

# センサネットワークにおける高精度測位方式と位置情報を用いたクロスレイヤプロトコル

代表研究者 萬代 雅希 静岡大学情報学部助教  
 共同研究者 Vijay Bhargava ブリティッシュコロンビア大学教授

## 1 はじめに

近年の無線通信技術の急速な進展に伴い、無線センサネットワークに関心が集まっている。センサネットワークでは、各種小型センサに簡単な無線通信機能を付加したセンサノードを環境に散布もしくは配置し、環境観測を行う。一般に、各センサノードで収集された情報は、他のセンサノードを中継してシンクと呼ばれる収集ポイントに無線マルチホップ通信により送信される。センサノードの省電力化は重要な研究課題であり、ネットワーク層ではシンクまでの経路制御（ルーティング、フォワーディング）の効率化、リンク層ではメディアアクセス制御（MAC）プロトコルの効率化、スリープスケジューリング等の様々な取り組みが各所でなされている。

位置情報フォワーディング（geographical forwarding）は、各センサノードが自身の位置情報を取得可能であると仮定し、位置情報を用いてシンクまでデータを転送する経路制御手法である。位置情報フォワーディングは、データ送信時にシンクまでの経路を決定するのではなく、各センサノードが所定のルールに従ってデータを転送するだけでシンクまでデータ配送する手法であり、経路制御情報量が少なく、センサノードの省電力化および高いスループットを実現できる手法として期待される。位置情報フォワーディングプロトコルは、大きく state-based と state-free の 2 種類に分類できる。greedy forwarding [1] や greedy perimeter stateless routing (GPSR) [2] に代表される state-based プロトコルでは、各センサノードが近隣ノードテーブルもしくはルーティングテーブルを管理する。各センサノードは、これらのテーブルを利用してデータ転送を行う。state-based プロトコルは、送信ノードが受信ノードを指定してデータ送信をするため、受信ノード決定プロセスが簡易であるという利点を有するが、テーブルの更新および管理のオーバーヘッドが発生するという問題がある。一方 state-free プロトコルは、各ノードがテーブル管理せず受信ノードを決めることなくデータを転送する手法である。state-free プロトコルは、テーブル管理が不要であるという利点があり、センサノードの省電力化に対するポテンシャルを有すると考えられる。代表的な state-free プロトコルとして、geographic random forwarding (GeRaF) [3][4] が挙げられる。また近年では、GeRaF 方式を基本とした様々なプロトコル [5]-[10] が提案されている。

一般的な位置情報フォワーディングプロトコルは、電波が全方向に均等に放射される無指向性アンテナ（omni-directional antenna）の利用を仮定している。しかし、シンク方向以外の方向へも電波が放射する無指向性アンテナの性質は、位置情報フォワーディングプロトコルにおいては冗長であると考えられる。本研究者はこれまでに、アンテナの指向性を電子的に自由に制御可能なスマートアンテナ技術に着目し、スマートアンテナを用いた MAC プロトコルを提案し、その有効性を確認している。スマートアンテナは、大きく二つの利点を有する。一つは、エネルギーを所望方向に集中して送信することによる通信距離の拡大効果である。もう一つは、所望方向以外には電波を放射しないことにより、他の通信への干渉を軽減できる点である。スマートアンテナを用いる際のネットワーク層でのルーティングには、位置情報フォワーディング技術の親和性が高いことは直感的に理解できるが、どの程度の性能が得られるのかは定量的かつ理論的に明らかになっていない。さらに、スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングには、state-based と state-free のどちらのアプローチが適当かについては検討がなされておらず、具体的なプロトコルの提案に関する十分な知見が得られていない。

本研究では、まずスマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングのマルチホップ通信環境下での性能を理論的に解析し、スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングがセンサネットワークの省電力化に有効であることを定量的に明らかにする。次に、スマートアンテナを用いた state-free プロトコルである geographical forwarding with directional antennas (GFDA) を提案し、計算機シミュレーションにより有効性を評価する。なお、本課題の申請時においては、位置情報を用いたクロスレイヤプロトコルを確

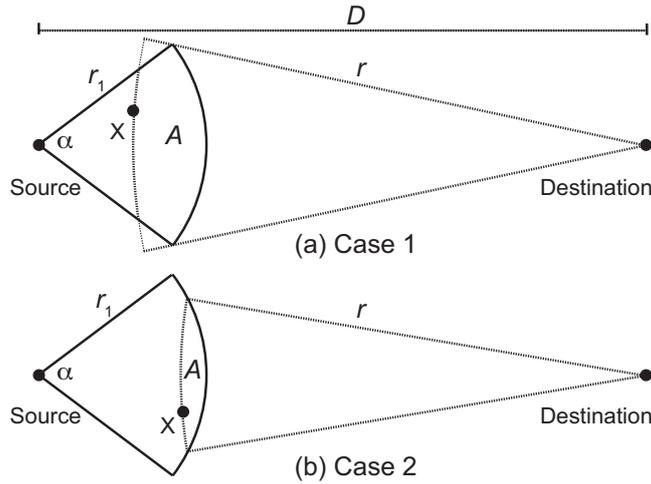


図 1: 解析モデル

立する前段階として、各センサノードが自律的に自身の位置情報を省電力かつ単純なハードウェアで正確に測位する技術が必要であると考えていたが、近年の測位技術の進展の結果、近隣ノードと制御情報をやり取りしてその受信電力を用いて測位する **range-based** 測位手法が大幅に進展した。さらに、GPS 等の測位デバイスの小型化、省電力化、低価格化も大幅に進展し、センサノードのような小型ノードでも十分精度の高い測位技術が利用できるという仮定がリーズナブルなものになった。このような背景を鑑み、測位技術は既存のものを仮定し、本研究では、位置情報を用いたクロスレイヤプロトコルの開発に注力することにした。

## 2 スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングの特性解析

### 2-1 特性解析

スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングのマルチホップ通信環境下での特性を理論解析する。図 1 に解析モデルを示す。ソースノードで発生したデータをシンク（デスティネーション）に送信する際の、ホップ数の期待値  $E[h]$  を導出する。ソースノードとシンク間の距離を  $D$ 、ノードの送信距離を  $r_1$ 、スマートアンテナのビーム幅を  $\alpha$  と仮定する。また、単位面積当たり  $M$  ノードが均一に存在すると仮定する。この時、ソースノードが送信したデータを  $X$  が中継すると仮定する。ノード  $X$  はシンクから距離  $r$  に位置し、ソースノードの送信範囲に存在するノードの中で、最もシンクに近いノードであるものとする。

まず、1 ホップでシンク方向に近づく距離の期待値  $E[\zeta]$  を導出する。ノード  $X$  がデスティネーションから距離  $r$  にあるとき、 $\zeta = D - r$  となる。したがって  $\zeta$  は  $D$  の関数である。ノード  $X$  が選ばれるためには、ソースノードの送信範囲に存在するノードの中で、最もデスティネーションに近いノードである必要がある。つまり、図 1 において、ソースの送信範囲（半径  $r_1$ 、中心角  $\alpha$  の扇形）とシンクから距離  $r$  の扇形（半径  $r$ ）の共通部分（領域  $A$ ）にノードが存在しなければよい。そこで、領域  $A$  にノードが存在しない確率を求める。領域  $A$  にノードが存在しない確率  $p$  は、領域  $A$  の面積を  $A(r, D)$  とすると、次式で求められる。

$$p = \exp^{-MA(r, D)/\pi}. \quad (1)$$

したがって、 $E[\zeta]$  は  $\zeta$  と  $p$  との積を  $r$  に関して  $D - r_1$  から  $D$  までの区間で積分することで以下のように求められる。

$$E[\zeta] = \int_{D-r_1}^D (D-r) \exp^{-MA(r, D)/\pi} dr. \quad (2)$$

次に、領域  $A$  の面積を、図 1 のように、 $r$  による二つの場合分けをして考える。 $D - r_1 \leq r \leq r_0$  の場合に、図 1a のようになる。この時の領域  $A$  の面積を、 $A_1(r, D)$  とする。ただし、

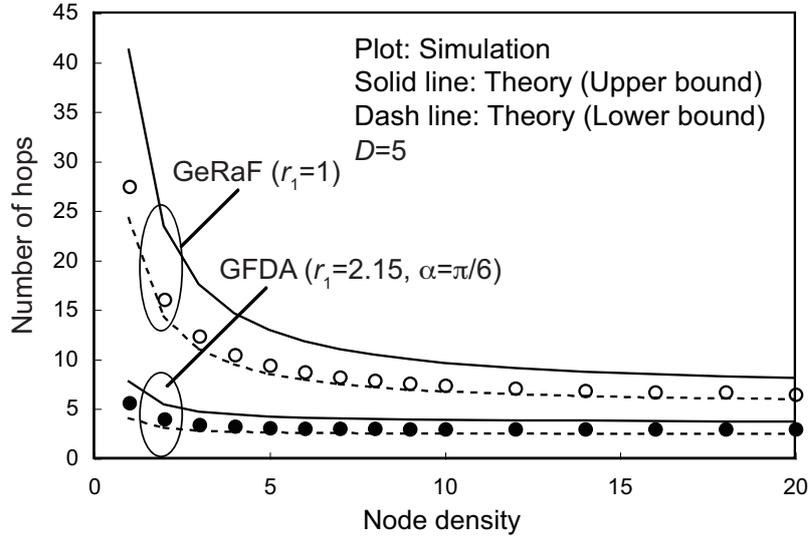


図 2: 解析結果

$$r_0 = \frac{D - r_1 \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}},$$

$$\beta = \arctan \frac{r \sin \frac{\alpha}{2}}{D - \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$

とする。また、 $r_0 < r \leq D$  の場合に、図 1b のようになる。この時の領域 A の面積を、 $A_2(r, D)$  とする。以上より、

$$E[\zeta] = \int_{D-r_1}^{r_0} (D-r) \exp^{-MA_1(r,D)/\pi} dr + \int_{r_0}^D (D-r) \exp^{-MA_2(r,D)/\pi} dr \quad (4)$$

が成り立つ。 $A_1(r, D)$  および  $A_2(r, D)$  の導出は省略するが、幾何学的に求めることができる。

最後に、上記で得られた  $E[\zeta]$  を用いて、導出過程は省略するが、ソースノードから距離  $D$  にある destinations までのホップ数の期待値  $E[h]$  は以下の不等式で示される。

$$\frac{D - r_1}{E[\zeta(D)]} + 1 \leq E[h] < \frac{D}{E[\zeta(r_1)]} + 1. \quad (5)$$

ここで、 $(D-r_1)/E[\zeta(D)]+1$  が  $E[h]$  の下界、 $D/E[\zeta(r_1)]+1$  が上界となる。

## 2-2 解析結果

ここでは、計算機シミュレーションと理論解析の結果を比較する。ノード密度 (node density) は、無指向性アンテナの送信範囲に存在するノード数と定義する。計算機シミュレーションは単純なものを仮定し、各ノードにおいて自身の送信範囲内にノード密度に等しい数のノードをランダムに配置し、最もシンクに近いノードをデータ転送先とする手順を、データがシンクに到着するまで繰り返すものである。無指向性アンテナを用いる GeRaF 方式を比較対象とする。スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディング (GFDA と表記) のビーム幅は  $\alpha=\pi/6$ 、送信半径は無指向性アンテナ利用時の 2.15 倍 (アンテナゲインは 10 dBi) とする。また、減衰定数は 3 とする。

図 2 に、理論解析の結果を示す。図より、解析結果と計算機シミュレーションの結果は傾向が一致してお

り、理論解析の妥当性が示される。特に、スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングは、従来手法である GeRaF 方式と比較して、理論解析の上界と下界の差が小さく、シミュレーション結果と傾向が近いことが分かる。これは、同じノード密度でも、スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングの方が無指向性アンテナを用いた GeRaF 方式よりもデータ転送先の候補となるノード数が多くなり、よりシンクに近いノードを選択できることが可能になるためだと考えられる。また、スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングは、GeRaF 方式よりも少ないホップ数でシンクまでデータが到達することが分かる。これより、無指向性アンテナよりも通信距離の長いスマートアンテナを用いることでホップ数の削減効果が得られることが分かる。特に、ノード密度が低い領域におけるホップ数の削減効果が大きいことが分かる。例えば、ノード密度が 1 の場合は、ホップ数が五分の一に削減できる。これは、前述のデータ転送先の候補数の増加の影響によるものであると考えられる。

これらの解析結果より、スマートアンテナを用いることでホップ数の削減効果が得られることが定量的に明らかになった。特に、ノード密度が低い領域におけるホップ数の削減効果が大きいとの知見を得た。ただし、上記の理論解析およびシミュレーションでは、送信ノードがその転送先ノードを 1 つに特定できるとの仮定をしている。この仮定は、state-based プロトコルでは成り立つが、state-free プロトコルでは成り立たない。state-free プロトコルでは、送信ノードは宛先ノードを指定せずにデータを送信する。したがって、そのデータを複数のノードが受信する。理想的には、データを受信したノードの中で最もシンクに近いノードのみが次の中継ノードとしてデータ転送すればよいが、state-free プロトコルでは、このような転送先ノードを一つに絞り込む手順（アービトレーション）を自律分散的に行う必要がある。アービトレーションは、データを受信した複数のノードによる競合となる。このアービトレーションを考慮したクロスレイヤプロトコルは 3 で提案する。本理論解析結果は、理想的なアービトレーションが実現した場合に達成可能な性能の上界を意味する。

### 3 スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングプロトコル GFDA の提案

#### 3.1 Geographical forwarding with directional antennas (GFDA)

スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングプロトコル geographical forwarding with directional antennas (GFDA) を提案する。GFDA 方式は state-free プロトコルである。state-free プロトコルは、送信ノードは受信ノードを指定せずにデータを送信するため、近隣ノードテーブル等の更新および管理が不要であるという利点を有し、メモリ量や計算資源に制限のあるセンサネットワークに適すると考えられる。さらに、state-based プロトコルでは、通信距離の長い指向性アンテナの送信範囲すべてのノードをテーブルで管理しようとする、hello パケット等を指向性ビームで複数回送信方向を回転しながら送信する必要があるため、大きなオーバーヘッドが必要になる。一方で、state-free プロトコルでは、データを受信した複数ノードの中から、1 つのデータ中継ノードを自律分散的に決定（アービトレーション）する必要がある。GFDA 方式では、ACK 返信に優先制御を適用することと、ノードの送受信モードを適切に切り替えることでアービトレーションを効率的に行う。ここで、シンクの方向は、既存のロケーションサービスを用いることで、すべてのノードにおいて既知であるものと仮定する。各ノードは、二つの送信モード（無指向性送信、指向性送信）および二つの受信モード（無指向性受信、指向性受信）を有する。通信可能な距離は、送信ノードと受信ノードの組み合わせによって以下の四つの組み合わせが考えられる。

- 無指向性送信かつ無指向性受信（この場合の送信距離を 1 とする）
- 指向性送信かつ無指向性受信（ビーム幅  $\pi/6$  かつ指向性アンテナゲインが 10dBi の場合、送信距離は約 2）
- 無指向性送信かつ指向性受信（ビーム幅  $\pi/6$  かつ指向性アンテナゲインが 10dBi の場合、送信距離は約 2）
- 指向性送信かつ指向性受信（ビーム幅  $\pi/6$  かつ指向性アンテナゲインが 10dBi の場合、送信距離は約 4）

GFDA 方式は、DATA-ACK 型の CSMA/CA を MAC 層で用いる。各ノードは、定期的にスリープ状態とウェイクアップ状態を繰り返す。ウェイクアップ期間では、自身が転送すべきデータを持つ場合はデータ送信する。データを持たない場合は、無指向性受信モードでキャリアセンスを行う。他ノードの通信を検出し

表 1: シミュレーション諸元

Network area	200 x 200 m <sup>2</sup>
Number of nodes	100 (randomly distributed)
Transmission range	Omni: 50 m, Direc: 100 m ( $\alpha=\pi/6$ )
Physical model	IEEE 802.15.4 (2.4 GHz, 250 kb/s)
Traffic pattern	Poisson (1 pkt/s, src and dst are random)
Packet length	1,000 bit (data), 100 bit (ack)
Wakeup duration	4 ms

た場合は、ウェイクアップ期間を延長する。データ送受信のシーケンスは下記の手順で行う。

1. データ送信ノードは、宛先を指定せずにシンク方向に指向性送信モードでデータを送信
2. データ送信ノードは、データ送信方向にアンテナ指向性を固定し指向性受信モードで待機
3. データを受信したノードは、自身からシンクまでの距離を計算し、シンクまでの距離に比例した ACK 送信待ち時間待機
4. もし、待機中に他のノードからの ACK を受信した場合、自身の ACK 送信を中止
5. ACK 送信待ち時間を満了したら、無指向性送信モードで ACK を返信

ここで、シンクまでの距離と ACK 送信待ち時間の対応は、連続的な値とするのではなく、ACK 送信待ち時間をタイムスロット化する。これにより、ACK 送信待ち時間の算出が簡単になり、また、レイテンシの増大を抑えつつ ACK 同士の衝突を軽減できる。

GFDA 方式では、state-free でデータを指向性送信することで、近隣ノードテーブルの等を管理することなく、無指向性送信時と比較して送信距離を延長することが可能となる。また、シンクまでの距離に比例した ACK 返信待ち時間を適用することで、シンクに近いノードほど早いタイミングで ACK を返信し、次の中継ノードとして選ばれやすくなる。さらに、ACK 送信を無指向性送信モードで行うことで、自身の ACK 送信を近隣のノードが検出しやすくする。上記のアービトレーション機構により、state-free プロトコルのテーブル不要の利点を活かしつつ、その欠点である中継ノードの決定を自律分散的かつ効率的に行うことが見込まれる。

### 3.2 性能評価

GFDA 方式の性能を計算機シミュレーションを用いて評価する。表 1 にシミュレーション諸元を示す。デューティサイクルは、各ノードがウェイクアップする期間の割合と定義する。例えば、デューティサイクル 0.1 では、40 ms おきにウェイクアップ期間 (4 ms) キャリアセンスを行うことになる。自身が転送すべきデータを持つか、他ノードの通信を検出した場合は、ウェイクアップ期間を延長する。各ノードのウェイクアップ期間は同期せず、それぞれ異なるタイミングでウェイクアップを行う。データは、各ノードで平均 1 packet/s の割合で発生し、そのデスティネーションは自身以外のノードからランダムに選択されるものとする。比較対象は、無指向性アンテナを用いた GeRaF 方式とする。

図 3 にホップ数の期待値、図 4 にレイテンシ特性をそれぞれ示す。レイテンシは、ソースノードでデータが発生してからデスティネーションに到着するまでの時間と定義される。これらの図より、提案する GFDA 方式の性能が従来の GeRaF 方式よりも改善されることがわかる。特に、GFDA 方式は小さなデューティサイクルの設定時に、大きな改善が得られることがわかる。デューティサイクルが小さいということは、単位時間あたりにウェイクアップするノード数が少ないことを意味する。従って、ノード密度が低いときに GFDA 方式の性能は優位であることがわかり、この結果は 2 の解析結果と一致する。この理由は、前述の通り、GFDA ではスマートアンテナを用いることで、受信ノードの候補数が増加するためである。しかし、図 3 から、ホップ数の期待値では最高で二分の一の程度の改善であることが分かる。これは図 2 と比較して性能の改善が小さい。この理由は、複数の受信ノードのアービトレーションが失敗することによる影響と考

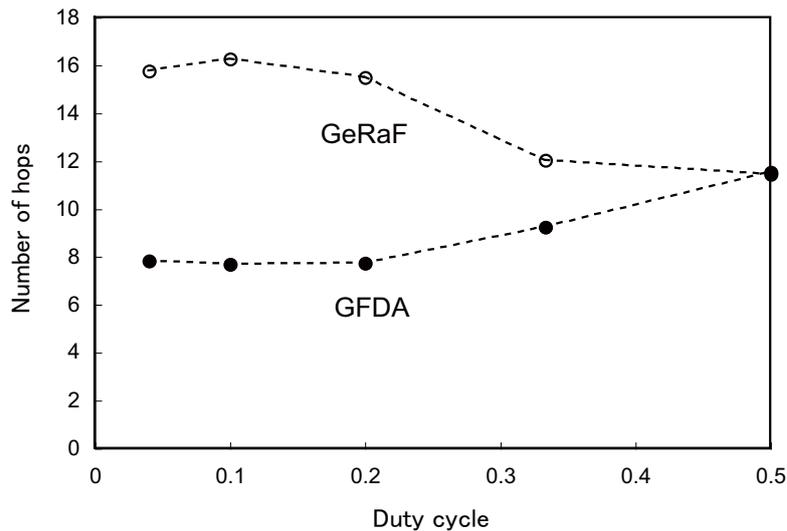


図 3: ホップ数の期待値

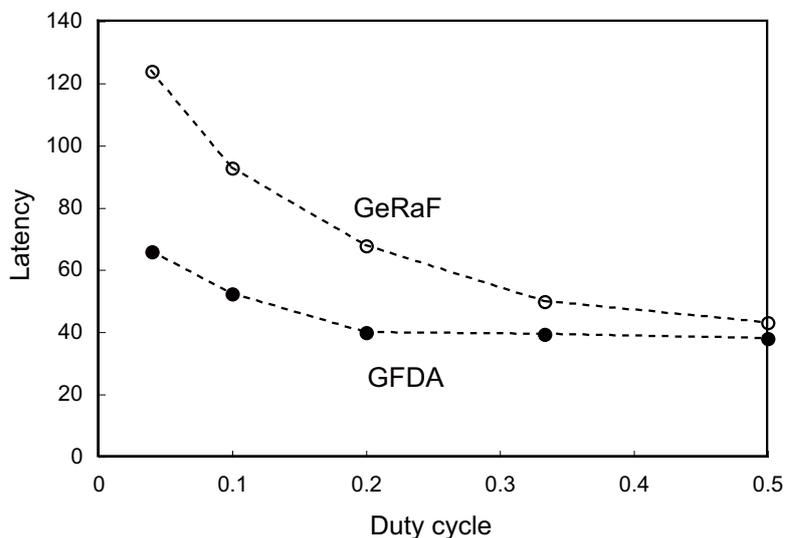


図 4: レイテンシー

えられる。つまり、理論解析では理想化していたアービトレーションであるが、実際にはアービトレーションの失敗が発生し、データ再送が引き起こされる。この影響は、受信ノードの候補数が多い GFDA 方式の方が大きいため、GeRaF 方式に対する性能の優位性が小さくなると考えられる。特に、大きなデューティサイクルに設定する場合において、その影響は大きく、GFDA 方式と GeRaF 方式の性能はほとんど同等になることが分かる。これは、GFDA では、上記のアービトレーション失敗の原因に加えて、スマートアンテナの通信距離延長効果に起因する指向性隠れ端末問題や deafness 問題が発生するためだと考えられる。現在は、MAC プロトコルとして CSMA/CA を用いているが、今後、これらの問題の影響を軽減する、より高度な RTS/CTS 型の MAC プロトコルを適用する必要があると考えられる。上記の結果より、デューティサイクルが小さい、もしくはノード密度が小さい環境下で、GFDA 方式のホップ数の期待値が小さくなることがわかる。

これは、シンクまでに経由するノード数が少なくなることを意味するため、各ノードでの電力消費量を削減できることを示している。さらに、レイテンシ性能も改善できることから、GFDA 方式は電力消費を削減するだけでなく、ネットワーク性能の向上に有効であることが示される。

## 4 まとめ

本研究では、まずスマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングのマルチホップ通信環境下での性能を理論的に解析し、スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングがセンサネットワークの省電力化に有効であることを定量的に明らかにした。次に、スマートアンテナを用いた state-free プロトコル geographical forwarding with directional antennas (GFDA) を提案し、計算機シミュレーションにより有効性を評価した。評価結果より、デューティサイクルが小さい、もしくはノード密度が小さい環境下で、GFDA 方式のホップ数の期待値が小さくなることがわかった。これは、シンクまでに経由するノード数が少なくなることの意味するため、各ノードでの電力消費量を削減できることを示している。さらに、レイテンシ性能も改善できることから、GFDA 方式は電力消費を削減するだけでなく、ネットワーク性能の向上に有効であることが示された。

今後の課題としては、消費電力特性およびシンクへのデータ到達率に関する理論解析、ノード密度が大きい環境下での GFDA 方式の性能が劣化する現象の原因の分析およびその対処法（指向性隠れ端末問題および deafness 問題に対応する MAC プロトコルの開発）について検討を続ける予定である。

## 【参考文献】

- [1] B. Karp, "Geographic routing for wireless networks," in Ph.D. Dissertation, Harvard University, Cambridge, MA, Oct. 2000.
- [2] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in *Proc. ACM Mobicom'00*, pp. 243-254, Boston, MA, Aug. 2000.
- [3] M. Zorzi and R. R. Rao, "Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 2, no. 4, pp. 337-348, Oct.-Dec. 2003.
- [4] M. Zorzi and R. R. Rao, "Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Energy and latency performance," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 2, no. 4, pp. 349-365, Oct.-Dec. 2003.
- [5] Y. Xu, W.-C. Lee, J. Xu and G. Mitchell, "PSGR: Priority-based stateless geo-routing in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE MASS'05*, Washington, DC, Nov. 2005.
- [6] S. Liu, K.-W. Fan and P. Sinha, "CMAC: An energy efficient MAC layer protocol using convergent packet forwarding for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE SECON'07*, San Diego, CA, June 2007.
- [7] D. Ferrara, L. Galluccio, A. Leonardi, G. Morabito and S. Palazzo, "MACRO: An integrated MAC/routing protocol for geographical forwarding in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE INFOCOM'05*, pp. 1770-1781, Miami, FL, Mar. 2005.
- [8] D. Chen, J. Deng and P. K. Varshney, "A state-free data delivery protocol for multihop wireless sensor networks," in *Proc. IEEE WCNC'05*, pp. 1818-1823, New Orleans, LA, Mar. 2005.
- [9] R. C. Shah, S. Wiethoelter, A. Wolisz and J. M. Rabaey, "Modeling and analysis of opportunistic routing in low traffic scenarios," in *Proc. IEEE WiOpt'05*, Riva del Garda, Italy, Apr. 2005.
- [10] P. Skaraba, H. Aghajan and A. Bahai, "Distributed passive routing decision in mobile ad-hoc networks," in *Proc. IEEE VTC'04 Fall*, pp. 2814-2818, Los Angeles, CA, Sep. 2004.

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Geographical forwarding with directional antennas in wireless sensor networks	Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC'09)	2009年6月 (投稿予定)