

MANET テストベッドにおける見通し外通信による影響

肥山 昌弘^{†1} 池田 誠^{†1}
バロリ レオナルド^{†2} 小山 明夫^{†3}

MANETs (Mobile Ad hoc Networks) では、端末の移動や遮蔽物などの外的要因によりパケット棄却が頻発することが問題となっている。そこで、本稿では屋内での見通し外通信における影響について調査を行ったので報告する。ルーティングプロトコルとして OLSR (Optimized Link State Routing) と AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) を考慮し、テストベッド実験の結果から、AODV より OLSR のほうが、見通し外通信による強い影響があることを確認した。

Effects of Non Line of Sight Communication in a MANET Testbed

MASAHIRO HIYAMA,^{†1} MAKOTO IKEDA,^{†1}
LEONARD BAROLLI^{†2} and AKIO KOYAMA^{†3}

In Mobile Ad hoc Networks (MANETs), because of node movement, there are many packet loss. In this paper, we present the implementation of 3 models in our testbed and investigate the effects of Non Line of Sight (NLOS) communication in MANETs. As routing protocols, we implemented Optimized Link State Routing (OLSR) and Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) protocols. The experimental results show that the OLSR protocol has significant effects during NLOS communication compared with AODV protocol.

^{†1} 福岡工業大学 大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

^{†2} 福岡工業大学 情報工学部
Department of Information and Communication Engineering,
Fukuoka Institute of Technology (FIT)

^{†3} 山形大学 工学部
Faculty of Engineering, Yamagata University

1. はじめに

近年、多くの携帯端末が普及してきた。特に携帯電話やネットブックなど低価格かつ高性能な端末も多くなってきている。それらの様々な機器から無線 LAN 等を使用し、ネットワークに接続することも、すでに一般的になってきている。特に無線接続については、街中でも喫茶店や商店街などで無線 LAN の利用サービスも増えてきた。そして、最近ではユビキタスネットワークの時代の到来が迫っているとも言われる。中でもユビキタスネットワークの中核となる MANETs (Mobile Ad hoc Networks) は注目され活発に研究されている。MANETs とは山中やルーラル地域などのインフラが整っていない環境でも円滑にネットワークを構築することができる技術である。この技術は、軍事目的で開発されネットワークインフラが整備されていない場所でも通信可能にする事を目的としている。また、最近国内では無線ブロードバンドサービスであるモバイル WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ^{*1}の正式サービスも始まっている¹⁾。モバイル WiMAX では数百メートル程度の距離をカバーする無線 LAN と異なり、1 から 3km 程度をカバーし、移動体の最大移動速度として 120km/h を考慮しており注目を集めている。しかし、モバイル WiMAX ではインフラの整備が必要なため本稿のインフラレスな MANETs とは使用する環境が異なる。現在 MANETs の技術を使用する環境として、災害地での緊急的なネットワークの構築²⁾ やイベント会場等での一時的なネットワークの構築の補助、登山客のグループ内情報共有などが考えられている。

本稿では、あるノードが移動ロボットを経由してパケットを転送する環境を想定している。さらに、本稿では見通し外通信による影響について分析を行うために、MANETs テストベッド^{3), 4)} に三つの実験モデルを実装し、ルーティングプロトコルとして OLSR (Optimized Link State Routing) ⁵⁾ と AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) ⁶⁾ の二種類を利用した性能評価を行う。

以下、第 2 章では MANETs について述べ、第 3 章では MANETs のルーティングプロトコルについて説明する。第 4 章では関連研究、第 5 章では提案する実験モデルについて、さらに第 6 章では、実験結果と考察について述べ、最後に第 7 章では本稿のまとめと今後の課題について述べる。

^{*1} IEEE 802.16e

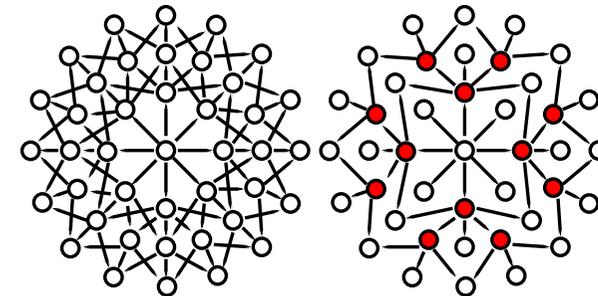
2. Mobile Ad-hoc Networks

MANETs とは無線ネットワークの一種で、移動無線端末間同士の動的な通信を行うネットワークで各端末が自立・分散的にネットワークを構築する。MANETs では Proactive 型, Reactive 型, Hybrid 型の三種類のルーティングプロトコルが研究されており、本研究ではその中で代表的なプロトコルである Proactive 型の OLSR と Reactive 型の AODV を採用し、実装を行った。Proactive 型のルーティングプロトコルは常に経路表を管理し、通信要求があれば即座に通信可能というメリットを持っている。しかし、常に経路表を最新の状態に更新しておく必要があるため、無駄なパケットを送信し、電力消費が激しいというデメリットを持つ。Reactive 型のルーティングプロトコルは通信要求後に経路探索を開始する特徴を持つため、電力消費を抑える事ができるというメリットがある。しかし、要求後に経路探索を行うために、遅延が必ず発生してしまうというデメリットを持つため、リアルタイム性を求める場合には使用できない。Hybrid 型のルーティングプロトコル (7) は、Proactive 型と Reactive 型の両方の特徴を持っている。近距離通信では、経路表を保持する Proactive 型を利用し、遠距離通信では、電力消費を抑える Reactive 型を使用する。しかし、現在は MANETs の Hybrid 型ルーティングプロトコルは研究が進んでいない。なお、このように MANETs ルーティングプロトコルが Proactive 型と Reactive 型などの二種があるのは、MANETs では端末としてノート PC や携帯電話、PDA などの携帯情報端末などが想定されているため、バッテリーが有限である可能性が高い。そのため、リアルタイム性を重視したプロトコルと電力消費を極力抑える事を重視したプロトコルが存在する。

3. MANETs のルーティングプロトコル

3.1 Optimized Link State Routing

OLSR は、Proactive 型のルーティングプロトコルであるため、常に経路表を管理するため帯域とパケット送信に伴う電力消費が問題となる。そこで、OLSR では MPR (Multi Point Relay) と呼ばれる端末を選択し、その選択された端末を中心にネットワーク全体の MPR ノードを管理し、パケットのフラッディングを行う事で無駄なパケットを削減している (図 1 参照)。これにより、帯域を有効活用する事ができ、かつ、端末の無駄な消費電力を抑える事ができる。具体的には、周囲の端末と Hello メッセージなどの四種類のメッセージを使用し、経路表を作成する。Hello メッセージは自端末とのリンク、隣接端末、MPR 集合などの情報が入っている。この Hello メッセージは隣接端末のみに定期的に配信され、ネッ



(a) 一般的なフラッディング (b) MPR フラッディング

図 1 フラッディング
Fig. 1 Flooding.

トワーク全体に再送信されない。TC (Topology Control) メッセージでは、MPR 集合を活用しネットワークのトポロジを各端末に効率よくブロードキャストを行う。これにより各端末がトポロジ情報を基にして通信経路を計算し、経路表を作成する事ができる。これを定期的に配信する事により経路表を作成することができる。また、MID (Multiple Interface Declaration) メッセージは、端末が複数のインターフェースを所有する場合にのみ使用される補助的なメッセージである。最後に HNA (Host and Network Association) メッセージでは、端末がゲートウェイとして機能する場合に使用される補助的なメッセージの事である。また、OLSR ではヒューリスティックな MPR ノード選定を行う。一般的に、全端末は単純な Dijkstra アルゴリズムによって最短経路を決定するが、これではパケット棄却率が高くなり良い方法とは言えない。そこで、OLSRd (OLSR daemon) (8) では LQ (Link Quality) の拡張を行う。この LQ とは、最短経路を決定するアルゴリズムでパケット棄却率の平均をメトリックとしている。これを ETX (Expected Transmission Count) と呼ぶ。ETX(i) = 1/(NI(i)×LQI(i)) と定義する。NI(i) は自端末のパケット棄却率、LQI(i) は隣接端末のパケット棄却率を示す。パケット棄却率が低いほど ETX は高くなり経路選択時のプライオリティが高い経路となる⁹⁾。

3.2 Ad hoc On-Demand Distance Vector

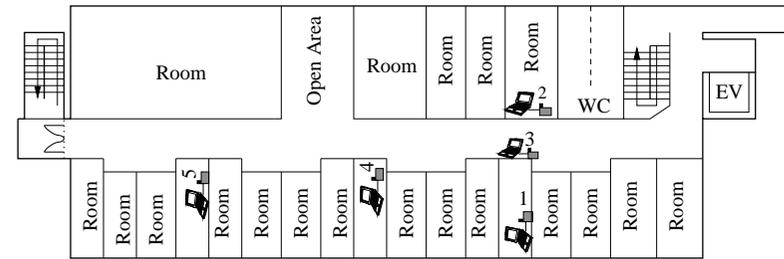
AODV は、Reactive 型ルーティングプロトコルである。送信要求が来てから周囲の端末にブロードキャストを行い、メッセージを受信した端末は一時的な経路表を作成する。また、目的端末までの経路を知っている端末に届くと、経路を逆に辿り送信端末までメッセージを

送信する．そして，送信端末は返信されたメッセージの中にある経路から，ホップ数が最短の経路を選択する．また，リンクが切断されると，送信端末にエラーメッセージが届き，上に記述したプロセスが繰り返される．さらに，経路要求が失敗した場合には，最初の要求のタイムアウト時間の2倍以上の時間が経過しないと経路要求が送信できない．また，AODVでは各端末はネットワーク全体を把握せず宛先端末と次ホップの情報のみでルーティングを行う．端末が固有のシーケンス番号を管理し，効率的なルーティングを実現する．このシーケンス番号を使用する事によりルーティングループを防ぐ．さらにAODVは，Reactive型のルーティングプロトコルで使用されるHelloメッセージを使用し，周囲の端末の情報を交換し，効率良いルーティングを行う．また，Expanding Ring Searchと呼ばれるブロードキャストの初期はTTL (Time to Live) をわざと小さく設定し，届く範囲を小さく制限する．これは，送信端末の近距離に目的の受信端末が存在する場合を考慮するため，無駄なパケットの発生を防ぎ，周囲の端末の消費電力を抑えるための技術である．AODV-UUはRFC3561に準ずる．

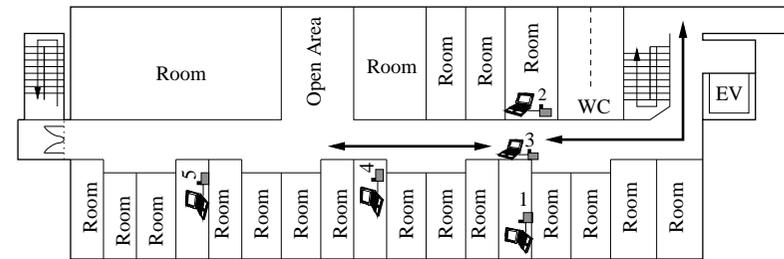
4. 関連研究

これまで，無線マルチホップネットワークのテストベッド及び計算機シミュレーションによる評価は数多く行われてきた^{(10),(11)}．その中の殆どは，移動端末を考慮しない静的なマルチホップネットワークによるスループット向上を焦点にしたものであった^{(9),(12),(13)}．または，主として端末の移動による経路修復機能を焦点に当てた研究もある⁽¹⁴⁾．文献⁽¹⁵⁾では，高レイヤプロトコルの設計のために論理リンク制御副層の調査を行っている．MIT Roofnet⁽¹⁶⁾では， $4km^2$ の領域に散らばった37台のノードでメッシュネットワークを構築し，その性能を評価している．ノード密度が接続性とスループットに与える影響などから，シングルホップよりもマルチホップネットワークを構築したほうが，接続性とスループットの観点から優位と述べている．Roofnetで利用されたSrcRRプロトコルはDSR⁽¹⁷⁾とMCL (Mesh Connectivity Layer)⁽¹²⁾をベースとしたリアクティブ型プロトコルである．

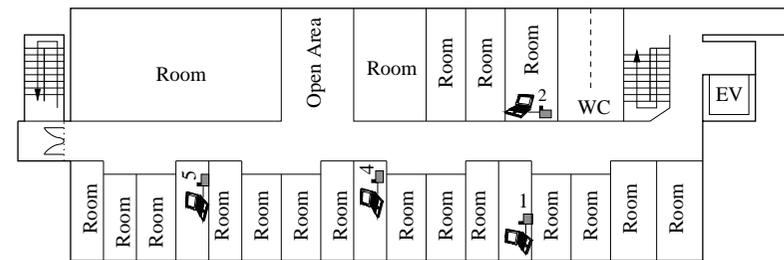
我々はこれまでに屋内・屋外の小規模なテストベッドを実装し，複数のフロアによるトラフィックの不公平性やMANETsプロトコルのホップ数におけるスループットやパケット棄却への影響について分析を行った．また，送信端末，受信端末の移動による影響，及び移動端末の移動モデルによる影響について実験を行った^{(3),(4)}．その結果，屋内における実験では，送信端末が移動するモデルと中継端末が移動する端末のスループットとパケット棄却率から見て，中継端末が移動するネットワークモデルのほうが，通信品質に大きな影響が出ること



(a) STA モデル (MAC フィルタリングを利用．端末 1 と端末 2 は直接通信ができず，端末 3 を経由して通信を行う．端末 1 は必ず最初に端末 3 を経由するフィルタリングルールを用いる．)



(b) MOVE モデル (MAC フィルタリングを利用．ルールは STA と同じ．)



(c) NLOS モデル (MAC フィルタリングを利用しない．)

図 2 実験モデル
Fig. 2 Experimental models.

を確認した．また，屋外における実験では，ホップが3ホップを越えるとスループットが急激に低下することを確認している．従来の研究では，受信端末や送信端末の移動パターンに

よる影響について評価を行っていたため遮蔽物による見通し外通信の影響を考慮していなかった。そこで本稿では、端末を金属のドアで遮られた部屋の中に配置させた実験モデルをテストベッドに実装し評価を行う。さらに、1台の中継端末が移動する影響についても評価する。また、本稿ではルーティングプロトコルとして、Proactive型のOLSRとReactive型のAODVを用いることによりプロトコルタイプの異なりによる影響について考察する。

5. 提案実験モデル

屋内におけるNLOS(Non Line of Sight:見通し外)通信による分析を行うにあたり、本研究では5台の端末を利用し三つの実験モデルを用いて評価を行う(図2参照)。具体的には、5台の端末のうち1台の移動端末を除く全ての端末を見通し外に配置し実験を行う。図2(a)は中継端末である端末3を除き、見通し外に配置するモデルでSTAと呼ぶ。図2(b)は端末3が移動するモデルでMOVEと呼び、図2(c)は端末3をネットワークから離脱させたモデルでNLOSと呼ぶ事にする。見通し外と移動による影響の差別化を行うために、STAとMOVEの実験ではMACフィルタリングを利用し、端末3を経由することを条件としている。トラフィックの生成にはD-ITG(18)を利用し、実験回数を10回、平均実験時間を100秒、パケットレートを122pps、パケットサイズを512bytesとした(表1)。また、理想的なビットレートは、122ppsの場合、パケットレートとパケットサイズから計算し、499.712kbpsとなる。さらに、端末の移動については、次のルールを規定し実験を行った。

- 端末の移動速度は、人間の歩くスピードとする。
- 曲り角や折り返し地点では、3秒間停止する。
- 端末3の移動は始点から終点まで約100秒とする。

6. 実験結果と考察

表2に各実験のスループットの中央値を示す。また、各実験結果を図3から図4に箱髷図により示す。図3(a)から図3(c)と図4(a)から図4(c)はOLSR、図3(d)から図3(f)と図4(d)から図4(f)はAODVを使用した実験結果である。全端末が静止しているSTAモデルのスループットは、OLSRは端末5への通信以外ではほぼ理想値に近い結果が得られている。しかし、AODVでは全体的にばらつきが見られ端末5への通信においては不安定な結果となった。これはパケット棄却についても同じ傾向が見られる。一方で、MOVEモデルのスループットは、OLSRが理想値より50から100Kbps程低下しているが比較的安

表1 実験のパラメータ

Table 1 Experimental parameters.

パラメータ	値
端末数	5
オペレーションシステム	Fedora Core 4 or Ubuntu 9.04
MAC	IEEE 802.11 (channel 1)
パケットレート	122 pps
パケットサイズ	512 bytes
実験時間	100 seconds
実験回数	10 times

表2 スループットの中央値(Kbps)

Table 2 Median throughput (Kbps).

Model	送信端末と受信端末の端末番号			
	1→2	1→3	1→4	1→5
OLSR, STA	498.6266	499.6096	499.6096	195.5271
OLSR, MOVE	400.0288	427.3256	360.4263	139.5434
OLSR, NLOS	372.1364	N/A	423.0810	160.2784
AODV, STA	490.1274	497.9302	371.5054	137.5938
AODV, MOVE	493.4246	442.3066	499.2819	81.5223
AODV, NLOS	499.6710	N/A	192.1024	63.0351

定している。パケット棄却の結果からも、端末5への通信では90pkt/secを越えるパケット棄却数が確認されており、スループット低下の一つの原因となっている。また、AODVのスループットは、端末5への通信以外ではほぼ理想値に近い結果が得られているが、パケット棄却の結果と合わせてみると、端末5への通信がほぼ行っていないことがわかる。NLOSモデルでは、STAモデルでは端末1から見通し内であった中継端末3がネットワークから離脱したため、全体的にスループットが低下した。これは、障害物などの伝送路における減衰や伝搬距離による減衰が起因したことが大きい。今回の実験結果から、小規模なネットワークでは中継端末のモビリティの影響はOLSRの方が大きいが見通し外通信の影響はAODVの方が影響が大きいということが分かった。

7. むすび

本稿では見通し外通信による影響について分析を行うために、MANETsテストベッドに三つの実験モデルを実装し、ルーティングプロトコルとしてOLSRとAODVの二種類を

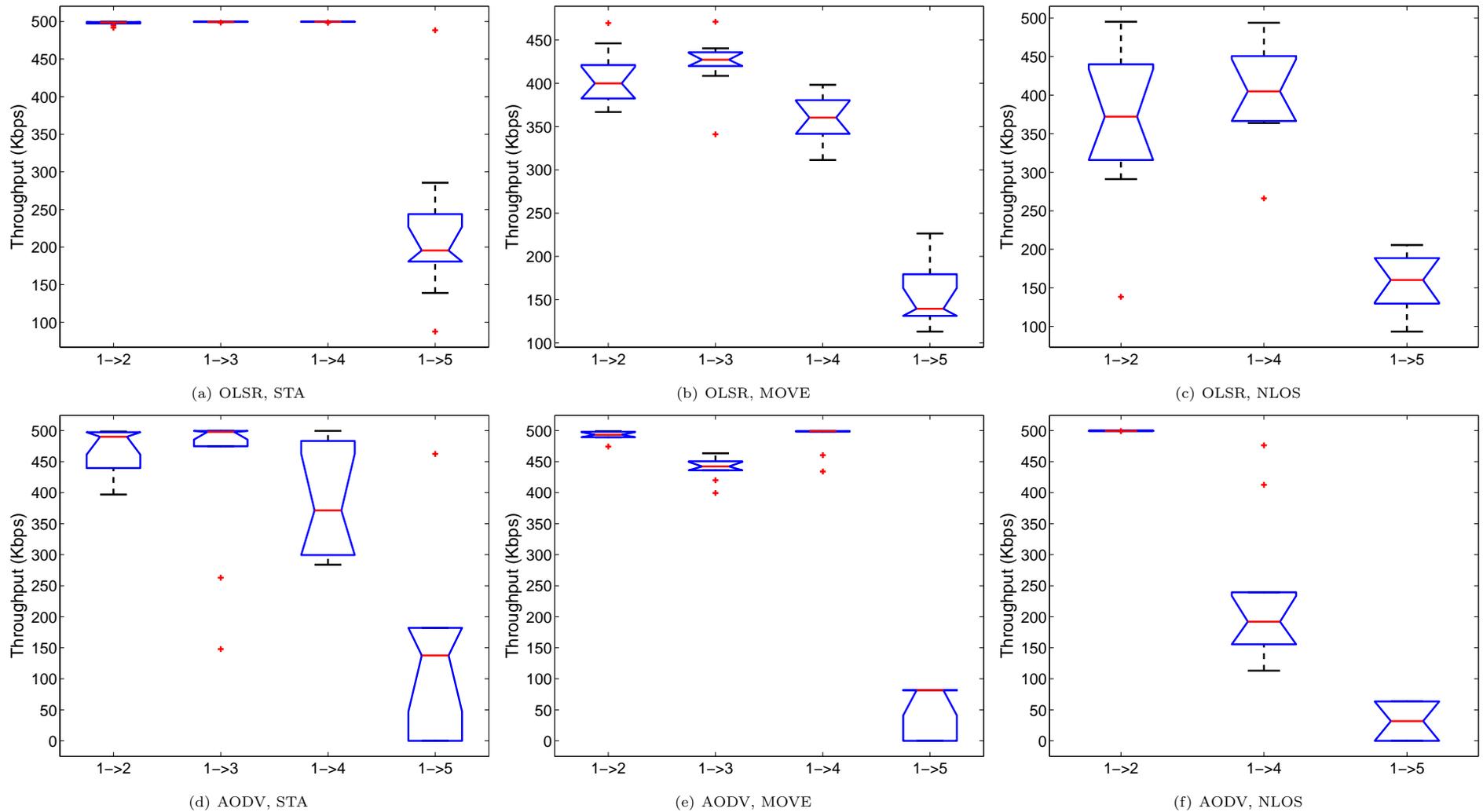


図3 OLSR と AODV のスループットの結果
Fig.3 Throughput of OLSR and AODV.

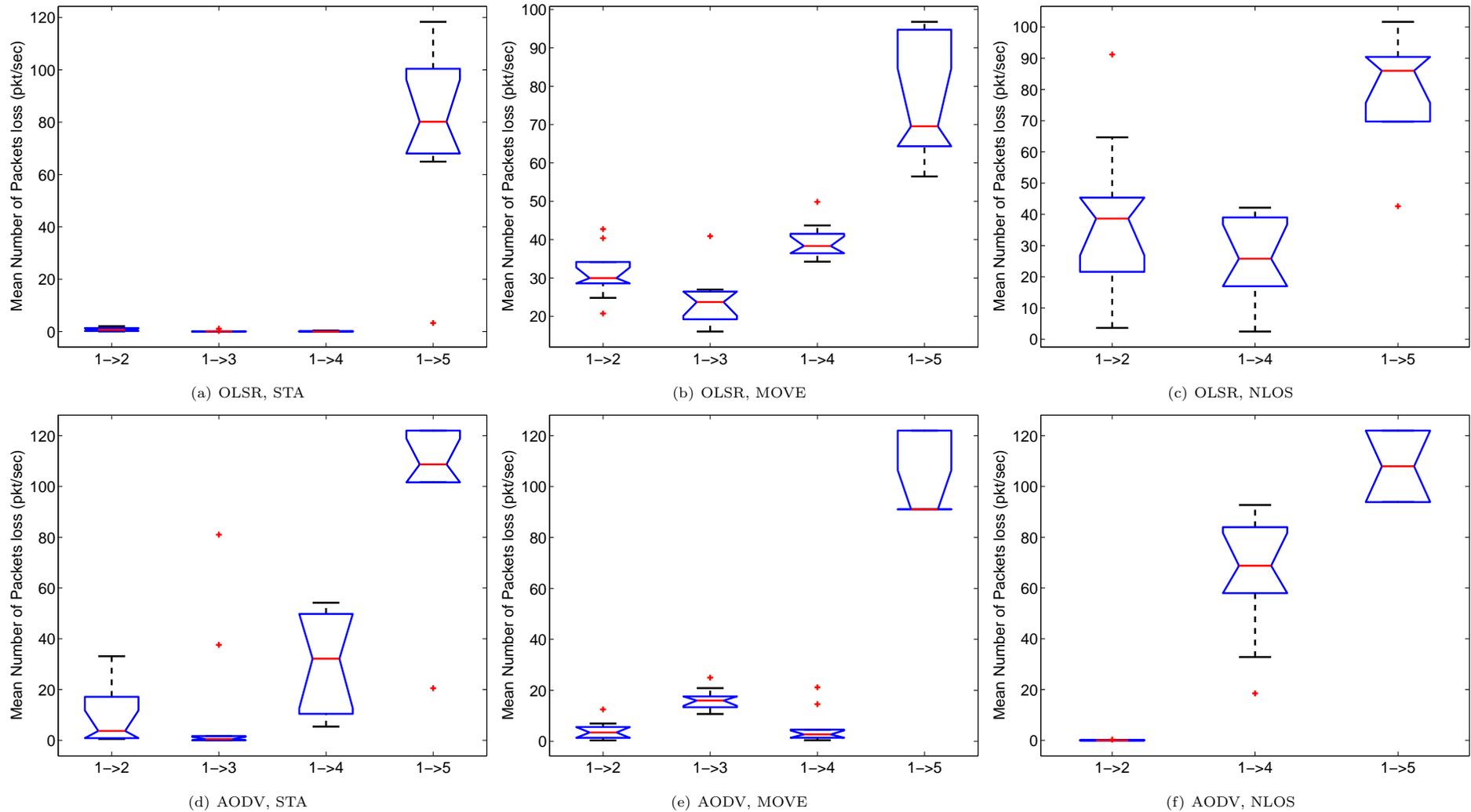


図4 OLSR と AODV のパケット棄却の結果
Fig. 4 Packet loss of OLSR and AODV.

利用した性能評価を行った。結果として、中継端末の移動端末が見通し外に入る事によって通信の安定性が欠ける事を OLSR と AODV の両プロトコルで確認した。また、共に端末が静止し必ず端末 3 を経由する STA モデル及び端末 1 から端末 2 への通信では、パケット棄却はほとんど見られず理想値に近い値が得られた。しかし、他の実験モデルでは大幅な性能の低下が見られた。特に完全な見通し外通信を行う NLOS モデルでは、OLSR と比較し AODV はマルチホップする回数が増えるとスループットの中央値は 63.0351 と低く、通信不能に陥る時間がかかり見られた。一方で、送信端末からある程度近い距離またはホップ数が少ない宛先までの通信においては、AODV を用いたほうが有利である。しかし、距離が伸び、ホップ数が増えた場合の通信には常に経路表を管理する Proactive 型プロトコルの OLSR を用いたほうが、通信を行える確率は高くなる。

今後の課題として、テストベッドの拡張を考えている。例えば、小規模なネットワークでの実験しか行っていないため、中規模や大規模なネットワークを構築し、規模による影響を調査するため、端末数を増やして実験を行いたい。また、現在では既に一般的なとなっているストリーミング動画ではパケットレートやビットレートが上がっているため、様々なタイプのトラフィックからの影響についても考慮したい。さらに、従来の研究からの課題として、平面的な端末の移動のみを考慮しているため、立体的な移動モデルについても考慮した実験も行っていきたい。

謝辞 本研究は日本学術振興会からの研究費による成果である。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) UQ Communications Inc.: UQ WiMAX, <http://www.uqwimax.jp/>.
- 2) 鈴木裕和, 兼子陽市郎, 間瀬憲一, 山崎重光, 牧野秀夫: 大規模災害復旧時のアドホック通信システム: スカイメッシュ, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol.2006, No.2, p.605 (2006).
- 3) Ikeda, M., De Marco, G., Yang, T. and Barolli, L.: Performance Analysis of an Ad Hoc Network for Emergency and Collaborative Environments, *Journal of Telecommunication Systems*, Vol.38, pp.133 – 146 (2008).
- 4) Hiyama, M., Ikeda, M., Barolli, L., De Marco, G., Xhafa, F. and Durrezi, A.: Mobility Effects in Mobile Ad hoc Networks, *The First International Workshop on Network Traffic Control, Analysis and Applications (NTCAA-2009)*, Vol.2, pp.679 – 684 (2009).

- 5) Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626 (Experimental) (2003).
- 6) Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, RFC 3561 (Experimental) (2003).
- 7) Z.Haas, M.: ZRP: The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks, Internet Draft draft-zone-routing-protocol-01.txt (1998).
- 8) Tønnesen, A.: OLSRd: Implementation code of the OLSR, <http://www.olsr.org/>.
- 9) Couto, D. S. J.D., Aguayo, D., Bicket, J. and Morris, R.: A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing, *Proc. MobiCom-2003*, pp.134–146 (2003).
- 10) 高橋義彦, 大和田泰伯, 須田利章, 間瀬憲一: 大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発, 信学論 (B), Vol.89, No.6, pp.836–848 (2006).
- 11) Kiess, W. and Mauve, M.: A Survey on Real-world Implementations of Mobile Ad-hoc Networks, *Ad Hoc Networks*, Vol.5, No.3, pp.324–339 (2007).
- 12) Draves, R., Padhye, J. and Zill, B.: Comparison of Routing Metrics for Static Multi-hop Wireless Networks, *SIGCOMM '04*, pp.133–144 (2004).
- 13) 高橋義彦, 兼子陽市郎, 間瀬憲一: 無線メッシュネットワークにおける高スループット経路選択に関する実験的検証, 信学論 (B), Vol.J90-B, No.3, pp.311–314 (2007).
- 14) Gray, R.S., Kotz, D., Newport, C., Dubrovsky, N., Fiske, A., Liu, J., Masone, C., McGrath, S. and Yuan, Y.: Outdoor Experimental Comparison of Four Ad hoc Routing Algorithms, *ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pp.220–229 (2004).
- 15) Lundgren, H., Nordström, E. and Tschudin, C.: Coping with Communication Gray Zones in IEEE 802.11b Based Ad hoc Networks, *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WOWMOM)*, pp.49–55 (2002).
- 16) Bicket, J., Aguayo, D., Biswas, S. and Morris, R.: Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network, *MOBICOM*, pp.31–42 (2005).
- 17) Johnson, D.B., Maltz, D.A. and Broch, J.: *DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks*, Ad Hoc Networking, chapter5, pp.412–420, Addison-Wesley (2001).
- 18) Botta, A., Dainotti, A. and Pescapé, A.: Multi-protocol and multi-platform traffic generation and measurement, *INFOCOM 2007 DEMO Session* (2007).