

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19700057  
 研究課題名 (和文) 無線通信の特質を利用するコーポラティブアドホックネットワークに関する研究

研究課題名 (英文) Research on wireless cooperative ad hoc networks

## 研究代表者

萬代 雅希 (BANDA I MASAKI)

静岡大学・情報学部・助教

研究者番号：90377713

## 研究成果の概要：

低消費電力かつスケーラブルなネットワーク基盤技術を構築するために、無線通信の特質である電波の全方向放射性を利用してノードが物理層、メディアアクセス制御 (MAC) 層、ネットワーク層等の各層で協調してネットワークを構成するコーポラティブアドホックネットワークを開発した。具体的には、リレー通信を適用したクロスレイヤプロトコル、受信電力を用いた省電ルーティング、位置情報を用いたオポチュニスティックルーティング等を開発した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

研究分野： 計算機ネットワーク

科研費の分科・細目： (分科) 情報学 (細目) 計算機システム・ネットワーク

キーワード： アドホックネットワーク, ユビキタスネットワーク,

メディアアクセス制御 (MAC), ルーティング

## 1. 研究開始当初の背景

アドホックネットワークは、モバイル端末 (ノード) が自律分散的に情報をバケツリレー転送 (マルチホップ通信) する無線ネットワークと定義される。その最大の利点は、有線ネットワークや無線基地局等のあらかじめ敷設された通信インフラに依存することなくネットワークを構築できる点であり、ユビキタス社会を支える基盤技術として注目されている。アドホックネットワークは、イベント会場や災害現場など通信インフラが利用できない場

面での利用や、携帯端末と都市や生活環境に遍在するユビキタスコンピュータとの接続、車々間通信による高度交通システム (ITS)、あるいはセンサネットワーク構築等の広範な応用が期待される。その研究開発に当たっては、ノードのハードウェア構成の複雑化、消費電力に対する厳しい制約、多数のノードから同時に発生する大量の情報の効率的通信 (スケーラビリティ) の三点が問題になる。これらの解決には、無線通信特有の電波の受信レベル

が変動するフェージングの影響やデータ同士の衝突によるデータ損失への対応(データ通信の信頼性の向上)が不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究では、低消費電力かつスケーラブルなネットワーク基盤技術を構築するために、無線通信の特質である電波の全方向放射性を利用してノードが物理層、メディアアクセス制御 (MAC) 層、ネットワーク層等の各層で協調してネットワークを構成するコーポラティブアドホックネットワークを開発することを目的とする。

具体的には下記の四つの課題に取り組んだ。

- (1) リレー通信を適用したクロスレイヤプロトコルの開発
- (2) 受信電力を用いた省電力ルーティングの開発
- (3) 位置情報を用いたオポチュニスティックルーティングの開発
- (4) 各種クロスレイヤプロトコルとその活用技術の開発

## 3. 研究の方法

本研究で提案する各種プロトコルを、市販のネットワークシミュレータである Qualnet もしくは、C++や C 言語で自作したイベントドリブンのネットワークシミュレータ上に実装し、定量的に評価している。これら計算機シミュレーションでは、無線通信の電波伝播環境を理想化して行っている。例えば、送信電力、送受信アンテナゲイン、パスロス等から受信電力を算出し、受信電力がしきい値を上回ればデータの受信ができる（もしくは確率的な誤りが発生する）等である。

これに加え、一部の課題では、待ち行列理論や通信トラフィック理論等を用いたネットワークの理論解析も行っている。

## 4. 研究成果

### (1) リレー通信を適用したクロスレイヤプロトコルの開発

本課題では、データ送信における電力効率を高める目的で送信電力と送信レートを適応制御するアドホックネットワーク MAC プロトコルを開発した。提案プロトコルでは、あらかじめ送信電力と送信レートのすべての組み合わせに対して、電力消費の効率を算出した送信電力レート制御テーブルを作成する。そして、制御フレーム交換によって得られる受信電力を用いて、送信電力レート制御テーブルを参照して、2つの送信シーケンスを使い分ける。送受信間の直接送信よりも他のノードが中継を行ったほうが電力効率が高い場合、リレーシーケンスを適用する。

図1に提案プロトコルの概念図を示す。こ

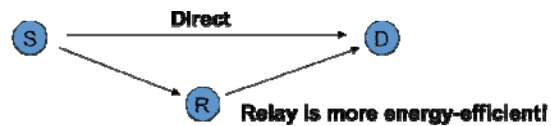


図1: リレー通信の概念図

こで、送信者 S と受信者 D、第三者 R の3ノードを仮定する。SD間の距離が遠い場合、送信レートは低くなる。それに対し、このリンクを2区間に分割し、SRとRDという風に中継者 R を経由することで、高い送信レートで2ホップの通信をする方が電力効率が高い場合がある。提案手法では、SD間の距離を S が送信した制御フレームの受信電力 (RSSI) の値で判定し、SD間が遠い場合は R のようなリレーノードの協力通信を利用する。反対に、SD間が近い場合は、直接通信を選択する。

計算機シミュレーションによって提案プロトコルの性能を評価し、提案方式の電力効率が従来の送信電力制御および送信レート制御を用いない場合と比較して、消費電力特性を最大で 1/5 程度にまで削減できることを示した。

移動端末からのネットワーク利用を想定した場合、端末の小型化・軽量化が問題となり、厳しいバッテリー容量に起因して端末の省電力稼動が大きな課題となる。これまでに、アドホックネットワークにおける端末の省電力化手法として、送信電力制御を用いる手法および送信レート制御を用いる手法の二つが検討されている。PCM や POWMAC 等の送信電力制御を用いる手法では、データ等の受信電力を測定し、必要最小限の送信電力でデータ送信することで端末の消費電力の低減を図る。また、ARF や RBAR, OAR 等の送信レート制御を用いる手法では、IEEE 802.11b 等のマルチレート対応 MAC プロトコル適用時に、データ送信を高いデータレートで送信し、データ送信に必要な時間を短縮することで高い電力効率でのデータ通信が可能になることが報告されている。また、MiSer が提案され、送信電力制御と送信レート制御の二つを組み合わせ、より電力効率の高い MAC プロトコルを目指した研究がなされているが、MiSer では、最小ホップルーティング適用時には、電力効率の向上には改善の余地が大きいと考えられ、提案手法は、モバイル端末の電力効率の改善手法として有望な選択肢の一つとなり得ると考えられる。

### (2) 受信電力を用いた省電力ルーティングの開発

フリスの伝達公式によると、アンテナから放射されるエネルギーは3次元的に放射され、送信電力制御を用い、小さな送信電力で多くのホップ数を刻む経路選択をすることはエネルギー消費削減に有効である (ただし、上記は

理論上の話であり、現在の実システムでは種々の制約により、必ずしもそうでない場合もある。本課題では、送信電力制御を適用したアドホックネットワークにおけるエネルギー消費の小さな経路探索を実現するルーティングプロトコルを開発した。提案プロトコルでは、近隣ノードの情報を常にモニターするといったことが不要になるという利点を有する。提案手法では、送信元がネットワーク全体に送信する経路探索メッセージ(RREQ)を受信したノードは、その受信電力を測定し、受信電力に反比例したRREQ転送待機時間後にRREQを転送する。こうすることで、最も電力消費の小さな経路を容易に探索できる。さらに、本課題では、実際のネットワークカードのような段階的に送信電力制御を行うデバイスに対応する手法へも方式拡張を行っている。

数学的な理論解析および計算機シミュレーションを用いて提案手法の性能を評価し、従来手法と比較して、最大で1/20の送信電力で経路選択できることを明らかにした。

送信電力制御適用時の省電力ルートの構築は様々な手法が提案されている。例えば、MTPRやMMBCR, CMBCR等のように、一般的なルーティング手法のメトリックとして残余エネルギー量などの電力消費関連の指標を用いる方法などが挙げられる。しかし、これらの手法は、RREQ/RREP型の最小ホップルーティングをベースとしているため、メトリックを最小化したルート形成するには、制御情報量が大きくなるという問題が生じる。本課題で提案した省電力ルーティングは、経路制御情報を増大させることなく省電力ルートを構築できる手法として意義深いものと考えられる。提案手法は、経路構築時間が大きくなるが、それへの要求に厳しくないアプリケーションで用いるべきである。なお、本課題により、情報処理学会山下記念研究賞をはじめいくつかを受賞した。

### (3) 位置情報を用いたオポチュニスティックルーティングの開発

従来のネットワークアドレスを用いず、ノードの位置情報を用いてルーティングを行う位置情報フォワーディングはセンサネットワーク等のノードのハード制約や電力消費制約の厳しい環境への適用が期待される技術である。

本課題では、まずアンテナの指向性をソフト的に自由に制御可能な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 プロトコルである

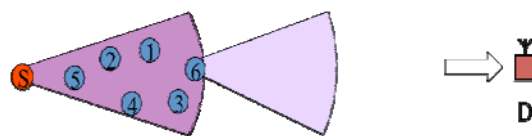


図2: スマートアンテナを用いた位置情報フォワーディングの概念

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。

図2に提案し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の概念図を示す。送信者Sが遠くはなれた受信者Dにデータを送信することを考える。送信者SはDの位置を知っていると仮定する。Sは事前に経路選択をすることなくDの方向にデータを送信する。それを受信した1から6の六つのノードのうち、一番Dに近いノード6が次のデータの送信者となる。この手順を繰り返すことで、最終的にDにデータが到達する。

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。一方で、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が注目されている。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切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かった。

本提案手法は、数学解析と計算機シミュレーションにより、state-free プロトコルの可能性を示したものであり、センサネットワークにおける経路選択手法の一つとしてプロトコル設計の参考になると考えられる。また、提案手法のように送信者が受信者を決めずにデータ送信するオポチュニスティックな無線ネットワークは、そのロバスタ性により近年注目を集めており、従来のインターネット

トに由来した通信プロトコル体系とは適用領域が異なり、今後の発展が期待される。

#### (4) 各種クロスレイヤプロトコルとその活用技術の開発

本課題では、無線物理層の各種情報を上位層で活用するクロスレイヤプロトコルを検討し、その活用手法を検討した。具体的には、ネットワークコーディング、センサネットワークの省電力化、メッシュネットワークの高効率化に対し、複数ノードが広い意味で協調してネットワークを構築する各種手法について検討した。

これら研究成果について、次に示す代表的な発表論文の他にも、国内研究会を中心として多数発表している。詳しくは、下記を参照されたい。

<http://www.watanabe-lab.net>

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- [1] 高塚雄也, 高田昌忠, 長島勝城, 萬代雅希, 渡辺尚, "指向性アンテナのマイナーローブを考慮したアドホックネットワーク MAC プロトコル," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J92-B, No. 3, pp. 540-554, 2009年3月. 査読有
- [2] 鈴木孝明, 萬代雅希, 渡辺尚, "複数シンクセンサネットワークにおけるパケット分配送信を用いた長寿命化," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-B, No. 8, pp. 831-843, 2008年8月. 査読有
- [3] M. Bandai, T. Mioki, T. Watanabe, "A routing protocol with stepwise interest retransmission for wireless sensor networks," *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E91-B, No. 5, pp. 1446-1453, May 2008. 査読有
- [4] M. Bandai, S. Nakayama, T. Watanabe, "Signal strength based energy efficient routing for ad hoc networks," *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E91-B, No. 4, pp. 1006-1014, April 2008. 査読有
- [5] 萬代雅希, 前多聡, 渡辺尚, "送信電力と送信レートを適応制御するアドホックネットワーク MAC プロトコル," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-B, No. 3, pp. 239-249, 2008年3月. 査読有

[学会発表] (計6件)

- [1] T. Oishi, M. Bandai, T. Watanabe, "Dispersive packet transmission to

multiple sinks to reduce the load of individual nodes in sensor networks," *International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2008)*, Tokyo, Japan, 2008. 6. 13.

[2] R. Nishii, T. Munaka, M. Bandai, T. Watanabe, "Data transmission method for non-contention control in asymmetric wireless multi-hop access network," *International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2008)*, Tokyo, Japan, 2008. 6. 12.

[3] M. Bandai, S. Maeda, T. Watanabe, "Energy efficient MAC protocol with power and rate control in multi-rate ad hoc networks," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'08 Spring)*, Singapore, 2008. 5. 13.

[4] 萬代雅希, 渡辺尚, "位置情報を用いたマルチホップネットワークの基礎評価," 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 大阪, 2008. 10. 23.

[5] 高塚雄也, 萬代雅希, 渡辺尚, "指向性アンテナの利用を仮定した送信レート制御 MAC プロトコルについて," 電子情報通信学会アドホックネットワーク研究会, 福岡, 2007. 12. 18.

[6] 大石忠央, 萬代雅希, 渡辺尚, "ノードの負荷を考慮した複数シンクセンサネットワークのパケット分配送信方式に関して," 電子情報通信学会アドホックネットワーク研究会, 名古屋, 2007. 10. 31.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

萬代 雅希 (BANDAI MASAKI)  
静岡大学・情報学部・助教  
研究者番号: 19377713

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし