

彷徨えるロボット

一群ロボットの自己位置同定

竹下 聡亮* 高田 宗樹** 平田 隆幸**

A Wandering Robot — Self-localization and Mapping of Swarm Robots —

Sosuke TAKESHITA*, Hiroki TAKADA** and Takayuki HIRATA**

(Received September 28, 2015)

Swarm intelligence has been attracted much attention of researchers in various fields. A swarm robot is one of the research fields of the swarm intelligence. In the study of the swarm robots, a number of small robots are used. Although individual robot ability is not so high, a colony of robots can achieve a complex task with co-operative work. The ant searches feeding area, and carries food to the nest with marking by pheromone. Other ants trace the pheromone and go to the feeding area. Many ants shuttle between the nest and the feeding area. The pheromone route between the nest and the feeding area is formed. Thus the route is confirmed and optimized. We focus on the swarm robot's self-localization and mapping in the exploration field.

Key Words : Wandering Robot, Swarm Robots, Self-localization and Mapping

1. はじめに

群ロボットは、自律分散システムによる群知能 (Swarm Intelligence) の研究分野の中の一つである^[1]. 群知能の研究とは、要素間の相互作用によって創発現象 (Emergence) が発生し、より高度な知的システムが現れることに注目したものである。群知能を構成するエージェントを抽象化した群知能の研究が、コンピュータ・シミュレーションによって多くなされている。さらに、実体をもつロボットを仮定した群ロボットの研究においても、コンピュータ・シミュレーションによるものが多く存在する。なぜなら、実際のロボットと環境との間に生じる相互作用が簡単に表現できるためである。しかし、現実の系を理想化および単純化したコンピュータ・シミュレーションによる研究だけでは不完全である。

コンピュータ・シミュレーションによる研究には、モデル化を行う過程で本質的な部分が欠落する危険性が常に存在する。群ロボットの研究において実機のロボットを使用することは、ロボットの身体性を含め、予想外の問題が生じる可能性があり、必要不可欠である^[2]。さて、群ロボットには、多数の小型ロボットが用いられる。個々のロボットの性能は一般的に高くはないが、相互作用し協調行動をとることにより、単体のロボットでは達成困難な仕事ができるという特徴がある。群ロボットの設計は自由度が大きいため、かえって設計が困難になる。

蟻や蜂などの社会性昆虫 (Social Insect) の行動をヒントにして、群知能の設計を行うという研究がなされている^[3]。例えば、蟻の群れの行動は、経路の最適化問題などに応用されている (ACO (Ant Colony Optimization) ^[4])。蟻は餌を見つけると、フェロモンを散布しながら巣へ帰り、仲間はそのフェロモンを辿ることで餌場へ向かう。多数の蟻が餌場と巣を行き来することで、自己組織的に巣と餌場間の運搬路の最適化が実現される。これは、自然界で観察される自律分散システムの典型的な例である。

* 株式会社 PFU

* PFU LIMITED

** 大学院工学研究科知能システム工学専攻

** Dept. of Human & Artificial Intelligent Systems

そこで、我々は社会性昆虫である「蟻」を手本とした小型ロボットを製作し、協調行動するロボットの研究を行っている¹⁵⁾。ここでは、巣-餌場間の餌運搬路形成と経路の最適化に焦点をあてて、実機を使った群ロボットの実験における問題点を検証していく。

さて、手本にした蟻の能力と小型ロボットの関係をみていこう。蟻は、移動距離を歩測によって行うことが知られている¹⁶⁾。我々のロボットは、駆動部にステッピングモータを使用しており、ステッピングモータの回転角度を正確に知ることができる。つまり我々のロボットも、歩測によって自己位置（移動距離と方向）を同定することができる¹⁷⁾。また、蟻は、餌場から巣に帰巣するときにフェロモンを散布することにより、仲間の蟻に餌場の情報を伝達する。我々のロボットも水筆用紙、水、ライトセンサを用いることによって擬似フェロモンを再現し、蟻コロニーにおけるフェロモンと同様なフェロモンを介した情報伝達を可能としている¹⁸⁾。

蟻コロニーを手本とした群ロボットによる餌場運搬経路実験を行ったときどのようなことがおこるのだろうか。ロボットが他のロボットや壁と衝突したとき、自己位置同定に誤差が生じる。自己位置同定に誤差が生じると、巣の方向および距離に間違っているため、餌場から正しく帰巣することが困難になる。さらに、間違ったフェロモンのマーキングが発生し、仲間のロボットは誤った場所に誘導されてしまうことになる。

自己位置同定の誤差や誤ったフェロモンルートを辿ることで、誤った情報が伝達され、彷徨うロボットが発生する。本研究では、彷徨えるロボットについてみていく。

2. 群ロボット

実験に使用した群ロボットを Fig. 1 に示す。ロボットは、高さ 166mm、直径 140mm の円筒形をしており、重量はバッテリー搭載時で 850g である。また、判別用 LED を増設したときのロボットの高さは、250mm である。ロボット後方には、水筆ペンを装着し、水筆用紙に疑似フェロモンである水を散布する。水筆ペンは、サーボモータにより制御され、必要時以外は筆先を上げている。センサ部としては、タッチセンサ、ライトセンサが挙げられる。タッチセンサは、車体前部に取り付けられており、壁などの障害物を認識し、回避するために用いている。ロボットの底部に搭載されたライトセンサは、赤外線 LED と光変調型フォト IC により構成されており、水筆用

紙の色の違いを認識する。制御系統は 4 つのマイコンから成るマルチ CPU システムを採用している。メイン CPU には、H8/3069F を使用し、マザーボードとして秋月電子通商 H8/3069F-USB ホストボードを用いている。このボードは、USB インターフェースを搭載しており、実験中のロボットの行動をログとして USB フラッシュメモリに記録することが可能である。また、ロボットは擬似フェロモン場を介したグローバルなコミュニケーションと、接触通信によるローカルなコミュニケーションを用いて、ロボット同士の意思疎通を行っている。

群ロボットには、次のような特徴がある。1) ロボット 1 台あたりの単価が安価であるため、多数のロボットを容易に製作できる。2) 複数のロボットが協調行動を行い、複雑な仕事を達成することが可能である（創発性）。3) 数台のロボットが故障しても群ロボット全体の仕事には影響を与えない（頑健性）。4) 用途を限定したロボットではないため、様々な作業を行うことができる（柔軟性）。

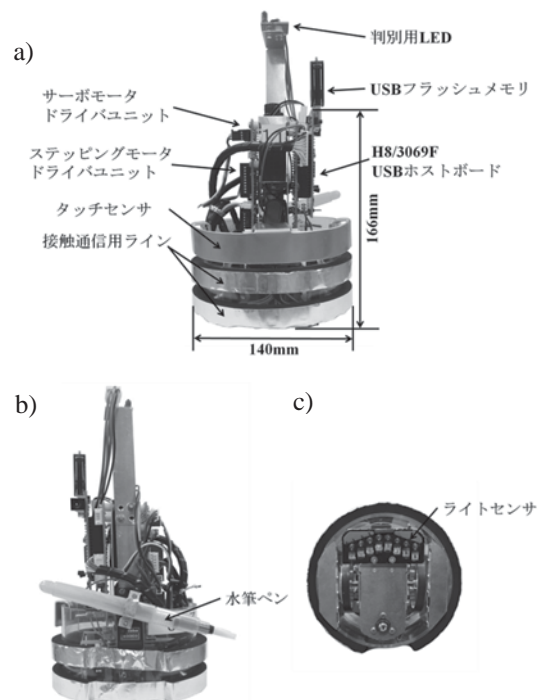


Fig. 1 実験に使用した群ロボット。a)は正面の写真、b)は背面の写真、c)は底面の写真を示す。

3. 群ロボットの行動アルゴリズム

群ロボットによる巣-餌場間の運搬路形成は、大きく分けて 3 つの段階で構成されている。群ロボットによる採餌行動実験の模式図を Fig. 2 に示す。ここでは、実験に用いた 3 つの行動アルゴリズムについてみていく。

- 1) 探索フェーズ：巣から発進したロボットが、餌場を探す。
- 2) 帰巣フェーズ：餌場に到達したロボットが、フェロモンを散布しながら巣に戻る。
- 3) フェロモントレースフェーズ：フェロモンを見つけたロボットが、フェロモンを辿る。

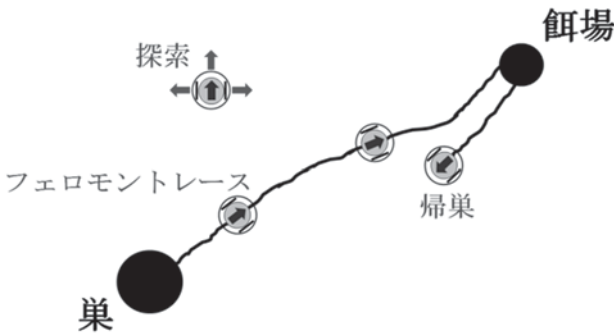


Fig. 2 群ロボットによる採餌行動実験の模式図。

3.1 探索

巣から出発したロボットは、餌場を見つけるまで前後左右の4方向から後方を除いた3方向重みづけランダムウォークによる餌場探索を行う。1ステップのロボットの移動距離は10cmとし、以下10cm移動することを1ステップとする（正方格子上の移動となる）。後方を除く理由は、1ステップ前の位置に戻らないようにするためである。

探索する空間を探索済み領域と未探索領域にロボット内部で分類（Mapping）し、未探索領域を優先的に探索することによって餌場発見の効率化を図る（ロボットの移動に誤差がない場合は、格子点の探索となる）。領域と格子についてみていく。220×220cmを11×11の121個の領域に分割する（Fig. 3）。1つの領域は20×20cmであり、Fig. 4に示すように4つの格子で形成されている。

ロボットは、正方格子を1ステップで1格子分移動し、領域を通過した際に探索済み領域として記録していく。過去に探索した領域を1、未探索の領域を0としてロボット内部のマップ情報を更新していく。ロボットは、Fig. 5に示すように現在の領域の正面および左右に存在する領域が探索済みか否かを確認し、未探索領域の方向へ移動するのを優先するような重み付けをしている。ここで、移動先として選択する確率についてみていく。前述のように1つの領域は4つの格子で形成されており、例としてFig. 6のようにロボットが移動した場合を考える。このとき領域Aにおいては、領域の1/4を探索したことになり、ロボットは探索済みの領域と記録する。これは、領域における残りの3/4を見落とすことにな

り、再度探索する必要がある。また、未探索の領域を探索済みの領域で囲むようにマップ情報が形成される場合、探索済みの領域に進む確率を0に設定することで領域Bに進むことができなくなってしまう。これらの問題を考慮して、未探索の領域を選択する確率をFig. 7のように設定している。

次に、ロボット間の相互作用（情報交換）についてみていく。ロボットは、接触通信ライン（1本の通信ラインとGNDから構成される）を他のロボットと同時に接触させることでお互いの情報を交換する接触通信システムを備えている^[9]。通信データは、情報の正確性確認のための Start bit: 4bits, End bit: 4bits, 通信内容として、フェロモンの発見フラグ: 1bit, 餌場の発見フラグ: 1bit, 餌場のx座標: 5bits, 餌場のy座標: 5bits, マップ情報（領域: 11×11）: 121bitsで、スタートビットとエンドビットを含め141bitsで構成される。フェロモンの発見フラグは、接触した相手ロボットがライントレース中か否かを判断するために用いる。また、餌場の発見フラグは、接触した相手ロボットが帰巣中か否かを判断するために用いる。交換したマップ情報は、内部マップと統合し、3方向重みづけランダムウォークに使用する。これは、お互いの探索済みの領域を教え合うことで未探索領域を少なくし、探索の効率化を図るものである。また、探索中のロボットは、接触通信によって餌場の情報（餌場: x座標, y座標）を受け取った後、餌場の座標に直線的に向かう。今回の実験では、取得した餌場の座標よりもフェロモンを優先するため、餌場の座標に到達するまでにフェロモンを発見した場合は、そのフェロモンをトレースする。トレース中にフェロモンを見失った場合は、見失った場所から、餌場の座標に直線的に向かう。

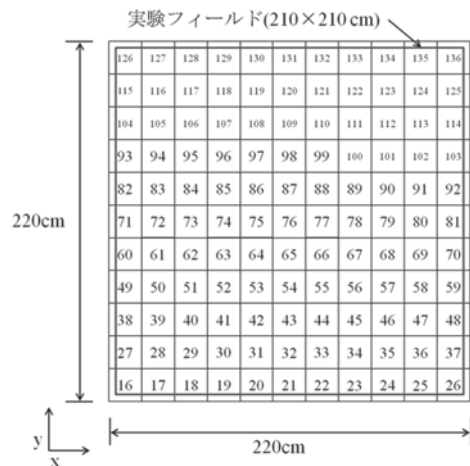


Fig. 3 220×220cmを11×11の領域に分割した模式図。実験フィールドは、210×210cmである。各領域の番号は、通信bitの配列の添字に対応して

いる。

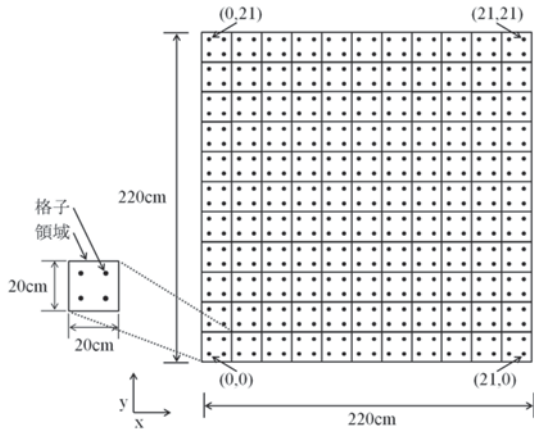


Fig. 4 格子と領域の関係を表す模式図. 1つの領域は4つの格子で構成されている. 座標は格子に対応している.

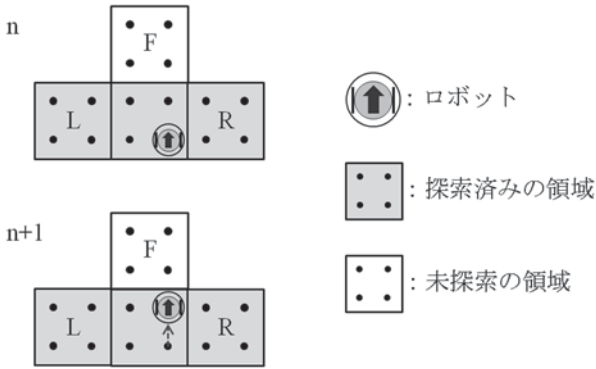


Fig. 5 ロボットが次に各方向に移動する確率を、領域の重み付けで決定する模式図. ロボットは、領域 F、領域 L および領域 R が探索済みか否かを確認し、未探索領域の方向を優先して、1ステップで1格子分移動する. 図中の n はステップ数を示す.

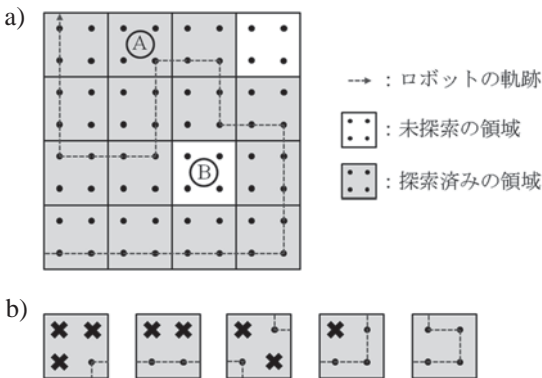


Fig. 6 ロボットが内部マップで記録する領域を示した模式図. a)は3方向重み付けランダムウォークによる探索の例, b)は探索済み領域のパターンを示す. 図中の×印は、ロボットが訪れていない格子を示す.

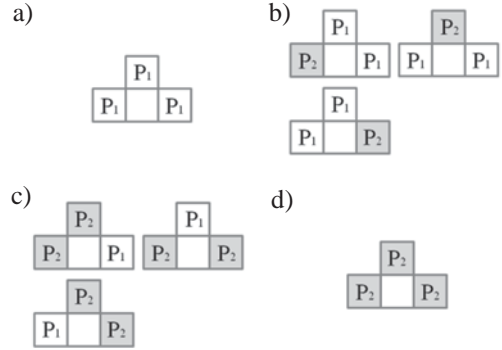


Fig. 7 3方向重み付けランダムウォークの進行方向として選択する確率. P_1 は未探索領域の方向を選択する確率, P_2 は探索済み領域の方向を選択する確率を示す. a)のとき $P_1=1/3$, b)のとき $P_1=9/20, P_2=1/10$, c)のとき $P_1=4/5, P_2=1/10$, d)のとき $P_2=1/3$ である.

3.2 帰巢

餌場に到達したロボットは、巣の方向に直線的にフェロモンを散布しながら帰巢する。また、帰巢中にフェロモンを見つけた場合は、フェロモンを散布しながらトレースを行う。トレース中のロボットがフェロモンを見失った場合は、その位置座標から再度巣の座標に直線的に帰巢する。巣に到達したかどうかはライトセンサの反応する個数によって判断する。ここでは、ライトセンサが同時に6個以上反応したとき巣と認識するようにする。内部マップに記録している巣の座標まで進んでも巣が発見できなかった場合は、巣を見失った後の行動として四角状螺旋行動を行う。四角状螺旋行動の模式図を Fig. 8 に示す。

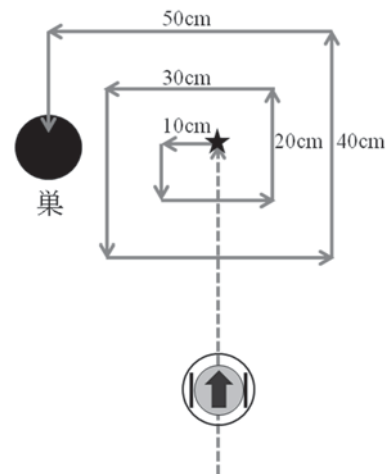


Fig. 8 ロボットが帰巢中に巣を見失った後の四角状螺旋行動の模式図. 点線は、巣の位置に向かい前進する行動を示す. 実線は、巣を見失った後の行動(四角状螺旋行動)を示す. 星印は、ロボットが記録している巣の位置を示し、実際の巣の位置は黒円を示す.

3.3 フェロモントレース

ロボットは、フェロモントレースと帰巢時に、搭載されている水筆ペンから擬似フェロモンを散布する。実験フィールドの床には水筆用紙が敷かれており、水に濡れると色が青灰色から黒色に変化する。変化した部分は、水の蒸発とともに元の青灰色に戻るという特徴がある。この色の変化をロボットの底部に搭載した8つのライトセンサで検出することで、水をフェロモンとして使用することができる。このフェロモン場は、時間が経過するとラインが細くなり、消えていくことから蟻のフェロモンの蒸発を再現している。また、視覚的にフェロモンを見ることが可能となり、フェロモン場が明瞭に観測できる。フェロモンルートはロボットの往復によって強化され、水の蒸発によって細く・薄くなり、その後消滅する。また、フェロモンは、ロボットの移動や衝突等を要因として途切れることがある。

過去の情報を次の行動に反映させるトレースアルゴリズムを用いることによって、消えてしまったフェロモンを補完し、フェロモンの途切れや、薄く・細くなった状況にも対応できるアルゴリズムが報告されている^[10]。トレースアルゴリズムの模式図を Fig. 8 に示す。ロボットが1ステップに進む移動距離は、2cm とする。図中の n は、ステップ数を示す。 θ_n は、ステップ数 n における θ を示す。 L_n は、ステップ数 n におけるライトセンサの反応を表し、 $f(L_n)$ には、256 パターンによってあらかじめ指定した角度でのトレースに用いた関数を利用する。トレースアルゴリズムの基本は、8つのライトセンサの中心のセンサが反応するように θ の角度を決定する。つまり、スムーズにトレースできている場合は、 θ は小さくなると考えられる。 $g(\theta_{n-1}, \theta_{n-2})$ は、 $|\theta_{n-1} - \theta_{n-2}|$ の大きさによりロボットが移動した軌跡が滑らかかどうかを判断し、さらに $\theta_{n-1} \cdot \theta_{n-2}$ の値の正負により、曲がりすぎか、曲がりきれていないかを判断する。 α の値は0.7から0.1刻みで増加させた1.3までの値の7つの重みで、 $\theta_{n-1} \cdot \theta_{n-2}$ の値が正の値であった場合は、ラインを曲がりきれていないので、 α の値は1以上の値となる。また、負の値であった場合の α は、1以下の値となる。つまり α の値は $|\theta_{n-1} - \theta_{n-2}|$ と $\theta_{n-1} \cdot \theta_{n-2}$ によって定める。 θ_{n-1} と θ_{n-2} と重み α の関係を Table 2 に示す。また、トレース中にフェロモンを見失った場合、その場で左右90度その場回転を行い、フェロモンの有無を確認する。フェロモンが存在した場合は、再びそのラインをトレースする。存在しない場合は、停止するように設定している。

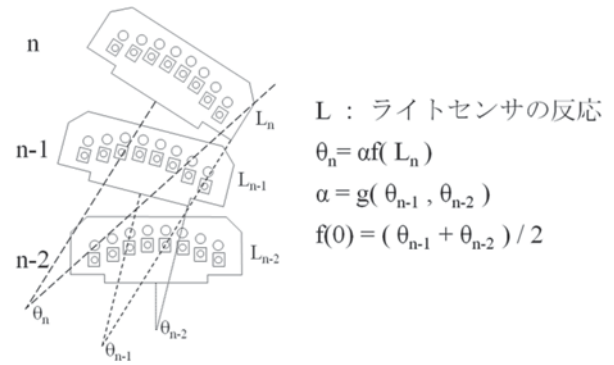


Fig. 9 過去の情報を次の行動に反映させるトレースアルゴリズムの模式図^[10]。

Table 2 Fig. 9 に示されたパラメータの表^[10]。

$g(\theta_{n-1}, \theta_{n-2})$		α
$\theta_{n-1} \times \theta_{n-2}$	$ \theta_{n-1} - \theta_{n-2} $	
+	0~15	1
+	16~30	1.1
+	31~45	1.2
+	46~	1.3
-	0~15	1
-	16~30	0.9
-	31~45	0.8
-	46~	0.7

θ_{n-1} と θ_{n-2} と重み α の関係。

4. 群ロボットによる採餌行動実験

4.1 実験概要

実験は、5台のロボットを用いる。ロボットは、全台巣から出発し、初期方向を前方とする。各ロボットの出発時間は、全台を巣から同時に出発させることはできないため、30秒の時間差をおいてスタートさせる。巣にロボットが存在していた場合、十分なスペースが空き次第、次のロボットを発進させる。各ロボットは、3章で述べたアルゴリズムに従い行動する。ロボットは、初期座標(巣の座標)を(7,7)として与えられており、餌場の位置座標は入力されていない。実験フィールドの設定を Fig. 10 に示す。実験フィールドには、2か所の黒円があり、大きい黒円(直径:20cm)を巣、小さい黒円(直径:15cm)を餌場に見立てている。210×210cmの実験フィールドは、高さ約18cmの木製の壁に囲まれており、その内側の床に水筆用紙が敷かれている。ロボットは物理的に壁の外に出ることができず壁の中を行動する。また、実験フィールド上には実験の様子を観察するために高さ約2.5mの位置にビデオカメラを設置している。

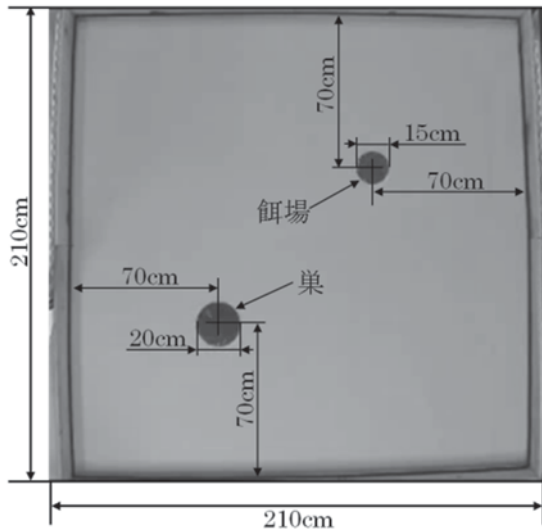


Fig. 10 実験フィールドの設定. 直径 20cm の黒円を巣, 直径 15cm の黒円を餌場とする. ロボットの出発位置は巣とし, 初期方向は前方とする.

4.2 実験結果

実験によって得られたパターンを 3 つ示す.

パターン 1 は, 1 台目がフェロモンを散布しながら帰巢した. しかしながら, 帰巢中に 2 台目のロボットの水筆ペンにタッチセンサが反応し, ロボットが後退した. このことにより, ロボット内部では, 巣の座標に到達した時点で帰巢が完了していなかった. そこで, 巣を見失った後の行動として四角状螺旋行動を行った. しかし, 散布されたフェロモンが重なることで, 黒色の範囲が広くなりフェロモンを巣と誤認識し停止した. 4 台目は, 探索中にフェロモンを発見し, 辿ることでフェロモンルートを強化しながら, 餌場を発見した (Fig. 11). しかし, 帰巢する際に動作不良が生じ, その場足踏みのような動作を行った. ロボット内部では, 巣の座標に到達した時点で餌場から移動しておらず, 餌場を巣と誤認識し停止した (Fig. 12).

パターン 2 は, 3 台目がフェロモンを散布しながら帰巢し, 巣を見失ったが四角状螺旋行動を行うことで巣に到達した. 3 台目が帰巢を開始した時点で, 1 台目のライトセンサに誤作動が生じ, フェロモンが散布されていない場所でフェロモントレースを行った (Fig. 13). この誤作動により散布されたフェロモンを 4 台目がトレースしたことにより, フェロモントレースを続け, 行動が制限された (Fig. 14). 2 台目は, 3 台目が散布したフェロモンを発見することができず, フェロモンは蒸発した. 4 台目は, 3 台目が帰巢中に不具合により餌場付近で動作停止した.

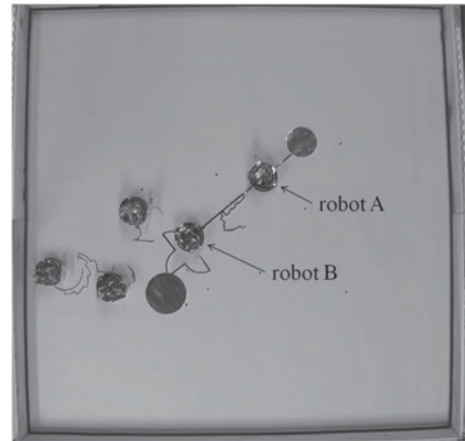


Fig. 11 散布されたフェロモンをトレースするロボット. robot A は, フェロモンを辿ることによって運搬路を強化しながら餌場に向かっている. robot B は, 四角状螺旋行動を行っている.

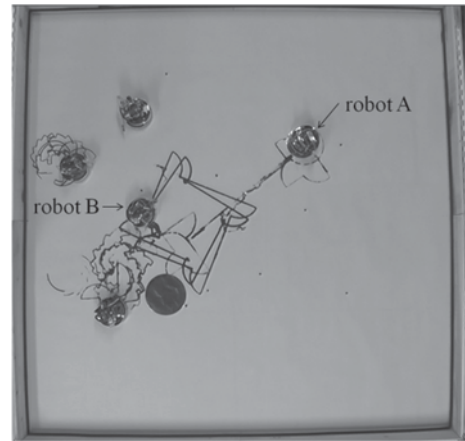


Fig. 12 散布されたフェロモンを巣と誤認識し, 停止したロボット. robot A は, 散布されたフェロモンを辿ることで餌場に到達した. robot B は, 散布されたフェロモンを巣と誤認識し停止した.

パターン 3 は, 1 台目がフェロモンを散布しながら巣の方向に帰巢した. しかし, 帰巢中に発進開始した 5 台目のロボットの水筆ペンにタッチセンサが反応し, ロボットが後退した. 帰巢する方向は正しかったが, 前進距離が不十分であった. そこで, 巣の座標に到達した際に, 四角状螺旋行動を行った. ここで, 3 台目のロボットに着目すると, ランダムウォークにより餌場に到達し, 帰巢を開始した. 四角状螺旋行動中の 1 台目のロボットと帰巢中に接触したことにより, 3 台目のロボットの方向に大きな誤りが生じた (Fig. 15). 帰巢する方向に大きなずれが生じたが, 四角状螺旋行動により帰巢することに成功した. 5 台目は, 3 台目が散布したフェロモンをトレースした (Fig. 16). フェロモンを辿ったが餌場

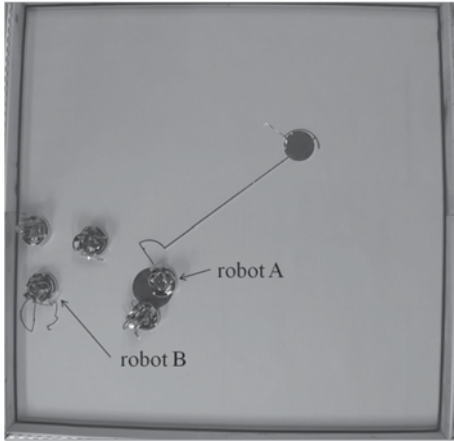


Fig. 13 誤ったフェロモンを散布するロボット. robot A は、四角状螺旋行動を行うことで巣に到達した. robot B は、フェロモンが散布されていない場所でフェロモントレースを行った.

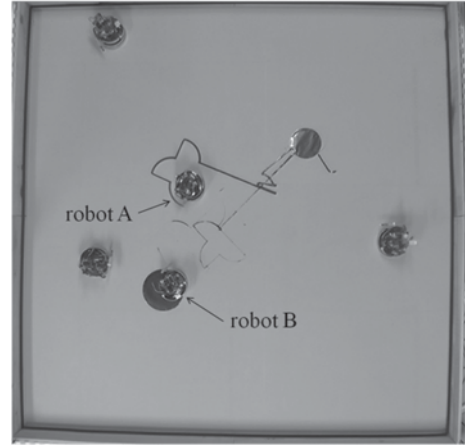


Fig. 15 帰巢中に方向に大きな誤りが生じたロボット. robot A は、他のロボットと接触することで誤った自己位置同定を行った. robot B は、四角状螺旋行動を行うことで巣に到達した.

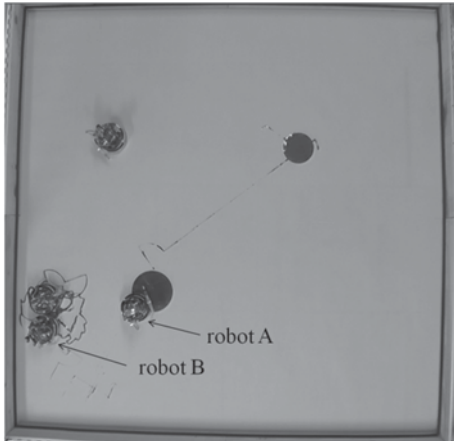


Fig. 14 誤ったフェロモンを辿ることで道に迷ったロボット. robot A は、不具合により餌場付近で動作停止した. robot B は、誤ったフェロモンを辿ることで行動が制限された.

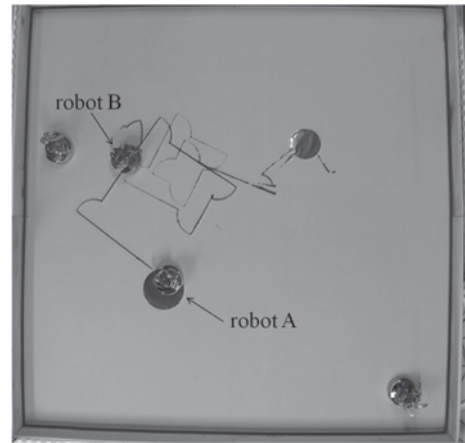


Fig. 16 四角状螺旋行動によって散布されたフェロモン（誤ったフェロモン）をトレースするロボット. robot A は、巣に到達した. robot B は、フェロモントレースを辿ることで運搬路を強化した.

に到達する事ができず、フェロモンを見失った.

5. 議論

蟻を模した群ロボットを用いて、採餌行動実験を行った. 採餌行動を含めた巣-餌場間の運搬路形成過程において、個々のロボットが自己位置同定に失敗することが大きな問題であることが再確認された. 自己位置同定の失敗が彷徨えるロボットを生み出されることになる.

では、なぜロボットは、自己位置同定に失敗するのだろうか? 我々のロボットは、ステッピングモータによって駆動されており、ロボットが単独でかつ外界からの影響を受けずに行動する場合、歩測に

よって高い自己位置同定能力(その場 10 回転: ± 1.1 度/回転, 1m の距離の往復運動: 進行方向 2.1mm/往復, 左右 2.5mm/往復)を実現している. しかしながら、実験でも示されたように、ロボットが壁や他のロボットと接触することによって、ロボットの自己位置同定に大きな誤差が生じる. このように、複数のロボットが協調行動をとりながら作業する群ロボットにおいては、ステッピングモータの回転角度に基づいたロボットの歩測による自己位置同定は、重大な問題点を抱えていることが示された.

さて、蟻を模してロボットを考えた場合、蟻は歩測による自己位置同定とともに、フェロモンを散布することによって、巣-餌場間の運搬路情報を仲間

Table 3 歩測とフェロモンルートが生み出す彷徨えるロボット.

	歩測	フェロモンルート
自己位置同定	高い精度	不用
衝突 (外乱)	弱い	影響なし
誤った情報の修正	接触通信などによる補正	蒸発によるリセット
情報の保持力	長い	短い
誤ったデータのコロニーのロボットへの影響	限定的	広範囲

の蟻に伝えている。フェロモンによる巣一餌場間の運搬路の情報伝達は、一旦、フェロモンによる巣一餌場間の運搬路が形成されてしまえば、蟻は自己位置同定をすることなしに、餌を巣まで運ぶことができるようになる。しかしながら、実験で示されたように、フェロモンルートが確立されるまでは、ロボット（蟻）は自己位置同定をする必要がある。餌をみつけたロボットが巣までフェロモンを散布しながら帰巣する場合、巣の方向や距離を知っていなければならない。我々は、巣の方向や距離の情報に多少の誤差があり巣を発見できなくても、巣の近くにきたとき螺旋タイプの巣探索を行うことによって巣を発見できることを示した (Fig. 16 参照)。しかしながら、これはロボットによって誤ったフェロモン(間違った情報)がフィールド上に散布されことを意味する。そのため、他のロボットはそれらを辿ることで道に迷ってしまう。これは、フェロモンルートが、巣一餌場間での餌運搬にマイナスの影響を与えることを意味している。

しかしながら、フェロモンルートによる巣一餌場間運搬経路の情報共有には、時間が経つとリセットされるという特質がある。フェロモンの特性の一つとして、揮発性があげられる。フェロモンは、時間が経過するとともに蒸発し消滅するため、誤ったフェロモンルートはフィールド上に蓄積されない。この特性は、ロボットの自己位置同定の能力とフェロモンルート形成をうまく組み合わせることにより、非常に効率的な巣一餌場間の運搬路形成が行えることを示唆する。

さらに我々のロボットには、接触したときに情報交換が行える接触通信機能を有しており、餌場や巣の位置および現在いる場所の位置情報を交換できる。フェロモンルートは正しく形成されると自己位置同定の必要もなく、外乱に強いという特徴がある。しかし、情報の保持力は短く、消えてしまう。また、誤った情報が広範囲で伝達されてしまうというデメリットが存在する。Table 3 に、これらの機能の特徴をまとめたものを示す。

彷徨えるロボットが生まれる原因についてみてき

た。彷徨えるロボットは、新たな未知の餌場を発見できる可能性を有しており、デメリットばかりでなく、メリットも存在する。しかし、効率的な巣一餌場間での餌の運搬を考えた場合、デメリットが大きく、彷徨えるロボットをどうするかは重要な課題である。

謝辞

本研究を行う上で、福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻非線形科学研究室の方々には、実験および議論において大変お世話になりました。心から感謝致します。

参考文献

- [1] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz: *Swarm Intelligence*, Oxford Univ.Press, New York (1999).
- [2] F. Mondada, M.Gambardella, D. Flireano, S. Nolfi, J-L Deneubourg, M. Dorigo: *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12-2, 21(2005).
- [3] 川村秀憲：生命複雑系からの計算パラダイム，森北出版，pp.1-81(2003).
- [4] M. Dorigo and T. Stutzle: *Ant Colony Optimization*, The MIT Press, Cambridge (2004).
- [5] 首藤尚亮，平田隆幸：形の科学会誌，20-2，pp.222-223 (2005).
- [6] M. Wittlinger, R. Wehner, H. Wolf: *Science*, 312, 1965 (2006).
- [7] 大場公隆，松浦了麻，平田隆幸：形の科学会誌，23-2，pp.185-186(2008).
- [8] Naokatsu SHUTO, Takayuki HIRATA: *AMiRE2005 Proceeding of the 3rd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment*, pp.307-313 (2005).
- [9] 平田隆幸，川地秀平：福井大工報，55，61 (2007).
- [10] 波田邦彦：福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻修士論文 (2012).