

モバイルアドホックネットワークにおける GPSを用いたACOルーティング

角野大輔, 鈴木朋子, 大下福仁, 角川裕次, 増澤利光

大阪大学大学院情報科学研究科

モバイルアドホックネットワーク環境におけるルーティングアルゴリズムの一つに Ant Colony Optimization(ACO)ルーティングがある。ACO ルーティングとは、蟻の働きを模倣したエージェントを用いて各ノード間の経路の質をフェロモン量で表現し、フェロモン量に応じてパケット送信経路を確率的に選択するアルゴリズムである。既存のACOルーティングでは、経路の質を測る指標として経路長(ホップ数)と通信遅延を用いている。本論文では、既存の指標に加え、GPSで得られる各ノードの位置情報、速度情報に基づき経路の頑健性を計算し、経路の質を測り、経路を構築、維持する手法を提案する。またシミュレーションにより、提案手法が既存手法に比べ、制御パケット数が少ないにもかかわらずパケット送信成功確率が高いことを示す。

ACO Routing with GPS for Mobile Ad Hoc Networks

Daisuke Kadono, Tomoko Suzuki, Fukuhito Ooshita,
Hirosugu Kakugawa, Toshimitsu Masuzawa

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Ant Colony Optimization (ACO) routing is one of efficient routing algorithms for mobile ad hoc networks. In the ACO routing, ant-like agents traverse in the network, detect a path to a destination, and leave *pheromone* on the traversed link depending on the quality of the path such as the number of hops and its delay. A packet is sent to a link selected with probability based on the amount of pheromone. In this paper, we propose a new ACO algorithm with GPS that evaluates and maintains a path by its *robustness*. Simulation results show that our algorithm achieves higher packet delivery ratio with smaller communication cost than the previous algorithm.

1 はじめに

モバイルアドホックネットワーク(MANET)とは、基地局を利用せず、無線通信によって移動ノードが互いに通信を行うネットワークである。MANET環境における基本問題としてルーティング問題がある。ルーティング問題とは、ネットワーク中の通信経路を探索する問題である。

MANET環境におけるルーティング問題を解く手法に、Ant Colony Optimization(ACO)を利用したものがある[1, 2, 3]。ACOとは、複数の単純な動きをするantエージェント(以下、antとよぶ)が互いに協力することで複雑な問題を解く、群知能を用いたメタヒューリスティックアルゴリズムである。ACOの最大の特徴は、antが知り得た情報の交換をフェロモンを利用して間接的に行う点にある。

ACOルーティングの基本動作は次のようになっている。各ノードはantを生成し、antがネットワークを巡回することで経路を探索する。各antは探索した経路の質に応じて散布するフェロモン量を決定し、経路を構成する各リンクにフェロモンを散布する。各ノードはパケットを送信する際、散布されているフェロモン量に応じた確率で送信経路を決定し、その経路を利用しパケットを送信する。既存研究[1, 2, 3]では経路の質を測る指標として経路長(ホップ数)と

通信遅延を用いている。そのため、ホップ数や通信遅延が短い経路ほど、より多くのフェロモンが散布される。しかし、MANET環境ではノードの移動により、ネットワークトポロジが動的に変化する。そのため、ホップ数や通信遅延が短い経路であっても、通信リンクの切断によって、パケットが送信できなくなることもある。

そこで本論文では、リンクの頑健性によって経路の質を測る指標を加え、動的な環境への高い適応性を有するACOルーティングを提案する。本論文では、各ノードはGPSを保持しているとする。提案手法では、GPSで得られる各ノードの位置や速度、移動方向などの情報を基に、リンクの切れにくさ(頑健性)を表わす関数 g を考案する。各antは経路を構成する各リンクの頑健性 g と、経路のホップ数や通信遅延に基づき、散布するフェロモン量を決定し、経路を構築する。さらに、各ノードは一定時間ごとに隣接ノードとのリンクの頑健性を測り、リンクが切断したと判断した際には、頑健性の高い近隣ノードへフェロモンを移すことで経路を維持する。本論文では、AntHocNet[1]と提案手法の性能比較をシミュレーションにより行い、提案手法が制御パケット数が少ないにもかかわらず、パケット送信成功確率が高いことを示す。

2 モデル

モバイルアドホックネットワークは、無線通信機能と GPS を備えた移動可能なノードで構成される。各ノードは 2 次元平面上に一様ランダムに配置され、その平面上を自由に移動する。各ノード x_i にはそれぞれ固有の識別番号が割り振られており、以降単に i と表す。各ノード x_i は通信半径 R 内に存在する他のノード x_j へのデータ送信が可能であり、その際、 x_i, x_j 間に通信リンクが存在し、 x_i, x_j は隣接するという。各ノードの通信半径は同じであるとする。ノード x_i が送信したデータは、 x_i の全隣接ノードが受信する。また各ノードは、GPS を用いることで、自ノードの座標、移動速度、移動方向、時刻を知ることができる。

ant とは、ネットワーク中のノード間を移動可能な、自律的に動作するソフトウェアである。

各ノードは、自ノード (以下、送信ノードとよぶ) から、データパケットの送信先であるノード (以下、目的ノードとよぶ) までの経路を探索する。各ノードは目的ノードの識別番号を知っており、目的ノードはネットワークに存在するとする。

3 既存手法 : ACO ルーティング

各ノードは経路情報を保持するフェロモンテーブルを持つ。フェロモンテーブルは、行が目的ノード、列が隣接ノードである 2 次元配列である。そしてフェロモン量 Φ_{ij} は、目的ノードを x_j としたときの、次ノードに隣接ノード x_i を選択した場合の経路の質を表す。

ACO ルーティングの概略を説明する。送信ノードは目的ノードの識別番号を保持する forward ant を生成し、全隣接ノードへ送信する。forward ant はネットワークを巡回し、目的ノードを探索する。目的ノードに到達した forward ant は、backward ant となる。backward ant は、目的ノードから送信ノードまで、forward ant がたどった経路を逆にたどり、送信ノードまで戻る。このとき、backward ant は、たどった経路の質 (ホップ数、通信遅延) に応じて経路を構成する各ノードのフェロモンテーブルを更新する。また各ノードは、ノードの移動によるネットワークトポロジの変化に対応するため、一定時間ごとにフェロモンテーブル内の各フェロモン量を減少 (揮発) させる。具体的には、ノード x_i は保持するフェロモンテーブル内の各項 Φ_{jk} に対し、 Δt 時間ごとに以下の式に従いフェロモンを揮発させる。

$$\Phi_{jk} = \gamma \times \Phi_{jk}, \quad \gamma \in [0, 1]$$

データパケットはフェロモンテーブルの情報に従って、確率的にルーティングされる。各ノードは自身のフェロモンテーブル内に目的ノード x_d へのフェロモン情報がある場合、以下の式で表される確率 P_{nd} で次ノード x_n を選択し、データパケットを x_n へ送信する。

$$P_{nd} = \frac{(\Phi_{nd})^{\beta_1}}{\sum_{j \in N_i} (\Phi_{jd})^{\beta_1}}, \quad \beta_1 \geq 1,$$

N_i はノード x_i の隣接ノード集合を表す。目的ノードへのフェロモン情報がない場合、隣接ノードから等確率で 1 つのノードを選び、パケットを送信する。

4 提案手法

提案手法では、各ノードが GPS を保持すると仮定し、ノードの位置・移動情報を用いて動的な環境への適応性を高める。

提案手法の概略は、ACO ルーティングのアルゴリズムとほぼ同じであるが、以下の 3 つの点が異なる。1 つ目は、ホップ数や遅延時間に加え、リンクの頑健性に基づいて経路の質を測りフェロモン量を決定する点である。2 つ目は、既存手法では backward ant のみが経路上のフェロモン更新を行っていたが、効率的な経路構築を行うために、提案手法では forward ant もフェロモン更新を行う点。3 つ目は、隣接ノードの頻繁な変化に対応するため、各ノードが隣接ノードとのリンクの頑健性を測り、それに基づいてフェロモンテーブルを更新し、経路維持に努める点である。各ノードは、隣接ノードの位置・移動情報を把握するために、隣接ノード x_j の (位置 p_j 、移動速度ベクトル \vec{v}_j) が保持された隣接ノードテーブルを持っている。これらの値は各 ant が収集した情報に基づいて更新される。以下では、まずリンクと経路の頑健性について述べた後、各 ant の動作とフェロモン維持手法について詳細を述べる。

リンクの頑健性 提案手法では、隣接するノード x_i, x_j 間のリンクの頑健性を表現する関数 $g(x_i, x_j)$ を 2 つ考案した。

- **関数 1:** ノード x_i に対しリンクの頑健性が高い隣接ノード x_j は、 x_i との相対速度が小さく、移動方向がノード x_i へ向いており、 x_i までの距離が近いノードであると考えた。そこで関数 $g_1(x_i, x_j)$ を以下のように定義した。

$$g_1(x_i, x_j) = \frac{1}{|V_{ij}|} \times (\cos\theta_{ij} + 1) \times (R - D_{ij})$$

ここで V_{ij} は x_i の速度に対する x_j の相対速度、 θ_{ij} は x_i の移動角度に対する x_j の移動角度、 R は通信半径、 D_{ij} は x_i, x_j 間の距離を表す (図 1(a))。

- **関数 2:** ノード x_i に対しリンクの頑健性が高い隣接ノード x_j は、 x_i の通信範囲に長く存在するノードであると考えた。そこで関数 $g_2(x_i, x_j)$ を以下のように定義した。

$$g_2(x_i, x_j) = \frac{Dr_{ij}}{|V_{ij}|}$$

ここで V_{ij} は x_i の速度に対する x_j の相対速度、 Dr_{ij} は x_j の x_i に対する相対的な移動ベクトルを延長した直線と x_i の通信半径との交点から x_j までの距離を表す (図 1(b))。

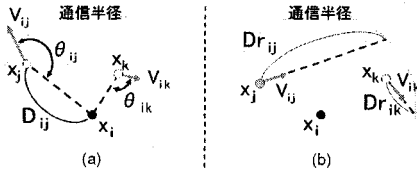


図 1: (a) 関数 g_1 の変数, (b) 関数 g_2 の変数

経路の頑健性 経路の頑健性の値は、経路を構成している各リンクの頑健性の最小値と定義した。つまり、経路 \mathcal{R} をノード識別番号の列 $[1, 2, \dots, k-1, k]$ で表したとき、経路 \mathcal{R} の頑健性 $G(\mathcal{R})$ は以下の通りである。

$$G(\mathcal{R}) = \text{Min}\{g(x_i, x_{i+1}) \mid 1 \leq i \leq k-1\}$$

Forward ant の動作 送信ノード x_s は、目的ノード x_d までのフェロモン情報を持たない場合、forward ant F_d^s を生成し、全隣接ノードへ送信する。 F_d^s は、 x_s から x_d までの経路を探索しつつ、訪問ノード上でフェロモンテーブルを更新する。ノード x_s からノード $x_j, x_{j+1}, \dots, x_{i-1}$ をたどってノード x_i に到達した F_d^s は、以下を保持している。

- 送信ノードの識別番号 s
- 目的ノードの識別番号 d
- 移動ホップ数 H
- 前ノード x_{i-1} の位置 p_{i-1}
- 前ノード x_{i-1} の移動速度ベクトル \vec{v}_{i-1}
- 訪問ノードリスト $\mathcal{P} = [s, j, j+1, \dots, i-1]$
- 通信遅延リスト $\mathcal{T} = [t_{sj}, t_{j(j+1)}, \dots, t_{(i-2)(i-1)}]$
- リンクの頑健性リスト

$\Psi = [g(x_s, x_j), g(x_j, x_{j+1}), \dots, g(x_{i-2}, x_{i-1})]$
 $t_{j(j+1)}$ はノード x_j, x_{j+1} 間の通信遅延である。

訪問ノード x_i 上での F_d^s の動作を説明する。訪問ノードリスト \mathcal{P} に x_i が含まれている場合、 F_d^s は破棄される。含まれていない場合、移動ホップ数 H に 1 加算、前ノード x_{i-1} の位置 p_{i-1} ・移動速度ベクトル \vec{v}_{i-1} の情報を利用し、ノード x_i の隣接ノードテーブルを更新する。さらに、訪問ノードの識別番号 i を訪問ノードリスト \mathcal{P} へ、通信遅延 $t_{(i-1)i}$ を通信遅延リスト \mathcal{T} へ、前ノード x_{i-1} と訪問ノード x_i 間のリンクの頑健性 $g(x_{i-1}, x_i)$ の値をリンクの頑健性リスト Ψ へ追加する。そして、ノード x_i を送信ノード、前ノード x_{i-1} を隣接ノード、訪問ノードリスト \mathcal{P} 中のノードそれぞれを目的ノードとしてフェロモン更新を行う。すなわち、 F_d^s は、 x_i が保持するフェロモンテーブルの $\Phi_{(i-1)s}, \Phi_{(i-1)j}, \dots, \Phi_{(i-1)(i-1)}$ の項に対しフェロモン更新を行う。 \mathcal{R} をノード x_k から x_{i-1} までにたどった経路 $[k, \dots, i-1]$ としたとき、 $\Phi_{(i-1)k}$ のフェロモン変化量の式は、以下の通りである。

$$\phi_{(i-1)k} = \left(\frac{T_{(i-1)k}^s + H_k^i}{2}\right)^{-1} \times G(\mathcal{R}),$$

$$(k = s, j, j+1, \dots, i-1)$$

なお、 T_k^i はノード x_i からノード x_k までの通信遅延であり、通信遅延リスト \mathcal{T} から求める。同様にノード x_i からノード x_k までの移動ホップ数 H_k^i は訪問ノードリスト \mathcal{P} から求めることができる。

フェロモン更新後 F_d^s は、 x_i のフェロモンテーブルの情報に従い、次の移動先ノードを決定する。その際、ノード x_i の位置 p_i ・移動速度ベクトル \vec{v}_i の情報を取得する。 x_i が目的ノード x_d までのフェロモン情報を持っている場合は、以下の式に従い、確率 P_{nd} で次ノード x_n を選択し、 x_n へ移動する。

$$P_{nd} = \frac{(\Phi_{nd})^{\beta_2}}{\sum_{j \in N_i, j \notin \mathcal{P}} (\Phi_{jd})^{\beta_2}}, \quad \beta_1 \geq \beta_2 \geq 1,$$

候補となる隣接ノードが存在しない場合や、訪問ノード x_i に目的ノードまでのフェロモン情報がない場合は、 F_d^s は全隣接ノードへ送信される。以降、これらの動作を目的ノードへ到達するまで繰り返す。

Backward ant の動作 目的ノード x_d に到達した F_d^s は、backward ant B_d^s に転向する。 B_d^s は、 x_d から x_s までフェロモンテーブルを更新しつつ戻り、経路を構築する。転向した B_d^s は、 F_d^s と同様のデータを保持し、ノード x_s を目的ノード、 x_d を開始ノードとした後、訪問ノードリスト以外のデータを初期化する。

B_d^s は、訪問ノードリスト \mathcal{P} 内のノード列を逆にたどることで送信ノード x_s を目指す。その際、中継ノード上での B_d^s の動作は F_d^s と同じである。

フェロモン維持手法 各ノード x_i は、一定時間 Δt ごとに隣接ノードテーブルの情報を用いて、 Δt 時間後の隣接ノード x_j との距離 D'_{ij} を計算する。 $D'_{ij} > R$ となった場合、リンク (x_i, x_j) が切断すると考える。この時、図 2 のように一辺の長さが L の正方形の領域 E_j を、ノード x_j の移動方向と逆向きに x_j が一辺の中点上になるよう設定する。そして、領域 E_j 内に存在し、 $D'_{ih} < R$ となる各隣接ノード x_h に対し、ノード x_i, x_j 間のフェロモンを x_i, x_h 間に移動させる。すなわち、フェロモンの移動先ノードとなるノードが u 個存在するとき、ノード x_i は保持するフェロモンテーブルにおいて、各対象ノード x_h に対し、以下の式に従いフェロモン量を移動させる。

$$\Phi_{hd} = \Phi_{hd} + \Phi_{jd}/u$$

最後にフェロモンテーブル内の x_j の列と、隣接ノードテーブル内の x_j の情報を削除する。



図 2: フェロモン維持手法

5 シミュレーション

本論文では提案手法の性能を測るためにシミュレーションを行った。性能比較の対象としては、ACOルーティングをMANET環境に適応させたアルゴリズムであるAntHocNet[1]を選択した。AntHocNetでは、ノードの移動によるリンクの切断に対応するために、各ノードは定期的にhelloメッセージを送信している。各ノードはリンクの切断によって、目的ノードまでの最良経路のフェロモン情報が変化した場合、新しいフェロモン情報をリンク故障通知として全隣接ノードへ送信する。各ノードはこの情報をもとにフェロモン情報を更新し、再度目的ノードまでの最良経路のフェロモン情報が変化した場合、リンク故障通知を全隣接ノードへ送信する。その結果、すべての近隣ノードが新しい状況を把握するまで、リンク故障通知が送信される。

シミュレーションでは、提案手法とAntHocNetのデータパケット送信成功確率と、合計制御パケット数を比較した。データパケット送信成功確率は生成パケット数に対する受信パケット数の割合で定義される。また、合計制御パケット数はシミュレーション開始時から終了時まで使用した制御パケット(各ant, helloメッセージ, リンク故障通知)の合計である。それぞれのシミュレーション結果の値は、10回の実行の平均値である。

シミュレーション環境 初期状態として、100ノードを $3000 \times 1000 m^2$ のフィールド上にランダムに配置する。シミュレーション時間は200秒とした。各ノードは1秒あたり、2パケットを生成し、送信要求を出す。通信半径 R を300m, L を200m, Δt を0.5秒, β_1, β_2, γ をそれぞれ、2, 1, 0.7とした。ノードの移動モデルはランダムウェイポイントモデルを用いており、ノードの移動速度は、1~10m/s, 1~20m/s, 1~30m/sの3つのパターンで実験した。なおノードの停止時間は0秒である。また、シミュレーションでは、任意の隣接ノード間の通信遅延を0.5秒とし、各ノードでの計算時間は0秒とした。

なお、パケット送信成功確率において、受信パケット数に数えられているパケットは、シミュレーション開始50秒から150秒までに各ノードで生成されたパケットを対象とした。

シミュレーション結果 表1は、パケット送信成功確率の結果である。この結果から提案手法はAntHocNetに比べ、すべての移動速度パターンでパケット送信成功確率が高いことが分かる。AntHocNetでは、ノードの移動速度が速くなると成功確率が大幅に低下しているが、提案手法では成功確率の低下が緩やかであることがわかる。

次に合計制御パケット数の結果を表2に示す。この結果から提案手法はAntHocNetに比べ、すべての移動速度パターンで合計制御パケット数が十分に

表 1: 各手法のパケット送信成功確率

移動速度 (m/s)	1~10	1~20	1~30
AntHocNet	0.807	0.723	0.690
提案手法 (関数 1)	0.995	0.987	0.983
提案手法 (関数 2)	0.997	0.990	0.987

表 2: 各手法の合計制御パケット数 ($\times 10^4$)

移動速度 (m/s)	1~10	1~20	1~30
AntHocNet	174.41	179.32	196.66
提案手法 (関数 1)	61.62	62.81	62.82
提案手法 (関数 2)	51.64	55.03	53.75

少ないことが分かる。AntHocNetの制御パケット数が大きくなる原因としては、各ノードが定期的に送信するhelloメッセージや、リンクの切断情報の拡散が考えられる。またAntHocNetでは、ノードの移動速度が速くなると合計制御パケット数が大幅に増加しているが、提案手法では合計制御パケット数の増加が緩やかであることがわかる。

以上の結果から、提案手法はAntHocNetに比べ、制御パケット数は十分少ないにもかかわらず、パケット送信成功確率が高く、有効な手法であることが分かる。

6 まとめ

本論文では、ACOルーティングにおけるリンクの頑健性に基づいたフェロモン更新手法、フェロモン維持手法を新たに提案した。シミュレーション結果から、提案手法が既存手法に比べ、制御パケット数が少ないにもかかわらず、パケット送信成功確率が高いことを示した。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省グローバルCOEプログラム(研究拠点形成費)、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)19300017, 基盤研究(B)17300020, 若手研究(B)18700059)、文部科学省科学研究費補助金(特定領域16092215)、中島記念国際交流財団、栢森情報科学振興財団の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] F. Ducatelle, G. D. Caro and L. M. Gambardella, "Ant Agents for Hybrid Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks", In Proceedings of the second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS'05), pp. 44-53, 2005
- [2] M. Gunes, U. Sorges, and I. Bouazizi, "ARA - the ant-colony based routing algorithm for MANETS", In Proceedings of the International Workshop on Ad Hoc Networks (IWAHN'02), pp. 79- 85, 2002
- [3] J. S. Baras and H. Mehta, "A probabilistic emergent routing algorithm for mobile ad hoc networks", In Proceedings of the Conference on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt'03), pp 20-24, 2003