

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：50102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870806

研究課題名(和文) 誘引フェロモンと忌避フェロモンの統合モデルの提案と大規模群ロボットへの応用

研究課題名(英文) Proposal of an integrated model of attractive pheromone and evasive pheromone and its application to large-scale swarm robots

研究代表者

土居 茂雄(DOI, Shigeo)

苫小牧工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：70465912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：群ロボットの制御の際に、ロボット同士が直接通信する、あるいは中央集中制御装置のようなものによりロボットの行動を制御するのではなく、ロボットが動く場の情報を用いて群ロボットの制御を行うことを考える。本研究では、場はグラフ構造で定義され、ノードはロボットが訪問する点、リンクを移動できる関係とし、場の情報はそれぞれのノードに対応付け、各ロボットが行動を決定する。忌避フェロモンを用いた制御ではノードの次数を考慮することにより良い性能が発揮されることがわかった。また、誘引フェロモンと忌避フェロモンを1つの情報量から計算する手法を見だし、計算機シミュレーションにより検証を行った。

研究成果の概要(英文)：When we control autonomous and distributed robots, we developed a model to control the robots using indirect communication with each other through information in correspondence of field. In this study, the field is defined as an undirected graph. A node corresponds to the point where the robots visit and a link between two nodes corresponds to the relation on which a robot can move. A robot determines a next node to move using the field information. When we used an evasive pheromone model, we got better results with consideration with degree of each next node rather than without. In addition, we developed a method to compute attractive pheromone or evasive pheromone through one field information and confirmed the behavior through computer simulations.

研究分野：知能情報学

キーワード：Ant Colony System マルチエージェント フェロモン 自律分散

1. 研究開始当初の背景

群ロボットの自律分散制御に関してはさまざまな研究が行われてきている。これらのロボットの制御では、ロボットの自律的動作や協調動作を簡単な仕組みで実現しており、群ロボットが何らかの形で互いにコミュニケーションを取ると、ロボットシステム全体としてみた場合に目的にあった振る舞いをさせることが可能である。これら大規模群ロボットシステムは、実際に Swarm-bot などの自己組み立て可能なロボット、の研究など、実機への実装も行われている。これらの群ロボットシステムの特徴としては「中央で制御する仕組み(管制のようなもの)が必要ない」「ロボットの台数が増えても対応が容易である」「信頼度の高いシステムが構築可能である」といった点があげられる。

群ロボットに限らず、ロボットシステムを考える際には、ロボットが何かしらの経路を動くことによって目的を果たすことになる。これらのロボットが動く環境を考慮すると、長い時間で考えた際には、外的要因である「ロボットが通ろうとしているところに障害物が置かれた」「ロボットが動ける範囲が広がった」、内的要因である「ロボットのモーターが故障した」「ロボットが電池切れで機能しなくなった」など、全く何も変化がない状態でロボットが制御できることは少ない。これに加えて、大規模群ロボットの自律分散制御では、中央でロボットを制御する仕組みが存在しない。このため、環境の変化をロボット間で共有して制御に生かすためには、次の3つの能力が求められる：(1)個々のロボットが環境の変化を検知できること、(2)環境が変化したことを検知したロボットは、他のロボットに環境変化の情報を伝えられること、(3)情報を受け取ったロボットは、その情報に基づき自律的に環境の変化に適応できること。これら3つの能力をアルゴリズム中に含めることが求められる。しかし、特定の仕事に対して群ロボットが仕事を行うアルゴリズムは様々なものが提案されているものの、複数の仕事に対応できるようにこれらを統一的に扱っているアルゴリズムは存在しない。

2. 研究の目的

大規模自律分散型群ロボットシステムは、耐障害性の向上やメンテナンスの手間軽減の観点から、今後の研究開発が期待されるが、その実現においては中央で集中して制御する仕組みが不要でなくてはならない。本研究では、この中央で集中制御を行う仕組みが不要である蟻コロニー最適化に端を発したアルゴリズムに基づき、誘引フェロモンと忌避フェロモンの2つを統一的に扱うモデルを提案し、時刻経過により変化する複数の目的および環境の変動に対応できるアルゴリズムを設計することを目的とする。アルゴリズムの検証は計算機シミュレ

ーションを通して行う。

3. 研究の方法

以降では、ロボットをエージェントと表記する。警備巡回問題は次のように定義される：まず、無向グラフ $G=(V,E)$ を定義し、 V はエージェントが巡回する地点、 V の頂点間は、 E により接続関係にあれば時刻 1 を使って移動可能であると定義する。 V に含まれる各ノード v に対して、エージェントによるノードの最終訪問時刻 $\sigma(v)$ が定義される。

忌避フェロモンベースのアルゴリズムでは、グラフで定義されるノードをなるべく均等に訪問するようにエージェントを行動させることを目的とする。

忌避フェロモンベースのアルゴリズム pidPVAW は以下のように実現される。フローチャートは以下のとおりとなる。一定確率 p に応じて、欲張り法に基づいて最後に訪問されてからタイムラグがあるノードに訪問するか、確率に基づいて動くかを決定する。

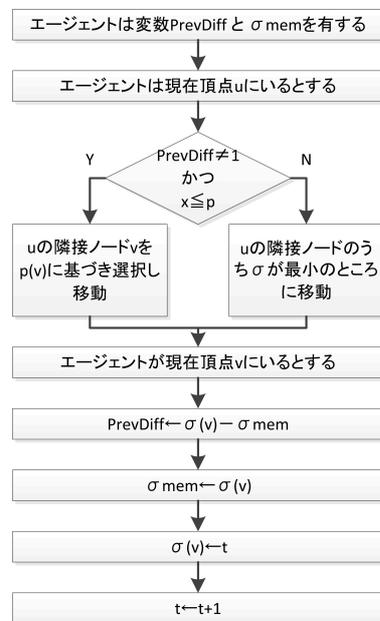


図1 pidPVAW のフローチャート

エージェントがノード w にいるとして、隣接ノード集合 $N(w)$ のうち $v \in N(w)$ に遷移する確率 $p(v)$ は以下の式で表される。 k はパラメータであり、大きいほど次数を考慮し、次数の小さいノードほど訪問されやすくなる効果がある。

$$p(v) = \frac{\frac{1}{D(v)^k} \left(\max_{n \in N(w)} \sigma(n) - \sigma(v) \right)}{\sum_{m \in N(w)} \left(\frac{1}{D(m)^k} \left(\max_{n \in N(w)} \sigma(n) - \sigma(m) \right) \right)}$$

誘引フェロモンベースにより動くアルゴリズムは次のように実行される。まず、区間 $[0, 1]$ の一様乱数を発生させ、それを u とし、閾値 p_t 比較した結果により行動を分ける。

(1) $u = p_t$ のとき

エージェントがノード w にいるとき、以下の式で移動する隣接ノード n を決定する。 TH_{ie} はパラメータであり、エージェントの拡がりをコントロールする。また、 $N'_{ie}(w)$ は t をシミュレーションの現在時刻とした時、 $t - TH_{ie} < (v) < TH_{ie}$ を満たす現在居るノード w の隣接ノード v を要素とする集合である。もし $N'_{ie}(w) = \emptyset$ であれば、ランダムに移動するノードを決定する。

$$n = \arg \max_{v \in N'_{ie}(w)} \sigma(v)$$

(2) $u > p_t$ のとき

エージェントが w にいるとき、次に移動するノード $v \in N'_{gt}(w)$ を以下の式の確率 $p(v)$ に基づき決定する。ここで TH_{gt} および j はパラメータである。また、 $N'_{gt}(w)$ は t をシミュレーションの現在時刻とした時、 $t - TH_{gt} < (v) < TH_{gt}$ を満たす現在居るノード w の隣接ノード v を要素とする集合である。もし $N'_{gt}(w) = \emptyset$ であれば、ランダムに移動するノードを決定する。なお、本研究では $TH_{gt} = 0$ と設定したため、 N'_{gt} が空集合になることはなく、ランダムに移動することはない。

$$p(v) = \frac{\frac{1}{(D(v))^j} \left(\sigma(v) - \min_{n \in N'_{gt}(w)} \sigma(n) \right)}{\sum_{m \in N'_{gt}(w)} \left(\frac{1}{(D(m))^j} \left(\sigma(m) - \min_{n \in N'_{gt}(w)} \sigma(n) \right) \right)}$$

作成したモデルについて計算機シミュレーションを行い遂行した。

4. 研究成果

(1) $k=1$ とした pidPVAW で、ネットワーク構造に着目したシミュレーションを行った。対象としては、10000 ノードを有する図 2 に示すような Scale-free ネットワーク(直径 27, 半径 14)を利用した。まずエージェント数が 2 の場合を対象とした。

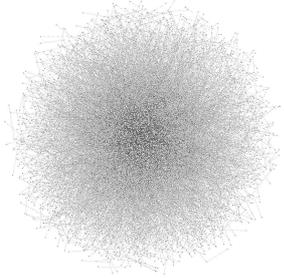


図 2 Scale-free ネットワーク

pidPVAW で $k=0$ と $k=1$ の場合を比較するためのシミュレーションを行った結果は以下のとおりとなった。まず、エージェント数によらず、pidPVAW では良好な結果が得られた。なお、 $k=0$ のアルゴリズムを pPVAW と表記する。評価規範としては、以下の式で求められる s と m を用い、シミュレーション時刻を横

軸に取ったグラフにプロットする。ここで、 t はシミュレーション時刻とする。 s は各ノードの最終訪問時刻からの経過時間の合計、 m は各ノードの最終訪問時刻からの経過時間のうち最大のものを表し、 s および m は低いほうが良いアルゴリズムである。グラフは 10 回シミュレーションを行い、その平均をとったものである。

$$s = \sum_{v \in V} (t - \sigma(v))$$

$$m = \max_{v \in V} (t - \sigma(v))$$

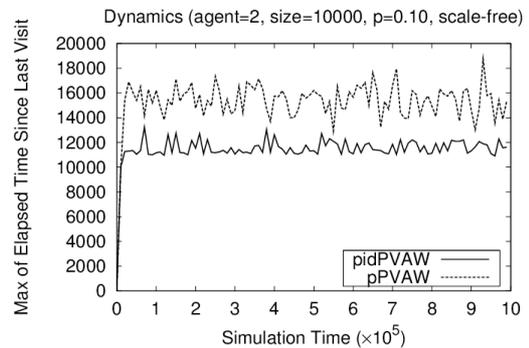
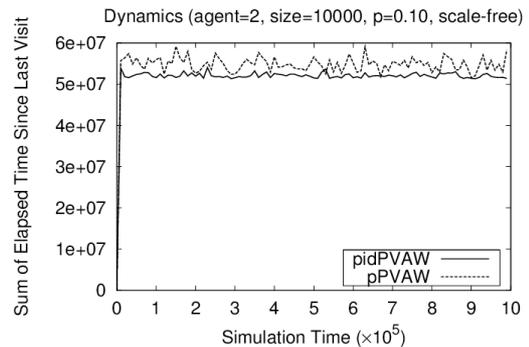


図 3 エージェント数 2 のときの結果
上: s について、下: m について

図 3 と図 4 を見るとわかるように、ノードの次数を考慮した $k=1$ である pidPVAW の方が、 s および m が小さくなっていることから、エージェントにより最後に訪問されてから時間をおかずに訪問されていることとなり、良好な性能が得られていることがわかる。

(2) グラフ構造が変動した場合においても、pidPVAW は変動に耐えられる性質があることを示せた。図 5 に示すグリッドを 2 つ、端の 2 本の廊下でつなげたようなグラフ構造で、シミュレーション時間の半分経過後に黒いノードを取り除くシミュレーションを行い、アルゴリズムの振る舞いを見る。

このとき、(1) 同様に s および m を比較したところ、パラメータ k によらずほぼ同様の性能を得ることが出来た。エージェント数が 2 の時の結果をシミュレーション結果を図 6 に示す。なお、エージェント数が 10 の場合

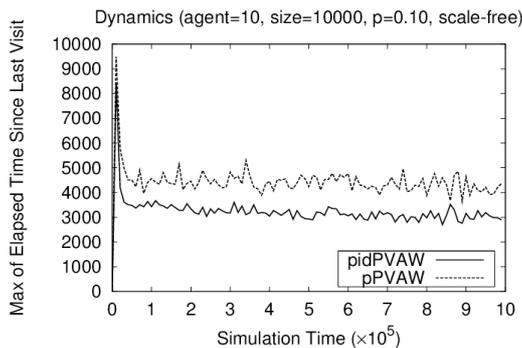
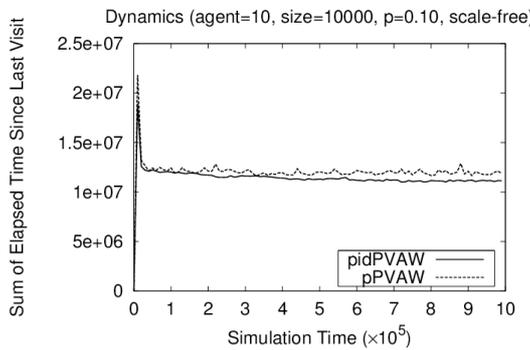


図4 エージェント数10のときの結果
上: sについて, 下: mについて

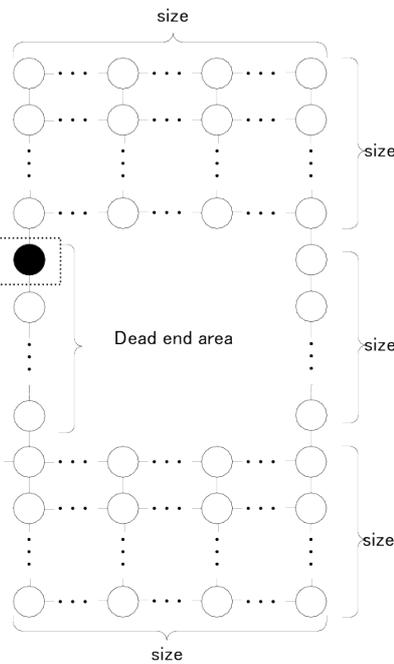


図5 グラフ構造

ほぼ同様のパフォーマンスとなった。このことから、エージェント数が充分でない場合に、次数を考慮することにより良いパフォーマンスを発揮できることを示した。また、シミュレーション時刻が500000を過ぎたときに、特にmについて次数を考慮しないpPVAW(pidPVAWでk=0)アルゴリズムよりもpidPVAW(k=1)の方が安定した性能を得られていることがわかる。

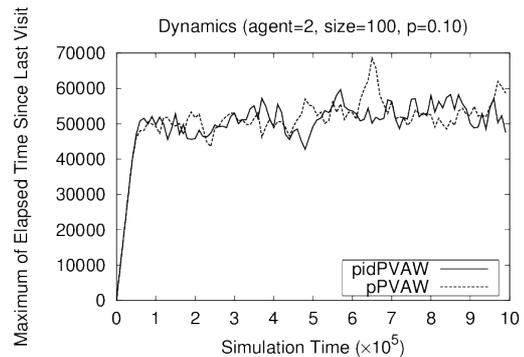
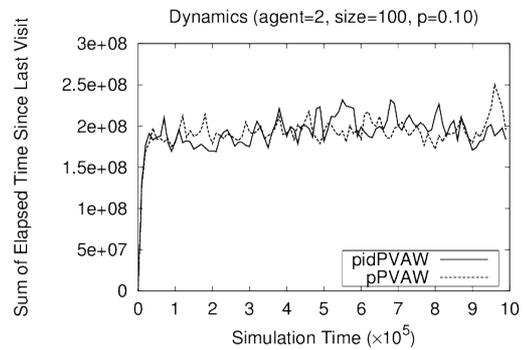


図6 エージェント数が2の場合の結果
上: sについて, 下: mについて

(3)pidPVAWに関して、パラメータkを変化させた際の図7に示すような正方形グリッド環境における角の訪問回数に関するシミュレーションを行った。sizeは領域の大きさを規定するパラメータである。

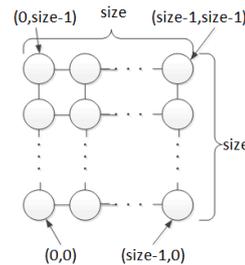


図7 グリッド環境

このとき、パラメータkを変化させて訪問されづらいと考えられる角のノードとなる(0,0),(size-1,0),(0,size-1),(size-1,size-1)の4つのノードの訪問回数を比較した。訪問回数の表を表1と表2に示す。表1と表2の結果から、エージェント数が多い環境であれば、kを大きくすることにより、角のノードの訪問回数を上げることが可能になることがわかる。

表1 エージェント数2, size=100

k \ coordinate	(0,0)	(99,0)	(0,99)	(99,99)	Average	Stdev.
0	162.1	156.6	159.4	167.2	161.325	3.497070202
1	168.0	158.6	169.3	162.2	164.525	3.882975663
2	163.8	160.2	173.1	165.9	165.75	4.210700654
3	167.4	162.3	170.8	166.1	166.65	2.720661684
4	163.8	164.3	169.9	165.4	165.85	2.154530111

表2 エージェント数 10, size=100

k \ coordinate	(0,0)	(99,0)	(0,99)	(99,99)	Average	Stdev.
0	826.3	809.4	822.0	818.4	819.025	5.564305887
1	833.1	830.9	823.2	820.4	826.9	4.698510402
2	839.8	833.1	831.7	825.7	832.575	4.483469639
3	840.6	844.9	849.9	848.4	845.95	3.204059925
4	840.0	840.5	851.1	842.7	843.575	3.990676634

(4)グリッド環境において、誘引アルゴリズムとpidPVAWを併用した際の振る舞いを見る。図7でsize=100としたグリッド環境において初期状態では中央にエージェントを配置する。アルゴリズムを誘引アルゴリズムから忌避アルゴリズムに切り替えた際に、きちんと切り替わるかを比較する。ケース1としてシミュレーション時間を500000として誘引アルゴリズムのみを実行し、ケース2としてシミュレーション時間を1000000として、時刻500000までは誘引アルゴリズムのみを、それ以降は忌避アルゴリズムを実行する。結果を図8に示す。

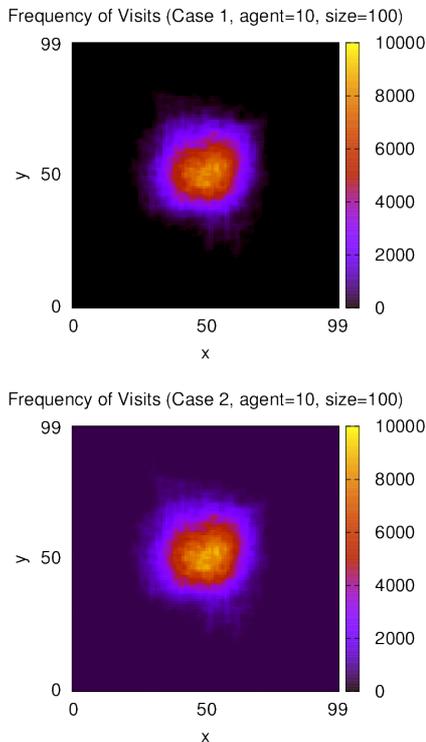


図8 誘引アルゴリズムのみ(ケース1, 上)と誘引アルゴリズムと忌避アルゴリズムを切り替えた場合(ケース2, 下)の比較

図8から、ケース1では初期配置であるグリッドのアルゴリズムを切り替えた場合でも切り替えがうまく行われ、一つの情報量を用いてアルゴリズムを切り替えることによりエージェント群の振る舞いを切り替えられることを示した。また、誘引パラメータ TH_i を調整することにより、ケース1における探索範囲を調整することが可能である。また、シミュレーション時間を1000000として時刻500000までは忌避アルゴリズム、それ以降は誘引アルゴリズムを実行すると、アルゴリズ

ムが切り替わった時点でエージェントがいた地点を中心に探索している様子が示された。

以上の結果から、忌避アルゴリズムにおいては次数を考慮することにより訪問されづらいと考えられるノードの訪問回数を向上させられること、ノードが突然なくなるような環境変動に対しても適応して探索ができること、1つの情報量により誘引アルゴリズムと忌避アルゴリズムを切り替えて実行することが可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

[Shigeo DOI](#), Proposal and Evaluation of a Robust Pheromone-Based Algorithm for the Patrolling Problem with Various Graph Structure, In Proceedings of the 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 査読あり, Vol. 1, pp.397-408, 2014.

DOI: 10.1007/978-3-319-13359-1

[Shigeo DOI](#), An Experimental Analysis of a Robust Pheromone-based Algorithm for the Patrolling Problem, In Proceedings of the 19th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 査読あり, pp.3-14, 2015.

DOI: 10.1007/978-3-319-27000-5_1

〔学会発表〕(計4件)

[土居 茂雄](#), フェロモンコミュニケーションとネットワーク構造を用いた警備巡回問題の解法の提案, 平成26年度電気学会C部門大会, 2014

[土居 茂雄](#), フェロモンとノードの次数に基づく警備巡回アルゴリズムのScale-freeネットワークにおける性能評価, 進化計算シンポジウム2014, 2014.

[土居 茂雄](#), 警備巡回問題のフェロモンコミュニケーションに基づく解法のグリッドでの評価, 平成27年度電気情報関係学会北海道支部大会, 2015.

[土居 茂雄](#), マルチエージェント系のフェロモンの複数解釈による行動の実現, 計測自動制御学会第43回知能システムシンポジウム講演資料, 2016.

6. 研究組織

(1)研究代表者

土居 茂雄 (DOI, Shigeo)

苫小牧工業高等専門学校 情報工学科

准教授 研究者番号: 70465912