

大規模アドホックネットワークにおける 通信の安定化手法の提案と実証

板谷 聡子[†] 長谷川 淳[†] 長谷川 晃朗[†]
デイビス ピーター[†] 門脇 直人[†] 小花 貞夫[†]

無線アドホックネットワーク上で安定な通信を実現するには、安定な通信経路の確保と、各端末における経路情報の同期が重要である。本論文では、各端末が中継端末候補を選出するための信号強度閾値を受信信号強度の変動幅を考慮して自動的に決定し、端末間での経路情報の更新タイミングを同期することにより、無線アドホックネットワークの安定性を自律的に改善する方式を提案する。また、これらのメカニズムを導入することにより、通常のルーティングプロトコルを使用した場合に、最大12%程度あったパケットエラー率を、1%未満に抑えることができたことを、50台の端末を含むテストベッドにおける評価実験結果により示す。

Proposal and experiment of stabilization methods on large ad hoc wireless networks

SATOKO ITAYA,[†] JUN HASEGAWA,[†] AKIO HASEGAWA,[†]
PETER DAVIS,[†] NAOTO KADOWAKI[†] and SADA OOBANA[†]

We have proposed techniques for improving the stability of communications in dynamic ad hoc wireless network. One technique avoids routing packets via unreliable neighbors with poor radio links and the second technique avoids loops due to mismatch in timing of route updates. The techniques can be implemented as modifications to conventional routing schemes such as OLSR. Experiments in a 50-node testbed showed that the modifications provide significant reductions in packet losses. Actually there is under 1% losses when we use our techniques, but there was 12% without our techniques.

1. はじめに

近年、無線LAN機能を持つデバイスの急速な普及に伴い、アドホック無線ネットワークの利用に対する関心が高まっている。アドホック無線ネットワークに期待される応用領域にはITS(高度道路交通システム)や、大規模被災地向け無線通信網があり¹⁾、安定したサービスを提供するには、効率的なアドホックルーティングによるマルチホップ通信が不可欠である。

これまでに、いくつかのモバイルアドホックネットワーク(MANET)ルーティングプロトコルが提案され、IETFにおいて標準化が検討されており²⁾、各ルーティングプロトコルの性能について、多くの研究が行なわれている^{3)~18)}。また、無線LANのMACプロトコルであるIEEE 802.11では、各デバイスがアクセスポイントを介さず直接通信することができるアド

ホックモードをサポートしており、IEEE 802.11デバイスとMANETルーティングプロトコルを用いたマルチホップアドホックネットワークへの様々な取り組みが行なわれている。

しかし、実環境における大規模なアドホックネットワーク上での安定したアプリケーション運用は、有線ネットワーク上で実現するほど容易ではない。これは、有線環境では考慮する必要のない通信の不安定性が、無線環境においては潜在的に存在するためである。

無線通信の不安定性の大きな要因は、信号強度の変動であり、端末が静止している場合でさえ無視することはできないほどの変動幅を持つ。さらに、MANETルーティングでは、中央集中型の制御機能を持たず、各端末がそれぞれ自律的に情報収集を行ない、それに基づいて経路を作成し、ルーターの機能を果たす。しかし、各端末での処理が自律的であるため、環境が絶えず変動している場合、それぞれの端末で保持している経路情報に不一致が生じやすく、これが通信の不安

[†] ATR 適応コミュニケーション研究所

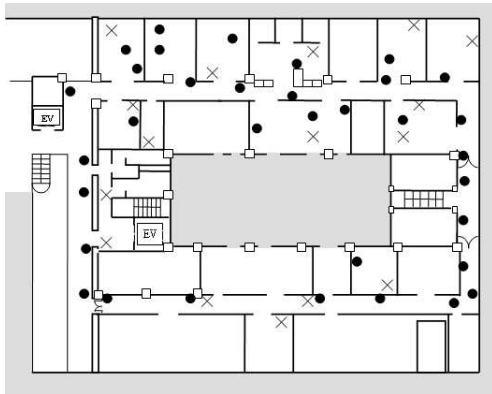


図1 オフィスにおける端末配置図.

定性をさらに悪化させる要因となっている。

本稿では、アドホックネットワークでのこれらの問題を解決するために、信号強度の変動幅を考慮した自律的な中継端末候補選出方式と、各端末の経路情報更新のタイミングを同期させることにより通信の性能を改善する方式を示す。また、これらの方式の効果を確認するため、PCとPDA50端末からなる屋内テストベッドを構築し、通信特性の評価を行った。

2. アドホック無線ネットワークテストベッド

本研究では、実用的なテスト環境として、研究所内のオフィスを利用した。図1にオフィスのレイアウトと端末の配置を示す。オフィスは口の字型の建物で、35m×20m程度の広さであり、金属パーティションで区切られた部屋が通路の両側に並んでいる。灰色の部分は屋外を表しており、34台のモバイルPC(図1●)と16台のPDA(図1×)が、地面から1m程度の高さに配置されている。

ネットワークのすべての端末には、同じ無線LANカードとソフトウェア環境を持たせ、オペレーティングシステムはRed Hat Linux 9(カーネルバージョン2.4.25)、PLANEX GW-CF11H無線LANカード、Orinoco_cs0.13d無線LANドライバーを使用し、ルーティングプロトコルは、テーブル駆動型のFSRとOLSRを使用した^{3)~5)}。

3. 無線環境の不安定性とその要因

各端末が近くに配置され、すべての端末が安定な無線環境にあるような無線アドホックネットワーク上での通信はさほど難しくはない。しかし、多くの端末が広く分布するようなアドホックネットワーク上では、安定した通信の実現は困難である。例えば、理論的に容易に予測できる問題は、グレーゾーンの存在である。

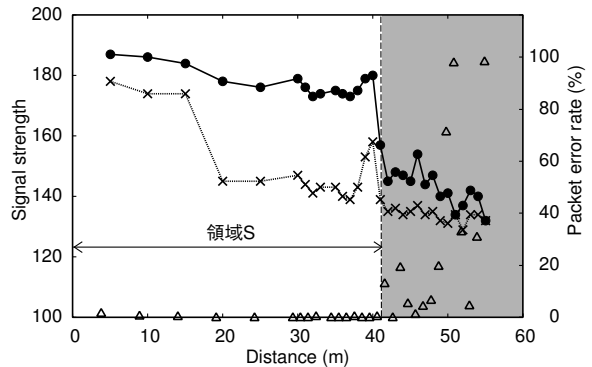


図2 端末間距離と通信品質の例：最大信号強度(●)、最小信号強度(×)とパケットエラー率(Δ)。

IEEE802.11bを使用した場合、ルーティングプロトコルによるHELLOパケットはブロードキャストを使用するので2Mbpsで送信され、ユニキャストパケットは11Mbpsで送信される。このため、HELLOパケットは受信できるが、データパケットは受信できない端末が存在することになる。この領域はグレーゾーン⁶⁾と呼ばれ、現在ではより広義に“パケットを受信できたりできなかったりする領域”がグレーゾーンと呼ばれている。グレーゾーンは電波の干渉条件に依存した複雑な形をしており、端末からの距離に単純に依存しないのが一般的であり、端末が無作為に配置される場合、グレーゾーン内の端末がネットワーク内に一つも存在しないということは考え難い。不安定な中継端末を使用するのを回避するために、パケットエラー率や信号強度を監視し、経路選択に利用することがいくつかの論文で提案されているが^{7)~11)}、具体的にどのようにして閾値を決定するかは述べられておらず、閾値導入は単純な問題ではない。

図2は、実験により得られた典型的なデータで、2つの端末の距離を離していった時のブロードキャストパケットのエラー率と信号強度の最大値と最小値の関係である。図2から明らかなように、端末間の信号強度は距離のみに依存しているわけではなく、パケットエラー率が上がり始める距離より2端末が離れていても、パケットエラー率が0%になることがある。また、図2において、最初にパケットエラーが観測される地点より右側(図2灰色の部分)を閾値により排除すれば良いのだが、信号強度がかなりの幅を持って変動しているため、適切な閾値の値を決めるのが困難である。そこで、検出された信号強度閾値がある値以下の端末を中継端末として採用しないようにFSRを修正し¹²⁾、閾値の高さを変えて実験を行なった。通常のFSR使用時(閾値なし)の場合に比べて、安定な地

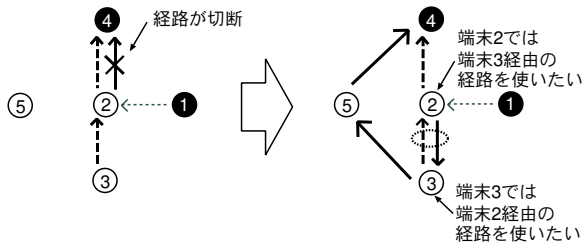


図3 パケットの投げ合い。

点（図2の領域S）の信号強度の変動を避け、かつ、できるだけ高い値に閾値を設定した場合は性能の改善が見られた。しかし、その時の閾値よりさらに高い値を閾値として設定した場合は、かえって性能が悪くなる。これは、経路更新のダイナミクスに起因している。テーブル駆動型のルーティングプロトコルでは、周囲の端末からのHELLOパケットなどで収集した情報をもとに、一定の時間間隔ごとにルーティングテーブルを更新する。その際、ルーティングテーブルの更新タイミングが端末によりばらつくと、局所的に正しくないネットワークトポロジーを持つ端末が出現することがある。このような端末が通信経路上に出現すると、2端末間で同一データパケットを投げ合う現象が発生する。図3は、パケットの投げ合いが発生する簡単な例である。端末1から端末4へデータが端末2経由で送信されている時に、端末2と端末4間のリンクが切断される場合を考える。端末2は、端末4への直接のリンクが切れたので、データ送信を端末3経由で行なおうとする。しかし、端末3は端末2経由でデータ送信を行なおうとするため、中継パケットとして受け取ったパケットを端末2に送信する。この端末2-3間のパケットの投げ合いは、古いテーブルを持っている端末のルーティングテーブルが更新されるまで続き、データパケット到着に長い時間がかかったり、データパケットのTTLが0になり破棄されたり、投げ合うパケットが原因でロスが発生したりする。

同一パケットを端末間で投げ合う現象は、一般的にテーブル駆動型のルーティングプロトコル使用時に見られるが、経路切替の頻度が少なければ、さほど大きな問題ではない。しかし、信号強度閾値を高く設定しすぎると、安定な地点（領域S）の端末での受信信号強度が閾値を繰り返し横切り、局所的な経路変更が頻繁に発生するため、パケットの投げ合い現象の発生頻度が高くなる。

このように、閾値の導入は単純ではなく、領域Sでの信号強度の変動幅を考慮した信号強度閾値の決定と、端末間の経路情報の不一致を回避するという二つの課

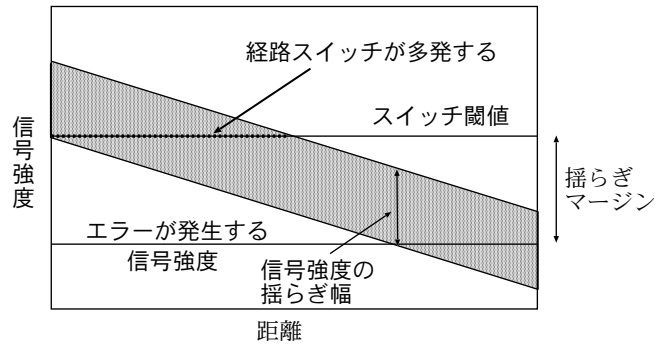


図4 閾値の導入と経路変更。

題の解決が、安定したアドホックネットワーク運用に重要である。

4. 不安定性改善方式の提案

前章では、無線アドホックネットワーク上で安定な通信を実現するための重要な課題を述べた。本章では、それらの課題の具体的な解決策として、信号強度の変動幅を考慮して中継端末候補を選出する方式と、ネットワークに存在する各端末のルーティングテーブルの更新タイミングを同期させる方式を提案する。

4.1 信号強度変動幅を考慮した中継端末候補選出
3章において、不要な経路切替を避けるような信号強度閾値の設定が重要であることを述べたが、そのような信号強度閾値を厳密に設定するのは容易ではない。

図4は、パケットエラーが発生する信号強度と隣接端末に登録するための閾値の関係を表している。図4のように、信号強度閾値を導入する際には、余裕を持って（揺らぎマージン）、パケットエラーが発生する信号強度よりも高い値に信号強度閾値を導入する必要がある。しかし、3章で述べたように、閾値を高く設定しすぎると、経路変更回数の増加により、ネットワークが不安定になる。このため、閾値決定には、図2領域Sに存在する端末の信号強度の変動幅を考慮し、無線環境におけるロスと経路変更によるロスを考慮した複合的なコスト評価の導入が必要であり、このコストが最小になるよう、閾値を導入することで安定な通信が可能となる。図5は、図2の各地点における信号強度の最大値・最小値・パケットエラー率を一組とし、最大値の降ベキの順に並べたものである。例えば、図5のような観測データが得られた端末では、横線がコストが最小となるような閾値である。このように閾値を決定する方法の一つの方法として、各端末に以下のような手順を実装した。

- 周りの各端末について、HELLOパケットの信号

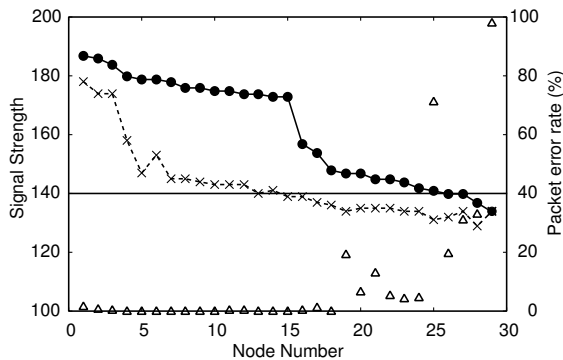


図 5 最大信号強度の降ベキの順に並べかえた中継端末の通信品質情報の例：最大信号強度 (●)，最小信号強度 (×)，パケットエラー率 (△)

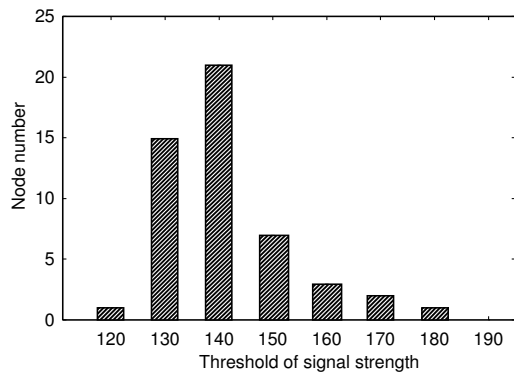


図 6 テストベッドにおいて 50 台の端末がそれぞれ決定した閾値の分布.

強度の最大値と最小値を監視する

- それぞれの端末から得た最大値・最小値を一組とし、最大値について降ベキの順に並べかえる
- 最大値の変化率が最大になる端末の組を見つけ、その最小値の平均値を信号強度閾値として設定する

図 6 は、図 1 のように配置された 50 端末のネットワークにおいて、この手法を実装した各端末が自律的に決定した閾値のヒストグラムを示している。各端末は場所によって電波環境が異なるため、すべての端末で同じ値の閾値を設定するのではなく、それぞれ自分の周りの環境に依存した閾値を決定していることがわかる。

4.2 ルーティングテーブル更新タイミングの自律的な同期

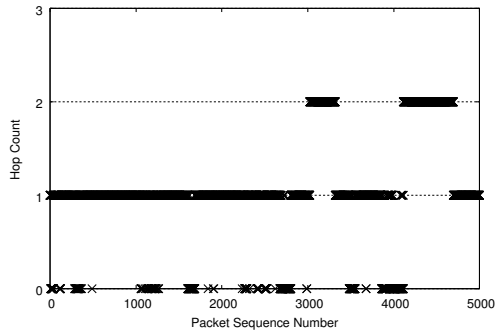
テーブル駆動型のルーティングプロトコルにおけるパケットの投げ合い問題を解決するには、各端末の経路情報が一致していれば良いので、各端末のルーティングテーブルの更新タイミングを同期させれば解消で

きる。テーブル更新を同期させることにより、経路切断を検知した端末も次の更新タイミングまで古い経路を使うため、その間パケットロスが発生するが、経路の不一致によるパケットの投げ合いが起こる場合に比べて通信特性の劣化が少ない。

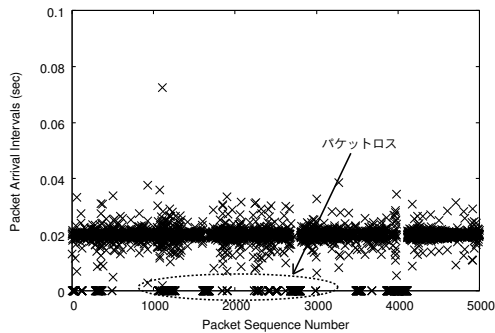
同期を取る手段としては、GPS を使うなど、いくつかの方法が考えられるが、ここでは、テーブル駆動型ルーティングの HELLO パケットを用い、自律分散的に同期を取る例を示す。まず、それぞれの端末にタイムカウンタを持たせ、HELLO パケットを送信する際、自分のタイムカウンタの値を入れて送信する。他の端末から HELLO パケットを受信した際、受信したパケット内のタイムスタンプの値をチェックし、自分のタイムカウンタの値の方が進んでいる場合は何もせず、自分のタイムカウンタの値が遅れている場合は受信した HELLO パケットの値に自分のタイムカウンタの値をセットする。これらの操作を繰り返すことで各端末のカウンタ値は同期する。タイムカウンタの値がある値になったとき、ルーティングテーブルの更新を行えば、全ての端末において同じタイミングでルーティングテーブルの更新を行なうことができる。これは、IEEE 802.11 の IBSS (Independent Basic Service Set) における TSF (Time Synchronization Function) と同様の方式である。

5. 通信性能の改善を示す評価実験の結果と考察

これらの提案方式の効果を確認するため、各機能を unik-OLSR version 0.4.7¹⁹⁾ をベースに OLSR-SS、OLSR-SS-SU という二つのルーティング方式として実装した²⁰⁾。OLSR-SS は、各端末が信号強度の変動を考慮して、自律的に信号強度閾値を決定する。ただし、通信開始が通常のルーティングプロトコルより遅くならないよう、各端末が自律的に閾値を決定するまで通常の OLSR として動作する。OLSR-SS-SU は、OLSR-SS にルーティングテーブル更新タイミング同期機能を持たせたものである。これらの 3 方式 (OLSR, OLSR-SS, OLSR-SS-SU) の通信実験を図 1 のテストベッドにて行なった。VoIP は、他のリアルタイムアプリケーションに比べ、パケットエラー率 (10% 未満) や遅延 (ITU-T クラス 0 の場合 100 msec 未満) について、非常に高い通信性能が要求されるため、ネットワークの安定性の評価に適している。そこで、評価実験でのフローとして、VoIP 通信 (64Kbps) を想定し、160byte のデータパケットを、20msec 間隔で送信し、5000 パケットを 1 試行として同じ実験を 10 回

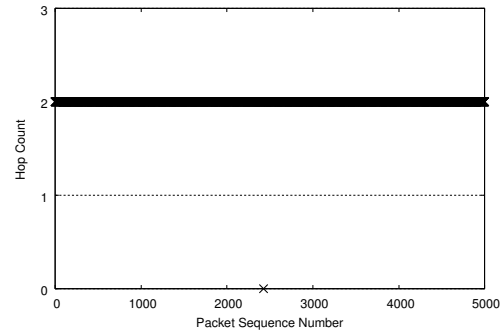


(a) ホップ数の変動

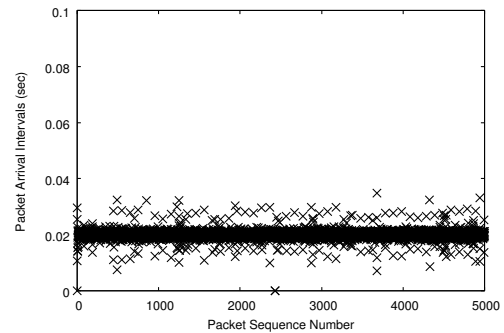


(b) パケット到着時間間隔

図 7 OLSR を用いた場合のホップ数の変動とパケット到着時間間隔。



(a) ホップ数の変動



(b) パケット到着時間間隔

図 8 OLSR-SS を用いた場合のホップ数の変動とパケット到着時間間隔。

繰り返した。図 7, 図 8 は、OLSR と OLSR-SS を用いた場合の、同じフローを流した場合のホップ数の変動とパケット到着時間間隔の変動を表している。ここで、Packet Arrival Interval がゼロになっている時には、パケットロスが起きていることを示している。図 7 より、OLSR 使用時にロスが起きているのは、OLSR が 1 ホップ経路を選択している場合であり、この時のパケットロスの発生は一樣ではなく、バースト的であることがわかる。VoIP アプリケーションでは、このようなバースト的なパケットロスが発生すると音声途切れる場合がある。

表 1 は、各方式を使用して上記実験を行なった際の、最大 (max)、最小 (min)、平均 (ave) パケットエラー率を示している。もし、経路に使用されている

表 1 各方式のパケットエラー率。

	min	max	ave
OLSR	0.04 %	11.7 %	2.85 %
OLSR-SS	0.16 %	2.14 %	0.64 %
OLSR-SS-SU	0.00 %	0.24 %	0.04 %

各端末間の信号強度が十分に強く、安定していれば、

それぞれの方式間に差が見られず、3つのルーティングプロトコルのパケットエラー率の最小値は0%に近い値となる。しかし、不安定な経路が存在する場合、単純に無線環境の影響や衝突からパケット損失が起こるだけでなく、端末間でのパケットの投げ合いにより、パケットエラー率がさらに増加するため、表 1 にある OLSR の最大パケットエラー率が約 12%程度になっている。信号強度の変動を考慮して、各端末が信号強度閾値を導入することにより、通常の OLSR よりパケットエラー率を抑えることができるが、パケットの投げ合いによるパケットロスが発生する場合があります。表 1 の OLSR-SS の最大パケットエラー率が 3%程度になっている。OLSR-SS-SU ではさらにルーティングテーブル更新タイミング同期機能を追加しており、パケットの投げ合いも抑制され、表 1 に示すように、OLSR-SS に比べてさらなる通信性能の向上が得られた。また、今回の実験では、平均ホップ数は 3, 4 ホップであり、ホップ数が 1 ホップ増加するにつれ、2msec 程度遅延が増加した。いずれのルーティングプロトコルを使用しても、遅延時間は数 msec~数十 msec であり、VoIP で要求されている条件を十分に満たしている。

6. おわりに

本稿では、受信信号強度の変動幅と、各端末が保持する経路情報の不一致に着目し、これらを克服する新しい方式を提案した。具体的には、周りの端末から受信される信号強度の幅を考慮して信号強度閾値を決定し、中継端末候補を選出する方式と、ネットワーク内で各端末のルーティングテーブル更新タイミングを同期させ、経路情報の不一致による不安定性を抑える方式を提案した。これらを組み合わせることで、通常のルーティングプロトコルを使用した場合に、最大12%程度あったパケットエラー率を、1%未満に抑えることに成功し、VoIPのように通信の不安定性に敏感なアプリケーションが十分実用的に使用できる無線アドホックネットワークを構築することができた。本稿で提案した方式は、オンデマンド型のルーティングプロトコルやフラディングを含む、他の重要な通信プロトコルに対しても導入することが可能であり、局所的な制御であるため、より大規模なネットワークに対しても有効である。

謝辞 本研究は情報通信研究機構の研究委託「ユビキタス ITS の研究開発」により実施したものである。

参考文献

- 1) 小菅, 板谷, Davis, 梅田: アドホックネットワークが開く新しい世界, 情報処理学会会誌, 2003, Vol. 44, No. 11, pp. 1160-1163.
- 2) J.P. Macker, M.S. Corson: *Mobile Ad Hoc Networking and the IETF*, ACM Mobile Computing and Communications Review, Vol. 3, No. 2, April 1999.
- 3) P. Guanyu, M. Gerla, T-W. Chen: *Fisheye state routing in mobile ad hoc networks*, In ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing, pp. D71-D78, 2000.
- 4) T. Clausen and P. Jacquet: *Optimized Link State Routing Protocol*, IETF RFC 3626, 2003.
- 5) T. H. Clausen: *Combining temporal and spatial partial topology for MANET—Merging OLSR and FSR*, The 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2003.
- 6) H. Lundgren, E. Nordstroem and C. Tshudin: *Coping with communication gray zones in IEEE 802.11b based ad hoc networks*, Proceedings of The 5th ACM International Workshop On Wireless Mobile Multimedia 2002, pp. 61-66.
- 7) C. K. Toh: *Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks*, Wireless Personal Communications Journal, Vol. 4, 1997.
- 8) R. Dube, C. Rais, K. Wang and S Tripathi: *Signal stability based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks*, IEEE Personal Communications, February 1997, pp. 36-45.
- 9) Y. Hu and D. Johnson: *Design and demonstration of live audio and video over multihop wireless ad hoc network*, IEEE Military Communications Conference, Vol. 21, No. 1, 2002, pp. 1211-1216.
- 10) K. Chin, J. Judge, A. Williams and R. Kermode: *Implementation experience with MANET routing protocols*, ACM SIGCOMM Computer Communications Review, Vol. 32, 2002, pp.49-59.
- 11) D. Couto, D. Aguayo, B. Chambers and R. Morris: *Performance of multihop wireless networks: Shortest path is not enough*, ACM SIGMOMM Computer Communications Review, Vol. 33, 2003, pp. 83-88.
- 12) FSR implementations by ATR:
<http://www.acr.atr.jp/acr/general/product/gsrfsr>.
- 13) 朴, 大和田, 須田, 照井, 間瀬: アドホックネットワークの通信実験—経路制御方式の性能評価—, 信学技報, IN/MoMuC/MVE2003-11, pp.13-18.
- 14) 長谷川, 嶋田, 板谷, 小菅, Davis: 屋内環境におけるアドホックルーティングの性能評価, 信学技報, MoMuC2004-13, Vol. 104, No. 38, pp. 1-4.
- 15) S. Itaya, J. Hasegawa, T. Shimada, M. Kosuga and P. Davis: *Improving the stability of ad hoc wireless communications in an office environment with fluctuating radio conditions*, IEICE Society Conference, 2004, pp S80-81.
- 16) 長谷川, 板谷, Davis, 梅田, 田中: 屋内環境におけるアドホックルーティングの性能評価 II—制御トラフィックの影響とルート切替え性能—, 信学ソ大, 2004, pp. S96-S97.
- 17) J. Hasegawa, S. Itaya, A. Hasegawa, P. Davis, S. Tanaka, N. Kadowaki, S. Obana, *VoIP Communication over a large ad-hoc network*, First Ad-hoc network workshop, 2005, pp. 89-92.
- 18) P. Davis, S. Itaya, J. Hasegawa, A. Hasegawa, N. Kadowaki, S. Obana, *Large scale ad hoc wireless networks*, Technical Report of IEICE of Signal Processing Society, SIP2004-148, 2005, pp. 49-52.
- 19) OLSR protocol implementations by Unik-University Graduate Center:
<http://www.olsr.org/>
- 20) OLSR-SS, OLSR-SS-SU implementations by ATR:
<http://www.acr.atr.jp/acr/general/product/gsrfsr>.