

ABLA:方向変化量に基づく無線ノード位置広告手法

尾根田 倫太郎^{†1} 梶 垣 博 章^{†1}

GEDIR, COMPASS, GPSR 等は, データメッセージごとに各中継移動無線ノードが次ホップノードを決定するアドホックルーティングプロトコルである. これらのプロトコルは, 移動頻度, 移動速度が比較的高い環境への適応性が期待できるが, 各中継移動無線ノードの次ホップノード決定には, 送信先移動無線ノードの位置情報が必要である. DREAM は, 送信先移動無線ノードの位置情報を各移動無線ノードが保持する完全分散方式において, その更新オーバーヘッドを削減するために, 更新広告メッセージをホップ数で制約された近隣にのみ配布する手法である. 本論文では, 位置情報更新の必要性は, 移動無線ノードからの距離だけでなく, 移動方向に対する方向にも依存することに注目したよりオーバーヘッドの削減が可能な ABLA (Angle-Based Location Advertisement) 手法を提案する. ここでは, 位置情報の広告範囲は各無線ノードが持つ位置情報との方向の変化量によって制約される. また, ABLA では, 更新広告メッセージの転送を各無線ノードが自律分散的に決定するにも関わらず, 散発的に発生する広域的なメッセージの拡散により, 接続性の向上と経路長の短縮が実現される.

ABLA: Angle-Based Location Advertisement for Location-Based Ad-Hoc Routing in MANETs

RINTARO ONEDA ^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

In location-based routing protocols for wireless multihop networks such as GEDIR, COMPASS and GPSR, each intermediate node determines its next-hop node for each data message independently. These protocols are highly applicable to highly mobile wireless networks. For determination of the next-hop node, the location information of the destination node is required by each intermediate node. In DREAM, each wireless node keeps location information of all the wireless nodes. For lower communication overhead, control messages with the up-to-date location information are transmitted only to neighbor nodes restricted by hop counts. This paper proposes a novel advertising method ABLA of the location information where the distribution area is determined not only by the distance but also the direction to the node. That is, distribution area of advertisement is determined by difference of direction to the last advertised location and to the up-to-date one. It is expected that the required commu-

nication overhead is reduced though the reachability of data messages is kept high. In addition, due to occasional wide-spread advertisement caused by autonomous decision of distribution in each node, multihop transmission routes are modified to be shorter.

1. はじめに

無線通信機能を備えた移動ノードのみから構成されるモバイルアドホックネットワーク (MANET) の研究が盛んに行なわれている. 移動無線ノードは一般に電力供給源を持たないこと, 無線通信がブロードキャストを基礎としており, 隣接移動無線ノードとの通信メディアの共有による衝突と競合を回避あるいは削減する必要があることから, 各移動無線ノードは限られた送信電力による無線信号到達範囲に含まれる隣接移動無線ノードとのみ直接通信が可能である. そのため, 送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードまでのデータメッセージ配送には, 他の移動無線ノードを中継移動無線ノードとする無線マルチホップ配送が用いられる. このとき, 無線ノードの移動による隣接移動無線ノードの変化, 省電力のためのスリープモードによる無線ノードのネットワークからの一時的離脱, 故障による永続的離脱などによりネットワークポロジが経時的に変化するため, データメッセージの配送経路を決定するルーティングプロトコルが重要となる. 隣接移動無線ノードの位置情報を用いてデータメッセージごとに次ホップ移動無線ノードを決定するルーティングプロトコルを用いる場合, 各中継移動無線ノードでは, 送信先移動無線ノードの位置情報が必要となる. そのため, 送信先移動無線ノードの位置を取得する機構が DREAM¹⁾ や HRLI⁸⁾ で提案されている. DREAM では, すべての移動無線ノードが他の移動無線ノードの位置情報を保持する完全分散型手法を用い, その更新を移動した無線ノードの近隣移動無線ノードのみに伝達することによって通信オーバーヘッドを削減する手法を提案している. 本論文では, 移動無線ノードの位置情報更新の伝達基準にその移動無線ノードの相対的な方向の変化を用いることで, データメッセージの無線マルチホップ配送の可用性を保ちながら位置情報更新に要する通信オーバーヘッドを削減する手法を提案する.

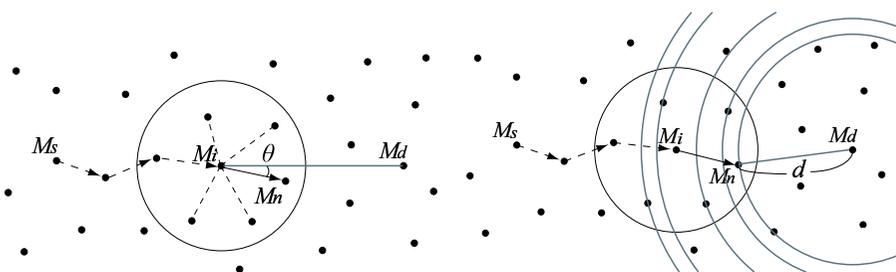
2. 関連研究

アドホックネットワークを対象としたルーティングプロトコルには, 無線ノードの移動性と故障に対する脆弱性によるネットワークポロジの動的変化の問題への対処が要求される. そのため, 従来の有線ネットワークを対象としたルーティングよりも困難な問題として多

^{†1} 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

様なアプローチがなされてきた。AODV や DSR は、データメッセージ群配送要求時に送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードへの無線マルチホップ配送経路を探索、検出するリアクティブ（オンデマンド）型アドホックルーティングプロトコルである。ここでは、経路探索要求制御メッセージのフラッディングを用いることから経路検出に比較的高い通信オーバーヘッドと時間オーバーヘッドを要する。このため、検出経路が一定数以上のデータメッセージ配送に使用される必要があり、検出経路が一定期間安定に使用可能である程度の移動速度と移動頻度であるアドホックネットワークが適用対象となる。

これに対して、GPSR⁴⁾、GEDIR⁶⁾、COMPASS⁹⁾、FACE²⁾ 等のプロトコルでは、各データメッセージごとに配送経路を動的に決定する手法が用いられており、移動速度、移動頻度の高い無線ノードを含むアドホックネットワークへの適用可能性を備えている。図1に示すように、隣接移動無線ノード M_p からデータメッセージを受信した移動無線ノード M_i は、自身とすべての隣接移動無線ノードの位置および送信先移動無線ノード M_d の位置に基づいて、データメッセージ転送先である次ホップ隣接移動無線ノード M_n を選択する。COMPASS では、 M_i から M_d と隣接移動無線ノード M を見込む角 $\angle MM_i M_d$ が最小となる M を次ホップ隣接移動無線ノード M_n と定める。また、GEDIR では M から M_d までの距離 $|MM_d|$ が最小となる M を次ホップ隣接移動無線ノード M_n と定める。



(a) COMPASS における次ホップ隣接無線ノード

(b) GEDIR における次ホップ隣接無線ノード

図1 COMPASS および GEDIR における次ホップ隣接無線ノード

これらのプロトコルでは、各中継移動無線ノード M_i が次ホップ移動無線ノード M_n を選択するために、すべての隣接移動無線ノード M の位置情報に加えてデータメッセージの送信先移動無線ノード M_d の位置情報を必要とする。HRLI⁸⁾、Homezone³⁾、GLS⁵⁾、Octopus⁷⁾

等では、動的に決定される複数の位置情報サーバに各移動無線ノードの位置情報を分散配置する手法が用いられている。ここでは、送信元移動無線ノード M_s が限定的なフラッディングを用いて位置情報取得要求メッセージを M_d の位置情報を格納したいずれかの位置情報サーバへ到達させ、得られた位置情報をデータメッセージのヘッダに格納することで各中継移動無線ノードが次ホップ移動無線ノードを決定することを可能としている。

一方、DREAM では、各移動無線ノードにすべての送信先移動無線ノードの位置情報を格納する完全分散型手法を採用している。データメッセージを中継する移動無線ノードは、自身に格納された隣接移動無線ノードと送信先移動無線ノードの位置情報に基づいて次ホップ移動無線ノードを選択し、データメッセージを転送する。ここでは、各送信先無線ノードの移動にともなって位置情報を更新する必要がある。各送信先移動無線ノードの位置の変化をすべての移動無線ノードに伝達するために要する通信オーバーヘッドは大きく、これを削減することが求められる。DREAM では、各移動無線ノードの位置の変化に対する次ホップ移動無線ノード変更の必要性は、無線ノードの移動距離と移動した無線ノードまでの距離に依存することから、位置情報の更新を移動した無線ノードから移動距離に基づいて定められたホップ数以内に含まれる近隣移動無線ノードにのみ伝達する手法を提案している。

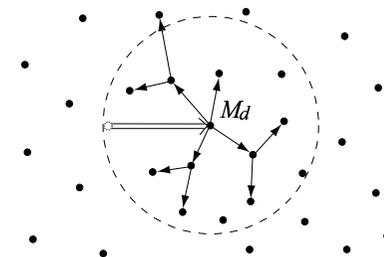


図2 DREAM の更新メッセージ配布

3. 提案手法

3.1 移動検出手法

DREAM では、各移動無線ノードが GPS 等の自身の位置情報を取得するためのデバイスを用意していることを前提とし、自身の位置があらかじめ定められた閾値以上に変わった場合に自身の位置情報を広告する制御メッセージを送信する。つまり、アドホックネットワークの存在領域に定められた固定座標系に対して閾値以上の移動を行なうことを位置情報広告のトリガとしている。しかし、他の移動無線ノードから自身への経路を変更するという観

点で考えた場合、他の移動無線ノードから見た自身の位置(方向)の変更は、移動無線ノード間の相対位置の閾値以上の変化がトリガとなるべきである。特に前章における考察から、他の無線ノードから見た自身の方向の変化が閾値以下である場合には位置情報を広告する必要はない。そのため、閾値以上の方向の変化をトリガとして位置情報を広告することで位置広告に要する通信オーバーヘッドを削減することができる。本論文では、各無線ノード M_i が隣接無線ノード M_j の位置情報を取得し、その位置(方向)が閾値以上に変化した場合にのみ M_j の位置情報広告のための制御メッセージの無線マルチホップ配送を M_i が開始する ABLA(Angle-Based Location Advertisement) 手法を提案する。ここでは、相対位置の閾値以上の変化を以下の手法によって検出する。

- 1) 各移動無線ノード M_j は、GPS 等の位置情報取得デバイスを用いて自身の位置情報を定期的に取得する。
- 2) M_j は取得した位置情報を含む定期位置広告メッセージ $RLadv$ を無線信号到達範囲にあるすべての隣接移動無線ノードへブロードキャスト送信する。
- 3) $RLadv$ を M_j から受信した M_i は、 M_j の位置情報を更新するとともに、 M_i から見た M_j の位置(方向)の変化量 φ を求め、これがあらかじめ定められた閾値 $\bar{\varphi}$ よりも大きい場合には、 M_j の位置情報を含むトリガによる位置広告メッセージ $TLadv$ を無線信号到達範囲にあるすべての隣接移動無線ノードへブロードキャスト送信する。

3.2 位置情報広告手法

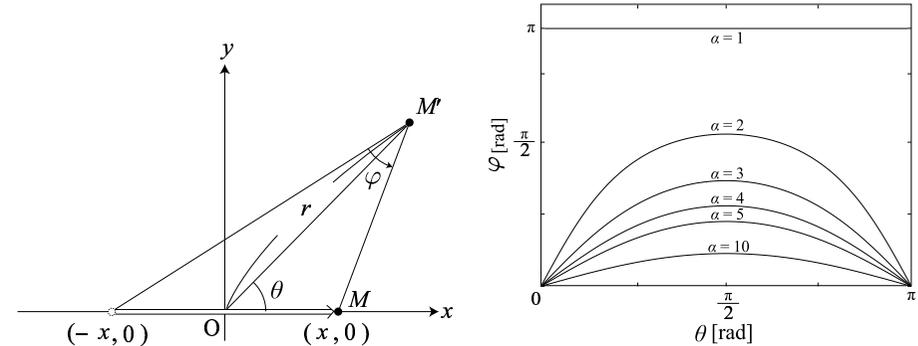
ここで、図 3(a) のように座標 $(-x, 0)$ から $(x, 0)$ へ移動する無線ノード M を座標 $(r \cos \theta, r \sin \theta)$ に位置する無線ノード M' が観測する場合を考える。このとき、 M' から M への方向の変化量 φ は次式で与えられる。

$$\left\{ (r \cos \theta - x)^2 + r^2 \sin^2 \theta \right\} + \left\{ (r \cos \theta)^2 + r^2 \sin^2 \theta \right\} - 2 \cos \varphi \left\{ \sqrt{(r \cos \theta - x)^2 + r^2 \sin^2 \theta} \sqrt{(r \cos \theta)^2 + r^2 \sin^2 \theta} \right\} = 4x^2$$

これを φ について解くと次式が得られる。

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{r^2 - x^2}{\sqrt{(r^2 + x^2)^2 - 4r^2 x^2 \cos^2 \theta}}$$

ここで $r = \alpha x$ としたときの、 α と θ に対する φ の変化を図 3 に示す。送信先移動無線ノードと隣接移動無線ノードの位置から各データメッセージごとに次ホップ移動無線ノードを選択する手法では、「送信先移動無線ノードのある方向」に位置する隣接移動無線ノードが選択される。すなわち、中継移動無線ノードからのこれらの移動無線ノードを見込む角



(a) 隣接ノードから観測されるノード移動

(b) ノード移動による方向の変化

図 3 観測されるノード移動とノード移動による方向の変化

が小さいものが次ホップとして選択される傾向がある。図 3(b) において α の値が大きいほど φ の値が小さいことから、この見込む角の変化は各移動無線ノードからの距離が大きいほど変化しにくいという性質を持つ。

例えば、図 4 において、移動する M'' からの距離が大きく方向の変化が小さな M では、 M'' への無線マルチホップ配送経路の次ホップ移動無線ノードは M'' が移動しても変化しない。したがって、 M の保持する M'' の位置情報が更新されない場合でもデータメッセージを M'' に到達させることができる。一方、 M'' からの距離が小さく方向の変化が大きな M' では、 M'' への無線マルチホップ配送経路の次ホップ移動無線ノードが変化する。このため、 M' の保持する M'' の位置情報が更新されない場合には、データメッセージが M'' に到達しなくなることが考えられる。DREAM では、この性質に基づいて M'' の移動距離に応じて更新した M'' の位置情報広告範囲をホップ数で指定している。

ここで、図 3(b) に示したように、ある移動無線ノードから見た他の移動無線ノードの方向の変化は距離だけではなく、移動方向にも依存する。例えば、図 5 の移動無線ノード M から見た移動無線ノード M' の方向の変化は大きく、 M' への無線マルチホップ経路の次ホップ移動無線ノードが変化する。このため、 M に保持される M' の位置情報は更新することが求められる。一方、 M から見た移動無線ノード M'' の方向の変化は小さく M'' への無線マルチホップ配送経路の次ホップ移動無線ノードは変化しない。すなわち、 M'' の位置情報は更新の必要性が低い。そこで、本論文で提案する ABLA 手法では、この移動無線ノードの方向の変化を基準として位置情報広告の伝達範囲を制約する手法を導入することで、無線

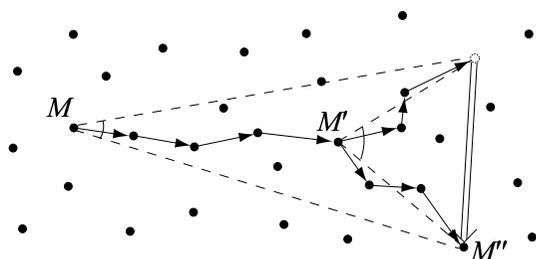


図 4 送信先移動無線ノードからの距離と次ホップ移動無線ノード変更

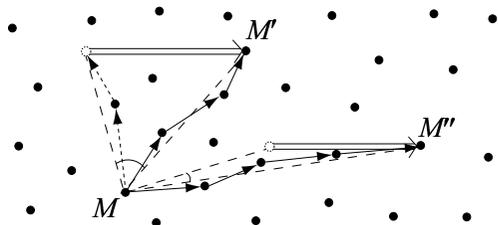


図 5 送信先移動無線ノードへの方向の変化と次ホップ移動無線ノード変更

マルチホップ配送経路の接続性を高く維持し、要する通信オーバーヘッドを削減する。

- 1) 移動無線ノード M_j の位置情報を広告するためのトリガによる位置広告メッセージ $TLadv$ を隣接移動無線ノード M_k から受信した各移動無線ノード M_i は、 M_j の位置情報を更新する。
- 2) M_i は M_i から見た M_j の位置 (方向) の変化量 φ を求め、これがあらかじめ定められた閾値 $\bar{\varphi}$ よりも大きい場合にのみ、 M_j の位置情報を含むトリガによる位置広告メッセージ $TLadv$ を無線信号到達範囲にあるすべての隣接移動無線ノードへブロードキャスト送信する。 φ が $\bar{\varphi}$ 以下である場合には、 $TLadv$ の送信は行なわない。

3.3 位置情報広告プロトコル

各移動無線ノード M_i は、定期的に自身の位置情報を含む定期位置広告メッセージ $RLadv(M_i, (x_i, y_i), seq_i)$ を無線信号到達範囲に含まれるすべての隣接移動無線ノードにブロードキャスト送信する。ここで、 (x_i, y_i) は GPS 等の位置情報取得デバイスを用いて取得した自身の最新の位置情報である。また、各 $RLadv$ メッセージにはシーケンス番号 seq_i を付与する。

さらに、各移動無線ノード M_i は、他のすべての移動無線ノード M_j について、ノード

ID, 現在位置, 更新基準位置, シーケンス番号の 4 項組 $\langle M_j, (x_{ij}, y_{ij}), (x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv}), seq_{ij} \rangle$ を保持する。 (x_{ij}, y_{ij}) は M_i が取得した M_j の最新の位置情報である。 (x_{ij}, y_{ij}) は、以下のいずれかの場合に更新される。

- M_j が M_i の隣接移動無線ノードであり、 M_i が M_j からブロードキャスト送信された定期位置広告メッセージ $RLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ を受信した場合。
- M_i が M_j 以外の隣接無線ノード M_k からブロードキャスト送信された (M_j からマルチホップ配送された) トリガによる位置広告メッセージ $TLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ を受信した場合。

M_j を送信先とするデータメッセージ配送における M_i の次ホップ移動無線ノードの決定には M_i が保持する M_j の最新の位置情報 (x_{ij}, y_{ij}) が用いられる。

M_i は隣接移動無線ノード M_j から定期的に $RLadv$ メッセージを受信し、 M_j の最新の位置情報 (x_{ij}, y_{ij}) を更新する。このとき、 M_j の $RLadv$ メッセージ送信間隔が M_j の移動速度に対して十分短い場合には、 M_i が観測する M_j の位置変化は十分に小さく、 M_j の位置情報を無線マルチホップ配送するための $TLadv$ メッセージが M_i から送信されることがない。そこで、 M_i が M_j の位置情報を $TLadv$ メッセージのマルチホップ配送によって広告する条件の充足を確認するために更新基準位置 $(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv})$ を保持する。 $(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv})$ は、以下のいずれかの場合に更新される。

- M_j が M_i の隣接移動無線ノードであり、 M_j から $RLadv$ メッセージを受信して (x_{ij}, y_{ij}) を更新した結果、 M_j の $(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv})$ から (x_{ij}, y_{ij}) への移動が $TLadv$ メッセージ送信基準を満足した場合。
- M_i が M_j 以外の隣接無線ノード M_k からブロードキャスト送信された (M_j からマルチホップ配送された) トリガによる位置広告メッセージ $TLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ を受信し (x_{ij}, y_{ij}) を更新した結果、 M_j の $(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv})$ から (x_{ij}, y_{ij}) への移動が $TLadv$ メッセージ送信基準を満足した場合。

なお、 M_i がブロードキャスト送信した $RLadv$ メッセージを受信した複数の隣接移動無線ノードにおいて $TLadv$ メッセージのマルチホップ配送による M_i の位置広告が開始された場合、これらの $TLadv$ メッセージを区別しないことによって M_i の位置情報を含む $TLadv$ メッセージの転送回数を削減することができる。また、 M_i から他の移動無線ノードへの無線マルチホップ配送経路が複数存在する場合、先に送信された $TLadv$ メッセージが後から送信された $TLadv$ メッセージよりも先に到達する場合もある。そこで、 M_i からブロードキャスト送信される $RLadv$ メッセージにはシーケンス番号 seq_i を付与することとする。また、 M_i からブロードキャスト送信された $RLadv$ メッセージを受信した M_i の隣接移動無線ノードが $TLadv$ メッセージをブロードキャスト送信する場合には、 $RLadv$ に付与されていた seq_i を $TLadv$ に付与する。この付与を行なうために M_i では次にブロードキャスト送信する $RLadv$ メッセージに付与するシーケンス番号 seq_i を保持する。

[定期位置広告メッセージによる位置広告]

- 1) 移動無線ノード M_i は、位置取得デバイスによって自身の位置 (x_i, y_i) を定期的に取り出し、定期位置広告メッセージ $RLadv(M_i, (x_i, y_i), seq_i)$ を無線信号到達範囲にある隣接無線ノードへブロードキャスト送信する。
- 2) $seq_i := seq_i + 1$ とする。

[定期位置広告メッセージによる位置更新]

- 1) 隣接移動無線ノード M_j からブロードキャスト送信された $RLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ を受信した移動無線ノード M_i は、自身の保持する M_j の位置情報を保持する4項組 $\langle M_j, (x_{ij}, y_{ij}), (x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv}), seq_{ij} \rangle$ について $seq_j > seq_{ij}$ である場合にのみ、以下の処理を行なう。
- 2) $(x_{ij}, y_{ij}) := (x_j, y_j)$, $seq_{ij} := seq_j$ とする。
- 3) 以下の式により3点 $M_{ij}^{adv}(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv})$, $M_i(x_i, y_i)$, $M_j(x_j, y_j)$ のなす角 $\angle M_{ij}^{adv} M_i M_j$ を求める。

$$\angle M_{ij}^{adv} M_i M_j = \cos^{-1} \frac{|M_{ij}^{adv} M_i|^2 + |M_j M_i|^2 - |M_{ij}^{adv} M_j|^2}{2 |M_{ij}^{adv} M_i| |M_j M_i|}$$

ただし、

$$\begin{aligned} |M_{ij}^{adv} M_i| &= \sqrt{(x_{ij}^{adv} - x_i)^2 + (y_{ij}^{adv} - y_i)^2} \\ |M_j M_i| &= \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \\ |M_{ij}^{adv} M_j| &= \sqrt{(x_{ij}^{adv} - x_j)^2 + (y_{ij}^{adv} - y_j)^2} \end{aligned}$$

である。

- 4) $\angle M_{ij}^{adv} M_i M_j$ が $TLadv$ メッセージ送信基準角度 $\bar{\varphi}$ 以上である場合、 M_i は M_j の位置情報をマルチホップ配送によって広告するために $TLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ メッセージを無線信号到達範囲にある隣接無線ノードへブロードキャスト送信するとともに、 $(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv}) := (x_j, y_j)$ とする。

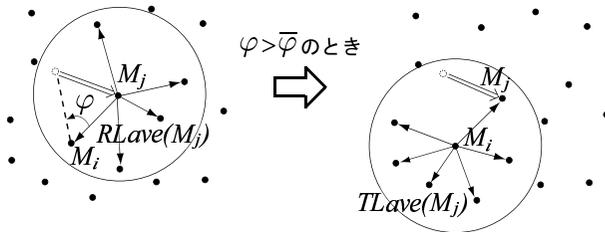


図6 定期位置広告メッセージによる位置更新

[トリガによる位置広告メッセージによる位置更新]

- 1) 隣接移動無線ノード M_k からブロードキャスト送信された移動無線ノード M_j の位置情報を広告する $TLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ メッセージを受信した移動無線ノード M_i は、自身の保持する M_j の位置情報を保持する4項組 $\langle M_j, (x_{ij}, y_{ij}), (x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv}), seq_{ij} \rangle$ について $seq_j > seq_{ij}$ である場合にのみ、以下の処理を行なう。
- 2) $(x_{ij}, y_{ij}) := (x_j, y_j)$, $seq_{ij} := seq_j$ とする。
- 3) 以下の式により3点 $M_{ij}^{adv}(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv})$, $M_i(x_i, y_i)$, $M_j(x_j, y_j)$ のなす角 $\angle M_{ij}^{adv} M_i M_j$ を求める。

$$\angle M_{ij}^{adv} M_i M_j = \cos^{-1} \frac{|M_{ij}^{adv} M_i|^2 + |M_j M_i|^2 - |M_{ij}^{adv} M_j|^2}{2 |M_{ij}^{adv} M_i| |M_j M_i|}$$

ただし、

$$\begin{aligned} |M_{ij}^{adv} M_i| &= \sqrt{(x_{ij}^{adv} - x_i)^2 + (y_{ij}^{adv} - y_i)^2} \\ |M_j M_i| &= \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \\ |M_{ij}^{adv} M_j| &= \sqrt{(x_{ij}^{adv} - x_j)^2 + (y_{ij}^{adv} - y_j)^2} \end{aligned}$$

である。

- 4) $\angle M_{ij}^{adv} M_i M_j$ が $TLadv$ メッセージ送信基準角度 $\bar{\varphi}$ 以上である場合、 M_i は $TLadv(M_j, (x_j, y_j), seq_j)$ メッセージを無線信号到達範囲にある隣接無線ノードへブロードキャスト送信する。
- 5) $(x_{ij}^{adv}, y_{ij}^{adv}) := (x_j, y_j)$ とする。

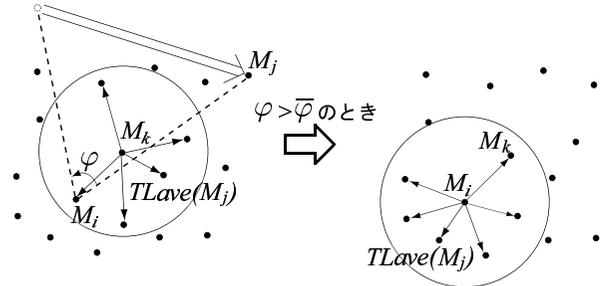


図7 トリガによる位置広告メッセージによる位置更新

4. 性能評価

4.1 通信オーバーヘッドとデータメッセージ到達率

本論文で提案した ABLA 手法は、無線ノード位置の変化を広告する対象無線ノードをこの無線ノード位置への方向の変化量を指標として選択することで、無線ノード位置広告オーバーヘッドとデータメッセージ到達率とのより優れたトレードオフを実現するものである。そこで、本節では、ABLA 手法における広告に要する制御メッセージ数とデータメッセージ到達率との関係を位置変化広告範囲を距離で制約する DREAM 手法と比較評価する。

シミュレーション領域は $5,000\text{m} \times 5,000\text{m}$ の正方形領域とし、無線信号到達距離 100m の無線ノードを $10,000$ 台、一様分布乱数を用いてランダムに配置する。また、送信元無線ノード M_s と送信先無線ノード M_d は、領域のひとつの対角線上で頂点から $1250\sqrt{2}\text{m}$ 地点に初期配置する。すべての無線ノードは、移動速度 $0\text{--}10\text{km/h}$ 、平均待機時間 10 秒のランダムウェイポイントモデルにしたがって移動する。データメッセージが COMPASS プロトコルでルーティングされる場合において、ABLA では位置情報広告の閾値角度を $20\text{--}60$ 度の範囲で変化させた場合、DREAM ではホップ数を $1\text{--}10$ ホップの範囲で変化させた場合の接続性に対する通信オーバーヘッドを測定する。無線マルチホップ配送経路の接続率は、データメッセージが破棄されずに送信先無線ノードへ配送される確率によって評価する。また、通信オーバーヘッドは、6 分以内にブロードキャスト送信された位置情報広告制御メッセージ数によって評価する。

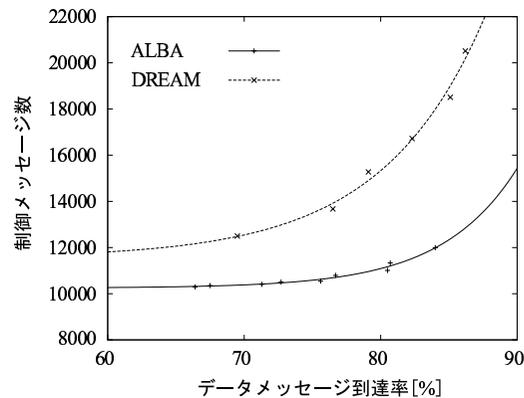


図 8 接続率と通信オーバーヘッド

評価結果を図 8 に示す。ABLA と DREAM のいずれにおいても無線ノードの更新された位置 (方向) 情報を伝達する制御メッセージの送信を行う閾値を小さく設定する場合には、位置情報広告制御メッセージの転送頻度が上昇し位置情報転送範囲が拡大することから、高接続性が得られるが、高い通信オーバーヘッドを要する。また、閾値を大きく設定する場合には、位置情報広告制御メッセージの転送頻度が低下し、転送範囲が縮小することから通信オーバーヘッドは低下するが、各無線ノードの保持する他の無線ノードの位置 (方向) 情報が不正確になるため、データメッセージの到達率が低下する。両者の到達率と制御メッセージ数の関係を比較すると、ABLA では同等の到達率をより低い通信オーバーヘッドで実現していることが分かる。

4.2 無線マルチホップ配送経路長

ABLA 手法と DREAM 手法はいずれも無線ノード位置を限定的に広告することで、無線ノード位置広告の通信オーバーヘッドとデータメッセージ到達率のトレードオフを得ている。このとき、最新の無線ノード位置が全球的に広告されないため、比較的直線的な無線マルチホップ配送経路を構成する位置ベースのアドホックルーティングプロトコルを用いた場合でも、実際にデータメッセージが配送される無線マルチホップ配送経路は湾曲することが考えられる。これによる通信経路長の延長によって中継無線ノード数が増加し、データメッセージ配送遅延が延長される。そこで、本節では、無線マルチホップ通信経路長の変化についてシミュレーション実験により考察する。ここでは、 $1,000\text{m} \times 1,000\text{m}$ のフィールドに無線信号到達距離が 100m の移動無線ノード 500 台を一様分布乱数を用いてランダムに初期配置する。各無線ノードの移動は、移動速度が $0\text{m/s}\text{--}2.77\text{m/s}$ に一様分布するランダムウェイポイントモデルに従うものとする (停止時間は 0s)。ここで、送信元無線ノード M_s を座標 $(200\text{m}, 200\text{m})$ に固定し、送信先移動無線ノード M_d を座標 $(200\text{m}, 800\text{m})$ から $(800\text{m}, 800\text{m})$ へ 1.38m/s の一定速度で移動させる。なお、ABLA における閾値角度 (40 度) と DREAM における広告ホップ数 (4 ホップ) は、4.1 節のシミュレーション実験から同等の到達率が得られる値としている。

図 9(a) および図 10(a) は、いずれも初期状態を表している。ここでは、 M_s から M_d への COMPASS プロトコルによって定められるデータメッセージ配送経路を示している。ここでは、各無線ノードは M_d の正確な位置を保持しており、 M_s から M_d への経路は直線に近く、最短経路に近いものになっている。

M_d の移動とともに、 M_s から M_d への無線マルチホップ配送経路は湾曲する。これは、いずれのプロトコルにおいても M_d の近隣には M_d の最新の位置情報が広告される一方、遠方の無線ノードは最後に広告された M_d の位置に基づいて次ホップ無線ノードを選択し、データメッセージを転送しているためである。

図 9(b) は、実験開始から 324 秒後における DREAM による位置広告に基づいたデータメッセージの配送経路である。このとき配送されたデータメッセージの M_s から M_d への

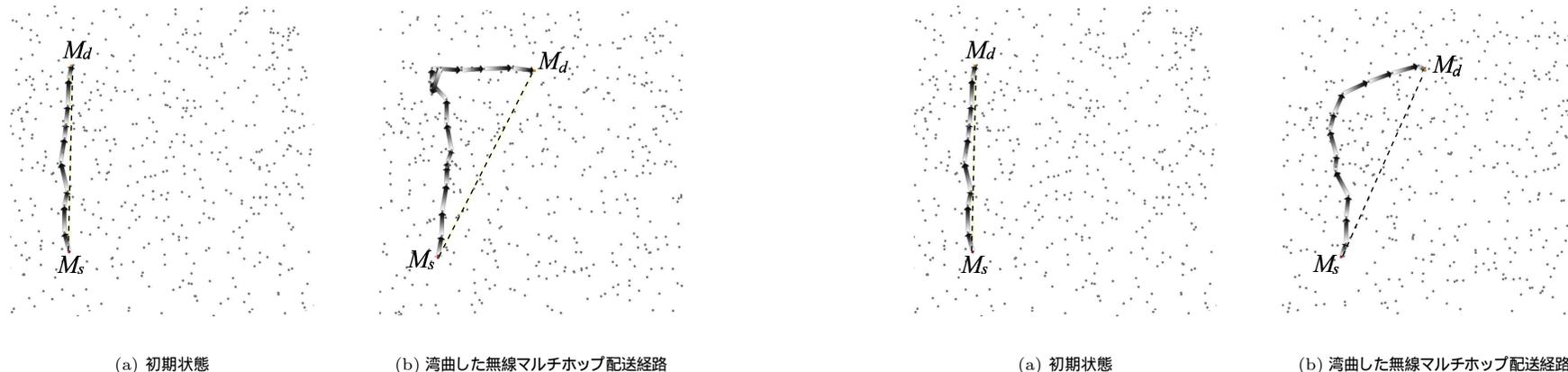


図9 DREAMにおけるデータメッセージ配送経路

無線マルチホップ配送経路は大きく湾曲しており、次に M_s から送信されたデータメッセージは、 M_d に到達することなくタイムアウトによって配送を失敗している。一方、図 10(b) は、同じ時刻における ABLA におけるデータメッセージ配送経路である。ABLA では、同じ通信オーバーヘッドでもより方向変化の影響が大きな無線ノードに対して最新の位置を広告するため、DREAM よりも湾曲が小さくなっている。また、ABLA では、広告範囲がホップ数ではなく、角度変化の大きさによって決定するため、図 10(c) (実験開始から 340 秒後) のように広域に最新位置が広告されることがある。これによって図 10(d) のように、無線マルチホップ配送経路の湾曲は大きく縮小され、配送経路長が短縮される。

図 11 は、 M_s と M_d との間の距離の経時的な変化についての典型的な 4 つの場合について、その無線マルチホップ配送経路長の変化を測定したものである。いずれの場合においても、ABLA によって定められる無線マルチホップ配送経路長がほぼ直線距離の変化と同様に安定して変化するのに対して、DREAM の位置広告によって定められる無線マルチホップ配送経路長が ABLA によるものよりも急激に伸長する時刻が存在し、やがて経路が検出できなくなる (データメッセージが M_d に到達することなくタイムアウトする) ことが分かる。この実験結果から ABLA が DREAM に対してデータメッセージ配送遅延を短縮し、データメッセージ到達率を改善することが分かる。

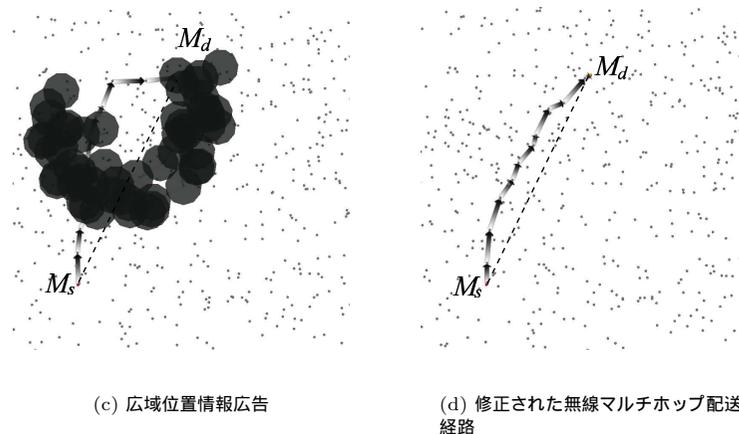


図10 ABLAにおける散発的な広域位置情報広告

5. まとめと今後の課題

本論文では、DREAM における移動無線ノード位置情報の保持、更新方法を基礎として、

その更新に要する通信オーバーヘッドを削減する ABLA 手法を提案した。ここでは、無線マルチホップ配送の送信先移動無線ノードの位置の変化によって各中継移動無線ノードにおけるデータメッセージの転送先が変更されるのは、中継移動ノードからの方向が変化する場合であることに基いて、更新位置情報の伝達を角度の変化を基準に制約する。ABLA は、DREAM と比較して、同程度のネットワーク接続性をより低い通信オーバーヘッドで実現することができる。本論文で提案した手法は、限られた送信先移動無線ノードの位置を低通信オーバーヘッドで広告しながら、データメッセージを高到達率、低遅延で配送することが求められる場合に有効である。そこで、論文¹⁰⁾で述べられているシンクノードが移動するセンサネットワークへの適用とその効果について検討を行なう。

参考文献

- 1) Basagni, S., Chlamtac, I. and Syrotiuk, V.R., "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)," Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.76-84 (1998).
- 2) Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp.48-55 (1999).
- 3) Giordano, V. and Hamdi, M., "Mobility Management: The Virtual Home Region," EPFL-ICA Technical Report, SSC/1999/037 (1999).
- 4) Karp, B. and Kung, H.T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.243-254 (2000).
- 5) Li, J., Jannotti, J., DeCouto, D.S.J., Karger, D.R. and Morris, R., "A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing," Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.120-130 (2000).
- 6) Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- 7) Melamed, R., Keidar, I. and Barel, Y., "Octopus: A Fault-Tolerant and Efficient Ad-Hoc Routing Protocol," Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Reliable Distributed Systems, pp.39-49 (2005).
- 8) Nakagawa, H., Ohta, T., Ishida, K. and Kakuda, Y., "A Hybrid Routing with Location Information for Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, pp.129-136 (2007).
- 9) Urrutia, J., "Two Problems on Discrete and Computational Geometry," Proceedings of Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, pp.42-52 (1999).
- 10) 高田, 萬代, 木谷, 渡辺, "移動シンクを用いた協調型データ蓄積方式," 信学技報, Vol.109, No.228, pp.127-132 (2009).

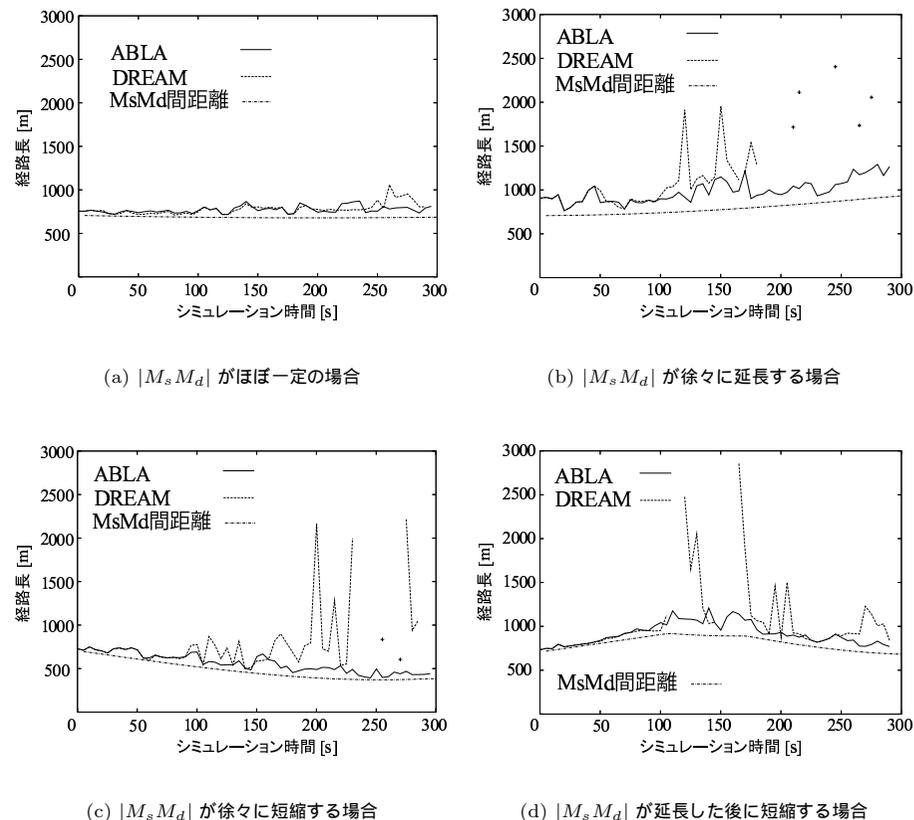


図 11 典型的な移動における配送経路長の変化