

被災時避難誘導に向けたフェロモン調節による 改良ACOアルゴリズムの提案

Improved ACO algorithm by pheromone control for disaster evacuation guidance

後藤大貴[†] 太田飛鳥[†] 松澤智史[‡] 滝本宗宏[‡] 神林靖[§] 武田正之[‡]
Hiroataka GOTO Asuka OHTA Tomofumi MATSUZAWA
Munehiro TAKIMOTO Yasushi KAMBAYASHI Masayuki TAKEDA

1. はじめに

近年、自然界のアリの採餌行動をモデル化した最適化手法であるアントコロニー最適化法 (Ant Colony Optimization: ACO) [1] の研究は盛んに行われている。ACO の一種である Ant Colony System は、ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) [2] などを含むメタヒューリスティックアルゴリズムの中でも、巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) に対して優れた探索性能を持つことが示されている [3]。

日本では、2011 年 3 月、東北地方太平洋沖地震が発生し、災害時への対応について注目が集まっている。その中でも、あらかじめ被害の発生を想定した上で、被害を低減させるという意味合いを持つ「減災」は広く普及している。災害時には、火災や建物の倒壊によって、日常的に使用している通路の通行が困難となる状況が発生する。周囲の状況が刻一刻と変化の中で、被害を最小化するためには、適切な避難誘導が必要である [4]。また、エージェントを用いた避難誘導に関して様々な研究が報告されており、シミュレーションによって避難ルートの発見に有望な結果が示されている [5]。

そこで本稿では、ACO による最適経路発見システムを改良して、災害時における避難誘導を目的とした ACO アルゴリズムを提案する。

2. Ant Colony Optimization (ACO)

2.1. 概要

現実のアリは、仲間と協調動作をとる際に揮発性のフェロモンを利用する。餌を発見したアリはフェロモンを地面に分泌しながら餌を巣に持ち帰る。後続のアリは地面に塗布されたフェロモンを道しるべとして餌にたどり着き、自身もその経路にフェロモンを上書きしながら餌を巣に運ぶ。結果として、アリが多く通る経路のフェロモンは次第に蓄積され、濃度が高くなる。一方でアリが通らない経路のフェロモン濃度は蒸発によって徐々に小さくなる。このように、アリは、フェロモンによる正のフィードバックを得ながら、一つの経路を集中して選択するようになる。

経路長の異なった複数の経路が存在する場合、アリは最短の経路を形成することが可能である。その際の経路生成過程は以下のとおりである。フェロモン情報がないアリはランダムに徘徊し、餌を探索する。アリの進行速度が一定であれば、長い経路と比較して短い

経路を選択したアリほど餌と巣との往來の回数が多くなる。多くのアリが行き来した経路ほどフェロモンが濃くなるので、後続のアリが同じ経路を選択する確率が高くなる。短い経路に分泌されたフェロモンは時間とともに濃度が高くなり、長い経路のフェロモンは蒸発によって消滅する。つまり、アリが経路を形成する際に用いるフェロモンの扱いによって ACO の性能は大きく変化する。

2.2. ACO アルゴリズム

ACO アルゴリズムを利用し、ある 2 点を結ぶ経路を形成する際の流れは以下のとおりである。

1. 複数のアリが出発地点と目標地点の経路を探索する。
2. 経路について分岐などの局所探索を行う。
3. 作成された経路にフェロモンを塗布する。
4. 反復回数が一定値に到達するまで手順 1~手順 3 を繰り返す。

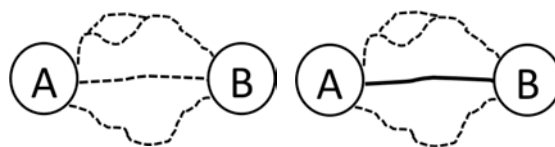


図 1: 探索前

図 2: 探索後

図 1, 図 2 を用いて、経路が形成される過程を具体的に説明する。出発地点を A, 目標地点を B とすると、AB 間には距離の異なる 3 つの経路が存在する。3 つの経路について 3 匹のアリが同時並行的に一斉に動作を開始する (手順 1)。上部の経路を選択したアリはその経路中に含まれる分岐についてランダムに分岐を選択する (手順 2)。アリの進行速度が同じであれば 3 匹の中で目標地点にたどり着くのは中央経路を選択したアリである。目標地点にたどり着いたアリは発見した経路についてフェロモンを塗布し、地点 A に戻ってくる (手順 3)。アリが出発地点に戻ってきたら、経路に塗布されたフェロモンを参考に再度目標地点 B に向かう。

フェロモンは蒸発によって弱まるので、中央経路以外のフェロモンは次第に選択されなくなる。アリはフェロモンの多い経路を好むので、塗布される回数が多い経路である最短経路の選択が可能になる (図 2)

経路探索において以上の動作を行う ACO を normal ACO と定義する。

[†]東京理科大学大学院 理工学研究科 情報科学専攻

[‡]東京理科大学 理工学部 情報科学科

[§]日本工業大学 工学部 情報工学科

2.3. MAX - MIN Ant System (MMAS)

ACO の性能向上を目的にフェロモンの調節を行う手法として MAX-MIN Ant System (MMAS) が存在する [6]。MMAS には大きな特徴が 2 つ存在する。

1 つはフェロモンに上限値と下限値を与え、大域的な探索を可能とすることにある。フェロモンの上限値からはその周辺だけの探索から局所解に陥ることを防ぎ、フェロモンの下限値からは、どのような解も探索される可能性を残す。

もう一方は、探索開始時からの最良解や繰り返しごとの最良解についてフェロモン更新を行う特徴である。

2.4. 既存 ACO アルゴリズムの問題点

normal ACO アルゴリズムをそのまま適応することで、経路を形成することが可能である。各アリをエージェントとし、前節で述べた ACO アルゴリズムを避難誘導に適用する。エージェントは自身の居場所から目標地点までの経路をランダムウォークによって模索する。目標地点を発見したエージェントは出発地点と目標地点の間にフェロモンを分泌することで経路の形成を進める。その際、エージェントはフェロモンに応じた最適解を探索するので、その経路のフェロモンが濃ければ道中に危険区域を含んでいても、フェロモンの濃い道を優先とした経路を形成する。避難誘導という特性上、たとえそれが遠回りでも安全な経路を形成できなければ、災害時の対応として正しいものではないので、最短経路にだけフェロモン更新を行う必要はない。

危険区域を避けながら経路を形成しなければならないという理由から、避難誘導に用いる経路を形成するものとして、既存 ACO アルゴリズムは妥当なものとは言えない。つまり、誘導経路に危険区域やその周辺が含まれることが既存 ACO アルゴリズムの問題点である。

3. 提案手法

2.4 節で述べた問題点を解消する経路の形成手法を提案する。

3.1. 前提条件

探索問題に関する前提条件を以下の様に設定する。

- 地震や火事などの被災状況下、局所的に危険区域が発生する
- 避難のためにエージェントを利用し、避難経路の形成を行う
- 火災や地震による道の倒壊などによって、立ち入り難い場所を危険区域とする
- エージェントはフェロモン値の格納された二次元マップ (MAP) を保持する
- MAP は全エージェントで共有を行うが、アクセス可能範囲は自身の周囲に限定される

3.2. 概要

経路の形成の過程で、危険区域を解の選択候補から排除すればよい。そこで normal ACO アルゴリズムに用いられ、経路形成に使用するフェロモンを "道するベフェロモン" とし、新たに危険区域に斥力を持つフェロモンである "消臭フェロモン" を定義する。また、道するベフェロモンは揮発性とする。この 2 種のフェロモンをエージェントが使い分けることによって、危険区域への立ち入りを防ぐための改良最適経路発見システム (proposal ACO) が実現できる。

3.3. 道するベフェロモン

3.3.1. 挙動

道するベフェロモンは経路形成を行う際に利用するフェロモンである。式 (1) の τ_{min} は道するベフェロモンの下限値、 τ_{max} は道するベフェロモンの上限値、 τ_{ij} は MAP における i, j 座標上の道するベフェロモン濃度を示す。道するベフェロモンについて 2.3 節で述べた MMAS のフェロモン制御を利用する。

$$0 < \tau_{min} < \tau_{ij} < \tau_{max} \quad (1)$$

エージェントは、道するベフェロモンを嗅ぎ取り、フェロモン値の濃い方へ移動する。周囲を確認しフェロモンが塗布されていない場合、また周囲のフェロモン値に差がない場合にエージェントはランダムウォークを選択する。

3.3.2. フェロモンの更新値

i, j 座標における時刻 t の道するベフェロモンは以下の式 (2), (3) によって更新する。

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) - d + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \alpha & (if (i, j) \in T^k(t)) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (3)$$

m はエージェントの最大数を表し、 $T^k(t)$ はエージェント k が生成した経路に含まれる座標の集合である。 d はフェロモンの蒸発量であり、時間経過により過去のフェロモンが減少する。 α は上書きするフェロモン値である。更新値に式 (1) を適応することで、道するベフェロモンが求まる。

3.4. 消臭フェロモン

消臭フェロモンはその場に斥力を発生させるフェロモンである。

$$\tau'_{ij} < 0 \quad (4)$$

式 (4) の τ'_{ij} は MAP における i, j 座標上の消臭フェロモン濃度である。エージェントは周囲の状況が危険区域の付近であると判断した際に経路に塗布されたフェロモンを消臭フェロモンによって減少させる。後続の

エージェントは従来の道しるべフェロモンと消臭フェロモンの和 τ''_{ij} を座標上のフェロモン濃度と解釈し、探索を行う。 τ''_{ij} を式 (5) に示す。

$$\tau''_{ij} = \tau_{ij} + \tau'_{ij} \quad (5)$$

また、 τ'_{ij} を大きな値に設定することで、道しるべフェロモンを強く消臭することができる。

道しるべフェロモンと消臭フェロモンは同じスカラー値であるので、危険区域近辺に塗布したフェロモン自体が斥力となり、強制的に収束を加速させることができる (図 3)。また本稿では、避難誘導において安全を第一に考えるために時間経過による消臭フェロモンの蒸発は考えない。

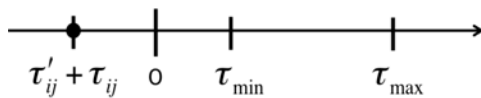


図 3: フェロモン濃度

3.5. 道しるべフェロモンの減衰

消臭フェロモンの斥力は周囲に及ぶ。消臭フェロモンが付近に塗布されていることを確認した後続のエージェントは、その周囲が危険区域にあることを判断し、通行・進入を避けるように付近のフェロモンを一定値減少させる。消臭フェロモンが塗布された場所付近の距離 n (式 (6)) における道しるべフェロモンは以下の計算式によって減衰した値となる (式 (7))。 $\Delta x, \Delta y$ は消臭フェロモンが塗布された場所からの座標である。ここで減衰した値が式 (1) における下限値 τ_{min} を下回った場合、MMAS のフェロモン制御によって減衰後のフェロモン値は τ_{min} になる。

$$n = \max(\Delta x, \Delta y) + 1 \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} * \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^n\right) \quad (7)$$

例えば $n = 3$ の場合、消臭フェロモンを発見した座標を $n = 1$ として、式 (7) によって道しるべフェロモンが割合に応じて減衰する (図 4)。 $n = 0, n = 1$ の減衰後のフェロモン値 $\tau''_{ij(0)}, \tau''_{ij(1)}$ は $\tau_{ij(0)} = 15, \tau_{ij(1)} = 15, \tau'_{ij} = 10$ とすると式 (5)、式 (7) より $\tau''_{ij(0)} = -10, \tau''_{ij(1)} = 7.5$ となる。

4. 実験

4.1. シミュレーションの概要

提案手法の有用性を示すために、独自のマルチエージェントシミュレータを用いて実験を行い、normal ACO と消臭フェロモンを用いた提案手法 (proposal ACO) について、生成された経路とその過程、ステップ数の観点から評価を行った。

0.875	0.875	0.875	0.875	0.875
0.875	0.75	0.75	0.75	0.875
0.875	0.75	0.5	0.75	0.875
0.875	0.75	0.75	0.75	0.875
0.875	0.875	0.875	0.875	0.875

図 4: 道しるべフェロモンの減衰割合

4.2. シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れとエージェントの動作は以下のとおりである。道しるべフェロモンの更新は 3.3.2 項を用いる。

1. エージェントは全て同じ座標を出発地点とし、同時並行に一齐に動作を開始する。1 ステップ毎にエージェントは 8 方向のいずれかに自身の大きさ分だけ移動できる。
2. 移動先が壁、危険区域、目標地点であるかは移動してみないとわからず、壁、危険区域であった場合は進入せずに再度思考を行う。
3. 周囲のフェロモン情報を取得し、相対的にフェロモン値の高い方向へ移動する。その際、同値のフェロモン値をもつ座標が複数存在するのであれば、ランダムに移動方向を決定する。目標地点に到達するまで手順 3 を繰り返す。
4. 目標地点に到達したエージェントは移動軌跡にフェロモンを塗布した後、出発地点に帰ってくる。
5. 提案手法のエージェントは危険区域の付近であることを判断したら、その場に 3.4 節で説明した消臭フェロモンを塗布する。消臭フェロモンについては、往路・復路問わずに塗布可能である。
6. 移動先のフェロモンが τ_{min} 未満のとき、消臭フェロモンを塗布した場所であると判断する。エージェントはその場所を中心として、式 (7) に基づいて周囲のフェロモンを減衰させる。また、フェロモンの減衰は壁を越えない。

4.3. パラメータ

実験に用いたパラメータの詳細は以下のとおりである (表 1)。

4.4. シミュレーション MAP

シミュレーションでは、屋内を模した MAP を作成し、検証を行う (図 5)。start, goal を除く黒く塗りつぶした部分は壁 (wall)、赤く塗りつぶした部分は危険区域 (danger) を表す。start, goal は、図 5 の左

表 1: 実験パラメータ

パラメータ名	値
エージェント数	150
MAP サイズ	100*100
エージェントの大きさ	1
目標地点 (goal)	(98, 56)
出発地点 (start)	(4, 4)
1 ステップ毎に蒸発するフェロモン値 (d)	0.0003
上書きするフェロモン値 (α)	0.3
道しるべフェロモンの上限値 (τ_{max})	30.0
道しるべフェロモンの下限値 (τ_{min})	1.0
消臭フェロモン値 (τ')	40.0
消臭フェロモンの減衰が及ぶ距離 (n)	5
終了条件 (目標地点への到達エージェント数)	200

上を座標原点としてパラメータ (表 1) で示したものである。

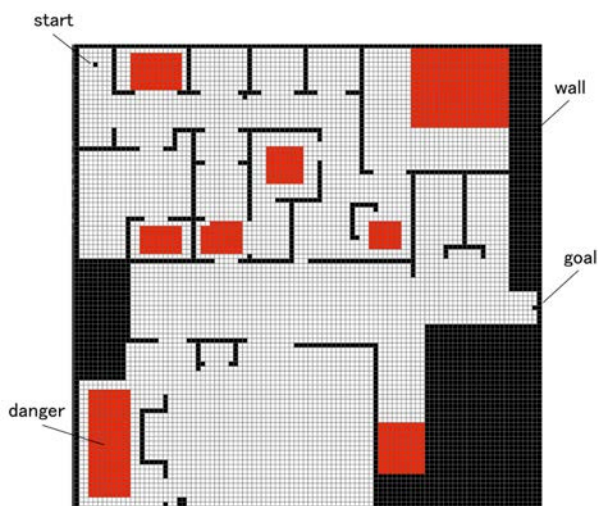


図 5: 実験に用いた MAP

4.5. 結果と評価

normal ACO と proposal ACO についてそれぞれ 1000 回ずつ実験を行った。それぞれの結果を示し、評価を行う。

4.5.1. フェロモンの散布状況

それぞれの手法における MAP 上のフェロモン状況を示す (図 6, 図 7)。normal ACO では中央経路を含む 2 本の経路にわたってフェロモンを塗布している。proposal ACO では中央経路にフェロモンを塗布しているものの、途中で途切れている。また、危険区域に消臭フェロモンを塗布し、周囲のフェロモンが減衰するので、normal ACO と比較すると proposal ACO における危険区域の周囲はフェロモン濃度が低い。

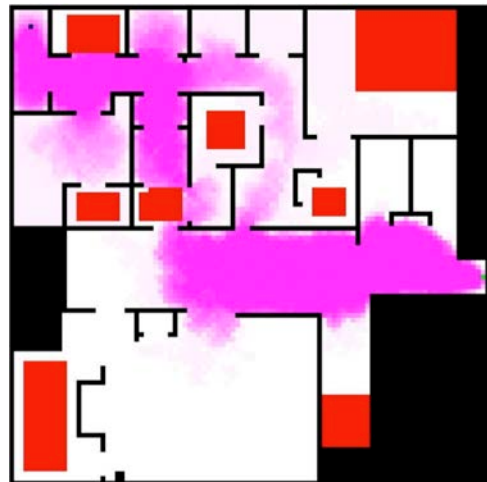


図 6: normal ACO のフェロモン濃度

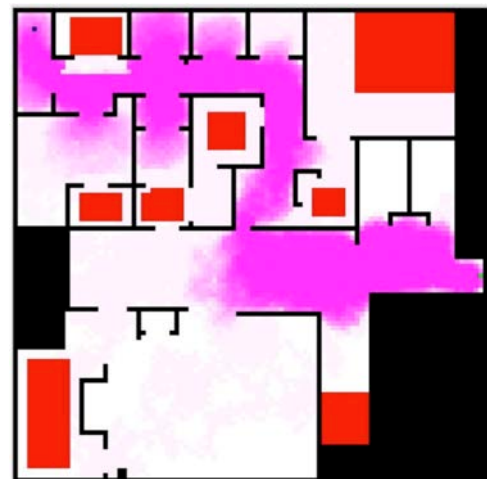


図 7: proposal ACO のフェロモン濃度

4.5.2. 危険区域への進入

それぞれの手法における危険区域への進入回数と到達エージェントの関係を示す (図 8)。図 8 上の赤い曲線は normal ACO、青い曲線は proposal ACO の結果であり、normal ACO と比較して危険区域への進入回数が大幅に少ない。どちらの手法も到達エージェントが増加するにつれて傾きが緩やかになる。

4.5.3. 狭路の通行状況

中央経路を選択するエージェント数を比較するために図 9 における斜線部分を通行したエージェントの結果を示す (図 10)。図 10 上の赤い曲線は normal ACO、青い曲線は proposal ACO の結果である。normal ACO と比較すると、proposal ACO は到達エージェント数が少ない段階で通行回数が低減している。

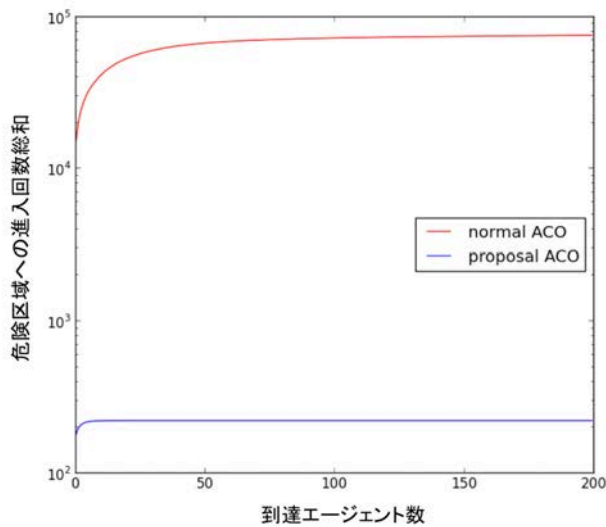


図 8: 到達エージェント数と危険区域への進入回数

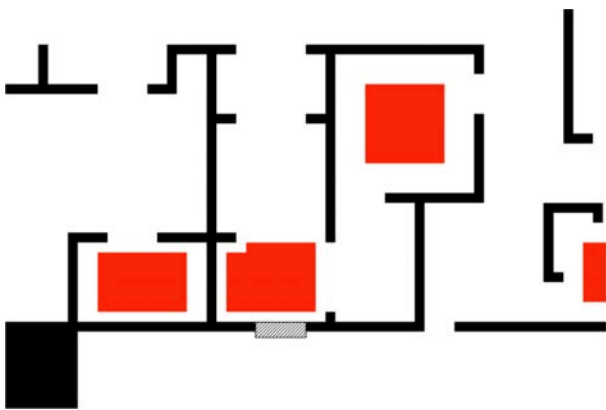


図 9: 指定する狭路

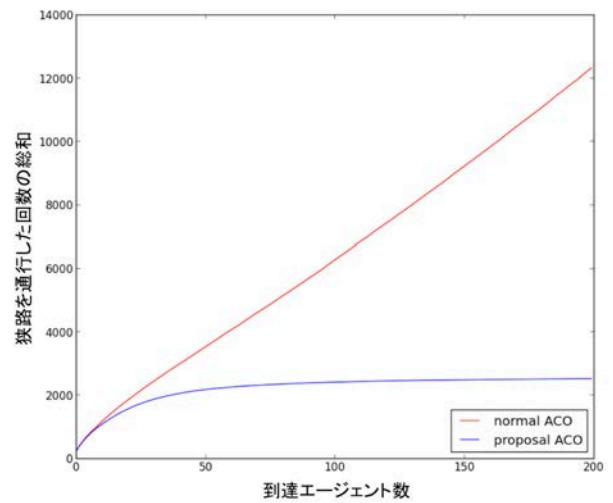


図 10: 到達エージェント数と指定狭路の通過数

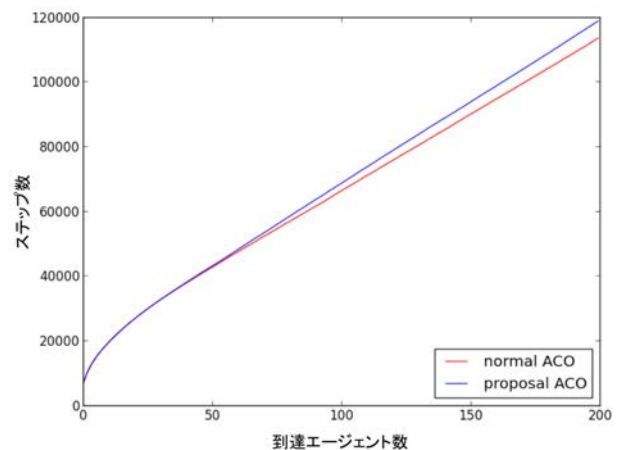


図 11: 到達エージェント数とステップ数

4.5.4. 終了条件までにかかるステップ数

それぞれの手法におけるステップ数と到達エージェントの関係を示す(図 11)．図 11 上の赤い曲線は normal ACO，青い曲線は proposal ACO の結果である．normal ACO と比較すると，proposal ACO はより多くのステップ数を要する．

5. 考察

5.1. フェロモンの散布状況

実験に用いた MAP において，proposal ACO では最短経路の形成はできないものの，危険区域を避けた経路の提示が可能である．エージェントが経路の形成の段階で危険区域の付近を通行するリスクを考慮すると，最短経路が必ずしも良い経路とはいえない．

図 6 中央上部の行き止まりの空間についてもフェロモンを濃く塗布している．原因として，目的地に到達したエージェント全てが経路の長さに関係なくフェロモン値の更新に関与していることが挙げられる．しか

し，経路の優れたエージェントだけに更新を許すと，避難経路を形成できなくなる可能性がある．行き止まりの空間を検知したら，元の道に戻るといったようにエージェントの動作アルゴリズムを改良することで，行き止まりに塗布したフェロモンは次第に蒸発する．

5.2. 危険区域への進入

ステップの経過とともに，危険区域と比較して通行可能な経路上のフェロモン濃度が上昇するので，エージェントは徐々に危険区域への進入を避けるようになる．すなわち，図 8 の傾きは危険区域への進入の収束を示す．proposal ACO では到達エージェントが少ない段階で危険区域への進入を防ぐことができる．

実環境下において，危険区域付近に立ち寄ったエージェントは火災や倒壊に巻き込まれて故障してしまう可能性がある．故障によって周囲と通信が不可能になったエージェントの位置に消臭フェロモンを塗布することで，通信が途絶えたエージェントからのフィードバックを受け取ることができる．

5.3. 狭路の通行

本稿で実験を行ったMAPでは、最短経路に狭路が存在し、加えて危険区域が存在した。このMAPにおいて、proposal ACOでは最短経路を提案することは出来ないが、前提は災害時の避難であり、火災や倒壊といった危険区域の拡大の可能性は大いにある。また、実環境下におけるエージェントの故障を考慮すると、可能であれば危険区域の付近に立ち入るべきではない。

一方で危険区域が復旧した場合、proposal ACOでは対応ができない問題点がある。解決策として消臭フェロモンに依存せず動作を行うエージェントを生成する手法が考えられる。

5.4. 経路の収束

今回用いたシミュレーションMAPでは既存のACOと提案手法が結果として異なる経路を提示することから、終了条件までのステップ数に差異が見られた。

5.5. 本手法の応用

本稿では危険区域を避けた経路を目的としたが、応用として特定状況下を避けた経路の提示が考えられる。例えば携帯電話等の移動端末をエージェントとすることによって、混雑したイベント会場やテーマパークなどで、人の密集する場所を避けた経路を提示できると考えられる。

6. 今後の課題・まとめ

6.1. 今後の課題

シミュレーションを行ったMAPは図5だけであるので、今後は屋外を模したより広大なMAP、経路探索が難解で複雑なMAP、危険区域の拡大や縮小によって周囲の状況が動的に変化していくMAP等様々な状況について検証する必要がある。また、エージェントの動作アルゴリズムを改良するとともに、本手法を適用する対象によって、各種ACOパラメータや、ヒューリスティック値を適切に決定する必要がある。

6.2. まとめ

災害時における避難誘導を目的として、フェロモンを打ち消し、減衰させることのできる消臭フェロモンを定義した。エージェントが危険区域と判断した箇所のフェロモンを局所的に打ち消すことで、危険区域付近のフェロモンの収束時間を短縮する手法を提案した。

結果として、危険区域の進入回数、フェロモンの散布状況から選択が予想される経路を比較し、優位性の検証を行った。今後はパラメータの調整を含め、各エージェントの動作アルゴリズムの改良や、動的に危険区域の変化する状況の検討を行う。

参考文献

- [1] Dorigo, M., Maniezzo, V. and Coloni, A. : Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents, IEEE Transaction on System, Vol. 26, No. 1, pp. 29-41 (1996).
- [2] D. E. Goldberg : Genetic Algorithms ins Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, (1989)
- [3] Dorigo, M. and Stützle, T. : Ant colony optimization, Bradford Books, Massachusetts, USA, (2004).
- [4] 消防科学総合センター, 地域防災データ総監, 東日本大震災関連調査 (平成 23 年度) 編, (2012).
- [5] Alejandro Avilés, Munehiro Takimoto, Yasushi Kambayashi : Distributed Evacuation Route Planning Using Mobile Agents, Transaction on Computational Collective Intelligence XVII, LNCS 8790, pp. 128-144, (2014).
- [6] Stützle, T. and H. Hoos, H. : MAX-MIN Ant System, Future Generation Computer System, Vol. 16, No. 8, pp. 889-914, Elsevier, (2000).