

低信頼無線環境における到達性を改善する Face プロトコルの拡張

江崎 智和^{†1} 鈴木 和久^{†1} 桧垣 博章^{†1}

無線ノードの移動速度、移動頻度が高い無線マルチホップネットワークでは、データメッセージ群の配送経路を探索、検出する AODV 等と比べ、データメッセージごとに配送経路を決定する Face, GPSR 等が有効である。存在する配送経路の検出を保証し、デッドエンドノードを発生しない Face プロトコルでは、各無線ノードがすべての隣接無線ノードの位置を取得することが経路検出保証の前提となっている。本論文では、各無線ノードの位置情報を含む制御メッセージが紛失し得る場合には、データメッセージがループ経路を配送されることがあることを示す。また、無線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の存在領域を含むブラックリストとブラックリストに含まれる領域に存在するにも関わらず無線マルチホップ配送経路に含むことができる無線ノード ID を含むホワイトリストを用いることによって、ループ配送を回避する手法を提案する。

Reachability Improvement Extension of Face Routing Protocol for in Unreliable Wireless Multihop Networks

TOMOKAZU EZAKI,^{†1} KAZUHISA SUZUKI^{†1}
and 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

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。また、無線通信機能を搭載したセンサノードにより広域データを継続的に収集するセンサネットワークの研究開発が活発に行なわれている²⁾。一般的に無線ノードの電力は電池によって供給され、その容量が限られていることから、無線ノード間の通信は、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によって実現される。そこで、アドホックネットワーク、センサネットワーク、メッシュネットワークなどの無線マルチホップネットワークを対象として、無線マルチホップ通信を実現するためにデータメッセージを配送するためのルーティングプロトコルが研究開発されている⁷⁾。特に、消費電力の削減のために制御メッセージを削減したルーティングプロトコルが必要であり、各無線ノードが GPS (Global Positioning Device) を備えていることを前提として、制御メッセージのフラッディングを用いないプロトコルとして、Face¹⁾、GPSR⁵⁾、GEDIR⁶⁾等のプロトコルが提案されている。

これらのプロトコルでは、ルーティングプロトコルによって検出した無線マルチホップ配送経路に沿ってデータメッセージ群を配送する DSR³⁾ や AODV⁸⁾ と異なり、各データメッセージがそれぞれ異なるマルチホップ配送経路に沿って配送される。送信元無線ノードおよび前ホップから転送されたデータメッセージを受信した無線ノードは、局所的な位置情報、すなわち、送信元無線ノード、送信先無線ノード、自無線ノードおよび隣接無線ノードの座標のみを用いて次ホップ無線ノードを決定し、データメッセージを転送する。すなわち、各無線ノードは、隣接無線ノードの座標を取得する必要があり、また、隣接無線ノードの座標のみを取得すればよい。これは、各無線ノードが GPS デバイスを用いて取得した自身の座標を含むビーコンメッセージを定期的に自身の無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードへブロードキャスト送信することによって実現できる。

FACE プロトコルは、GPSR や GEDIR と異なり、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路が存在するならば、そのうちのひとつに沿ってデータメッセージを送信先無線ノードまで必ず到達させることができる到達保証型のルーティング

^{†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

プロトコルである^{*1}。しかし、この FACE プロトコルの優れた性質は、各無線ノードがすべての隣接無線ノードの座標を取得していることを前提としている。本論文では、一部の無線ノードが隣接無線ノードの座標を含むビーコンメッセージの受信に失敗することによってデータメッセージが局所的な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ことを示す。また、次ホップ無線ノードとしてデータメッセージを転送することを禁止する無線ノードを含む領域の集合であるブラックリストとブラックリストに含まれる領域内であってもデータメッセージの転送先無線ノードとして選択可能な無線ノードの集合であるホワイトリストを導入することによってこの問題を解決する手法を提案する。

2. Face ルーティングプロトコル

2.1 アドホックルーティングプロトコル

アドホックネットワークをはじめとする無線マルチホップネットワークでは、送信元無線ノード $N^s (= N_0)$ から送信先無線ノード $N^d (= N_n)$ まで中継無線ノード N_i の列で構成された無線マルチホップ配送経路 $R = \{N_0 \dots N_n\}$ に沿ってデータメッセージが配送される。ここで、各 N_{i+1} は N_i の無線信号到達範囲に含まれることが必要である。AODV や DSR 等のアドホックルーティングプロトコルでは、経路探索要求メッセージ $Rreq$ のフラッディングを用いることによって、各無線ノードの位置情報を用いることなく無線マルチホップ配送経路を検出することができる。しかし、アドホックネットワーク全域に渡るフラッディングの通信オーバーヘッドは大きく、フラッディングの TTL を適切に定めることも容易ではない。さらに、データメッセージ群の配送時間に対して十分長い時間だけ検出された無線マルチホップ配送経路が切断されない程度の安定性がない場合には、経路切断に対処するための経路修復や経路再探索が必要となる。このため、無線ノードの移動速度や移動頻度、故障頻度等に比較的高い制約が課される。

一方、Face, GPSR, GEDIR 等の無線ノードが GPS デバイスを備えており、自身の位置情報(座標)が取得可能であることを前提とした位置ベースアドホックルーティングプロトコルでは、各データメッセージごとに無線マルチホップ配送経路が定まることから、高移動速度、高移動頻度の無線ネットワーク環境への適用性が高い。これらのプロトコルでは、送信元無線ノードおよび前ホップ隣接無線ノードからデータメッセージを受信した無線ノードは、局所的な位置情報、すなわち、自身の位置、隣接無線ノードの位置(Face で用いられる前ホップ隣接無線ノードの位置を含む)、送信元無線ノードの位置^{*2}、送信先無線ノードの位置のみから、それぞれのプロトコルで定められたアルゴリズムによって次ホップ隣接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、GPSR, GEDIR 等では、送

信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路が無線マルチホップネットワーク内に存在するにも関わらず、中継無線ノードが次ホップ隣接無線ノードを選択できないデッドエンドノードとなることがある。これは、これらのプロトコルにおける次ホップ選択アルゴリズムが局所的な位置情報に基づいた貪欲アルゴリズムであることによるものである。一方、Face プロトコルでは、これらのプロトコルと同様に全域的な無線ノード位置情報を用いないにも関わらず、デッドエンドノードが存在しない。すなわち、送信元無線ノードから送信先無線ノードへの無線マルチホップ配送経路が存在するのであれば、データメッセージは必ずそのいずれかに沿って配送される。

2.2 Face ルーティングプロトコル

Face プロトコルは、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隣接無線ノードを決定する分散的手法であるにも関わらず、デッドエンドノードを発生しない。ここで、図 1 に示すように、各無線ノード N_i を頂点、各無線リンク $\langle N_i N_j \rangle$ ^{*3} を辺とするグラフを考える。このグラフによって、平面全体は 3 本以上の辺で囲まれた有限個の部分平面に分割される。ただし、この分割においては、2 辺の交わりには必ずしも頂点が存在しない。後述するように、Face プロトコルでは部分平面を構成する辺に沿ってデータメッセージを配送することから、辺の交わりには必ず頂点(無線ノード)が存在することが必要である。そこで、任意の 2 辺の交わりに頂点が存在する、すなわち平面的グラフとなっているこのグラフの全域部分グラフを構成する。このようなグラフとして、以下の条件を満足するガブリエルグラフがある⁴⁾。

[ガブリエルグラフ]

頂点の集合を $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_m\}$ とするとき、以下の条件を満たす線分 $N_i N_j$ のみを辺とする平面的部分グラフ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 $|N_i N_j| \leq R$ を満たす。
- (2) $\forall N' \in \mathcal{N}$ について、 N' は線分 $N_i N_j$ を直径とする円の外部にある。□

図 1 に示す無線マルチホップネットワークでは、図 2 の破線に示す無線リンクが削除され、図 3 に示されるガブリエルグラフが導出される。

ここで、任意の無線ノード対 (N_s, N_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 $N_s N_d$ と交わる部分平面列 $\langle F_1^{sd}, \dots, F_t^{sd} \rangle$ (ただし、 $N_s \in F_1^{sd}$ かつ $N_d \in F_t^{sd}$) 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 N_s から N_d へ配送することができる。

[Face プロトコル(概略)]

- (1) N_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。

*1 GPSR や GEDIR では、中継無線ノードが次ホップ無線ノードを決定できないデッドエンドノードとなることがある。

*2 GPSR と GEDIR では不要である。

*3 本論文では、すべての無線リンクが双方向であることを仮定する。

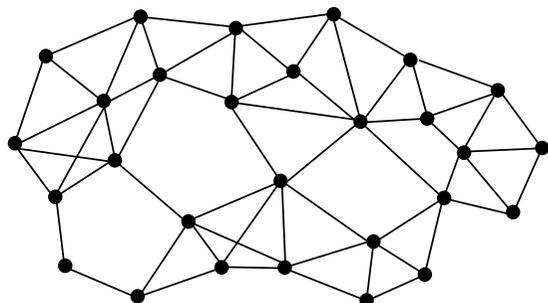


図 1 無線マルチホップネットワーク

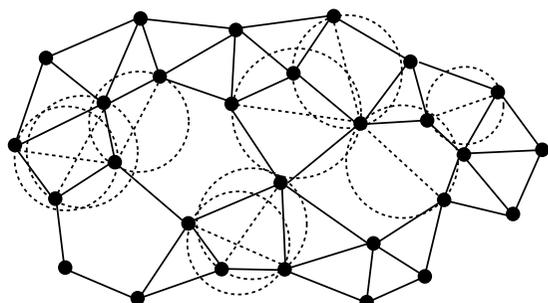


図 2 無線リンク除去によるガブリエルグラフの導出

(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 $\bar{N}_i \in F_i^{sd} \cap F_{i+1}^{sd}$ 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。□

Face プロトコルでは、無線ノード N_{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 N_i は、 $N_i \bar{N}_{i+1}$ がガブリエルグラフの辺となっている \bar{N}_{i+1} のうち、 $\angle N_{i-1} N_i \bar{N}_{i+1}$ が最小となる \bar{N}_{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 4 では、 $N_i N_{i-1}$ と $N_i \bar{N}_{i+1}$ はガブリエルグラフの辺であるが、 $N_i N'$ と $N_i N''$ はそれぞれを直径とする円が N_{i-1} 、 \bar{N}_{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、 $\angle N_{i-1} N_i N' < \angle N_{i-1} N_i N'' < \angle N_{i-1} N_i \bar{N}_{i+1}$ であるにもかかわらず、 \bar{N}_{i+1} が N_i の次ホップ無線ノードとなる。ここで、 $\angle N_{i-1} N_i \bar{N}_{i+1}$ 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回りと反時計回りを交互に適用する。図 3 では、 F_1 では反時計回り、 F_2 では時計回り、 F_3 では反時計回

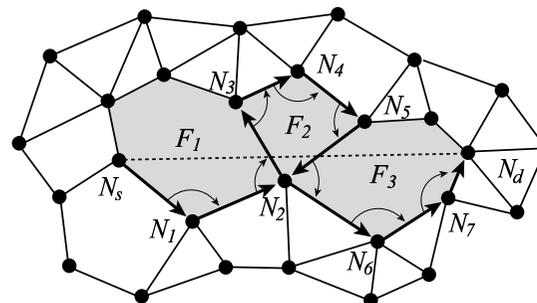


図 3 Face プロトコル

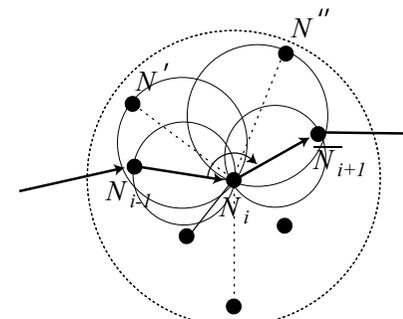


図 4 Face プロトコルにおける次ホップ決定

りである。

N_i がすべての隣接無線ノード \bar{N}_{i+1} について $\angle N_{i-1} N_i \bar{N}_{i+1}$ を計算するためには、 \bar{N}_{i+1} の位置情報を N_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 N_{i-1} から受信したデータメッセージを中継無線ノード N_i が正しく次ホップ無線ノード N_{i+1} へ転送するためには、 N_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5では、中継無線ノード N_i がすべての隣接無線ノード $\{N_{i-1}, N_{i+1}, N_j, N_k\}$ 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 N_{i-1} から受信した N_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、 N_{i+1} を検出し、 m を N_{i+1} へ転送している。 m はさらに N_{i+1}, N_{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 N_d へと到達する。

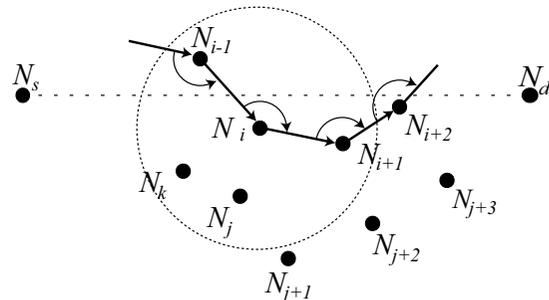


図5 Face プロトコルによる正しいマルチホップ配送

一方、図6では、 N_i が隣接無線ノードのうち $\{N_{i-1}, N_j, N_k\}$ の位置情報を取得しているが、 N_{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

N_{i-1} から受信した N_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、 N_j を検出し、 m を N_j に転送している。 m はさらに $N_j, N_{j+1}, N_{j+2}, N_{i+1}$ 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 N_i は再度 N_j へと m を転送する。この結果、 m は部分平面 $N_i N_j N_{j+1} N_{j+2} N_{i+1}$ 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 $N_s N_d$ 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 $N_s N_d$ 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 N_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 $N_s N_d$ 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。

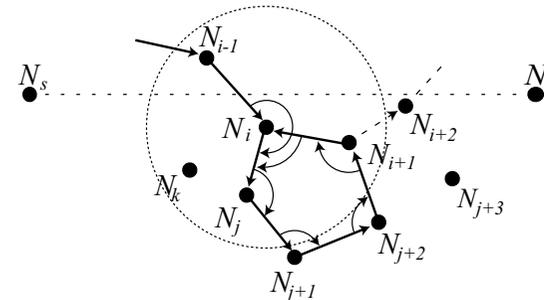


図6 隣接ノード 検出失敗によるループ配送

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。

*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。

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 N_i が複数回転送することがある。 N_i の隣接無線ノード数が N_i であるとき、 N_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、 N_i の前ホップ無線ノードを N_i^- 、 N_i の次ホップ無線ノードを N_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 $\langle N_i, N_i^-, N_i^+, D \rangle$ 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 $N_s N_d$ 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 $N_s N_d$ 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 N_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 N_s から N_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6において、データメッセージが線分 $N_s N_d$ と交わらない部分平面 $N_i N_j N_{j+1} N_{j+2} N_{i+1}$ の辺に沿ったループ経路を配送されるのは、 N_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 N_{i+1} を N_{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7に示すように、 N_i 以降のすべての中継無線ノードが N_{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 N_{j+2} から N_{j+3} へとユニキャスト転送され、以降 N_{i+2} 等へとマルチホップ配送されていく。つまり、 N_i 以降の中継無線ノードがすべて N_{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。

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

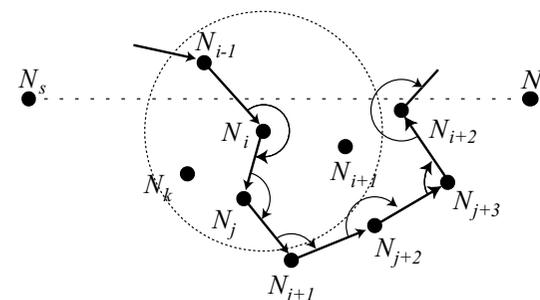


図7 検出失敗ノード除去によるループ配送回避

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8では、 N_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 N''' 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 N_{i+1} であることから、 N_i を中心として $N_i N_{i-1}$ および $N_i N_{i+1}$ を半径に含む N_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、 N_i の次ホップとならなかった無線ノード N''' を以降に無線マルチホップ配送経路に含むと $N''' N_i$ 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 N_{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。

例えば図9では、 N_{i+1} が N_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、 $\angle N_{j+1} N_{j+2} N_{i+1} < \angle N_{j+1} N_{j+2} N_{j+3}$ であり $N_{j+2} N_{i+1}$ がガブリエルグラフの辺であるにも関わらず、 N_{j+2} が N_{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 N_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 N_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 (N_i, L_i, D_i) を中継無線ノード N_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、 (N_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、 N_j は受信したデータメッセージにピギーバックされた (N_i, L_i, D_i) の列から任意

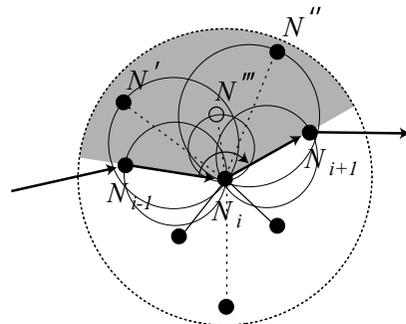


図 8 ブラックリスト手法

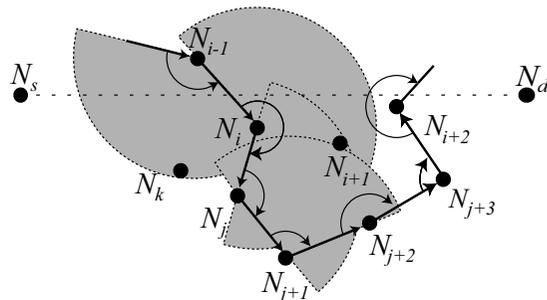


図 9 ブラックリスト手法によるループ配送回避

の $1 \leq i < j$ について線分 $N_i N_{i-1}$ および $N_i N_{i+1}$ を半径に含み、半径の長さを N_i の無線信号到達距離として図 8 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 $N_{i-1} N_i N_{i+1}$ 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 N_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 10 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。

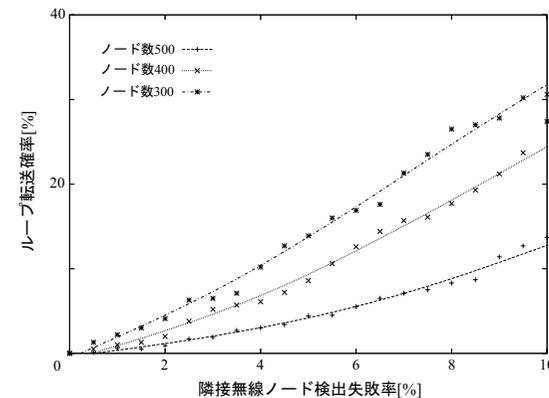


図 10 データメッセージのループ転送確率

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ーション実験結果を図 11 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 10 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。

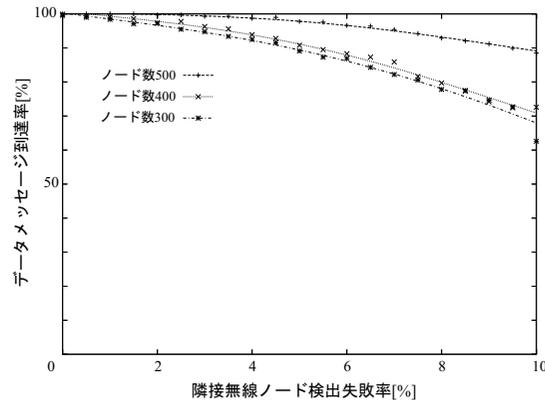


図 11 データメッセージの送信先無線ノードへの到達率

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 N_i の次ホップ無線ノード N_{i+1} の選択アルゴリズムにおいては、前ホップノード N_{i-1} とのなす角 $\angle N_{i-1}N_iN_{i+1}$ が最小となる N_i の隣接無線ノード N_{i+1} を探索する。ただし、 N_iN_{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 8 において、 $\angle N_{i-1}N_iN' < \angle N_{i-1}N_iN_{i+1}$ および $\angle N_{i-1}N_iN'' < \angle N_{i-1}N_iN_{i+1}$ であるにも関わらず、 N' と N'' は N_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 $N_{i-1}N_iN_{i+1}$ に含まれるすべての無線ノードを N_{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、 N' と N'' 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 $N_{i-1}N_iN_{i+1}$ に含まれている N_i が位置情報を取得できていない無線ノード（例えば図 8 の N''' ）であり、 N' と N'' 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、 N' と N'' を N_{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、 N_i の次ホップ無線ノード N_{i+1} の探索時に $\angle N_{i-1}N_iN' < \angle N_{i-1}N_iN_{i+1}$ であるにも関わらず N_i の次ホップ無線ノードとはならなかった N_i の隣接無線ノード N' 、すなわち、 N_iN' がガブリエルグラフの辺でない $\angle N_{i-1}N_iN' < \angle N_{i-1}N_iN_{i+1}$ である N' 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。 N_j ($j > i$) における次ホップ無線ノード探索時に、 N' 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、 N_j の次ホップ無線ノードの候補として扱い、 N_jN' がガブリエルグラフの辺であり、 $\angle N_{j-1}N_jN'$ が候補無線ノードのなかで最小であるならば、 N' は N_j の次ホップ無線ノードとなる。

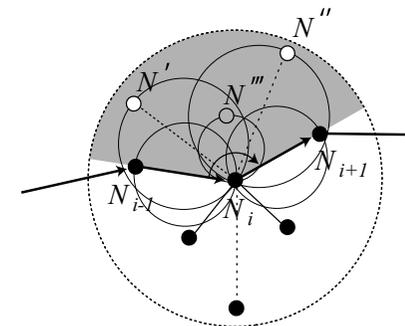


図 12 ブラックリストとホワイトリストの併用

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) Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol.47, No.6, pp.30-33 (2004).
- 3) David, B., David, A. and Hu, Y.C., "The Dynamic Source Routing Protocol," RFC 4728 (2007).
- 4) Gabriel, K.R. and Sokal, R.R., "A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis," Systematic Zoology, Vol.18, pp.259-278 (1969).
- 5) 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).
- 6) Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- 7) Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison Wesley (2001).
- 8) Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).