

MANETテストベッドのモビリティによるスループットの 影響

池田 誠[†], デマルコ ジュゼッペ^{††}, 肥山 昌弘[‡], バロリ レオナルド[‡]

[†] 福岡工業大学大学院工学研究科知能情報システム工学専攻 ^{††} 豊田工業大学工学部

[‡] 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

あらまし 本稿では, Mobile Ad-hoc Network (MANET) テストベッドを実装し, TCP と UDP のトラフィックを用いて, Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) の Link Quality Window Size (LQWS) とモビリティの関連におけるスループットの影響について報告する. 端末は直線では一定の速度で移動し, 曲がり角にきた場合は3秒間停止する. 実験モデルとして移動端末が1台のときと2台あるときを想定した. 移動端末は中継端末とする. 評価パラメータとしてスループット, 往復遅延時間, ジッタとパケット棄却率を測定した. データ分析の結果, LQWSを小さくすることにより, TCP のスループットを向上させることができた.

Effects of Mobility in Throughput of a MANET Testbed

Makoto IKEDA[†], Giuseppe DE MARCO^{††}, Masahiro HIYAMA[‡] and Leonard BAROLLI[‡]

[†] Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

E-mail: bd07001@bene.fit.ac.jp

^{††} Department of Engineering, Toyota Technological Institute

E-mail: demarco@toyota-ti.ac.jp

[‡] Department of Information and Communication Engineering, FIT

E-mail: s05b2030@bene.fit.ac.jp, barolli@fit.ac.jp

Abstract In this paper, we present the implementation and analysis of our testbed considering the Link Quality Window Size (LQWS) parameter of Optimized Link State Routing (OLSR) protocol and the mobility. We investigate the effect of mobility in the throughput of a Mobile Ad-hoc Network (MANET). The mobile nodes move toward the destination at a regular speed. When the mobile nodes arrive at the corner, they stop for about three seconds. In our experiments, we consider two cases: only one node is moving (mobile node) and two nodes (intermediate nodes) are moving at the same time. We assess the performance of our testbed in terms of throughput, round trip time, jitter and packet loss. From our experiments, we found that throughput of TCP was improved by reducing LQWS.

1 はじめに

近年, 無線 LAN を搭載したオーディオプレイヤー, 携帯端末やノートパソコンを代表とする小型コンピュータの発達により, モバイルネットワークが注目されホットスポットや商用サービスを見かける機会が増えた. また, ルーラル地域では, 補間ネットワークのためのアクセスポイントを設置するメッシュネットワークが注目され, 市町村の一部をカバーするネットワークの構築例も存在する¹⁾. これらのネットワークの特徴としてノード同士が直接通信できない場合でも, 近隣ノードを経由 (マルチホップ) することによりデータの送受信が可能になる. 近隣ノードを経由してパケットをマルチホップしていくネットワークに Mobile Ad-hoc Network (MANET)

がある. MANET は各ノードが自立・分散的にネットワークを構築する. MANET で用いられるノードの搭載可能なバッテリー容量が大きくないことから無線送信電力を無制限に大きくすることはできない. また, MANET でパケットを転送しようとするとき n をノード数とすると, スループットが $\Theta(\frac{1}{\sqrt{n}})$ のように低下することが問題となっている^{2, 3, 4)}. この原因として, Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance (CSMA/CA) をベースとした IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) をマルチホップネットワークで用いるため, 複数のフローが同時に通信を行う場合などに, 不公平性や衝突によるパケット棄却などが発生し, スループットが低下する問題がある^{5, 6)}. さらに, ルー

ティングプロトコルの影響もある。MANETのプロトコルとして Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) がある。AODVは通信要求がきたら経路探索を開始するため、要求がきたらすぐにパケットを宛先まで送信することが不得意なリアクティブプロトコルの一つである。一方で Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) は常に経路表を管理するプロアクティブプロトコルでネットワークのリソースを常に利用し、経路管理を行う。したがって、データを即座に送信することが可能だがリソースの占有でスループット低下の原因の一つとなっている。いかにこの問題を回避するかが課題となっている。

本稿では、この問題を解決するために OLSR の Link Quality 機構に着目して送信ノードと宛先ノードを固定し、中継ノードの移動による影響を解析する。評価環境として平坦で壁に遮られている屋内環境で1台または2台の端末が移動しているネットワークを用いて TCP または UDP の単一フローによる OLSR プロトコルの性能分析を行う。本実験では OLSR daemon (OLSRd) ⁷⁾ を用いる。実験環境として、平坦で壁に遮られている屋内環境で実験する。利用した端末はノート PC を4台とデスクトップ PC を1台用意した。

以下、まず2章では関連研究について、3章では MANET について、4章で OLSR について説明する。続いて、5章では実験モデルの定義について、6章では実験結果と考察を述べる。そして、最後に7章では今後の課題を述べる。

2 関連研究

我々はこれまでに屋内・屋外における MANET テストベッドを実装し、複数のフローによるトラフィックの不公平性や MANET プロトコルのホップ数におけるスループットへの影響などについて分析を行った^{8, 9, 10)}。その結果、屋外における場合、ホップ数が3を超えるとスループットが低下することが分かった。しかし、従来は端末を静止した場合の評価しか行っておらず、モビリティを考慮していなかった。そこで、本稿では移動端末を考慮した環境をテストベッドに実装し、TCP と UDP の各フローからスループット、往復遅延時間、ジッタおよびパケット棄却率にどのような影響がでるか評価を行う。

本稿のテストベッド同様に、これまでに様々なテストベッドが実装されている¹¹⁾。しかし、これらのテストベッドでは特定の無線技術やノード数のスケラビリティに関することを焦点にしているため、本

稿のテストベッドとは異なる。文献¹²⁾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。文献¹³⁾では、最も我々のテストベッド環境と近いが、屋内での TCP の評価のみである。

近年、インターネットユーザはストリーミングや動画共有などの動画配信関連サービスの需要が非常に高い。そこで、本稿では、これらのサービス (Real-time Video) を想定した屋内環境での MANET の評価を行う。評価指標としてトラフィックの種類、移動ノード数および OLSR の Link Quality Window Size (LQWS) とする。

3 MANET

従来のルーティングプロトコルを無線ネットワークで利用すると様々な問題が生じる。特に、常に端末が移動する場合のネットワークでは、迅速に経路表を管理しなければいけない。この問題を解決する MANET の代表的なプロトコルとして OLSR がある。一般的なプロアクティブ方式の MANET ルーティングプロトコルの特徴として、常に経路制御パケットを広告し経路表の管理を行う。したがって、送信者からの要求に即座に返答することが可能になる。しかし、トポロジ情報を広告するための情報のやりとりが頻繁なため、各端末の電力消費に大きな問題が存在する。一方で、ネットワークに通信要求が来た時点で経路作成を始めるリアクティブ方式がある。リアクティブ方式の特徴として、非通信時には経路制御パケットを広告しないことでパケットの削減を可能にしている。しかし、経路を常に管理しないため通信開始時に遅延が発生する。代表的なプロトコルとして、AODV, Dynamic On-demand MANET routing protocol (DYMO), Dynamic Source Routing (DSR) が考案されている。

4 OLSR

一般的なプロアクティブ方式の MANET プロトコルの特徴として常に経路表の管理を行う。したがって、送信者からの要求に即座に返答することが可能である。しかし、トポロジ情報を広告するための情報のやりとりが頻繁なため、各端末の電力消費に大きな問題が存在する。この問題を解決するために

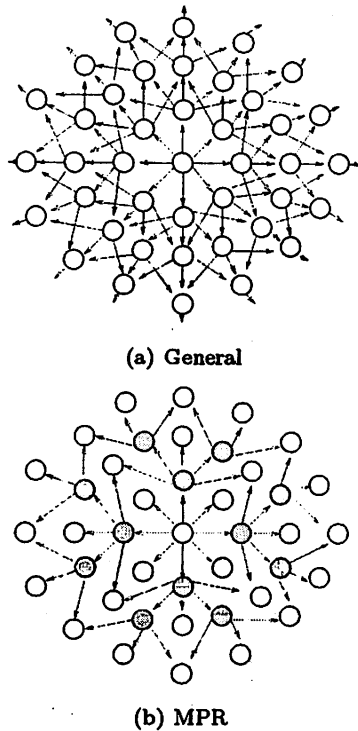


図1 フラッディング手法

OLSR はいくつかの機能を有する。

一般的なフラッディングでは、全ての隣接ノードがフラッディングを繰り返すことでブロードキャストストームが発生する。そこで、OLSR ではあるノードがブロードキャストまたは再ブロードキャストしたパケットを、そのノードが選択した Multi Point Relay (MPR) と呼ぶノードのみが再ブロードキャストすることで、パケットの削減を図る¹⁴⁾。このフラッディングメカニズムを MPR フラッディングと呼ぶ。OLSR では Hello メッセージとは別に Topology Control (TC) メッセージを用いて、ネットワーク全体のトポロジ情報を各ノードへ伝えている。トポロジは、実際に存在するすべてのリンクから構成するネットワークとは異なり、各ノードの MPR セレクタ集合から構築されるため、管理するリンク数は実際のリンク数よりも非常に少ない。OLSR は、ヒューリスティックな MPR ノード選定を行う。一般的には、全てのノードは最短経路を単純な Dijkstra アルゴリズムで決定するが、最短経路を求めるのはパケット棄却率の観点から見て得策とは考えにくい。

そこで、OLSR daemon (OLSRd) では Link Quality (LQ) の拡張を行う⁷⁾。これは、パケット到着率の平均をメトリックとした最短経路アルゴリズムである。これを Expected Transmission Count (ETX) と呼び、 $ETX(i) = 1/(NI(i) \times LQI(i))$ と定義する。NI(i) は自ノードのパケット到着率、LQI

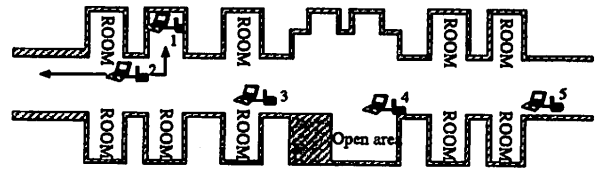


図2 実験モデル1 (MV1)

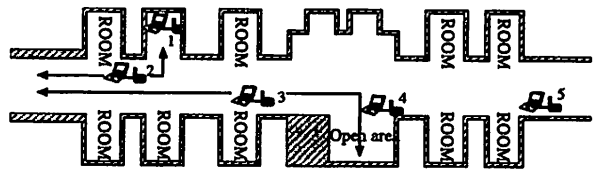


図3 実験モデル2 (MV2)

(i) は隣接ノードのパケット到着率を示す。パケット到着率が高いほど ETX は 1 に近づき経路選択時のプライオリティが高くなる。パケット到着率は LQWS によって異なる。たとえば、LQWS が 100 と 10 で、五つのパケットが棄却した場合の到着率はそれぞれ 95% と 50% となる。本実験では、経路選択アルゴリズムに ETX を用いる。OLSR の実装は複数存在するが、そのほとんどが、RFC3626¹⁴⁾ から多くの改良がなされ、街全体をカバーするようなメッシュネットワークを構成するための改良が加えられたものもある。しかし、文献¹⁵⁾では、このリンクステート型アルゴリズムでは、ノード数が 450 のような多数のノードで構成するネットワークでは、トポロジグラフを再構築するために数秒かかると報告している。現在、OLSRd ではスケーラビリティ向上を目指し改良が加えられている。

5 実験モデルの定義

本報告では屋内での実験を行うにあたり、従来研究で行ったモデル^{8, 9, 10)}に移動ノードの拡張を行った図2と図3の二つのモデルを実装した。以下で、実験モデル1を利用した実験を MV1 と呼び、実験モデル2を利用した実験を MV2 と呼ぶ。すべての端末には、オペレーションシステムとして Fedora Core 4 をインストールしている。カーネル 2.6 上でシステムを構築する。また、無線チップセットとして RT2500 を有している Linksys 社の USB 接続で可動式小型アンテナを搭載する WUSB54G-JP を利用する。端末1はゲートウェイ機能を有し DNS とルータ機能を稼働させている。端末1ですべての測定をするためのスクリプトを実行する。本テストベッドのシステム構成を図4に示す。図4の中央上にあるデスクトップマシンがゲートウェイで本稿では端末1と呼ぶ。端末1ではウェブインターフェー

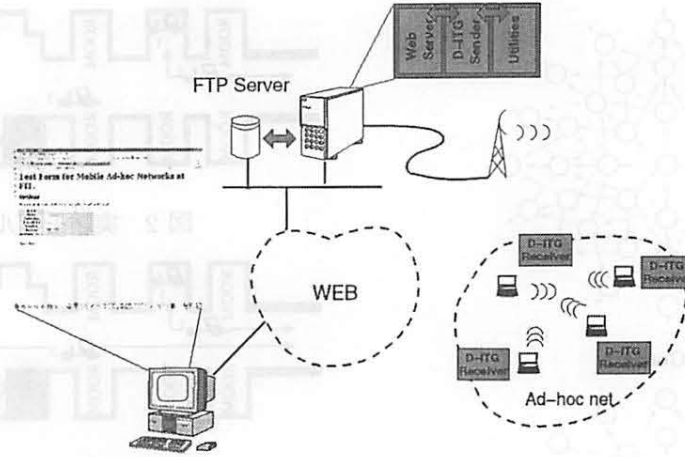


図4 テストベッドの構成

表1 各群のグループ分け表と中央値の結果 - $(\hat{T}, \widehat{RTT}, \hat{J}, \hat{P}_L)$, (AとE群のジッタ値は $\hat{J} \times 10^{-3}$)

群	因子				1 → 2				1 → 3			
	FLOW	MODEL	LQWS		$\hat{T}$	$\widehat{RTT}$	$\hat{J}$	$\hat{P}_L$	$\hat{T}$	$\widehat{RTT}$	$\hat{J}$	$\hat{P}_L$
A	UDP	MV1	100		498.892	0.019	0.617	0.002	499.712	0.022	0.592	0
B	UDP	MV2	100		496.273	0.018	0.001	0.008	475.611	0.031	0.001	0.059
C	TCP	MV1	100		498.217	0.115	0.001		497.721	0.398	0.002	
D	TCP	MV2	100		498.217	0.095	0.001		100.261	0.162	0.002	
E	UDP	MV1	10		498.572	0.021	0.774	0.004	499.712	0.022	0.762	0
F	UDP	MV2	10		497.708	0.023	0.001	0.005	477.422	0.026	0.001	0.055
G	TCP	MV1	10		498.217	0.0681	0.001		498.217	0.021	0.001	
H	TCP	MV2	10		498.217	0.089	0.001		498.217	0.087	0.001	

群	1 → 4				1 → 5			
	$\hat{T}$	$\widehat{RTT}$	$\hat{J}$	$\hat{P}_L$	$\hat{T}$	$\widehat{RTT}$	$\hat{J}$	$\hat{P}_L$
A	496.478	0.029	0.658	0.008	484.314	0.059	0.985	0.037
B	410.711	0.489	0.003	0.118	451.014	0.117	0.001	0.096
C	227.579	0.188	0.003		102.770	0.179	0.003	
D	198.765	0.146	0.002		77.912	0.181	0.003	
E	499.712	0.031	0.770	0	499.712	0.031	0.708	0
F	452.663	0.101	0.001	0.109	444.777	0.061	0.001	0.122
G	497.721	0.210	0.002		497.721	0.087	0.001	
H	495.266	0.178	0.002		399.355	0.163	0.003	

スを新たに実装しており、他の端末からアクセスし実験を開始することが可能である。移動端末のルールは次の三つである。

1. 直線部分は一定のスピードで移動する。
2. 曲がり角に到着したら、3秒間停止する。
3. 端末は椅子の上に載せるため同じ高さである。

端末の移動速度は人間の歩行速度とほぼ等しい。端末1と端末5間の距離は約100メートルで、1ホップで通信することはできない。端末1と端末4はパケット通信のグレーゾーンに該当する。

評価指標としてスループット、往復遅延時間、ジッタ、パケット棄却率を調査する。MV1は図2のように端末2を矢印のように動かして実験を行う。MV2

は図3のように端末2と端末3の両端末を動かして実験を行う。フローの種類はUDPとTCPを利用する。トポロジはメッシュトポロジを利用する。トラフィック・ジェネレータとしてD-ITG¹⁶⁾を利用した。実験回数は50回、平均実験時間を10000msec、パケットレート (P_{Rate}) を122pps、パケットサイズ (P_{Size}) を512Kbytesとする。理想的なビットレートは $P_{Rate} \times P_{Size} \times 8 = 499.712$ Kbpsとなる。

6 実験結果と考察

各群とグループ分け対応表を表1の上段(群と因子)に示す。表1のAからD群はLQWSを100にしたときのサンプルの中央値である。EからH群はLQWSを10にした場合の結果である。表中の $\hat{T}$ はスループットの中央値、 $\widehat{RTT}$ は、往復遅延時間の

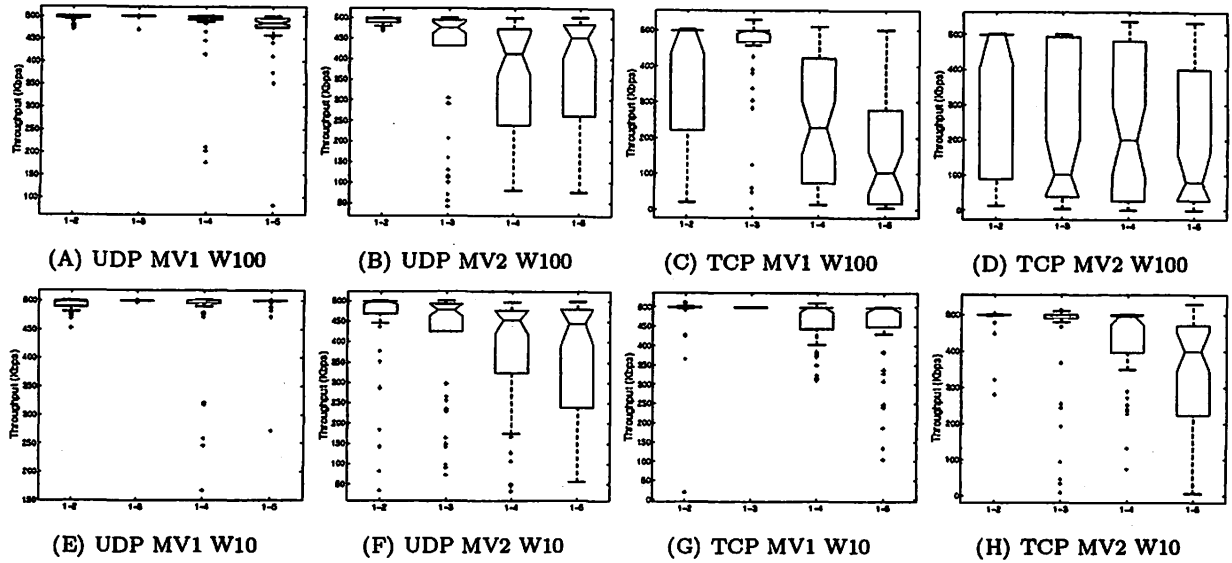


図5 スループットの結果

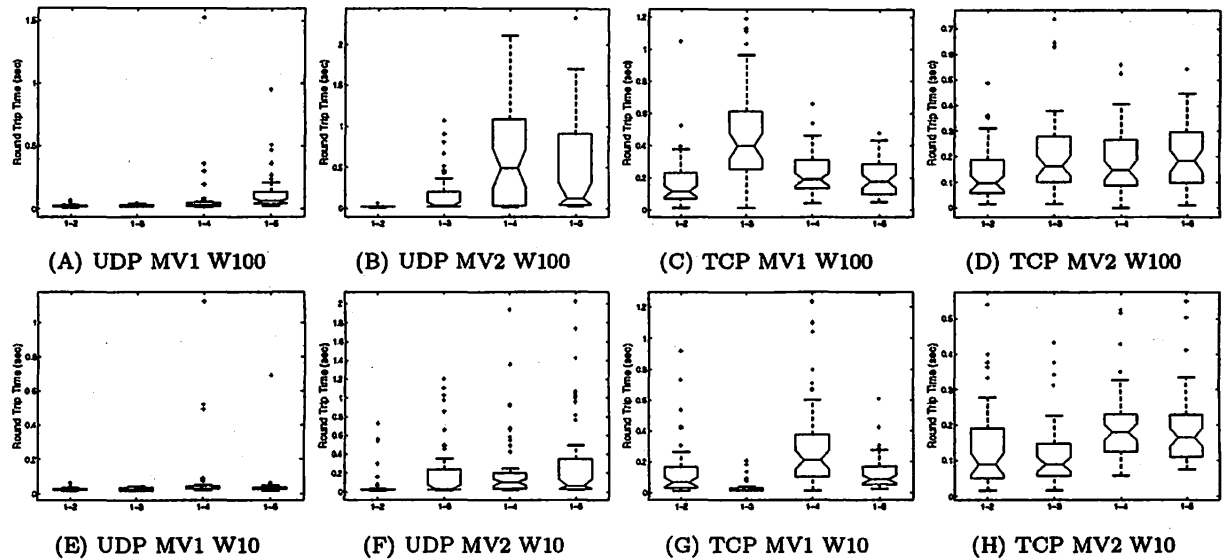


図6 往復遅延時間の結果

中央値, $\hat{f}$ はジッタの中央値, そして $\hat{P}_L$ はパケット棄却率の中央値を表す。

スループットの実験結果を図5に示す。往復遅延時間の実験結果を図6に示す。図5 (A) から図5 (D) と図6 (A) から図6 (D) は, OLSR の LQWS を 100 に設定したときのスループットと往復遅延時間の結果を示す。図5 (E) から図5 (H) と図6 (E) から図6 (H) は, OLSR の LQWS を 10 に設定したときの結果である。横軸は, 送信端末と宛先端末のラベルで, 縦軸は各評価パラメータを示す。一般的に結果を評価する場合に平均値を用いる場合があるが, これは重要なデータを見落とす可能性が高く

なる。そこで, 本稿ではサンプルの評価に箱髭図を用いる。箱髭図はデータを昇順に並び替え四分分割にし, 下辺が第1四分位点 (Q_1), 箱の中線が第2四分位点 (Q_2 : 中央値), 上辺が第3四分位点 (Q_3) を表し, 箱から上下に伸びている髭は箱の高さ (四分位範囲) の 1.5 倍以内にあるデータの最大値, 最小値を表している。

図5 (A) と図5 (E) の UDP を用いた場合のスループットの結果からは, 端末2が移動しているにもかかわらず中央値に集中した結果となったことにより, OLSR の LQWS の違いによるスループットへの影響はなかった。また, 端末1から端末4へフ

ローを送る場合などでは、すべての端末が静止している場合には端末 (1-2-4) とマルチホップしていくが、MV1 では移動端末 2 を中継せず、静止している端末 3 を中継し端末 (1-3-4) とマルチホップしていったため、スループットの低下が見られなかった。

一方で、TCP を用いた場合のスループットの結果 (図 5 (C) と図 5(D)) は、UDP の結果 (図 5 (A) と図 5 (B)) と比較し大きく分散した結果となった。特に宛先端末が端末 4 と端末 5 の場合に、スループットの低下が大きい。これは、LQWS が 100 であったため、パケットを送出するときに最良の経路を選択できなかったことが影響した。また、LQWS が 10 の図 5 (G) と図 5 (H) を見れば明かで、端末の移動によるスループットの低下を抑えている。さらに、この LQWS による影響は MV1 と MV2 のすべての条件下で同じ傾向となった。つまり、LQWS を小さくすることにより OLSR の ETX の計算値が、より実環境のコネクティビティに近くなったことを表している。

実験モデルの違いによる評価としては、端末 1 から端末 2 と端末 3 への結果は LQWS が 100 で TCP を用いた場合の結果を除くと両結果とも似た傾向となった。LQWS が 100 で TCP を用いた場合の結果では、端末 1 からシングルホップで届く距離であったが、端末がグレーゾーンに移動したため再送制御や OLSR の経路表と実際のトポロジの異なりによってスループットが低下した。

宛先端末が端末 4 と端末 5 の場合には MV1 と比較して MV2 の結果には大きな差がある。これは、端末 2 と端末 3 が同時に移動するため実際のトポロジが OLSR の経路表と異なりルーティングループができたことが起因する。

7 むすび

本稿ではモビリティを考慮する二種類の MANET テストベッドモデルを実装し、フローの種類と LQWS の違いによる OLSR の性能評価を行った。結果として、今回実装した実験モデルでは LQWS を小さくすることにより OLSR の ETX が、より実環境のコネクティビティに近くなったことが分かった。また、これにより屋内において移動ノードを有する場合にでも対応できることが期待できる。しかし、どの程度の移動ノードまで考慮できるかは本データでは判断できない。今後の課題として、本稿では移動端末は中継ノードまたは、宛先端末であったため、送信端末が移動する環境を考慮していなかったのに、送信端末も移動するモデルを考慮すること。さらに、

様々な移動モデルとトポロジによる影響や屋内・屋外での影響を調査することおよびシミュレーションによる比較を行うことである。

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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) "The freifunk project," <http://wiki.freifunk.net/>.
- 2) P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 46, pp. 388–404, 2000.
- 3) F. Xue and P. R. Kumar, "Scaling laws for ad hoc wireless networks: An information theoretic approach," *Foundations and Trends in Networking*, vol. 1, pp. 145 – 270, 2006.
- 4) P. C. Ng and S. C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad hoc networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 15, no. 2, pp. 309–322, April 2007.
- 5) M. Durvy and P. Thiran, "Understanding the gap between the IEEE 802.11 protocol performance and the theoretical limits," *SECOM-2006*, vol. 2, pp. 324–339, 2006.
- 6) A. Aziz, R. Karrer, and P. Thiran, "Effect of 802.11 adaptive exponential backoffs on the fluidity of down-link flows in mesh networks," in *Proc. WinMee-2008*, 2008.
- 7) A. Tønnesen, "OLSRd: Implementation code of the OLSR," <http://www.olsr.org/>.
- 8) M. Ikeda, G. De Marco, T. Yang, and L. Barolli, "Performance analysis of OLSR and B.A.T.M.A.N protocols for indoor scenarios," *IPSI SIG Notes*, 2007-DPS-132, vol. 2007, no. 18, pp. 43–48, September 2007.
- 9) G. De Marco, M. Ikeda, T. Yang, and L. Barolli, "Experimental performance evaluation of a pro-active ad-hoc routing protocol in out- and indoor scenarios," in *Proc. AINA-2007*, Canada, May 2007, pp. 7–14.
- 10) M. Ikeda, G. De Marco, T. Yang, and L. Barolli, "A bat in the lab: Experimental results of new link state routing protocol," in *Proc. AINA-2008*, Canada, May 2008, pp. 295–302.
- 11) W. Kiess and M. Mauve, "A survey on real-world implementations of mobile ad-hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 3, pp. 324–339, 2007.
- 12) J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, "Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network," in *Proc. MobiCom-2005*, 2005, pp. 31–42.
- 13) V. Kawadia and P. R. Kumar, "Experimental investigations into tcp performance over wireless multihop networks," in *Proc. of E-WIND-2005*, 2005, pp. 29–34.
- 14) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," RFC 3626 (Experimental), 2003.
- 15) A. Neumann, C. Elektra Aichele, and M. Lindner, "B.A.T.M.A.N status report," <https://www.open-mesh.net/batman/>.
- 16) "D-ITG: Distributed Internet Traffic Generator," <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>.