

異種無線アドホックネットワークにおける TCP/UDP 通信とホップ数に応じた無線メディア選択法

篠原 敬英 牛谷 善哉 松井 真奈美 今尾 勝崇[†]

東野 武史 塚本 勝俊 小牧 省三

大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

[†]現在, 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

E-mail: takahide@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし 複数の無線メディアが存在するアドホックネットワークにおいて, ユーザが利用可能な無線メディアを適応的に選択することでネットワークリソースを有効に利用することができ, 幅広い QoS 保証が可能となる. 本稿では, 2つの無線メディア (IEEE802.11a, IEEE802.11g) を有する無線端末で構成されるアドホックネットワークにおいて, ネットワーク内の TCP 及び UDP データに対する, 電波伝搬距離特性並びにルートのホップ数に応じた無線メディア選択法を提案している. これにより, 無線メディアをランダムに選択する方式に比べてネットワーク容量, 遅延及びパケットロス率が改善されることを計算機シミュレーションにより明らかにする.

キーワード アドホックネットワーク, 異種無線, QoS, 無線メディア選択

Wireless Media Selection Method for TCP/UDP Communication and Hop Count in Heterogeneous Wireless Ad-hoc Network

Takahide SHINOHARA, Yoshiya USHITANI, Manami MATSUI, Masataka IMAO[†],

Takeshi HIGASHINO, Katsutoshi TSUKAMOTO, and Shozo KOMAKI

Division of Electrical, Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871 Japan

[†] This author is currently with Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation.

E-mail: takahide@roms.comm.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract In heterogeneous wireless ad-hoc network where each terminal has different kind of wireless media, network capacity could be improved by adaptively selecting enabled wireless media. In addition, the number of users satisfying QoS will be expected to increase. Hence this paper proposes wireless media selection method based on both propagated distance of RF signal and hop count of route which is established by using wireless media in order to support the QoS for TCP/UDP traffic in heterogeneous wireless ad-hoc network where each terminal has two wireless media (IEEE802.11a, IEEE802.11g). Computer simulations show that the proposed method can improve network capacity, delay and packet loss rate compared to random media selection method.

Keyword Ad-hoc Network, Heterogeneous Wireless, QoS, Wireless Media Selection

1. まえがき

基地局などのネットワークインフラを介さずに通信を行う手段として、分散して存在する移動端末が互いの通信を中継し合うアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークでは、音声、静止画、動画、テキストデータといった様々なトラフィックが混在しており、それぞれの通信メディアに対して所望の伝送速度、信頼性、遅延時間などを保証する QoS (Quality of Service) 技術が必要となる。しかし、端末が自由に移動することで、ネットワークトポロジが頻繁に変化するアドホックネットワークでは、QoS 保証の提供は極めて困難である。そこでアドホックネットワークにおいて QoS 保証に関する研究が行われている[1][2]。文献[1]では、ルートの帯域幅に基づいた QoS ルーティングが提案されており、移動無線通信環境において様々な種類のトラフィックの品質を公平に保つ手法が示されている。また文献[2]では End-to-End で帯域保証を行うために、IEEE802.11 で規定されている PCF (Point Coordinator Function) をベースとした複数チャネル利用型アクセス制御プロトコルが提案されており、従来の CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式と比べてスループット、遅延時間及びパケット損失率を改善できることが示されている。

アドホックネットワークにおいて、移動端末が使用する無線メディアとして IEEE802.11 系無線 LAN (Local Area Network) が仮定されることが多いが[3][4]、近年では複数の無線メディアを有するマルチモード無線端末が登場している。そのため、使用可能な無線メディアがネットワーク内に複数存在する環境を想定した研究が行われている[5][6]。文献[5]では、3G (3rd Generation) セルラネットワークと無線 LAN ネットワークの統合環境において、ネットワークの状況及びユーザの要求に応じて動的に統合ネットワークを制御する連携ネットワーク方式が提案されており、その制御ルールとしてパス選択ルールが示されている。また文献[6]では、複合無線システムにおいてネットワーク上にリソース配置マネージャ (RAM) を配置することにより、他の移動端末の通信状態を考慮することが可能な無線システム選択方式が提案されている。このように、端末が有する無線メディアを周りの電波伝搬環境やトラフィック量及び送受信データの種類により適応的に使い分けることで、ネットワーク側ではリソースの有効利用が可能になり、ユーザ側は単一メディア使用時に比べてより幅の広い QoS 保証を受けることができる。

そこで本研究では、複数の無線メディアを有する端末間で自律分散的にネットワークを構築するアドホックネットワークにおいて、各端末が使用するプロトコ

ルに対する QoS 保証を行うことを目的とし、無線メディアが確立したルートのホップ数に応じた無線メディア選択法を提案し、提案方式による TCP (Transmission Control Protocol) スループットの改善効果及び遅延、パケットロス率の低減効果について評価する。

本稿では、まず 2. において本研究で対象とする異種無線アドホックネットワークの構成及び各無線メディアの特徴について述べる。次に 3. で、ホップ数に応じた無線メディア選択法を提案し、4. で提案方式を用いた特性を計算機シミュレーションにより評価する。最後に 5. にて、まとめと今後の課題について述べる。

2. ネットワーク構成

図 1 に本研究で対象とするアドホックネットワークの構成例を示す。端末は一様分布に従い固定配置されているものとし、ネットワークエリア内の端末数は 50 とする。各端末は IEEE802.11a 及び IEEE802.11g の両方の無線メディアを使用可能であり、端末間での P2P (Peer to Peer) 通信を仮定する。また、各無線メディアの主要諸元を表 1 に示す。ルーティングプロトコルには Reactive 型 (オンデマンド型) の AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector routing) を使用し、送受信アンテナは無指向性アンテナとする。また端末間のアクセス制御は RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) を用いた CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を使用する。電波伝搬環境は、直接波と地面からの反射波を考慮した 2 波電波伝搬による距離減衰モデルを使用する[7]。

端末の送信電力が等しい場合、IEEE802.11g は IEEE802.11a に比べて使用周波数帯が低いため電波がより遠方まで到達する。その結果、フラディングによりルート探索を行う際に、中継端末数が少ないルートを選択する可能性が高くなると考えられる。しかしながら、広範囲に電波干渉を引き起こすため、周辺端末に及ぼす電波干渉による通信品質の劣化が懸念される。これに対し、IEEE802.11a は使用周波数帯が高く伝搬損失が大きいため、図 1 に示すように狭い範囲に電波を閉じ込めることができ、周辺端末へ引き起こす電波干渉を抑えることが可能であるが、ルート確立に必要な中継端末数 (ホップ数) が増加するため高い端末密度を要する上に遅延時間及びパケットロス率も増加すると考えられる[8]。

本研究では、これらの無線メディアの効率的な選択により、異種無線アドホックネットワーク内の TCP 通信についてはネットワーク容量を、UDP (User Datagram Protocol) 通信については遅延及びパケットロス率を改善することを目的としている。

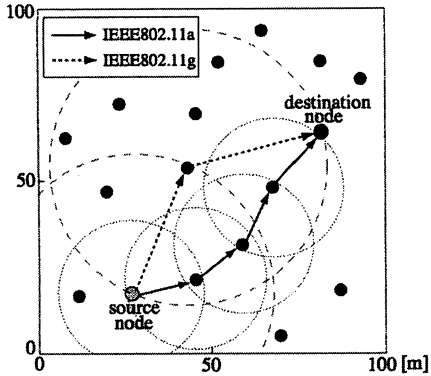


図 1：ネットワーク構成例

表 1：各無線メディアの主要諸元

| 無線インターフェース | 802.11a | 802.11g |
|------------|-----------|-----------|
| 搬送波周波数 | 5.2 [GHz] | 2.4 [GHz] |
| 通信レート | 54 [Mbps] | 54 [Mbps] |
| 送信電力 | 7 [dBm] | 7 [dBm] |
| 受信感度 | -65 [dBm] | -65 [dBm] |
| 通信可能半径 | 18 [m] | 40 [m] |

3. 無線メディア選択法の提案

3.1 ホップ数とスループット

図 1 に示すアドホックネットワークにおいて、ランダムに選択した 2 端末間での TCP データ送受信を仮定し、ルート探索のためのフラッディングの時間を含めた 10 秒間の P2P 通信を 50 回繰り返したとき、各無線メディアのホップ数の分布を図 2 に、ホップ数と TCP スループットの関係を図 3 に示す。ただし、TCP パケット長は 1500[bytes] とし、ネットワーク内において目的の P2P 通信以外の背景トラヒックは発生していないものとする。図 2 より、IEEE802.11a のホップ数は $1 \leq N \leq 7$ に分布し、IEEE802.11g のホップ数は $1 \leq N \leq 3$ に分布することがわかる。これは 2. で述べたように、IEEE802.11g は電波到達距離が大きいいためホップ数の少ないルートが選ばれるが、IEEE802.11a は電波到達距離が小さいため必然的にルート中のホップ数が多くなることを示している。図 3 より、ホップ数が増えると遅延が大きくなり、スループットが低下することがわかる。また、同じホップ数における TCP スループットのばらつきは、ルート探索のためのフラッディングにかかる時間の差に起因している。同図より、ホップ数 N のルートのスループットは、ホップ数 1 のルートのスループットに対しておおよそ $1/N$ になると予測できる。ただし N は正整数である。

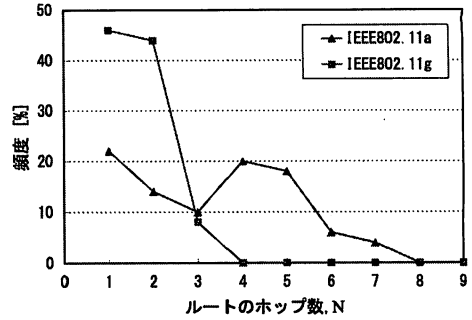


図 2：各無線メディアによって確立したルートのホップ数の分布

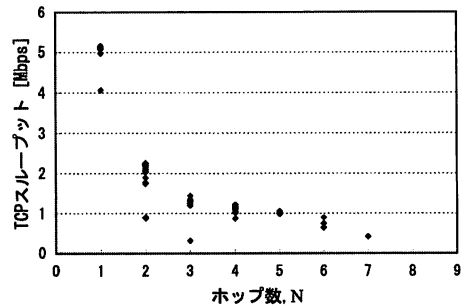


図 3：ホップ数と TCP スループットの関係

3.2 ホップ数に応じた無線メディア選択法

3.1 節でホップ数の増加に従ってスループットが低下することを明らかにした。すなわち、スループットを高く保つためにはホップ数を少なくする必要があり、電波到達距離が大きくホップ数を少なく保つことが可能な IEEE802.11g を使用することでこれを実現できるということがわかる。しかしながら、IEEE802.11g では周辺端末に与える電波干渉範囲が広くなり、ネットワーク内のトラヒック量が増加するため、逆にスループットが低下するという問題がある[7]。そこで、公平かつ効率の良い通信が行えるように、各無線メディアが確立したルートのホップ数に応じた無線メディア選択法を以下のように提案する。

- $HC_a - HC_g \geq X$ のとき
: IEEE802.11g を選択
- $HC_a - HC_g \leq (X-1)$ のとき
: IEEE802.11a を選択
- 端末密度が低く、IEEE802.11a ではルート確立ができないとき
: IEEE802.11g を選択

ただし、 HC_a 、 HC_g はそれぞれ IEEE802.11a 及び IEEE802.11g のホップ数であり、 X は非負整数である。上記の提案方式は、IEEE802.11a と IEEE802.11g の間のホップ数差が小さいときは IEEE802.11a でもある程度高いスループットが期待できるため IEEE802.11a を使用し、ホップ数差が大きいたときは IEEE802.11a 使用時のスループットが非常に低くなるため、IEEE802.11g を使用するという結果に基づいている。また、端末密度が低く IEEE802.11a のフラッディング時にルート確立ができないときは必ず IEEE802.11g を使用するものとする。これにより、平均ホップ数も減少できると考えられるので、UDP データに対して遅延を抑える効果が期待できる。図 4 のフローチャートに示す通り、送信端末は IEEE802.11a 及び IEEE802.11g の二つの無線メディアを使用してフラッディングを行うことで、それぞれ受信端末までのホップ数を知ることができ、上記の提案方式を利用して無線メディアの選択を行うことが可能となる。

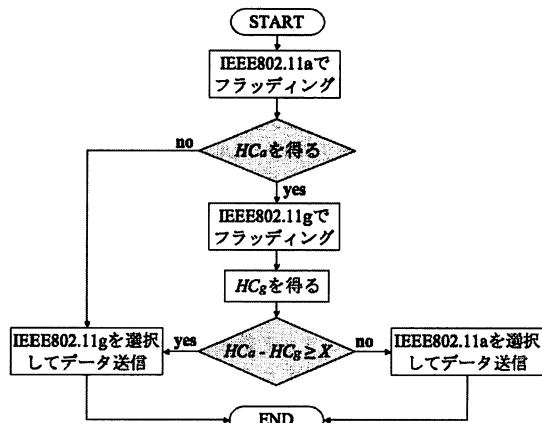


図 4：無線メディア選択のフローチャート

4. 計算機シミュレーション

4.1 シミュレーションパラメータ

表 2 にシミュレーションパラメータを示す。4.2 節で TCP データ送信に対するスループットのシミュレーション結果を示し、4.3 節では WoIP (Wireless over IP) による通話を想定した UDP 通信に対するパケットロス率及びホップ数のシミュレーション結果を示す。さらに 4.4 節で、FTP (File Transfer Protocol) によるファイル転送と WoIP が混在したネットワークにおけるファイル転送達成率、パケットロス率及びホップ数のシミュレーション結果を示す。

表 2：シミュレーションパラメータ

| | |
|-------------|--------------|
| シミュレーション時間 | 60 [sec] |
| TCP パケット長 | 1500 [bytes] |
| FTP ファイルサイズ | 5 [Mbytes] |
| UDP パケット長 | 160 [bytes] |
| UDP 送信レート | 64 [kbps] |

4.2 TCP 通信

図 1 に示すネットワークにおいて、7 組の端末対が同時に P2P で TCP パケットの送受信を行ったときの、各方式におけるスループットを図 5 に示す。ただし、IEEE802.11a のみを使用する方式を S_a 、IEEE802.11g のみを使用する方式を S_g 、2つの無線メディアをランダムに使い分ける方式を R_{ag} 、各提案方式を $P(X)$ と表すことにする。ただし X は 3.2 節で述べた IEEE802.11a と IEEE802.11g の間のホップ数差であり、非負整数である。図 5 より、 R_{ag} 方式では高いスループットが得られているペアも存在しているが、10kbps 程度のスループットしか得られていないペアも存在していることがわかる。これに対し、提案方式の $P(2)$ 、 $P(3)$ 方式では全てのペアについておよそ 100kbps 以上のスループットが達成されており、公平な通信が行われていることがわかる。これは、ホップ数に応じた適切な無線メディアを選択することによって、周辺端末から受ける RTS/CTS パケットによる干渉の影響を抑えると同時に、ホップ数が多く高いスループットが期待できない端末対には IEEE802.11g が割り当てられ、スループットの改善が計られることによる効果である。

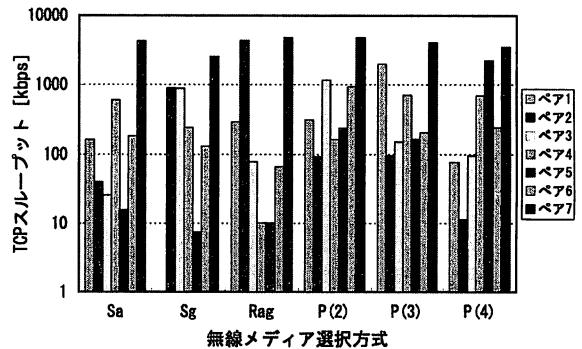


図 5：各方式に対する TCP スループット

4.3 UDP 通信

図 1 に示すネットワークにおいて、10 組の端末対が同時に P2P で UDP 通信を行ったときの、各方式における平均パケットロス率及び平均ホップ数をそれぞれ図 6 及び 7 に示す。図 6 より、いずれの提案方式でも S_a 、 S_g 、 R_{ag} 方式に比べてパケットロス率を低減してお

り、最大で Rag 方式の 15 分の 1 となることがわかる。これは、ホップ数に応じて無線メディアを切り換えることにより、周辺端末に与える干渉の割合が抑えられ、パケットの衝突の割合が低下するためであると考えられる。また図 7 より、X の値を低く設定することでホップ数を小さくでき、遅延を抑えることが可能であることが分かる。これは、X の値を小さくすることによって、ホップ数の多い IEEE802.11a に対して IEEE802.11g の選択される確率が高まるためである。

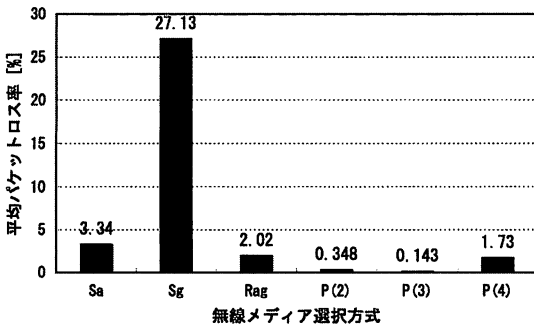


図 6：各方式に対する平均パケットロス率

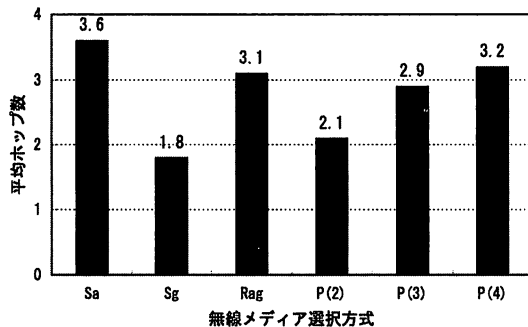


図 7：各方式に対する平均ホップ数

4.4 TCP/UDP 通信の混在

図 1 に示すネットワークにおいて、5 組の端末対が FTP ファイル転送、5 組の端末対が UDP 通信を P2P で同時に行なったときの、各方式におけるファイル転送達成率、平均パケットロス率及び平均ホップ数をそれぞれ図 8、9 及び 10 に示す。ただし、転送を試みるファイルサイズの総和（ここでは 25[Mbytes]）に対する実際に転送されたファイルサイズの割合をファイル転送達成率と定義する。また、TCP 通信（FTP）に対して X=3、UDP 通信に対して X=2 を割り当てる方式を P(3,2) と表す。

図 8 より、P(2)、P(3)及び P(3,2)において Rag を上回るファイル転送達成率が得られていることがわかる。

特に P(3,2)方式では、ネットワーク容量の増加により Rag 方式の約 1.3 倍のファイル転送達成率が得られていることがわかる。一方、提案方式の P(4)方式では Rag 方式に比べてファイル転送達成率が低下しているが、これは IEEE802.11a を使用する確率が高いためホップ数が多くなり、高いスループットが得られ難いためであると考えられる。

また、図 9 より、パケットロス率は提案方式全てにおいて Rag 方式に対して低く抑えられていることがわかる。特に、TCP 通信と UDP 通信で異なる X を指定した P(3,2)方式では、パケットロス率をほぼ 0 に抑えられていることがわかる。これは、TCP/UDP 通信とホップ数に応じた効率のよい無線メディア選択により、他の P2P 通信との間で発生するパケット衝突が少なくなったためと考えられる。

さらに、図 10 より、提案方式において X を小さくすると、IEEE802.11g 使用時と同程度のホップ数を得られ、遅延を小さく抑えることができると考えられる。これは先述のように、X の値を小さくすることによってホップ数の多い IEEE802.11a に対して IEEE802.11g の選択される確率が高まるためである。

以上の結果より、提案方式では Rag 方式と比べてネットワーク容量、パケットロス率及びホップ数を改善することができることを明らかにした。また TCP 通信と UDP 通信に対して、それぞれに適切な X の値を指定することにより、さらにそれらを改善できることがわかった。

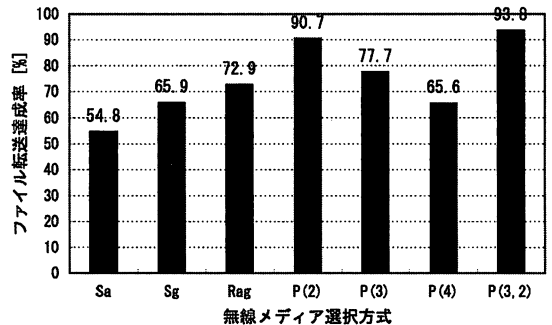


図 8：各方式に対するファイル転送達成率（FTP）

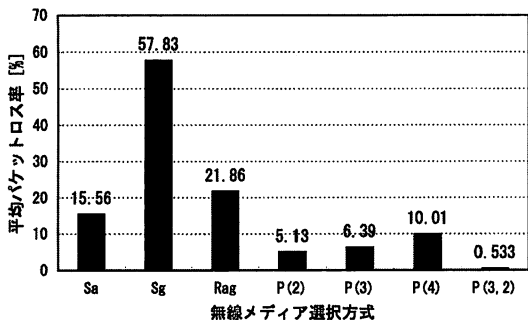


図 9：各方式に対する平均パケットロス率 (UDP)

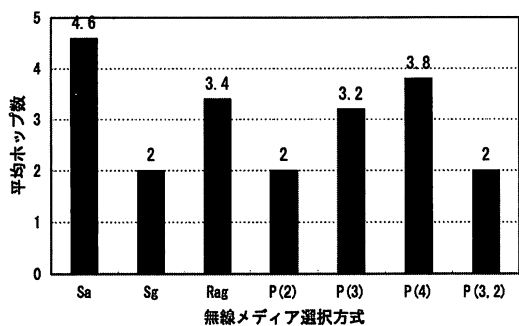


図 10：各方式に対する平均ホップ数 (UDP)

5. まとめ

本稿では、各端末が 2 つの無線メディア (IEEE802.11a, IEEE802.11g) を有する異種無線アドホックネットワークにおいて、ホップ数に応じた無線メディア選択法を提案し、計算機シミュレーションによる評価を行った。その結果、次のことが分かった。

- TCP 通信において、提案方式を用いるとファイル転送達成率が最大で Rag 方式の 1.3 倍となる。
- UDP 通信において、提案方式を用いるとパケットロス率が最大で Rag 方式の 15 分の 1 となり、ホップ数は Sg 方式とほぼ同程度の値に改善される。
- TCP 通信と UDP 通信が混在するネットワークにおいて、それぞれの通信に適切な X を指定することで、ネットワーク容量、パケットロス率及びホップ数を全て改善することができる。

今後の課題としては、障害物が存在するネットワーク環境における無線メディア選択法、及び端末の移動

方向や移動速度を考慮した計算機シミュレーションによる評価などが挙げられる。

文 献

- [1] C.R. Lin and J. Liu, "QoS routing in ad hoc wireless networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.17, no.8, pp.1426-1438, Aug. 1999.
- [2] 水野晃平, 片山 穰, 中山正芳, 須田博人, "マルチホップ無線ネットワークにおける複数チャネル利用型帯域保証メディアアクセス制御プロトコル," 信学論(B), vol.J85-B, no.12, pp.2179-2188, Dec. 2002.
- [3] 石黒成輔, 安田靖彦, "アドホックネットワークにおける IEEE802.11 の一検討," 2005 信学総大, B-15-6, March 2005.
- [4] 渡辺正浩, 田中信介, 小宮山牧兒, 小花貞夫, 藤瀬雅之, "IEEE802.11g 無線 LAN をベースとして ESPAR アンテナと組み合わせた無線アドホックネットワーク実験装置 (WACNet)," 2005 信学総大, B-21-2, March 2005.
- [5] 新熊亮一, 山田将人, 高橋達郎, "混合マルチホップネットワークのための連携ネットワーク設計," 2006 信学総大, BS-10-3, March 2006.
- [6] 水木篤志, 川上 博, 滝田 亘, "複合無線システムにおいてネットワーク制御による無線システム選択方式," 2006 信学総大, B-6-80, March 2006.
- [7] T.S. Rappaport, Wireless Communication: Principles and Practice, pp.69-90, Prentice Hall, 1996.
- [8] 篠原敬英, 松井真奈美, 今尾勝崇, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, "異種無線アドホックネットワークにおける受信成功率に関する基礎的検討," 2006 信学総大, B-15-11, March 2006.