

Faceルーティングプロトコルにおける隣接無線ノード検出失敗によるメッセージのルーティング転送回避手法

松本和也^{t1} 尾根田倫太郎^{t2} 岡啓明^{t3}
小杉正昭^{t3} 榎垣博章^{t1,t2,t3}

Faceルーティングプロトコルは、メッセージの複製を行なうことなく、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでのマルチホップ転送経路が存在する場合には必ずメッセージの転送に成功する。しかし、これは各無線ノードが隣接ノード位置を正しく獲得している場合のみ成り立ち、隣接ノード検出に失敗する場合にはメッセージがルーティング経路を転送され、送信元無線ノードに到達しないことが考えられる。特に、隣接無線ノードの位置情報と交換しないNB-Faceルーティングプロトコルでは、制御メッセージの送信タイミングによって隣接無線ノード検出に失敗する可能性がある。問題解決手法が必要である。本論文では、ある中継無線ノードで隣接無線ノードとして検出に失敗した無線ノードは他の中継無線ノードにおいても隣接無線ノードとして検出しないことにより、メッセージのルーティング経路転送を回避するブラックリスト手法を提案する。本手法は、メッセージのルーティング経路転送を回避することができ、一方、経路に含むことが許される無線ノードが減少することから、マルチホップ経路検出率が低下することが考えられる。そこで、隣接無線ノード検出率とマルチホップ経路検出率の関係を示シミュレーション実験によって評価する。

Avoidance of Looped Transmission of Messages due to Neighbor Detection Failures in Face Routing Protocol

KAZUYA MATSUMOTO,^{t1} RINTARO ONEDA,^{t2}
HIROAKI OKA,^{t3} MASAOKI KOSUGI^{t3}
and HIROAKI HIGAKI^{t1,t2,t3}

Face routing protocol requires no copies of data messages and surely transmits them to the destination wireless node. However, it is assumed that each wireless nodes achieves location information of all its neighbor wireless nodes. In case that an intermediate node fails to achieve location information of neighbor nodes, a forwarded data message might be transmitted along a looped route and it never reaches its destination. In order to solve this problem, this paper proposes a method to avoid the looped-transmission of data messages by introduction of the black-lists in which wireless nodes never included in a wireless mul-

tihop transmission routes are listed. Though it avoids the looped-transmission, reachability of wireless multihop transmission might be degraded. The results of simulation experiments show that avoidance of looped-transmission is more effective than degradation of its reachability.

1. 背景と目的

近年、無線通信デバイスを搭載した移動コンピュータが広く用いられるようになり、無線LANの普及が進んでいる。センサノードのような限られた電源容量で動作する移動コンピュータからなる無線LANにおいては、高い接続性を維持するために、移動コンピュータや基地局といった無線ノード間の通信において、他の無線ノードがデータメッセージを中継する無線マルチホップ通信が必要である。このとき、消費電力を削減するために、必要とする制御メッセージの少ないルーティングプロトコルが求められている。データメッセージを複製せず、送信元無線ノードから送信先無線ノードへのデータメッセージ到達を保証するFaceプロトコルが提案されている¹⁾。

Faceプロトコルでは、各無線ノードがデータメッセージをユニキャスト転送するために、隣接無線ノードの位置情報取得の必要があり、ビーコンメッセージの定期的な交換を行っている。このビーコンメッセージ交換のオーバーヘッドを削減する拡張プロトコルとしてNB-Face³⁾が提案されている。NB-Faceでは、前ホップ無線ノード、現ホップ無線ノード、次ホップ候補無線ノードの位置で定まるタイムアウトによって次ホップ無線ノードを決定しており、無線ノードの位置情報交換のための制御メッセージが不要である。しかし、いずれのプロトコルにおいても、必要な位置情報がすべて取得可能であることが、データメッセージ到達性保証の前提となっている。このため、隣接無線ノード位置の取得に失敗した場合には、データメッセージがループ経路で配送される問題がある。本論文では、これを解決する手法を考案することを目的とする。

2. 関連研究

2.1 Faceルーティングプロトコル

各無線ノードが自身と自身の隣接無線ノードの座標を用いて転送先無線ノードを決定する分散的手法であるにも関わらず、デッドエンドを発生しないプロトコルにFaceプロトコルがある。ここで、各無線ノード M_i を頂点、 M_i の隣接無線ノード M_j について線分 $M_i M_j$

^{t1} 東京電機大学理工学部情報システム工学科

Department of Computers and Systems Engineering, Tokyo Denki University

^{t2} 東京電機大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス専攻

Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

^{t3} 東京電機大学院理工学部情報システム工学科専攻

Department of Computers and Systems Engineering, Tokyo Denki University

を辺とする平面図形を考える。この図形によって平面全体は、複数の辺で囲まれた有限個の部分平面 F_1, \dots, F_f に分割される。ただし、この分割においては、2 辺の交わりが必ずしも頂点になっていない。2 辺の交わりが必ず頂点となっている (無線ノードが存在する) という条件を満たすために、以下の条件を満たす Gabriel Graph²⁾ の辺のみを配送経路として用いることとする。

[Gabriel Graph]

頂点の集合を $M = \{M_1, \dots, M_m\}$ とするとき、以下の条件を満たす線分 $M_i M_j$ を辺とする図形を Gabriel Graph という。

- (1) $|M_i M_j| \leq h$ を満たす。
 - (2) $\forall M' \in M$ について、 M' は線分 $M_i M_j$ を直径とする円の外部にある。□
- ここで、任意の無線ノード対 (M_s, M_d) について、これらがマルチホップ通信可能であるならば、線分 $M_s M_d$ と交わる部分平面列 $(F_1^{sd}, \dots, F_f^{sd})$ (ただし、 $M_s \in F_1^{sd}$ かつ $M_d \in F_f^{sd}$) を一意に定めることができる。頂点と辺の定義から、メッセージをこの図形の辺に沿って配送することが可能である。そこで、以下の手順によって、データメッセージを M_s から M_d へ配送することができる。

[Face プロトコル (概略)]

- (1) M_s から F_1^{sd} の辺に沿ってデータメッセージを配送する。
- (2) F_i^{sd} の辺に沿ってデータメッセージを配送しているとき、無線ノード $\overline{M}_i \in F_i^{sd} \cap F_{i+1}^{sd}$ がデータメッセージを受信したならば、以降 F_{i+1}^{sd} の辺に沿ってデータメッセージを配送する。□

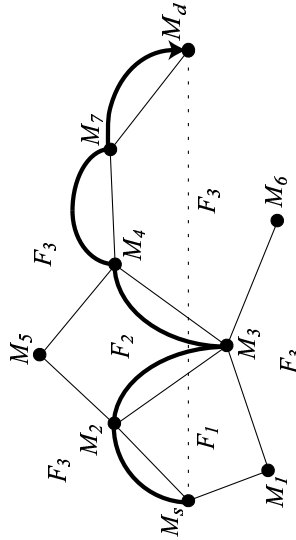


図 1 Face プロトコル
Fig. 1 Face Protocol.

Face プロトコルでは、無線ノード M_{i-1} からデータメッセージ m を受信した中継無線ノード M_i は、 $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ が最小となる \overline{M}_{i+1} を次ホップ無線ノードとすることによって部分平面を構成する辺に沿って m を配送することができる。しかし、 M_i がすべての隣

接無線ノード \overline{M}_{i+1} について $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ を計算するためには、 \overline{M}_{i+1} の座標を M_i があらかじめ取得しておかなければならない。さらに、無線ノードは経時的に座標を変えらることから、各無線ノードは定期的に自身の位置情報を隣接無線ノードに通知しなければならぬ。これにより、全体の制御メッセージ数が増加し、無線ノードの限られた電力を消費する。データメッセージを配送する無線通信と位置情報通知ビーコンとの衝突や競合によりデータメッセージ配送のスループットが低下する、といった問題が発生する。

2.2 NB-Face ルーティングプロトコル

前章で述べた問題を解決するために、NB-Face プロトコル³⁾ では、 $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ の計算を M_i ではなく、 \overline{M}_{i+1} が行う。 M_i は、前ホップ無線ノードの座標 $M_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ と自身の座標 $M_i(x_i, y_i)$ を含むデータメッセージ m を自身の無線信号到達範囲内にブロードキャスト送信する (図 2 左)。 m を受信した M_i の隣接無線ノード \overline{M}_{i+1} は、 m に含まれる座標 $M_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $M_i(x_i, y_i)$ 、 および自身の座標 $\overline{M}_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ から $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ を計算する。

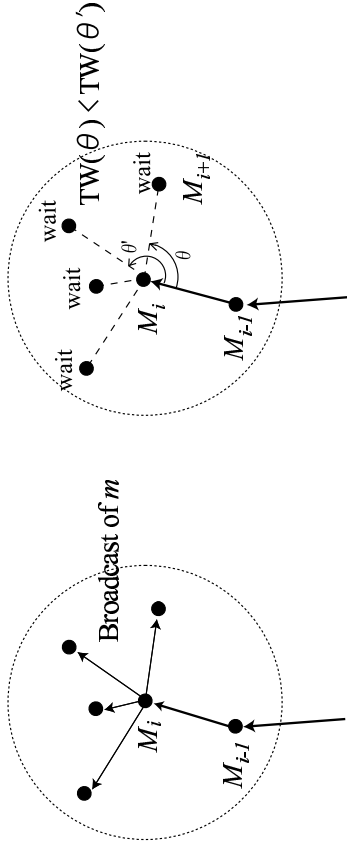


図 2 NB-Face プロトコル
Fig. 2 NB-Face Protocol.

各隣接無線ノード \overline{M}_{i+1} で計算された $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ から、その大きさが最小となるものを決定するために、この大きさに基づいた待ち時間 TW_{i+1} を各 \overline{M}_{i+1} が定める (図 2 右)。 \overline{M}_{i+1} は、 M_i からの R_{req} メッセージ受信後 TW_{i+1} 経過したならば、自身が次ホップ無線ノードの候補となることを表明する提案メッセージ Prop を自身の無線信号到達範囲内にブロードキャスト送信する。

ここで、 $\text{TW}_{i+1} = \text{TW}(\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1})$ とするとき、関数 $\text{TW}()$ を $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ に対して単調増加するように定めれば、 M_i が最初に受信した Prop を送信した \overline{M}_{i+1} が $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ を最小とする隣接無線ノードであることが分かる。

[TW_i の計算]

次ホップ無線ノードの探索方向が時計回りの場合は、 TW_{i+1} は $\theta = \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ に対して単調減少し、反時計回りの場合は、単調増加するように定める必要がある。そこで、一例として次式を用いる。

- 探索方向が時計回りのとき $TW_{i+1} = \alpha(2\pi - \theta)$
- 探索方向が反時計回りのとき $TW_{i+1} = \alpha\theta$

ただし、 $TW_i = 2\pi\alpha$ である。□

ただし、 \overline{M}_{i+1} が M_i の次ホップ無線ノードとなるためには、線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ が Gabriel Graph の辺となっていないなければならない。このためには、線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ を直径とする円の内部に他の無線ノードが存在しないことが必要十分条件である。この判定を行なうために、 \overline{M}_{i+1} が送信する Prop メッセージには、 M_i と \overline{M}_{i+1} の座標 $M_i(x_i, y_i)$, $\overline{M}_{i+1}(\overline{x}_i, \overline{y}_i)$ を含めることとする。Prop メッセージを受信した無線ノード M は、自身が線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ を直径とする円の内部に含まれるかを判定する。この判定は、Prop メッセージに含まれる座標 $M_i(x_i, y_i)$, $\overline{M}_{i+1}(\overline{x}_i, \overline{y}_i)$, および自身の座標 $M(x, y)$ を用いて行なうことができる。

[Gabriel Graph のリンク判別方法]

線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ を直径とする円の内部に M が含まれるとき、線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ は Gabriel Graph のリンクとはならない。 M が円の内部に含まれることと $\angle M_iM\overline{M}_{i+1} = \theta$ が鈍角であることとは同値である。したがって、 $M_i(x_i, y_i)$, $\overline{M}_{i+1}(\overline{x}_i, \overline{y}_i)$, $M(x, y)$ とすると、

$$\frac{(x_i - x)(\overline{x}_i + 1 - x) + (y_i - y)(\overline{y}_i + 1 - y)}{< 0}$$

ならば、 M は線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ を直径とする円の内部にある。□

もし M がこの円の内部に含まれるならば、 M はただちに否定応答メッセージ Nack を自身の無線信号到達範囲内にブロードキャストする。逆に、Prop メッセージ送受信後、一定時間 τ が経過しても Nack メッセージを受信されないならば、線分 $M_i\overline{M}_{i+1}$ が Gabriel Graph の辺であることを \overline{M}_{i+1} が知ることができる。

3. 提案手法

3.1 隣接ノード検出失敗によるループ配送

2章で述べたように Face プロトコルおよび NB-Face プロトコルは、配送されるデータメッセージの複製を用いることなくユニキャスト転送のみによってマルチホップ配送し、各無線ノードが全域的に無線ノード位置情報を取得することなく、送信元無線ノード、送信先無線ノード、隣接無線ノードの位置情報のみによって次ホップ無線ノードを選択してデータメッセージを転送する。それにも関わらず、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでマルチホップ配送経路が存在する場合には必ずデータメッセージを到達させることができるという優れた性質を持っている。しかし、前ホップ無線ノード M_{i-1} から受信したデータメッセージを M_i が正しく次ホップ無線ノード M_{i+1} へ転送するためには、 M_i がすべての隣接無線ノードの位置情報を獲得していることが前提条件であり、これが満足されない場合にはデータメッセージがループ経路を転送されることで、送信先無線ノードに到達しないことがある。

図 3 では、中継無線ノード M_i がすべての隣接無線ノード $\{M_{i-1}, M_{i+1}, M_j, M_k\}$ の位

置情報を正しく取得している場合のデータメッセージ転送の様子を示している。データメッセージ m を M_{i-1} から受信した M_i が Face プロトコルの次ホップ無線ノード選択アルゴリズムに従って時計回り方向に隣接無線ノードを探索した結果、 M_{i+1} を検出し、 m を M_{i+1} へ転送している。 m はさらに M_{i+1} , M_{i+2} 等の後続中継無線ノード列によって順次ユニキャスト転送され、送信先無線ノード M_d へと到達する。

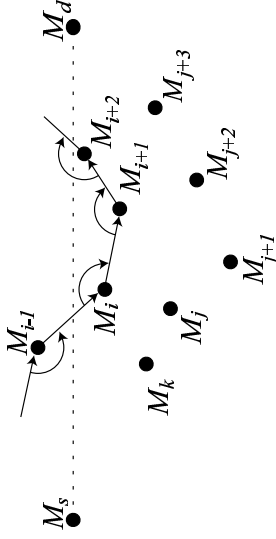


図 3 Face プロトコルによる正しいマルチホップ配送
Fig. 3 Multihop Transmission without Failure of Neighbour Detection.

一方、図 4 では、 M_i が隣接無線ノードのうち $\{M_{i-1}, M_j, M_k\}$ の位置情報を取得しているが、 M_{i+1} の検出に失敗し、その位置情報を取得していないために隣接無線ノードとして把握していない場合のデータメッセージ転送の様子を示している。データメッセージ m を M_{i-1} から受信した M_i が Face プロトコルの次ホップ無線ノード選択アルゴリズムに従って時計回り方向に隣接無線ノードを探索した結果、 M_j を検出し、 m を M_j に転送している。 m はさらに M_j , M_{j+1} , M_{j+2} , M_{i+1} によってそれぞれ時計回り方向の隣接無線ノード探索によって検出された次ホップ無線ノードへと転送され、探索方向が変化しないまま M_i は再度 M_j へと m を転送する。この結果、 m は部分平面 $M_iM_jM_{j+1}M_{j+2}M_{i+1}$ の辺に沿ったループ経路を転送され続けることになる^{*1}。これは、この部分平面が線分 M_iM_d と交わらないためである。Face プロトコルでは、データメッセージ m は線分 M_iM_d と交わる部分平面の辺に沿ってのみ転送されることが保証されており、これによって m が必ず M_d に到達する。しかし、隣接無線ノードの検出に失敗すると m が線分 M_iM_d と交わらない部分平面の辺に沿って転送される可能性がある。

Face プロトコルでは、各無線ノードが GPS 等で取得した自身の位置情報を定期的にブロードキャスト送信するビーコンメッセージにピギーバックすることで、隣接無線ノードに通知している。これによって各無線ノードは自身の隣接無線ノードの位置情報を取得することができ、ビーコンメッセージの受信失敗時には位置情報を取得することができない。

*1 これらの無線ノードがこの部分平面の隣接無線ノードの検出に失敗する確率が 0 でないために、ループ外の隣接無線ノードへ転送される可能性はある。

とが検出できる。このとき、このデータメッセージは線分 $M_s M_d$ と交わらない部分平面の辺に沿って配送されているため、データメッセージを $M_s M_d$ と交わる部分平面の辺に沿うようにさせる必要があるが、全域的な位置情報を持たない M_i がこれを実現することは困難である。したがって、送信元無線ノードを M_s から M_i に置き換えてデータメッセージ配送を再開することで、この問題を解決する。しかし、データメッセージを転送するごとに各中継無線ノードに上記の4項組を記憶しなければならず、これらを削除するタイミングを定めることができない問題があり、適切な解決手法とは言えない。

そこで本論文では、データメッセージがループ経路を配送されることを回避する後者の手法を提案する。図4において、データメッセージが線分 $M_s M_d$ と交わらない部分平面 $M_i M_j M_{j+1} M_{j+2} M_{i+1}$ の辺に沿ったループ経路を配送されるのは、 M_i が検出に成功すればその次ホップ無線ノードとなる隣接無線ノード M_{i+1} を M_{j+2} の次ホップ無線ノードとしてデータメッセージの配送経路に含めたためである。図5に示すように、 M_{j+2} が M_{i+1} を次ホップ無線ノードの候補に含めないのであれば、データメッセージは M_{j+3} へとユニキャスト転送され、以降 M_{i+2} 等へとマルチホップ配送されていく。つまり、 M_i 以降の中継無線ノードがすべて M_{i+1} が存在しないとしてデータメッセージの配送を継続すること、ループ経路配送を回避することができる。

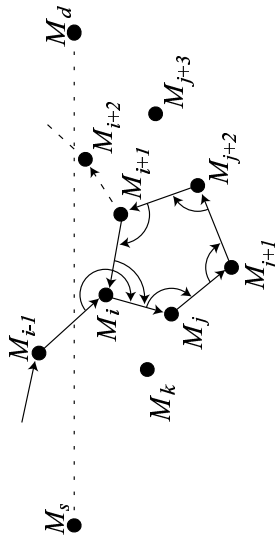


図4 隣接ノード検出失敗によるループ配送
Fig. 4 Looped Transmission due to Failure of Neighbour Detection.

継続的なビーコンメッセージ交換を行なうことから、同一隣接無線ノードからのビーコンメッセージの受信に連続して失敗する可能性は小さい。しかし、無線ノードが移動している場合にはビーコンメッセージを受信しない理由が無線ノードの移動によるものであることが考えられること、データメッセージ通信頻度が高い場合にはビーコンメッセージの交換間隔を拡大する必要があることなどから、すべての隣接無線ノードの位置情報を常に正しく受信することは困難である。

また、NB-Face プロトコルでは、各中継無線ノードがデータメッセージをプロトコルキャスト送信し、受信した隣接無線ノードが次ホップ無線ノードの探索方向に作る角度に応じて定める待ち時間によるタイムを設定し、タイムアウトとともに応答メッセージをプロトキャスト送信する方法で次ホップ無線ノードを決定している。しかし、タイムアウトから応答メッセージ送信までに要する時間が各無線ノードによって異なることが考えられるため、角度差の小さい隣接無線ノード間で応答メッセージの送信順序が逆転する可能性がある。

3.2 ブラックリスト手法

3.1 節で述べた隣接無線ノード検出に失敗することによってデータメッセージがループ経路を配送される問題と解決する手法には、以下の2種類が考えられる。

- データメッセージがループ経路を配送されていることを検出し、ループから離脱する手法。

- データメッセージがループ経路を配送されない手法。

Face プロトコルでは、データメッセージ m を中継無線ノード M_i が複数回転送することとがある。 M_i の隣接無線ノード数が N_i であるとき、 M_i は N_i 個以下の部分平面の頂点となり、データメッセージがループ経路を配送されない場合には、 M_i の前ホップ無線ノードとし、 M_i の次ホップ無線ノードを M_i^+ 、探索方向を D (時計回りまたは反時計回り) としたときの4項組 (M_i, M_i^-, M_i^+, D) は、各回のデータメッセージ転送ごとに異なる。したがって、同一の4項組となる場合には、データメッセージがループ経路を配送されているこ

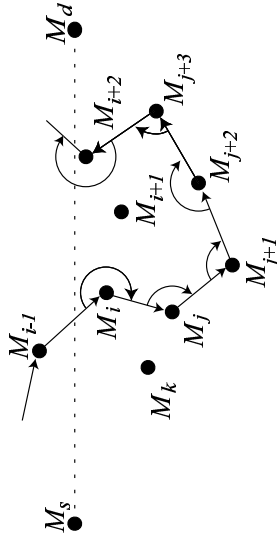


図5 検出失敗ノード除去によるループ配送回避
Fig. 5 Loop-Free Multihop Transmission by Removal of Phantom Nodes.

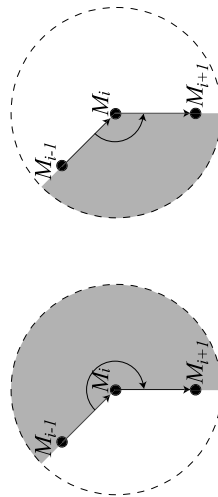
このように、以降中継無線ノードとしてマルチホップ配送経路に含めることができない無線ノードを定めるための何らかの情報をデータメッセージにビジーバックし、各中継無線ノードがこの情報に基づいて次ホップ無線ノードを隣接無線ノードから選択してデータメッセージを転送する手法をブラックリスト手法とよぶ。ブラックリスト手法によって、データメッセージのループ経路配送を回避できる。しかし、存在するにも関わらずデータメッセージメッセージの中継を行なうことができない無線ノードを発生させることから、中継無線ノード候補が削減され、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでのマルチホップ配送経路が存在するにも関わらず、データメッセージが送信先無線ノードに到達しないことが考

られる。

3.3 次ホップ選択アルゴリズム

3.2節で提案したブラックリスト手法によるデータメッセージのルーブ配送回避を実現する次ホップ無線ノード選択アルゴリズムについて述べる。以降のデータメッセージ配送において中継無線ノードとしてはならない隣接無線ノードをその検出に失敗した中継無線ノードが決定することはできない。しかし、このような隣接無線ノードが含まれる領域を決定することは可能である。

前ホップ無線ノード M_{i-1} からデータメッセージを受信した M_i が、時計廻りに探索した次ホップ無線ノードが M_{i+1} であるとき、図 6 に示すような $\angle M_{i-1}M_iX > \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ を満たす位置 X に存在する M_i の隣接無線ノードを中継無線ノードとしてはならない*2。すなわち、図 6(a) の影をつけた M_i を中心として M_i の無線信号到達距離を半径とする扇形領域に位置する無線ノードは中継無線ノードとしてマルチホップ配送経路に含めることはできない。一方、 M_{i-1} からデータメッセージを受信した M_i が、反時計廻りに探索した次ホップ無線ノードが M_{i+1} であるとき、図 6 に示すような $\angle M_{i-1}M_iX < \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ を満たす位置 X に存在する M_i の隣接無線ノードを中継無線ノードとしてはならない。すなわち、図 6(b) の影をつけた M_i を中心として M_i の無線信号到達距離を半径とする扇形領域に位置する無線ノードは中継無線ノードとしてマルチホップ配送経路に含めることはできない。



(a) 探索方向が時計廻り (b) 探索方向が反時計廻り

図 6 配送経路に含めることができない無線ノード位置
Fig. 6 Black-List Entry : Area of Phantom Nodes.

データメッセージを受信した中継無線ノード M_j が配送経路に含めることができない無線ノード位置を獲得するためには、データメッセージを転送した中継無線ノード M_i の ID と位置 L_i およびその中継無線ノードを検出したときの探索方向 D_i の 3 項組 (M_i, L_i, D_i) を中継無線ノード M_i が転送するときにデータメッセージにビギンバックすればよい。これによって、 (M_i, L_i, D_i) の列がマルチホップ配送経路に沿ってビギンバックされる。し

たがって、 M_j は受信したデータメッセージにビギンバックされた (M_i, L_i, D_i) の列から任意の $1 \leq i < j$ について線分 M_iM_{i-1} および M_iM_{i+1} を半径に含み、半径の長さを M_i の無線信号到達距離として図 6 に従って D_i に基づいて定めた扇形領域の内部に含まれる無線ノードは次ホップ無線ノードとはしないという制約のもとで、Face プロトコルあるいは NB-Face プロトコルの次ホップ無線ノード選択アルゴリズムに従い、選択された隣接無線ノードへデータメッセージを転送する。

Face プロトコルでは、 M_i がビーコンメッセージの受信によってその位置情報取得している隣接無線ノードのうち、上記の方法で次ホップ無線ノードとして選択することができる領域に含まれないものなから、選択アルゴリズムに基づいて隣接無線ノードのひとつを次ホップ無線ノードとし、データメッセージを転送する。

NB-Face プロトコルでは、 M_i は 3 項組 (M_i, L_i, D_i) をデータメッセージにビギンバックし、隣接無線ノードにブロードキャスト転送する。受信した M_i の隣接無線ノード M は、データメッセージにビギンバックされている (M_j, L_j, D_j) 列から M が M_i の次ホップ無線ノードが存在できない領域に含まれるかを確認する。含まれている場合、 M はデータメッセージを転送せずに破棄する。含まれていない場合、 M は次ホップ無線ノードの探索方向に基づいて計算される $\angle M_{i-1}M_iM$ の大きさに対して単調増加するタイムをセットする。他の隣接無線ノードから転送されたデータメッセージを受信することなくタイムがタイムアウトした無線ノード M は、 M_i の次ホップ無線ノード M_{i+1} となり、隣接無線ノードへデータメッセージをブロードキャスト転送する。逆にタイムがタイムアウトする以前に他の隣接無線ノードから転送されたデータメッセージを受信した場合には、タイムをリセットしてデータメッセージを破棄する。

4. 性能評価

Face プロトコルおよび NB-Face プロトコルにおいて、隣接無線ノードの検出に失敗することによってデータメッセージがルーブ配送される問題を解決するために 3 章で提案したブラックリスト手法の性能をシミュレーション実験によって評価する。

まず、隣接無線ノードの検出失敗によってデータメッセージのルーブ配送がどの程度発生するかをシミュレーション実験評価する。1,000m × 1,000m の正方形領域に無線信号到達距離 100m の無線ノードを 300 台、400 台、500 台、それぞれ一様分布乱数に基づいてランダムに配置する。送信元無線ノードと送信先無線ノードの対も一様分布乱数に基づいて選択し、Face プロトコルと NB-Face プロトコルに共通の基準に基づいて選択された次ホップ無線ノードへと順次データメッセージを転送する。この選択の際に、0-10% の確率で隣接無線ノード検出に失敗するものとして、3.1 節で述べたルーブ転送の発生確率を測定する。

測定結果を図 7 に示す。無線ノード分布密度が低く、隣接無線ノード検出失敗率が高いほど、データメッセージのルーブ配送が発生し易い。無線ノード数 400 で各中継無線ノードが 5% の確率で隣接無線ノード検出に失敗する場合、配送データメッセージの 8.6% がルーブ経路配送される。この実験結果は、3.1 節で述べた Face プロトコル、NB-Face プロトコルそれぞれにおいて次ホップ無線ノード検出に失敗する場合、有意に高い確率でデータメ

*2 角度はすべて反時計廻りを正の方向として表すものとする。

セージがループ経路配送されることから、その対策が必要であることを意味している。

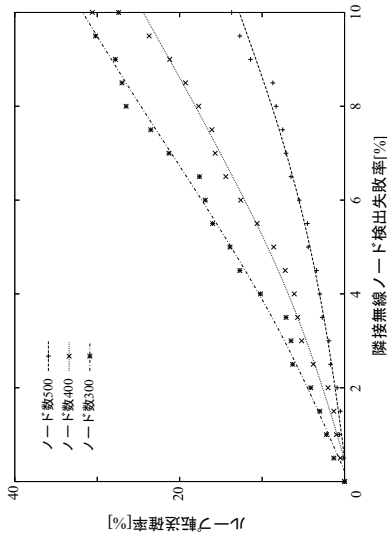


図 7 データメッセージのループ転送確率
Fig. 7 Probability of Looped Route Detection.

次に、本論文で提案したブラックリスト手法によってデータメッセージの送信先無線ノードへの到達率がどの程度低下するかについて評価実験を行なう。3.2節で述べたように、ブラックリスト手法では中継無線ノード候補を削減するため、Face プロトコルが持っている送信先無線ノードへデータメッセージを 100%到達させるといった性質を充足することができず、その影響は隣接無線ノード検出失敗率が高いほど大きく及ぼされることが予想される。そこで、上記のループ経路発生確率の測定実験と同一の環境条件のもとで、データメッセージの送信先無線ノードへの到達率をシミュレーション実験評価する。

評価結果を図 8 に示す。無線ノード分布密度が低く、隣接無線ノード検出失敗率が高いほど、データメッセージの到達率が低くなる。無線ノード数 400 で各中継無線ノードが 5%の確率で隣接無線ノード検出に失敗する場合、配送データメッセージの 3.5%が送信先無線ノードへ到達しない。この実験結果は、3.1節で述べた Face プロトコル、NB-Face プロトコルのそれぞれにおいて次ホップ無線ノード検出に失敗する場合、本論文で提案したブラックリスト手法の導入によってマルチホップ配送経路が存在する場合にはデータメッセージの送信先無線ノードへの到達を保証するというこれらのプロトコルの性質が失われているものの、データメッセージが送信先無線ノードへ到達することができなくなる確率は、図 7 で示したループ経路配送が発生する確率と比べて十分に低いものとなっている。したがって、ブラックリスト手法は、本論文の想定環境における適用が適切であるといえる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、無線ノードが隣接無線ノードの検出に失敗する可能性のある環境を対象とし

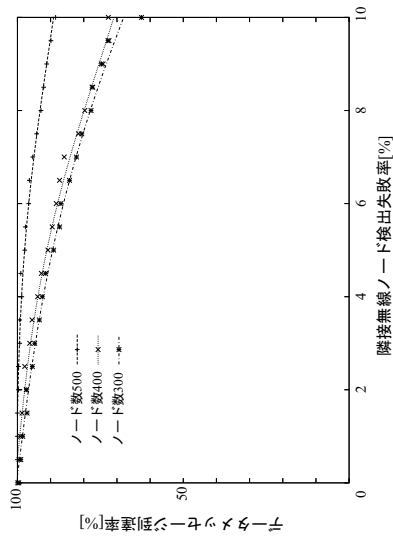


図 8 データメッセージの送信先無線ノードへの到達率
Fig. 8 Reachability of Data Messages.

て、Face プロトコルと NB-Face プロトコルにおいてデータメッセージがループ配送される可能性があることを明らかにした。そして、その対策として検出に失敗した次ホップ無線ノード候補となった無線ノードを以降の経路探索では中継ノードとして選択しないブラックリスト方式を提案した。提案手法は、中継ノード位置とそれを検出したときの探索方向の情報を順次データメッセージにヒギバハックすることによって、広域的な位置情報収集を行なうことなく実現することができる。シミュレーション実験の結果、従来手法のループ経路発生確率よりも低いデータメッセージ到達率低下で抑えることができていることが明らかになった。今後は、諸手法におけるデータメッセージ配送遅延をシミュレーション実験評価することによって、提案手法の性能をより詳細に評価する。

参考文献

- 1) Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J. "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp.48-55 (1999).
- 2) Gabriel, K.R. and Sokal, R.R., "A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis," Systematic Zoology, Vol.18, pp.259-278 (1969).
- 3) Narasawa, M. and Higaki, H. "NB-FACE: No-Beacon FACE Ad-hoc Routing Protocol for Reduction of Location Acquisition Overhead," Proceedings of the International Workshop on Future Mobile and ubiquitous Information Technologies (2006).