

低信頼無線アドホックネットワークのための FACE プロトコルの拡張

梶 垣 博 章^{†1}

FACE プロトコルは、各中継ノードが隣接ノードから得た位置情報という局所的な情報のみを用いて次ホップを決定するにも関わらず到達率が 100%となる優れたアドホックルーティングプロトコルである。しかし、ブロードキャスト送信される位置情報通知メッセージの紛失が可能である前提では、メッセージがループ配送されることがある。これを解決するブラックリスト手法を提案したが、到達率が 100%とはならなかった。本論文では、ブラックリスト手法が過剰に中継ノード候補を削減しているために到達率を低下させていることを示し、その解決手法としてブラックリスト手法で導入した中継禁止領域に含まれていても中継可能なノード ID からなるホワイトリストを併用する手法を提案する。

Reachability Improvement of Face Routing Protocol in Unreliable Wireless Environments

HIROAKI HIGAKI^{†1}

In ad-hoc routing protocols such as Face, GEDIR and GPSR, a wireless multihop transmission route from a source node to a destination one is determined for each data message. An intermediate node receiving a data message selects one of its neighbor nodes as a next-hop node based on its location, the locations of its neighbor nodes and the destination node. Even without global location information, data messages are surely transmitted to the destination node. However, it is assumed that beacon messages with location information are repeatedly broadcasted without losses. Hence, in unreliable wireless environments, a node may lose locations of some neighbor nodes and some data messages may be transmitted along a looped route. In order to solve this looped transmission problem, this paper proposes a novel routing method with black-lists in which regions including nodes which cause looped transmission of data messages are registered and white-lists in which nodes in the regions in a black-list and which never cause looped transmission of data messages are registered.

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。論文¹⁾では、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。

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を取得する必要がある。これは、各無線ノードが GPS を用いて取得した位置情報を含むビーコンメッセージを定期的に交換することで実現可能である。しかし、次ホップ中継無線ノードの選択には、すべての隣接無線ノードの位置情報が必要であり、一部の隣接無線ノードの位置情報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に沿って配送され、送信先無線ノードに到達しない問題がある。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. Face ルーティングプロトコル

各中継無線ノードが自身と自身の隣接無線ノードの位置情報を用いて次ホップ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 $M_i M_j$ 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ガブリエルグラフ²⁾の辺のみを配送経路として用いることとする。

[ガブリエルグラフ]

頂点の集合を $\mathcal{M} = \{M_1, \dots, M_m\}$ とするとき、以下の条件を満たす線分 $M_i M_j$ を辺とする図形をガブリエルグラフという。

- (1) 無線信号到達距離 R に対して $|M_i M_j| \leq R$ を満たす。
- (2) $\forall M' \in \mathcal{M}$ 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。□

^{†1} 東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

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 $\langle F_1^{sd}, \dots, F_i^{sd} \rangle$ (ただし、 $M_s \in F_1^{sd}$ かつ $M_d \in F_i^{sd}$) 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。□

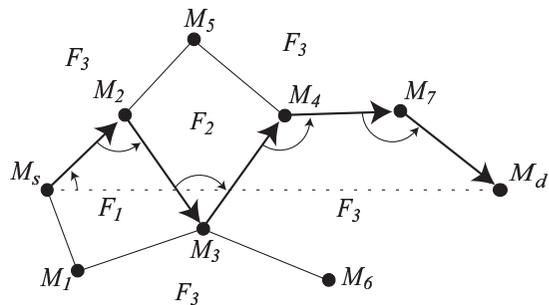


図 1 Face プロトコル

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、 $M_i \overline{M}_{i+1}$ がガブリエルグラフの辺となっている \overline{M}_{i+1} のうち、 $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ 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。Face プロトコルにおいて、図 2 では、 $M_i M_{i-1}$ と $M_i \overline{M}_{i+1}$ はガブリエルグラフの辺であるが、 $M_i M'$ と $M_i M''$ はそれぞれを直径とする円が M_{i-1} 、 \overline{M}_{i+1} を含むことからガブリエルグラフの辺ではない。そのため、 $\angle M_{i-1} M_i M' < \angle M_{i-1} M_i M'' < \angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ であるにも関わらず、 \overline{M}_{i+1} が M_i の次ホップ無線ノードとなる。ここで、 $\angle M_{i-1} M_i \overline{M}_{i+1}$ の測定方向は、配送される部分平面を切り替えるごとに時計廻りと反時計廻りを交互に適用する。図 1 では、 F_1 では反時計廻り、 F_2 では時計廻り、 F_3 では反時計廻りである。

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}

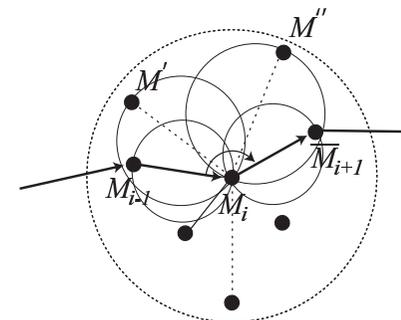


図 2 Face プロトコルにおける次ホップ決定

の位置情報を 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位置を変えることから、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ない。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のためのビーコンメッセージ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。そのため、ビーコンメッセージの送信間隔は、隣接無線ノード位置の正確さと通信オーバーヘッドとのトレードオフとなる。

3. 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無線マルチホップ配送し、各中継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中継無線ノード 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に沿って転送されることで、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

ページ 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廻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。

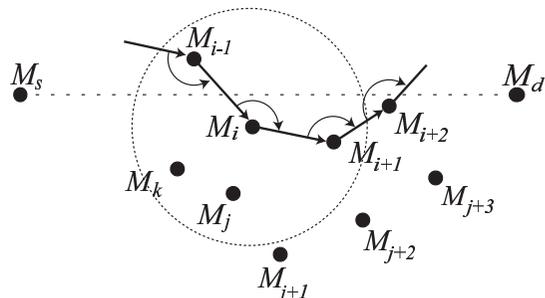


図 3 Face プロトコルによる正しいマルチホップ配送

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廻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廻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 $M_i M_j M_{j+1} M_{j+2} M_{i+1}$ 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 $M_s M_d$ 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 $M_s M_d$ 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 $M_s M_d$ 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

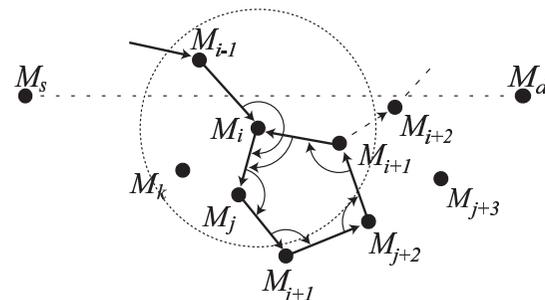


図 4 隣接ノード検出失敗によるループ配送

とができるが、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。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必ずしも大きくない。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取得することは困難である。

4. 提案手法

4.1 ブラックリスト手法

3章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を解決する手法には、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っている。ここで、各無線ノードがすべての隣接無線ノードの位置情報を取得しており、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を M_i^- 、 M_i の次ホップ無線ノードを M_i^+ 、探索方向を D (時計廻りまたは反時計廻り) としたときの4項組 $\langle M_i, M_i^-, M_i^+, D \rangle$ 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

*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。

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配送経路を変更させる必要がある。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が、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、 m をループ経路外へ配送することが可能である。しかし、データメッセージを転送するこ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ない。さらに、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ることから、前者の検出と離脱による手法は実現が困難である。

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_i 以降のすべての中継無線ノードが 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+2} から 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で、ループ経路配送を回避することができる。

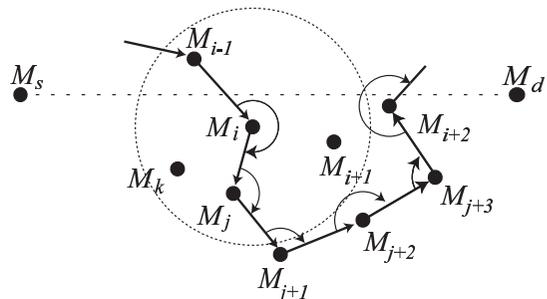


図 5 検出失敗ノード除去によるループ配送回避

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ピギーバックし、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。ただし、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。

例えば図 6 では、 M_i が位置情報を取得していれば次ホップ無線ノードとして選択されていた隣接無線ノード M''' は、実際に次ホップ無線ノードとして選出された隣接無線ノードが M_{i+1} であることから、 M_i を中心として $M_i M_{i-1}$ および $M_i M_{i+1}$ を半径に含む M_i の無線信号到達距離を半径の長さとする扇形領域に必ず含まれる。逆に、この領域に含まれ、Face プロトコルの次ホップ選択条件を満足しているにも関わらず、 M_i の次ホップとならなかった無線ノード M''' を以降に無線マルチホップ配送経路に含むと $M''' M_i$ を含むループ経路に沿ってデータメッセージが配送される可能性がある。そこで、この扇形領域に含まれる無線ノードを M_{i+1} 以降の中継無線ノードとして選択しないこととする。

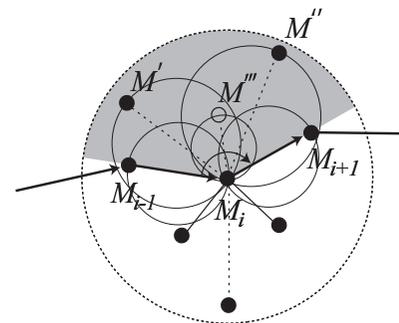


図 6 ブラックリスト手法

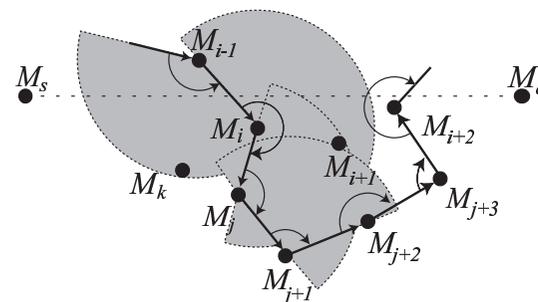


図 7 ブラックリスト手法によるループ配送回避

例えば図7では、 M_{i+1} が M_i の配送経路に含めることができない無線ノードの存在領域に含まれるため、 $\angle M_{j+1}M_{j+2}M_{i+1} < \angle M_{j+1}M_{j+2}M_{j+3}$ であり $M_{j+2}M_{i+1}$ がガブリエルグラフの辺であるにも関わらず、 M_{j+2} が M_{j+3} を次ホップ無線ノードとしてデータメッセージ m を転送することによってループ経路に沿った配送を回避することができる。

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ピギーバックすればよい。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ピギーバックされる。したがって、 M_j は受信したデータメッセージにピギーバックされた (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??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を次ホップ無線ノードとしないという制約のもとで、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選択した隣接無線ノードへデータメッセージを転送する。

4.2 ブラックリストとホワイトリストの併用

前節で提案した扇形領域 $M_{i-1}M_iM_{i+1}$ に含まれる無線ノードを無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとして含まない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に沿った配送を回避することができる。しかし、この手法の導入によってデータメッセージの送信先無線ノード M_d への到達率が低下することがある。そこで、ブラックリスト手法の性能をシミュレーション実験評価する。

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プ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章で述べたループ転送の発生確率を測定する。

測定結果を図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ループ配送が発生し易い。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%がループ経路配送される。この実験結果は、Faceプロトコルが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ッセージがループ経路配送されることから、その対応策が必要であることを意味している。

一方、ブラックリスト手法を導入した場合におけるデータメッセージ到達率のシミュレ

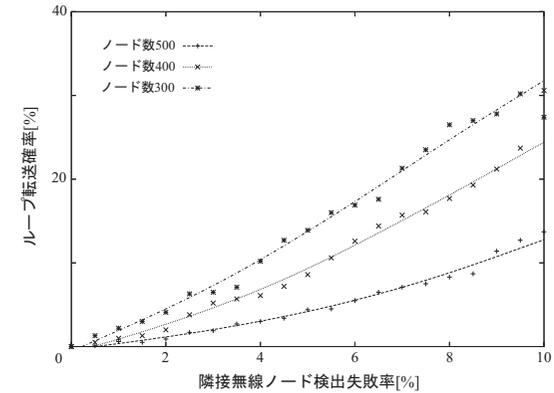


図8 データメッセージのループ転送確率

シオン実験結果を図9に示す。無線ノード数、隣接無線ノード検出失敗率が同一の場合をそれぞれ比較すると、データメッセージが送信先無線ノードに到達しない確率が図8のループ転送確率よりも低下していることが分かる。これは、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転送が回避され、データメッセージの到達率が改善されていることを示している。しかし、依然としてデータメッセージの一部が送信先無線ノードに到達していないことをシミュレーション実験結果が示している。

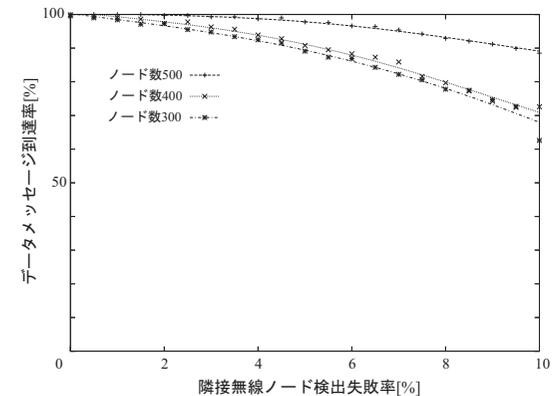


図9 データメッセージの送信先無線ノードへの到達率

このように、ループ経路に沿った配送を回避した場合においてもデータメッセージの到達率が100%にならない原因として、過剰に無線ノードをブラックリストに加えているために、マルチホップ配送経路の中継無線ノードとするべき無線ノードをその候補から除外していることが考えられる。Faceプロトコルを用いた無線ノード M_i の次ホップ無線ノード M_{i+1} の選択アルゴリズムにおいては、前ホップノード M_{i-1} とのなす角 $\angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ が最小となる M_i の隣接無線ノード M_{i+1} を探索する。ただし、 M_iM_{i+1} がガブリエルグラフの辺となっていることが条件である。したがって、図6において、 $\angle M_{i-1}M_iM' < \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ および $\angle M_{i-1}M_iM'' < \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ であるにもかかわらず、 M' と M'' は M_i の次ホップ無線ノードには選択されない。一方、前節で提案したブラックリスト手法では、扇形領域 $M_{i-1}M_iM_{i+1}$ に含まれるすべての無線ノードを M_{i+1} 以降の中継無線ノードとして無線マルチホップ配送経路に含むことを禁止している。そのため、 M' と M'' も中継無線ノードの候補から除外されることとなる。しかし、ループ経路に沿ってデータメッセージが配送されることを回避するために必要なのは扇形領域 $M_{i-1}M_iM_{i+1}$ に含まれている M_i が位置情報を取得できていない無線ノード (例えば図6の M''') であり、 M' と M'' はループ経路を形成する原因とはなっていない。このため、ブラックリスト手法では、過剰に中継無線ノード候補が削減されており、データメッセージ到達率を低下させることとなっている。

この問題を解決するためには、 M' と M'' を M_{i+1} 以降の中継無線ノードとすることを妨げないことが必要である。そこで、本節では、ブラックリスト手法を拡張し、扇形領域に含まれる無線ノードであってもループ経路形成の原因とならない無線ノードからなるホワイトリストを作成、保持し、ホワイトリストに含まれる無線ノードを中継無線ノードの候補とすることによって、データメッセージ到達率の低下を回避する手法を提案する。具体的には、 M_i の次ホップ無線ノード M_{i+1} の探索時に $\angle M_{i-1}M_iM' < \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ であるにもかかわらず M_i の次ホップ無線ノードとはならなかった M_i の隣接無線ノード M' 、すなわち、 M_iM' がガブリエルグラフの辺でない $\angle M_{i-1}M_iM' < \angle M_{i-1}M_iM_{i+1}$ である M' の無線ノード ID を登録したホワイトリストをデータメッセージ m にピギーバックする。 M_j ($j > i$) における次ホップ無線ノード探索時に、 M' がブラックリストに登録された扇形領域に含まれている場合でも、ホワイトリストに登録されているならば、 M_j の次ホップ無線ノードの候補として扱い、 M_jM' がガブリエルグラフの辺であり、 $\angle M_{j-1}M_jM'$ が候補無線ノードのなかで最小であるならば、 M' は M_j の次ホップ無線ノードとなる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、隣接無線ノードの位置情報をすべて取得していることを前提に、各中継無線ノードが局所的に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しながら、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プロトコルを対象として、位置情報を不完全にしか取得できない低信頼無線環境に適用する際の問題点を指摘し、その解決策を

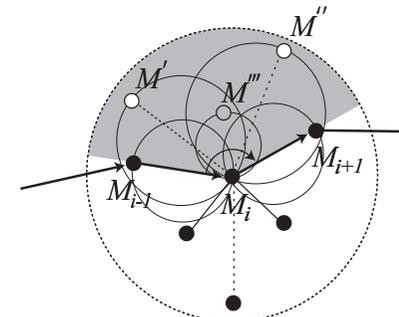


図10 ブラックリストとホワイトリストの併用

示した。ここでは、中継無線ノードが一部の隣接無線ノードの位置情報取得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に沿って配送され、送信先無線ノードへ到達しない可能性がある。この問題を解決するために、ある中継無線ノードが次ホップ無線ノード選択時にその位置情報を取得していないために次ホップとして選択されなかった無線ノードが存在する可能性のある扇形領域をブラックリストに登録し、以降の中継無線ノードが次ホップ無線ノードを選択する際には、ブラックリストに登録された領域に含まれる隣接無線ノードを候補から除外するブラックリスト手法と、この扇形領域に含まれているものの、その中心にある中継無線ノードとを結ぶ線分がガブリエルグラフの辺とはならない無線ノードをホワイトリストへ登録し、中継無線ノードの候補として残すホワイトリスト手法とを提案した。シミュレーション実験の結果、ブラックリスト手法はループ経路の発生を回避している一方で、中継無線ノード候補を過剰に削減するためにデータメッセージ到達率を低下させている。今後は、ホワイトリスト手法によるデータメッセージ到達率の改善をシミュレーション実験によって評価する。

参考文献

- 1) Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Proceeding of the 3rd ACM International Conference 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).