

Fast-FACE ルーティング手法の GPSR への適用

江崎 智和^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要：GPSR アドホックルーティングプロトコルは、GEDIR に基づく貪欲モードと FACE に基づく迂回モードから構成される。迂回モードにおける配送性能は void 領域境界に沿ったデータメッセージ配送の方向に依存するため、配送遅延の分散が拡大する。本論文では、FACE における問題を解決する Fast-FACE における限定的な複製メッセージの導入を GPSR に対して行なうことでこの問題を解決する。複製メッセージの配送が継続することを防ぐために、貪欲モードへの切替え以降も複製メッセージを配送する。シミュレーション実験の結果、void 領域による偏った無線ノード分布、格子状の無線ノード分布のいずれにおいても、配送遅延の分散を縮小するとともに配送遅延の短縮を実現することが明らかになった。

キーワード：モバイルアドホックネットワーク、位置ベースルーティング、GPSR、迂回モード、FACE

Extended GPSR with Limited Copies of Data Messages

TOMOKAZU EZAKI^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: GPSR ad-hoc routing protocol consists of a greedy mode based on GEDIR and a perimeter mode based on FACE. In the perimeter mode, the transmission performance depends on the direction of the transmission around the void area. This paper introduces limited copies of data messages as in Fast-FACE to solve this problem. For avoidance of continuous transmissions of copies of data messages, a pair of copies around the same void area are continuously transmitted to meet at a certain intermediate wireless node even after switching to the greedy mode. The simulation results show that the extended GPSR achieves shorter average transmission delay and smaller variance which brings stable data message transmissions in ad-hoc networks.

Keywords: MANETs, Location-Based Routing, GPSR, Perimeter Mode, FACE

1. はじめに

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 [3]。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用いて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 [10]。ここでは、ノードの位置が時間経過とともに変化することに対応し、消費電力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る。そこで、各無線ノードが GPS デバイス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ず、各データメッセージごとに独立に配送経路が定まる FACE [2]、GPSR [7]、GEDIR [9]、COMPASS [8] 等が

¹ 東京電機大学大学院ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

a) ezaki@higlab.net

b) hig@higlab.net

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 DSR [4] や AODV [11] 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。前ホップから転送されたデータメッセージを受信した中継無線ノードは、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位置情報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。このとき、各無線ノードは、隣接無線ノードの位置情報を取得する必要がある、また、隣接無線ノードの位置情報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位置情報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 は、GEDIR や COMPASS 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プロトコルである。しかし、局所的な位置情報のみを用いて次ホップ無線ノードを決定するため、データメッセージの配送経路は他のアドホックルーティングプロトコルと比べて長くなる傾向があり、配送遅延の延長が問題となる。論文 [13] では、この問題を解決する Fast-FACE プロトコルを提案している。本論文では、Fast-FACE のデータメッセージ配送手法を GPSR の迂回モードに適用する場合の性能を評価する。

2. 関連研究

GPSR は、GEDIR に基づく貪欲モードの配送手法と FACE に基づく迂回モードの組み合わせによって構成される。FACE は、各中継無線ノードが全域的な位置情報を取得する必要がなく、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、デッドエンドを発生しない。また、各無線ノードがデータメッセージ配送に要する記憶領域は配送途中のデータメッセージを保持するバッファのみである。ここでは、FACE プロトコルの概要を述べる。

図 1 に示すように、無線マルチホップネットワークは各無線ノード N_i を頂点、各無線リンク $\langle N_i N_j \rangle$ を辺とするグラフに対応させることができる。ここで、無線ノード N_i と N_j の距離 $|N_i N_j|$ が無線信号到達距離 R 以下であるならば $\langle N_i N_j \rangle$ が存在し、 N_i と N_j は互いに隣接無線ノードであるという。このとき、図 1 のグラフのように、2 辺の交点が存在することがある。FACE ではこの交点を除去する

ために、互いに交わる 2 辺の少なくとも一方を除去することによって平面的グラフである全域部分グラフを構成する。このようなグラフには、ガブリエル部分グラフや相対近傍グラフがあり、FACE プロトコルでは前者が用いられる [5]。

[ガブリエル部分グラフ]

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グラフをガブリエル部分グラフという。

- (1) $|N_i N_j| \leq R$ である。
- (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たガブリエル部分グラフが構成される。なお、後述するように各無線ノードは隣接無線ノードの位置情報のみによってガブリエル部分グラフ上の隣接ノードを特定することができる。

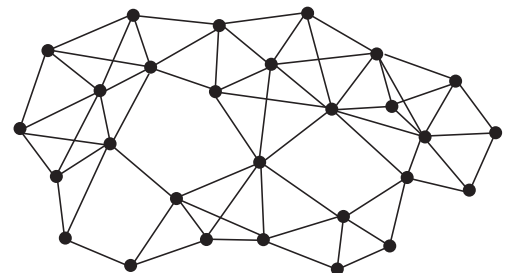


図 1 無線マルチホップネットワーク

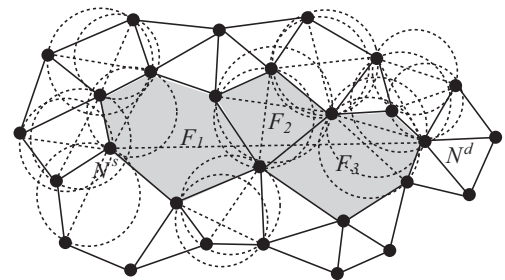


図 2 無線リンク除去によるガブリエルグラフの導出

ガブリエル部分グラフによって平面全体は有限個の領域に分割される。互いに隣接する 2 つの領域は辺とその頂点のみを共有する。送信元無線ノード N^s から送信先無線ノード N^d までの無線マルチホップ配送経路が存在するならば、線分 $N^s N^d$ と交わる複数の領域はすべて単連結な多角形であり、 N^s または N^d を含まない領域は、線分 $N^s N^d$ と交わる隣接領域を少なくとも 2 つ持つ。

ここで、各領域の辺の長さは R 以下であり、隣接する頂点に対応する無線ノードは互いに無線信号到達範囲内に位置している。したがって、データメッセージを各領域の辺に沿って配送することが可能である。FACE では、線分

$N^s N^d$ と交わる領域の辺に沿ってのみデータメッセージを配送する。以下に示す FACE-1 では、データメッセージ m を各領域のすべての辺に沿って配送することで、線分 $N^s N^d$ との交点が最も N^d に近い辺を探索し、その辺を共有する隣接領域の辺に沿って m を配送することを繰り返す。これによって、図 3 に示すように m を N^s から N^d へと配送する。

[FACE-1 プロトコル]

```

 $p \leftarrow N^s$ 
repeat
   $F \leftarrow p$  を境界に含み線分  $pN^d$  と交わる領域
  foreach  $F$  の辺  $NN'$ 
    if  $NN'$  が線分  $pN^d$  と  $p'$  で交わり  $|p'N^d| < |pN^d|$ 
       $p \leftarrow p'$ 
    end if
  end foreach
until  $p = N^d$ 
□

```

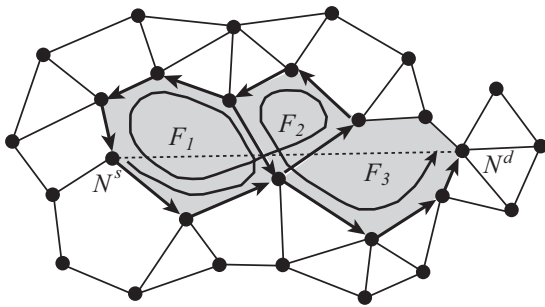


図 3 FACE-1 プロトコル

領域の辺に沿ったデータメッセージ配送は、隣接無線ノードの位置情報のみを用いて以下に行なう。図 4 に示すように、前ホップ無線ノード N_{i-1} からデータメッセージ m を受信した無線ノード N_i は、各隣接無線ノード N と N_i とを結ぶ線分 NN_i がガブリエル部分グラフの辺となっているかを判定する。これは線分 NN_i を直径とする円の内部に他の無線ノードが含まれるかを調べればよく、この円全体が N_i の無線信号到達範囲に含まれていることから、隣接無線ノードの位置情報のみによって判定可能である。ガブリエル部分グラフの辺 NN_i の端点である隣接無線ノード N のうち、 m を領域の辺を時計廻り方向に配送している場合には反時計廻り方向に測定した $\angle N_{i-1}N_iN$ が最小となる N を、反時計廻り方向に配送している場合には時計廻り方向に測定した $\angle N_{i-1}N_iN$ が最小となる N を N_i の次ホップ無線ノードとする。このようにして、局所的な位置情報のみによって N_i の次ホップ無線ノードが決定される。

[2] では FACE-1 と FACE-2 の 2 つのプロトコルが提案

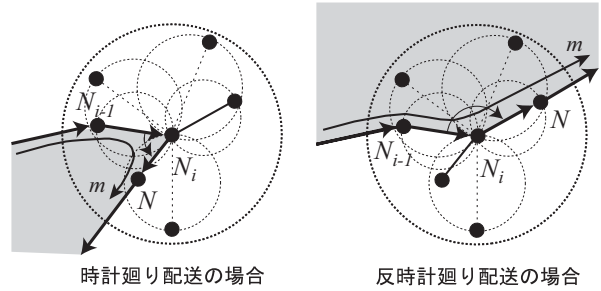


図 4 FACE プロトコルにおける次ホップ決定

されている。FACE-1 では、 m が線分 $N^s N^d$ と交わる各領域のすべての辺を配送される。このため、配送経路長が拡大し、配送遅延が延長する。一方、FACE-2 では、 m を各領域の辺に沿って配送することで線分 $N^s N^d$ と交わる最初の辺を探索し、その辺を共有する隣接領域の辺に沿って m を配送することを繰り返す。これによって、図 5 に示すように各領域の一部の辺のみを m が配送されることとなり、配送経路長の縮小、配送遅延の短縮が実現できる。なお、各領域における m の配送方向は任意であるが、領域を転送されるごとに時計廻り方向と反時計廻り方向とを交互に繰り返す手法が提案されている。

[FACE-2 プロトコル]

```

 $p \leftarrow N^s$ 
repeat
   $F \leftarrow p$  を境界に含み線分  $pN^d$  と交わる領域
  線分  $pN^d$  と  $p' \neq p$  で交わる  $F$  の辺  $NN'$  を検出
   $p \leftarrow p'$ 
until  $p = N^d$ 
□

```

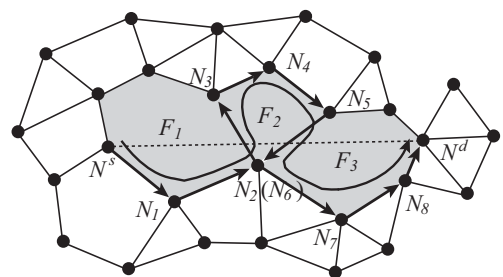


図 5 FACE-2 プロトコル

FACE では、線分 $N^s N^d$ と交わる各領域の辺に沿ってデータメッセージを配送することによって 100% の到達性を実現している。しかし、FACE ではガブリエル部分グラフを配送経路決定の基礎としているため、比較的長い無線リンクが除去され、配送経路長が拡大し、配送遅延が延長するという問題がある。GPSR では、貪欲モードと迂回モードを組み合わせることでこれらの問題を低減している。また、SkipFACE [6] では、各領域のすべての頂点に対応する

中継無線ノードを経由せず、条件を満たす場合にはスキップする手法を導入している。

一方、FACE-2はFACE-1よりも配送遅延を短縮しているものの、 N^s が選択したデータメッセージ m の配送経路方向によって配送経路長が異なり、 N^s がより短い経路を選択できないという問題がある。図6上に示すように、 N^s が m を時計廻り方向に送信した場合、 m は7ホップで N^d に到達する。しかし、図6下に示すように、 N^s が m を反時計廻り方向に送信した場合、 m が N^d に到達するまでに23ホップを要する。これは、 N^s および各中継無線ノードが全域的な位置情報を取得せず、局所的な位置情報のみによって次ホップ無線ノードを決定することによるものであり、より短い経路が得られる配送方向を各無線ノードが選択することは不可能である。

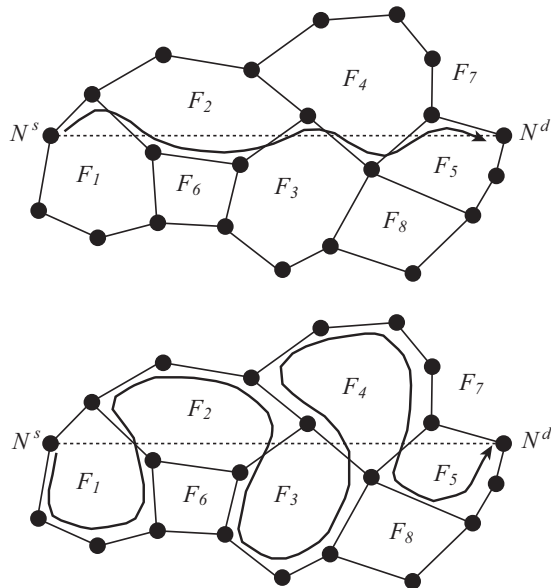


図6 FACEプロトコルによる経路検出 (1)

さらに、図7においては、配送経路長がそれぞれ7ホップと34ホップとなり、その差が拡大する。これは、領域 F_4 が開いた領域となっているためである。論文[1]では、GPSRの迂回モードを対象として、開いた領域における配送では、隣接領域との共有辺までの配送経路が短い配送方向を選択する手法が提案されている。しかし、この手法では、各無線ノードが開いた領域の頂点となっているかを常時検証し、そうである場合には、その領域の頂点である隣接無線ノードと制御メッセージを交換し続けることが必要である。この制御メッセージの交換は、データメッセージ配送の有無とは無関係に行なうことが求められ、通信オーバーヘッドの拡大は避けられない。また、自身が開いた領域の頂点となっているか否かという状態情報、頂点となっている場合にはその隣接無線ノードの識別子情報等を保持する状態変数を必要とする。このため、無線ノードが隣接無線ノードの位

置情報のみを保持し、トポロジ管理オーバーヘッドが小さいというFACE、GPSR等の位置ベースアドホックルーティングプロトコルの利点が損われる。

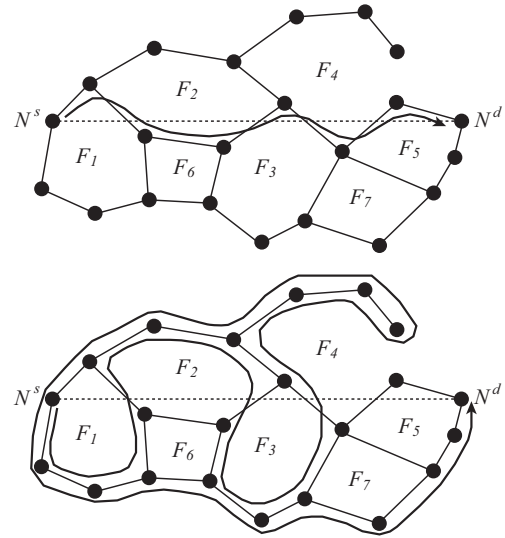


図7 FACEプロトコルによる経路検出 (2)

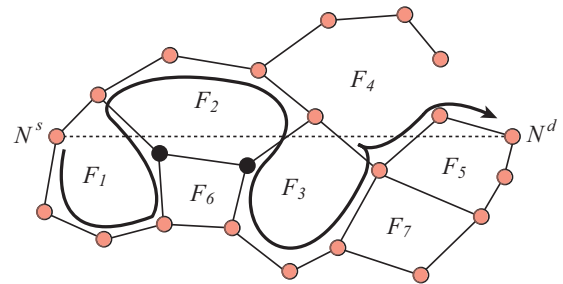


図8 トポロジ管理によるFACEの経路長短縮

3. 提案手法

前章で述べた中継無線ノードによるデータメッセージの配送方向選択による配送遅延延長の問題を解決するために、論文[13]では、各領域においてデータメッセージの複製を時計廻り方向と反時計廻り方向の両方に配送するFast-FACEを提案している。図9に示すように、領域 F の辺に沿ってデータメッセージ m の複製を両方向に配送するならば、線分 N^sN^d との交点を持つ辺の端点となる無線ノードへは、より配送経路長の短い経路を配送された m の複製が先に到達する。ここで、 m はこの辺を共有する隣接領域の辺に沿って配送されることとなる。この隣接領域においても m の複製が時計廻り方向と反時計廻り方向の両方向に配送される。これによって、各領域において配送経路長が短い方向で配送された m の複製が N^d へ最初に到達する。本提案手法は、 m の複製を配送することによる通信オーバーヘッドの拡大を要するものの、 m の配送遅延を短縮することが可能である(図10)。

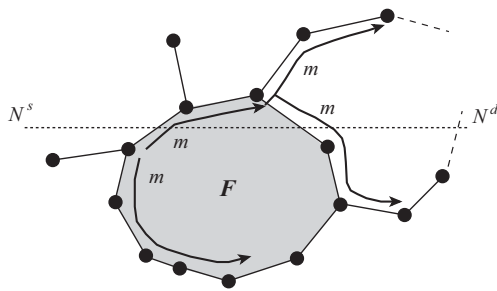


図 9 複製メッセージの両方向配送

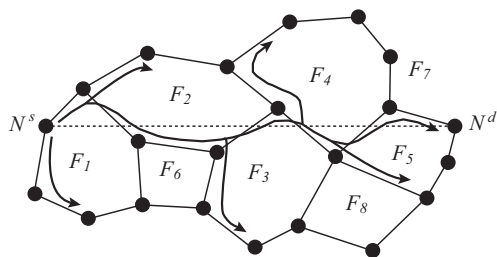


図 10 両方向配送による配送遅延の短縮

上記の手法によって、各領域において配送経路長が短い方向に配送された m の複製が先に線分 $N^s N^d$ と交わる辺の端点となる無線ノードに到達する。このとき、逆方向に配送された m もこの到達とは無関係に線分 $N^s N^d$ と交わる辺の他の端点となる無線ノードまで配送される。ここで、到達した m の複製が同様にこの辺を共有する隣接領域の辺に沿って配送されると、この領域では m の複製が冗長に配送されることとなり、通信オーバーヘッドが大幅に拡大する (図 11)。これを解決する方法として、隣接領域との共有辺の端点となる無線ノードが m の複製を保持し、遅れて到達した m の複製を受信しても隣接領域の辺に沿った配送を行わない手法が考えられる [12]。しかし、この手法では、この無線ノードが m の複製を保持するバッファを要すること、図 12 に示すように領域が凹図形である場合には配送方向が異なる m の複製が必ずしも共有辺の両端点にまで到達しないために m の複製をバッファから削除することができないこと、という 2 点が問題となる。

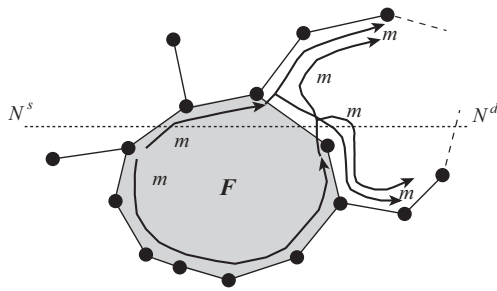


図 11 複製メッセージの冗長配送

そこで、本論文では、隣接領域との共有辺の端点となる無線ノードに m が到達した以降もこの領域の辺に沿った m

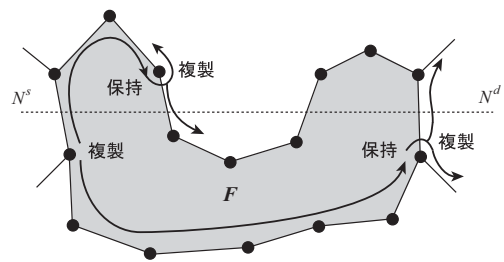


図 12 凹多角形領域における複製保持の問題点

の配送を継続する手法を提案する (図 13)。 m が継続して配送され続けることにより、この領域の頂点に位置するいずれかの中継無線ノードにおいて、両方向に配送された m の複製が到達する。したがって、この中継無線ノードにおいて両方向に配送された m の複製を検出し、これを破棄することによって、各無線ノードが m の複製を保持することなく、データメッセージの冗長配送を回避することができる。

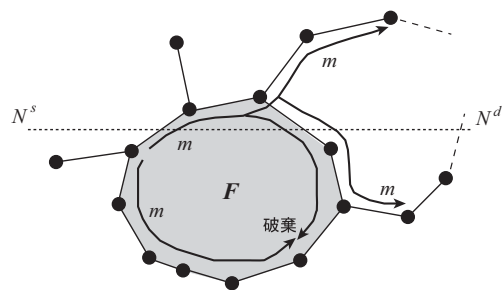


図 13 複製メッセージの配送継続

一般に、無線ノード N がガブリエル部分グラフの辺によって接続された n 台の隣接無線ノード N_i ($0 \leq i < n$) を持つとき、 N は最大 n 領域の辺の頂点に位置している。各領域において、時計廻り方向と反時計廻り方向に配送されるデータメッセージが N に到達することが考えられる。したがって、同一の領域を双方向に配送されるデータメッセージを互いに対応付けるためには、データメッセージに何らかの情報を付加することが必要である。データメッセージには、その領域における転送方向 (時計廻り方向か反時計廻り方向か) の情報 *direction* が付加されている。そして、このデータメッセージを前ホップ隣接無線ノード N_- から受信した中継無線ノード N は、自身と自身の隣接無線ノードの位置情報から次ホップ隣接無線ノード N_+ を取得することができる。そこで、このデータメッセージが転送待ちとなり通信バッファに保持される際には、4 項組 $\langle N_-, N, N_+, direction \rangle$ を付すこととする。このとき、4 項組 $\langle N_+, N, N_-, direction' \rangle$ ($direction' \neq direction$) を付したデータメッセージが通信バッファに格納されているならば、これらは互いに逆方向に同一領域の辺を配送されるデータメッセージであることから、これら双方ともに通信バッファから除去して破棄するものとする (図 14)。一方、

このような4項組が付されたデータメッセージが通信バッファに格納されていないならば、そのまま転送処理を継続する。

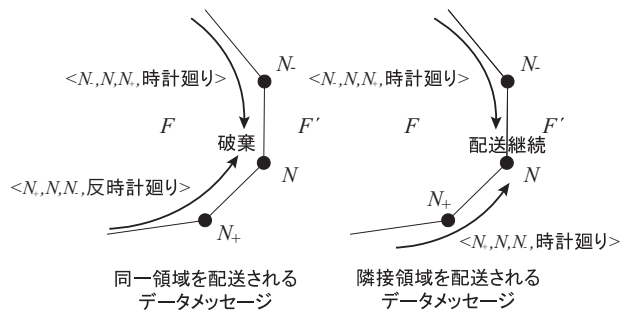


図 14 複製データメッセージの破棄

なお、図 15 に示すように領域が凹多角形である場合には、線分 $N^s N^d$ と交わる辺が多数存在することも考えられる。このとき、異なる中継無線ノードで複製されたデータメッセージが異なる配送方向で同一領域の辺を配送され、ひとつの中継無線ノードに到達することがある。この場合でも、データメッセージに付された4項組が上記の条件を満足する場合には通信バッファから除去して破棄し、満足しない場合には配送を継続することで、複製メッセージの冗長な配送を回避しながら、データメッセージの N^d への到達を妨げない遅延を短縮した配送を実現することができる。

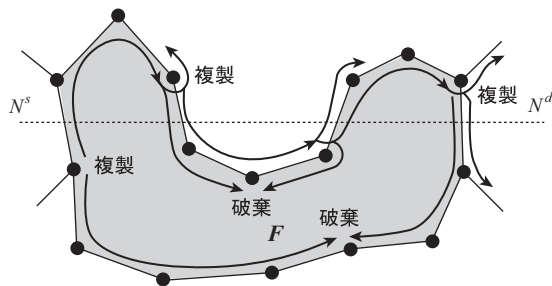


図 15 凹多角形領域におけるデータメッセージ複製と破棄

GPSR は、デフォルトで貪欲モードの配送を行なう。ここでは、GEDIR の次ホップ選択手法を適用し、各中継無線ノードは最も送信先無線ノードに近い隣接無線ノードへデータメッセージを転送する。すべての隣接無線ノードが中継無線ノードよりも送信先無線ノードまでの距離が長い場合には、データメッセージの転送先が存在しないデッドエンドとなる。このとき、GPSR では配送手法を迂回モードに切替え、FACE による次ホップ選択手法を適用する。しかし、ここでもデータメッセージの転送方向の選択によって配送経路長、配送遅延が異なる。特に、無線ノードが低密度に分布する場合、分布に偏りがある場合などにおいては、無線ノードが存在しない void 領域の存在によって配送遅延の分布 (ばらつき) が大きくなる問題がある。そこで、本

論文では、GPSR の迂回モードに対して Fast-FACE の迂回モードの配送手法、すなわち、void 領域の両方向にデータメッセージの複製を配送する手法を提案する。

GPSR では、デッドエンドを検出した中継無線ノードが配送手法を貪欲モードから迂回モードへと切替える。このとき、データメッセージの複製を時計廻りと反時計廻りの両方向へと配送する。void 領域の辺に対応する無線リンクを順次配送される複製データメッセージがデッドエンドを検出した中継無線ノードよりも送信先無線ノードに近い中継無線ノードに到達すると、この複製データメッセージの配送モードを貪欲モードへと切替えて配送を続ける。このとき、Fast-FACE で問題となった不要な複製データメッセージの生成と配送を回避する必要があることから、GPSR の迂回モード配送においても Fast-FACE における領域切替え時の複製データメッセージの配送継続と同様、再度データメッセージを複製し、貪欲モードでの配送を開始するとともに、void 領域に沿った配送を継続する。これによって、複製データメッセージが無線ネットワーク内に存在し続けることを回避することができる。

4. 性能評価

GPSR と GPSR の迂回モードに対して Fast-FACE の限定的な複製データメッセージ配送を適用する手法 (Fast-GPSR) の性能をシミュレーション実験により評価する。ここでは、1,000m 四方の正方形領域に通信距離 100m のノード 200-500 台を (1) 100m 四方の void 領域 0-45 ケ所を除く領域、(2) 50-200m 間隔の格子状に、限定して一様分布乱数に基づいてランダムに配置する。ただし、無線ノードは移動しないものとし、送信元無線ノードと送信先無線ノードは配置した無線ノードからランダムに選択する。

データメッセージ配送経路長の計測結果を図 16-19 に示す。GPSR においては、無線ノード密度が高く void 領域数が少ない場合には、迂回モードを適用する機会が少なく、貪欲モードによる配送が中心となることから、経路長を縮小した配送を実現しているが、void 領域の拡大にともなって経路長が拡大している。これは、void 領域の拡大によって、ガブリエル部分グラフによって構成される領域が大きくなるとともに、配送方向選択の経路長への影響が大きくなっていることによるものである。これに対して Fast-GPSR では、GPSR と比較して配送経路長が大きく縮小している。これは、ガブリエル部分グラフが構成する各領域において経路長の短い転送方向を配送された複製メッセージが送信先無線ノードに最初に到達することによるものである。この結果から、本提案手法を GPSR の迂回モードに適用することで、GPSR では迂回モードが適用されることで配送経路長が延長する無線ノード密度が比較的低い環境や void 領域数が多い環境においても性能を低下させることがないと

いう優れた性質を持つことがわかる。

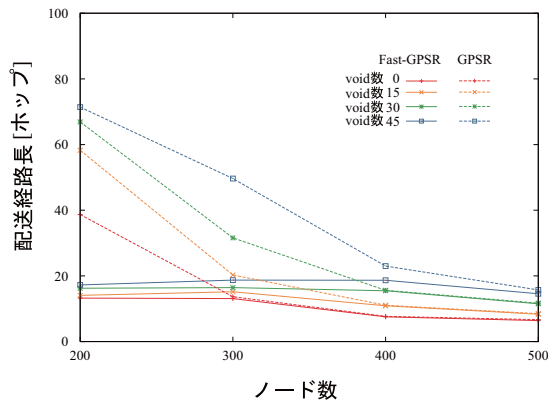


図 16 平均配送経路長 (void)

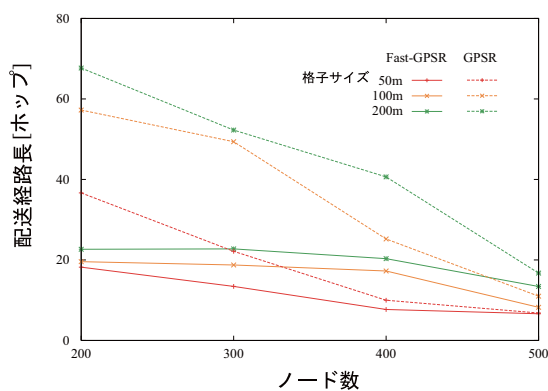


図 17 平均配送経路長 (格子)

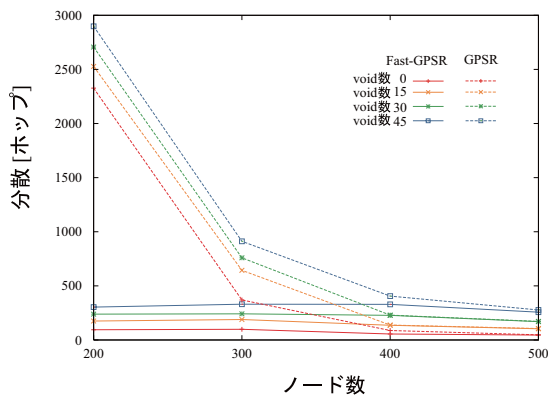


図 18 配送経路長の分散 (void)

次に、データメッセージ配送遅延の測定結果を図 20-23 に示す。データメッセージの複製を行なわない GPSR では配送経路長と同様の傾向となるのは勿論であるが、複製メッセージを用いる Fast-GPSR でもほぼ同様の傾向となった。さらに、Fast-GPSR では経路長分散、配送遅延分散がいずれも縮小しており、安定的な配送を実現している。

最後にデータメッセージ転送数 (送信回数) の測定結果を図 24, 25 に示す。Fast-GPSR は、ガブリエル部分グラフが

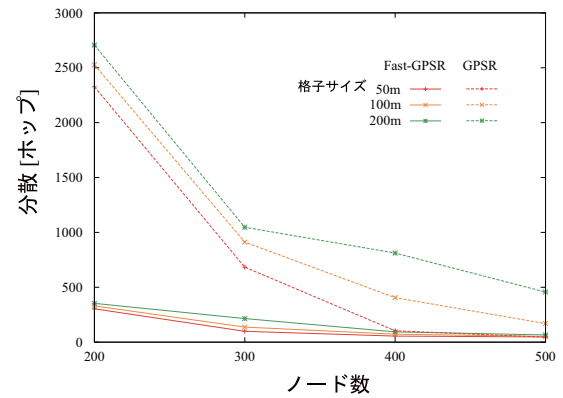


図 19 配送経路長の分散 (格子)

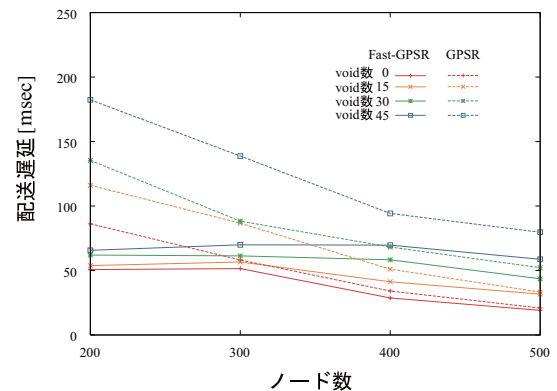


図 20 平均配送遅延 (void)

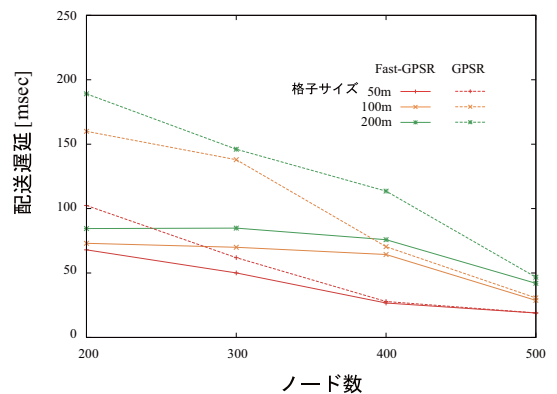


図 21 平均配送遅延 (格子)

構成する各領域のすべての辺に対応する無線リンクを用いて複製データメッセージを配送することとなるため転送数は最大となる。

5. まとめ

本論文では、GPSR の迂回モードに対して Fast-FACE の限定的な複製データメッセージ配送を適用する手法を提案し、その性能をシミュレーション実験評価した。デッドエンドを検出した中継無線ノードから、これよりも送信先無線ノードに近い中継無線ノードまで、複製データメッセージを時計廻り方向と反時計廻り方向の両方向に複製データ

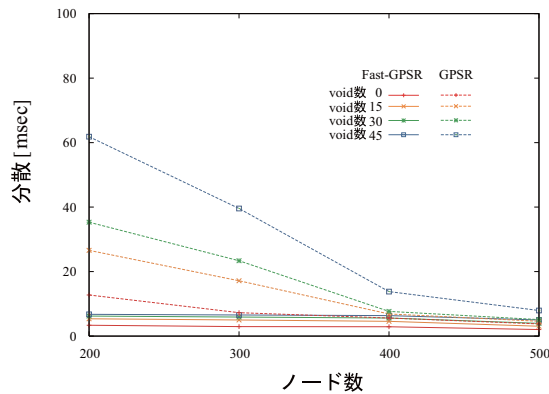


図 22 配送遅延の分散 (void)

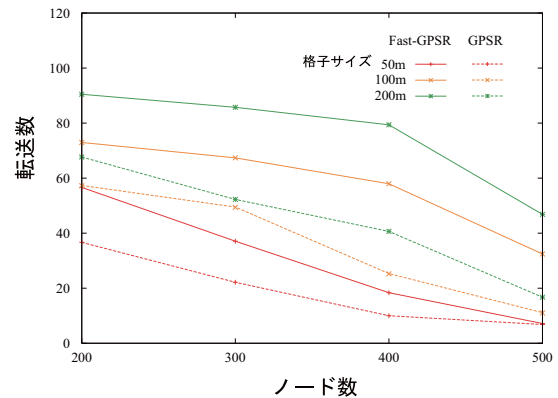


図 25 データメッセージ転送数 (格子)

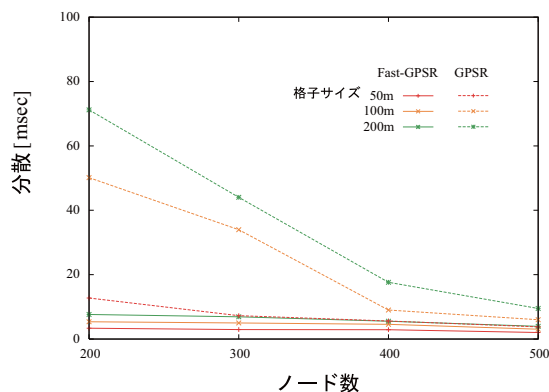


図 23 配送遅延の分散 (格子)

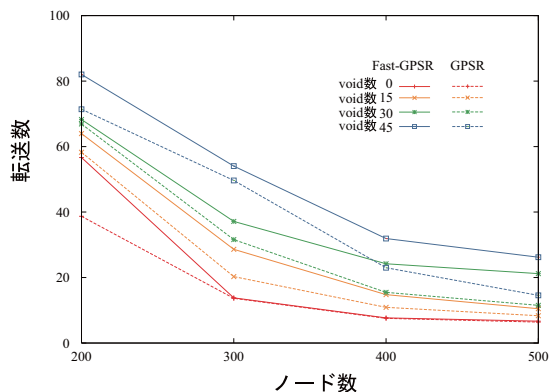


図 24 データメッセージ転送数 (void)

メッセージを配送することによって、GPSR の迂回モードにおける配送方向選択による配送経路長、配送遅延の分散を縮小することができる。また、Fast-FACE と同様、void 領域に沿った複製データメッセージの配送を両方向に配送された複製データメッセージが同一中継無線ノードに到達するまで継続することによって、複製データメッセージが無線ネットワーク内に存在し続けることを回避している。拡張した GPSR の性能は Fast-FACE と同様、配送遅延を短縮し、データメッセージ転送回数を増加させる。したがって、配送遅延の短縮と安定が求められるアプリケーションに対して適切な手法である。

参考文献

- [1] Aissani, M., Bouznad, S., Hariza, A. and Allia, S.E., "An Effective Mechanism for Handling Open Voids in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications, pp. 24–29 (2011).
- [2] Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Wireless Networks, Vol. 7, pp. 609–616 (2001).
- [3] Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol. 47, No. 6, pp. 30–33 (2004).
- [4] David, B., David, A. and Hu, Y.C., "The Dynamic Source Routing Protocol," RFC 4728 (2007).
- [5] Gabriel, K.R. and Sokal, R.R., "A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis," Systematic Zoology, Vol. 18, pp. 259–278 (1969).
- [6] Jie, L. and Kshirasagar, N., "Skipping Face Routing with Guaranteed Message Delivery for Wireless Ad Hoc and Sensor Networks," Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4325, pp. 47–59 (2006).
- [7] 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).
- [8] Kranakis, E., Singh, H. and Urrutia, J., "Compass Routing on Geometric Networks," Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry, pp. 51–54 (1999).
- [9] Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- [10] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison Wesley (2001).
- [11] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).
- [12] Takahashi, H. and Higaki, H., "Extended FACE Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," Proceedings of the 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems, pp. 220–224 (2005).
- [13] 江崎, 松垣, "Fast-FACE プロトコルの性能改善," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 信学技報, Vol. 112, No. 307, pp. 39–44 (2012).