ遷移する．状態遷移直後は，ロボットと Nest の間に Food が存在し，Nest 方向へフェロモン・トレイルを敷設することができない．そのため，ロボットは Food を迂回 (E_6) しながら，フェロモン・トレイルが敷設可能な場所へ移動する．S_6 において Food を見失った場合は P_5 が現れ，S_1 へ状態遷移する．それに対し，フェロモン・トレイルが敷設可能な場所への移動完了を知覚すると知覚標識 P_6 が現れ，S_2 へ状態遷移する．S_2 へ状態遷移すると，Nest へ向かってフェロモン・トレイル敷設 (E_2) を開始する．その後，Nest へ接近すると知覚標識 P_2 が現れ，ロボットは Nest への到着を知覚し，State が S_2 から S_1 へ遷移する．それに対し，S_5 において一定時間内に Food が動いた場合，Food 周辺にはロボットが複数存在し，それぞれが Nest 方向に力を発生している．つまり，協調運搬が創発されている状態であり，ロボット・Food・Nest が直線上に並ぶ運搬軌道が望ましい．しかし，力の相互作用の結果，運搬軌道を外れてしまう場合がある．その際，知覚標識 P_7 が現れ，State が S_5 から S_4 に遷移し，ロボットは軌道修正を行うために回り込み E_4 を開始する．そして，力を発生し続けた結果，知覚標識 P_2 が現れると，ロボットは運搬完了を知覚し，State が S_5 から S_1 へ遷移する．

2.2 衝突時の行動アルゴリズム

ロボットは，客体と積極的に衝突することによって外界を認識し，**表 1** のアルゴリズムに従って行動する．藤澤ら[1)] が導入したアルゴリズムに，ロボットの前・後の衝突を区別し，処理を行なうように拡張することでフェロモン・トレイル上でのロボットの渋滞を回避している．なお，協調運搬中は絶えず衝突が発生すると考えられるので，S_5(運搬) に関しては衝突処理をしていない．

3. 実機構成

図 2 は開発したロボット (ARGOS01) である．ロボットの仕様は以下の通りである；ボディ直径:150[mm]，高さ:195[mm]，重量:1.38[kg]，移動速度:0.1[m/s]．電源には Ni − MH バッテリ (7.2V 3900mAh) を使用する．バッテリーはロボットの中心に縦置きで搭載されている．ロボットには，Cypress Semiconductor 社製のマイクロコントローラ「PSoC CY8C29466」(以下マイコン) が計 4 枚搭載されている．I^2C バス・ラインで接続される 3 つのマイコンによって，センサ情報の取得や駆動部の制御を行う．残りのマイコンはデータ取得用の計算機へロボットの内部状態を無線送信する[*1]．

*1 この機能は，ロボットの内部状態の変化を観察し，群の行動を解析するために用いるだけであり，行動戦略には用いていないことに注意しておく．

© 2011 Information Processing Society of Japan

表 1 協調運搬のための衝突後の行動アルゴリズム
Table 1 Behavior selection of algorithm for cooperative transportation after collision

Collision processing	Contact position	Robot's behavior after contact with other object
Collision Processing[1]	front	rotation on-site after disengaging from contact point by reversing
	back	rotation on-site after disengaging from contact point by reversing
Collision Processing[2]	front	stop on-site
	back	disengaging from contact point by proceeding
Collision Processing[3]	entire circumference	disengaging from contact point by reversing
Collision Processing[4]	front	disengaging from contact point by reversing
	back	disengaging from contact point by proceeding
Collision Processing[6]	front	disengaging from contact point by reversing
	back	disengaging from contact point by proceeding

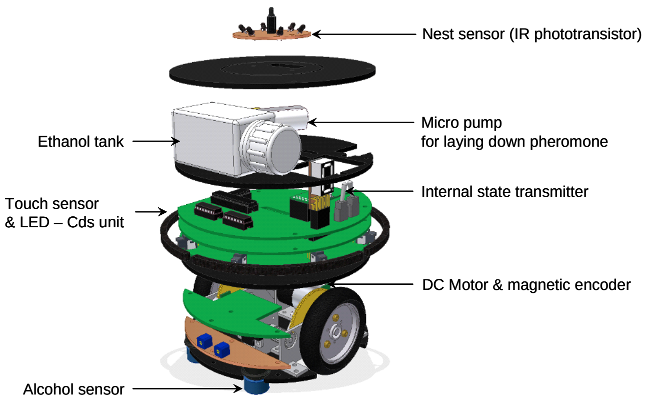

図 2 開発したロボット（ARGOS01）の構成図
Fig. 2 Construction of a developing robot (ARGOS01)

第 2 章で説明したアルゴリズムを実装するためには，10 個の知覚標識 (刺激): P_j $(j = 1, \cdots, 10)$ を知覚するセンサーと 6 個の作用標識 (行動): E_i $(i = 1, \cdots, 6)$ を実現する機構が必要になる．したがって，ロボットには, 以下に示すセンサと機構を搭載した. 1)Nest センサ (Nest 方向検知), 2) 接触センサ (衝突の検知), 3) 受光素子 (Food の検知), 4) エンコーダ (運搬判定), 5) アルコールセンサ (フェロモン検知), 6) フェロモン放出機構 (フェロモントレイル敷設).

Nest は赤外線ランプで構成されており，Nest センサに搭載した赤外線フォトトランジスタによって方向を検知する．衝突はロボットの側面方向に配置したプッシュスイッチによって検知する．Food の側面には LED を搭載しており，ロボットに搭載した受光素子が LED の光を検知することで Food を検知する．実験的に求めた知覚距離は 300[mm] 程度であった．運搬判定には駆動車輪の回転を検知するエンコーダを用いる．本研究ではフェロモンとしてエタノールを用いる．フィールド上に敷設されたエタノールを検知するためにアルコールセンサを搭載する．タンクにエタノールを充填し，マイクロポンプによってフィールドへのエタノールの放出を行う．

ロボットは大きく分けて 4 つの層で構成され，各層はスペーサで支持されている．第 1 層には，磁気式エンコーダを搭載した DC モーターで構成される駆動部，アルコールセンサ，エタノール吐出口が搭載されている．第 2 層には，ロボットのシステム基板，受光素子・接触センサが搭載されたセンサ基板，電源と無線送信用基板の計 3 枚の基板が搭載されている．第 3 層には，フェロモン放出機構のタンクとマイクロポンプが搭載されている．第 4 層には，Nest センサが搭載されている．

4. 実機実験

設計した群行動アルゴリズムをロボットに実装し，協調運搬におけるフェロモン・コミュニケーションの有効性の検証を行った．本研究で使用する実験フィールドの平面図を**図 3** に示す．フィールドの大きさは長さ 3600[mm]，幅 1800[mm] の四角形であり，四方を壁で囲まれた平坦な環境である．Food の大きさは半径 150[mm]，Nest の大きさは半径 450[mm] で

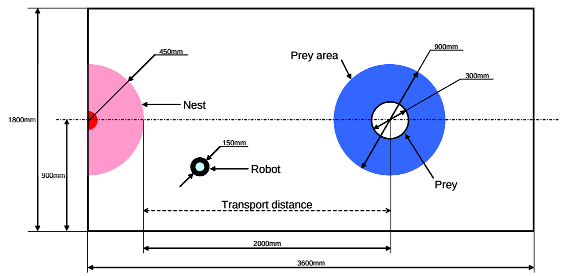

図 3 実験フィールドの簡易説明図
Fig. 3 Plane view of experimental field

© 2011 Information Processing Society of Japan

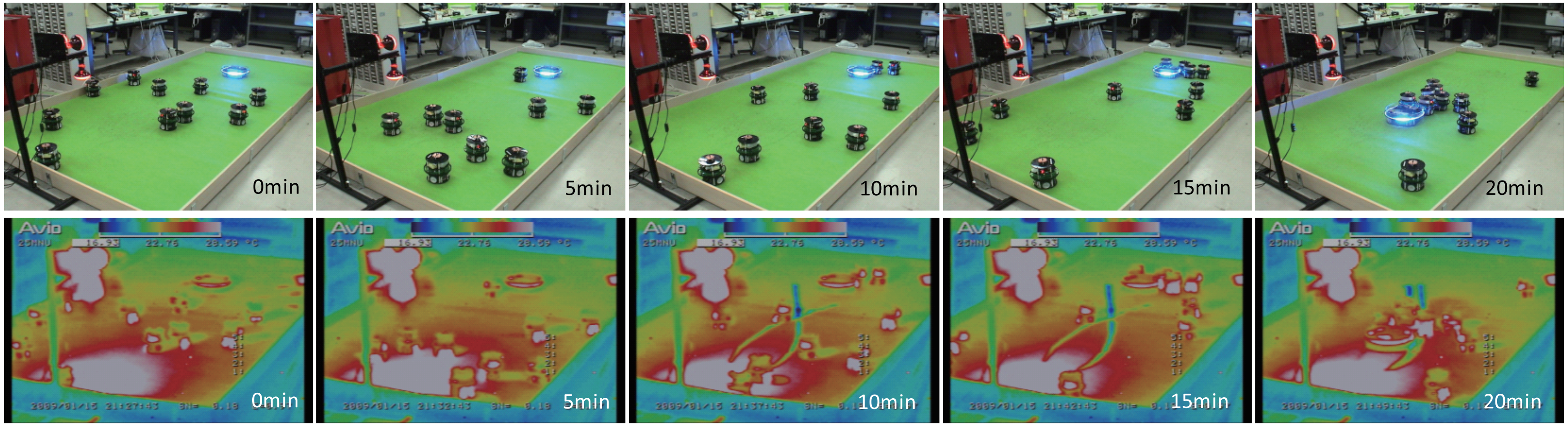

図 4 10 台のロボットによるフェロモン・コミュニケーションを用いた協調運搬．上図：通常のカメラ画像，下図：サーモグラフィによる熱画像
Fig. 4 Snapshots of experimental result by 10 robots using pheromone communication

ある．また，ロボットの Food 知覚可能範囲を考慮し，Food から距離径 450[mm] の範囲を Food エリアとした．Food エリアにロボットが入るとロボットは Food を発見し，Food の方向に向かって移動し，Food に接触し発見する．本研究では複数体のロボットによる Food の運搬を想定しているので，Food の重さを単体では運搬不可能な重さに設定する必要がある．そのため，予備実験を行ってロボット 3 体で運搬可能である重さ 3.58[kg] に設定した．Food の運搬距離は 2000[mm] とし，Food の中心が Nest に到達した時点でタスク解決とする．ロボットには，フェロモンの代わりにエタノール (100%) を搭載し，アルコールセンサから得られるセンサ値に閾値を設定することで調整を行ってロボットがフェロモン・トレイルを追従できる時間を 3 分程度になるように設定した．また，P_8(運搬不可能) を知覚するまでの時間を予備実験から 20[sec] と設定した．

ロボット数を 10 体としたときの実験結果を**図 4** に示す．上図は通常のカメラ画像であり，下図はサーモグラフィで撮影した画像である．エタノールの気化熱の影響でエタノール (フェロモン) が敷設された領域は温度が低くなるのでサーモグラフィで可視化できる．実験開始から 10[min] のとき，実験環境にフェロモン・トレイルが敷設されていることがわかる．20[min] のとき，ロボット群は協調して Food を Nest まで運搬している．実験の結果，ロボット群はフェロモン・トレイルを用いて協調運搬を行い，群行動アルゴリズムは意図した通りに働くことが実証された．次に，評価指標をタスク解決時間 (実験開始から Food を Nest まで運搬する時間) とし，フェロモンの有無がタスク解決時間に与える影響に関する検討を行なう．

4.1 フェロモン・コミュニケーションの有無

協調運搬を行なう上でフェロモン・コミュニケーションが有効であるかを検討するために実験を行った．フェロモン・コミュニケーションを用いる場合と用いない場合のタスク解決時間の平均 (実験数 10 回) を縦軸，ロボット数を横軸として表したグラフを**図 5** に示す．ロボット数が 4,7 体のとき，フェロモン・コミュニケーションを行うことでタスク解決時間 (Food を Nest まで運搬する時間) がフェロモン・コミュニケーションを行わない場合と比べて減じていることがわかる．この事実は，フェロモン・コミュニケーションが環境中にロボットが少ないとき (低ロボット密度時) には有効であることを示す．また，個体数が 10 体の高ロボット密度時にはフェロモン・コミュニケーションの有無がタスク解決時間短縮にそれほど影響していないことがわかる．これは，環境中に十分な数のロボットが存在した場合，フェロモン・トレイルが敷設される前に多くの個体が Food を発見し，運搬を開始するため，フェロモン・コミュニケーションを行う必要が薄れることを示唆している．

ロボット数が少ない場合 (ロボット数：4)，Food の発見可能性が低く，発見するまでに

© 2011 Information Processing Society of Japan

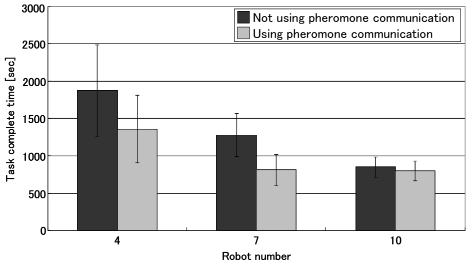

図 5 タスク解決時間（Food 発見から巣へ運搬するまでの時間）とフェロモン・コミュニケーションの有無の比較
Fig. 5 Experimental result of comparing cases using and not using pheromone communication

時間がかかる．フェロモン・コミュニケーションを行わない場合，運搬するのに必要な個体数が Food に取り付くのを完全にランダム・ウォークに依存するために運搬までに時間を要する．これに対して，フェロモン・コミュニケーションを行う場合は，運搬に必要な個体数を誘引によって集めることが可能になるためにフェロモン・コミュニケーションを行わない場合に比べて短時間で運搬を開始することができる．ロボット数が多い場合 (ロボット数：10)，環境中に十分な数のロボットが存在するため，群れは Food を容易に発見し，運搬を開始することができる．そのため，Food を運搬するまでの時間にフェロモン・コミュニケーションの有無の効果はあまり見られない．

5. 結　　論

第 4 章で述べたように，フェロモン・コミュニケーションによってタスク解決時間は短縮されている．特に，環境中の個体密度がそれほど高くない程度の冗長性をもつ場合にその傾向は顕著である (図 5)．これは，環境中に過剰 (超冗長) な個体数が存在しない場合でも，フェロモン・コミュニケーションを用いることで少ない個体数でタスクを実現しており，フェロモン・コミュニケーションが有効に働くことを示唆している．逆に，環境中の個体密度が高い場合は相互コミュニケーションに意味が無くなってくることが分かる．複数タスクを同時並列的に，あるいは時系列的に遂行する行動発現と群れの冗長度の関係，あるいはロバスト性・柔軟性と冗長性の関係を解明していくことは今後の課題である．

参　考　文　献

1) 藤澤隆介, 今村光, 橋本敬, 松野文俊. フェロモン場を用いて誘引を行うロボット群の開発. 情報処理学会論文誌　数理モデル化と応用, Vol.2, No.2, pp. 81–90, 2009.
2) Eric Bonabeau, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm Intelligence*. Oxford University Press, 1999.
3) エドワード・O・ウィルソン. 社会生物学. 新思索社, 1999.
4) 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.
5) 勝又綾子, 尾崎まみこ. アリのケミカルコミュニケーション. 比較生理生化学, Vol.24, No.1, pp. 3–17, 2007.
6) P. Karlson and A. Butenandt. Pheromones (ectohormones) in insects. *Annual Review of Entomology*, Vol.4, pp. 39–58, 1959.
7) 伊藤宏司（編）. 知の創発. NTT 出版, 2000.
8) 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.
9) S.Garnier, F.Tache, M.Combe, A.Grimal, and G.Theraulaz. Alice in pheromone land: An experimental setup for the study of ant-like robots. In *Proc. IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS2007)*, pp. 37–44, 1-5 April 2007.
10) 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.
11) A.H. Purnamadjaja and R.A. Russell. Guiding robots' behaviors using pheromone communication. *Autonomous Robots*, Vol.23, No.2, pp. 113–130, 2007.
12) M.Dorigo, E.Tuci, R.Groß, V.Trianni, T.H. Labella, S.Nouyan, C.Ampatzis, J.-L. Deneubourg, G.Baldassarre, S.Nolfi, F.Mondada, D.Floreano, and L.M. Gambardella. The swarm-bot project. In E.Sahin and W.M. Spears, editors, *Proc. Swarm Robotics: SAB 2004 International Workshop*, Vol. 3342, pp. 31–44. Springer Verlag, 2005.
13) F.Mondada, M.Bonani, A.Guignard, S.Magnenat, C.Studer, and D.Floreano. Superlinear physical performances in a swarm-bot. In MathieuS. Capcarrere, AlexA. Freitas, PeterJ. Bentley, ColinG. Johnson, and Jon Timmis, editors, *Proc. Advances in Artificial Life: 8th European Conference*, Vol. 3630, pp. 282–291. Springer Verlag, 2005.
14) C.R. Kube and E.Bonabeau. Cooperative transport by ants and robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.30, No. 1-2, pp. 85–101, 2000.

© 2011 Information Processing Society of Japan