

屋内環境における OLSR と B.A.T.M.A.N プロトコルの 性能分析

池田 誠[†], デマルコ ジュゼッペ^{††}, 楊 涛[†], 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、小規模な Mobile Ad-hoc Network (MANET) テストベッドを実装し、TCP、UDP のトラフィックを発生させた場合の MANET プロトコルの性能分析について報告する。プロアクティブ型ルーティングプロトコルの Open Link State Routing Protocol (OLSR) および、Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking (B.A.T.M.A.N) プロトコルを用いた、実環境での実験を行い Kruskal-Wallis 検定を行い各々のプロトコルの性能を統計的に、トポロジーとパラメータによる影響を分析する。評価パラメータとして throughput/goodput, end-to-end の遅延時間、パケットロス、ジッタを測定した。また、データ分析の結果、ホップ数が多い場合、B.A.T.M.A.N プロトコルが OLSR より高い Goodput を得ることができた。

Performance Analysis of OLSR and B.A.T.M.A.N Protocols for Indoor Scenarios

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

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

E-mail: {bd07001, bd07003}@ws.ipc.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: barolli@fit.ac.jp

Abstract In this paper, we present the implementation and performance analysis of a small-scale Mobile Ad-hoc Network (MANET) using TCP and UDP traffic. We used two routing protocols: the Open Link State Routing (OLSR) and Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking Protocol (B.A.T.M.A.N) protocols. We are interested in finding strong dependences of performance metrics on system and spatial parameters, such as the topology and other parameters. To this aim, the statistical analysis toolkit is unavoidable, because of the large number of factors which interact with our testbed. By means of statistical hypothesis tests, we assess the performances in terms of goodput, RTT, packet loss and jitter, which present a sort of degradation threshold as the number of hops of the connection increases. From our experiments, we found that B.A.T.M.A.N protocol has better goodput than OLSR protocol.

1 はじめに

現在、屋内・屋外での無線パケット通信の需要は高まり、公園や駅などの一部の範囲で無線 LAN が可能なホットスポットが注目されている。また、インフラが整っていない地域では、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アドホックネットワークやメッシュネットワークを構築している例もある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、近隣ノードを経由することによりデータの送受信が可能になる。

本稿では、我々が構築した小規模な MANET の性能分析について述べる。我々の実験では olsrd²⁾ (ver.0.4.10), batmand(ver.0.2.0rc2-rv379) を用いて実験を行った。実験環境として、平坦で壁に遮られている屋内環境で端末を静止させて実験する。利用した端末はノート PC4 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 について簡潔に述べ、4 章ではテストベッドで利用する OLSR について、5 章では B.A.T.M.A.N について説明する。続いて、6 章ではテストベッドの仕様と統計分析について、7 章では実験結果と考

察を述べる。そして、最後に8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 MANET テストベッドを実装し、OLSR の Link Quality Window Size を変化させることによる分析や屋内・屋外におけるプロトコルの性能について研究を行ってきた^{3) 4)}。その結果、屋外における場合、ホップ数が3をこえるとスループットが低下することが分かった。また、従来ではパケット毎の分析や、他のプロトコルとの比較を行っておらず、プロトコルの特徴を数値的に分析していない。

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⁵⁾。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⁶⁾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、その性能を評価する。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⁷⁾では、最も我々のテストベッド環境と近く、屋内でのTCPの評価のみである。しかし、我々の実装したテストベッドでは、屋内環境でReal-time Videoを想定したトラフィックを用いてプロトコルの性能分析を、データリンク層、MAC層、OLSRのパラメータ、ホップ数などの関連をノンパラメトリック検定のKruskal-Wallis検定を用いて分析を行う。

3 MANET

従来のルーティングプロトコルでは無線ネットワークのような特別なネットワークでは様々な問題がある。特に、端末が移動する場合、トポロジーは常に変化するため、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代表的なプロトコルとしてOLSRがある。OLSRはMANET経路制御プロトコルのプロアクティブ方式で、特徴として常に経路テーブルを管理することで、送信者からの要求に即座に答えることが可能である。しかし、トポロジー情報を広告するための情報のやりとりが必要で、各端末の電力消費が大きな問題である。一方で、ネットワークに転送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。特徴として、非通信時には経路制御メッセージのやり取りを行わないことでパケットの削減

を可能にしているが、経路を常に管理していないので通信開始時に遅延が発生する。代表的プロトコルとして、Ad-hoc On-Demand Distance Vector(AODV)、Dynamic Source Routing(DSR)が考案されている。

4 OLSR

OLSRは、Mult Point Relay(MPR)に基づいたフラッディングに特徴がある⁸⁾。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MPRと呼ばれる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。OLSRにおけるフラッディングメカニズムをMPRフラッディングと呼ぶ。MPRノードの選定としてWillingnessパラメータを用いる。Willingnessは0~7までの値を用い、0の場合はMPRとして選ばれることはなく、7の場合は積極的にMPRノードとして選択される。Willingnessパラメータは端末のバッテリーの残量により動的に変化することで、MPRから外れることによりバッテリーの消費を抑制する働きがある。また、静的にWillingnessパラメータを割り当てることも可能で電源供給がある端末ではパラメータを高く設定し、バッテリーが長持ちしない場合は低く設定することでネットワーク全体の生存期間を伸ばすように考案されている。

また、OLSRではHelloメッセージとは別にTopology Control(TC)メッセージを利用してネットワーク全体のトポロジーを各ノードに伝えている。トポロジーは、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セレクト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、RFCに対応したヒューリスティックなMPRノード選定を行う。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。しかし、この手法で最短経路を求めるのはパケット誤り率の観点から見て得策とは考えにくい。そこで、OLSRdではLink Quality(LQ)の拡張を行っている。これは、パケット誤り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。これを一般的にExpected Transmission Rate(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誤り率、LQI(i)は隣接ノードのパケット誤り率を示す。低パケット誤り率ほどETXは高い値となり良い経路となる。文献⁹⁾では、LQの拡張によりパケット配送率が非

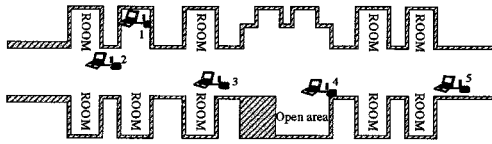


図 1 実験端末の配置図

常に高まったと報告している。OLSRの実装は複数存在するが、そのほとんどが、RFC3626から多くの改良がされ、街全体をカバーする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ている。しかし、文献¹⁰⁾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ノード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されている。そのために前述したETXやFisheyeなどが追加されたが、スケーラビリティに問題がある。

5 B.A.T.M.A.N

B.A.T.M.A.Nプロトコルは単純でロバスト性を考慮にいたマルチホップ経路を選択するアプローチで設計されている。特徴として、低プロセスと低コスト・トラフィックで適応的でLoop-freeな経路選択を保証する。メッシュネットワークの各ノードはEnd-to-End (E2E)の最良の経路に関する情報を分割管理し、次の最良ホップに関する情報だけを管理する。その結果、ローカルなトポロジー変化に関する情報のみで、全体のテーブル情報を知る必要性はない。さらに、イベント型にもかかわらず、制御トラフィックのオーバーヘッドを避けるとともに、異なるトポロジー情報に関するメッセージのフラッディング量のある程度防ぐことができる。また、アルゴリズムは信頼できないリンクで形成するネットワークにでも対応できるように設計されている。

各ノードはそれぞれの隣接ノードに生存情報をブロードキャストメッセージ (OGMs) を利用し広告する。この隣接ノードは特定の規則に従ってOGMsを再ブロードキャストを行うことで、メッセージをフラッディングしていく。OGMsは小さく、IPおよびUDPを含み52bytesのパケットサイズでパケットフォーマットとして、送信元ノードのアドレス、中継ノードのアドレス、TTL、シーケンス番号で構成する。OGMsは高速および信頼できる経路でパケットを転送する。各ノードは現在の最良ホップ隣接ノードから広告されるOGMsのみ再ブロードキャストする。OGMを一度受信したか、数回受信したかをシーケンス番号から判断する。

表 1 各群とグループ別対応表

Treatment	factors	intra-T. α -values
A	UDP, LT, O	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)
B	UDP, MT, O	(0.00, 0.00, 0.00, 0.12)
C	UDP, LT, B	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)
D	UDP, MT, B	(0.02, 0.00, 0.37, 0.33)
E	TCP, LT, O	(0.00, 0.00, 0.00)
F	TCP, MT, O	(0.06, 0.00, 0.00)
G	TCP, LT, B	(0.00, 0.00, 0.00)
H	TCP, MT, B	(0.00, 0.00, 0.00)

例えば、あるノードXはノードYのOGMsを受信することで存在するか判断する。ノードYはOGMsが1ホップの隣接ノードまで再ブロードキャストする。もし、ノードXがノードYから見て、1ホップ隣接ノード以上のように遠方ノードにデータを送る場合は、送信元からのメッセージ数や早さを基準にすることで、隣接ノードを選択する。つまり、アルゴリズムはメッセージの送信元から最良の隣接ノードを選択する経路表を作成することによりマルチホップ通信を実現させる。

6 テストベッドの仕様

我々のテストベッドでは4台のノートPCと1台のGateway (GW) PCで構成した。Operation SystemはFedora Core 4でkernel 2.6上でシステムを構築している。各端末にはLinkSys社のUSB接続で小型アンテナを搭載している無線アダプタ (IEEE802.11b/g対応) を利用する。無線ドライバとしてrt2500¹¹⁾を利用する。GWにはインターネットと接続するためのDNSサーバとルータ機能を稼働させる。GWではすべての測定をするためのスクリプトを実行する。また、グラフィカルツールを利用し、ネットワークの接続性について検証することを可能にした。我々のテストベッド環境にはバックグラウンドで1つ同じ周波数チャンネルを利用する無線アクセスポイントがキャンパス内にある¹。

6.1 定義

一般的に測定データは制御可能なパラメータの正しいサブセットを選択することが重要となる。統計的用語で、固定されたパラメータの部分集合を、因子と呼び処理群 (Treatment) と呼び、3つの因子によって定義する。

(Prot.[UDP|TCP], Topo.[LT|MT], Rout.[O, B])

ProtocolはUDP, TCPを示す。データリンク層とTCPの両パラメータは変更しない、kernelのデフォ

¹ Linux driverがAd-hoc modeの場合、チャンネル変更できないバグのため。

表 2 KW 検定の結果 - UDP (\widehat{G} , \widehat{RTT} , $\widehat{J} \times 10^{-3}$, \widehat{P}_L) - TCP (\widehat{G} , \widehat{RTT} , $\widehat{J} \times 10^{-3}$)

T	1 (1 → 2)	2 (1 → 3)	3 (1 → 4)	4 (1 → 5)
A	(499.712, 0.041, 0.238, 0.002)	(499.712, 0.07, 0.338, 0.002)	(499.712, 0.101, 0.638, 0.003)	(423.174, 2.647, 4.017, 0.102)
B	(499.712, 0.042, 0.381, 0.006)	(499.712, 0.041, 0.58, 0.002)	(499.212, 0.108, 0.753, 0.002)	(497.824, 3.152, 1.577, 0.017)
C	(499.712, 0.016, 0.417, 0.25)	(499.712, 0.024, 0.396, 0.10)	(499.712, 0.032, 0.445, 0.10)	(473.575, 0.196, 5.997, 0.285)
D	(499.712, 0.017, 0.381, 0.10)	(499.712, 0.017, 0.399, 0.10)	(499.712, 0.023, 0.416, 0.20)	(499.712, 0.022, 0.399, 0.20)
α	(0.13, 0.00, 0.00, 0.00)	(0.27, 0.00, 0.00, 0.02)	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)
E	(499.712, 0.046, 0.226)	(499.712, 0.057, 0.405)	(499.712, 0.080, 0.948)	(499.712, 0.105, 3.661)
F	(499.712, 0.017, 0.368)	(499.712, 0.050, 0.493)	(499.712, 0.041, 0.453)	(499.712, 0.119, 0.465)
G	(499.712, 0.046, 0.306)	(499.712, 0.057, 0.370)	(499.712, 0.115, 0.489)	(499.712, 0.105, 1.279)
H	(499.712, 0.028, 0.430)	(372.094, 0.833, 21.125)	(499.712, 0.017, 0.412)	(499.712, 0.060, 0.562)
α	(0.57, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00)

ルト値である²。TopologyはLinear Topology (LT)とMesh Topology (MT)で構成する。OLSRのメカニズムから見て、LTは最も安定しないトポロジーである。ノードが数珠つなぎに構成するので片方のリンクが非対称になるとOLSRはそのリンクを利用しないので、繋がるノードは孤立する。特にLTではMPRの選択にも影響し、 $n-2$ のMPRを選択する。このLTでのMPR選択とその振舞いにおいて、伝搬リンクの変動を測定する。LTはMACフィルタリングを利用する。MTはMACフィルタリングを利用せず電波の届く範囲でのリンクを形成する。実験端末の配置図を図1に示す。端末は椅子の上にすべて静止させて測定を行っている。屋内の壁はほとんどがコンクリートで一部金属扉になっている。端末3, 4間の距離は約22mである。Routingの“O”, “B”は“OLSR”と“B.A.T.M.A.N.”の略称である。表1にUDPとTCPの2つに基づいたグループ別けを示す。評価指標として4つ(Goodput (G), Round Trip Time (RTT), E2E Packet Loss (P_L), そしてJitter (J))の値をもとに分析する。トラフィックの生成手法として、D-ITG¹²⁾を利用する。測定データはすべてGW端末から各端末への単一トラフィックである。今回、Real-time Videoを想定したためPacket Sizeを512bytes, Packet rateを122pkt/secとした。この場合の理想的な平均ビットレートは $P_{size}[\text{bytes}] \times P_{rate}[\text{pkt/sec}] \times 8$ から499.712Kbit/secとなる。統計的検定を行うため各データとも50のサンプルを収集する。平均完了時間は10000[ms]とした。

6.2 分析

データ分析手法としてANOVA (ANalysis Of Variances)¹³⁾が考案されている。ANOVAは複数の母集団を比較し、その平均値が等しいかという仮定を検定する。この方法の前提条件として、それぞれの母集団の平均値が正規分布に従うことである。

² 現段階ではRTS/CTSは利用しない(TCP Reno)。

しかし、我々のテストベッドではサンプル数は一定ではない。これは、実験中に予想外なエラーが起きたことに起因する。予想外のエラーとしては、無線リンクのダウンや電波障害などによるパケット誤りにより測定データを得ることができない場合があった。そこで、我々が用いた分析はノンパラメトリック検定の、サンプルの正規分布性を気にせず一変数、または一要因の3つ以上のグループ差を検定するKruskal-Wallis (KW) 検定を行った。KW検定は他のノンパラメトリック検定が平均値を使わないように、中央値を用いる。また、KW検定は信頼区間 α を用いてサンプルの中央値を得る。一般的に有意水準 $\alpha=0.05$ と定義されている。本検定の場合、検定結果の α 値が0.05より低い場合、各データの中央値に差があることを示す。我々はここで検定を行う前に次の帰無仮説(H_0)と対立仮説 H_1 を立てた。

$$Y \begin{cases} H_0 : \text{各群の中央値には差はない。} \\ H_1 : \text{中央値が異なる分布が存在する。} \end{cases}$$

収集した各群(T)の中央値は、(\widehat{G} , \widehat{RTT} , \widehat{J} , \widehat{P}_L)と表現し、2種類のグループに分類する。TCPの場合は P_L はいつも0なので省略する。分析結果としてグループ内のKW検定をIntra-treatment testとし表1にグループ別け対応表とIntra-groupsの結果を示し、検定を行うためにグループに分類した関係を次に示す。

Intra-groups ホスト間のホップ距離による検定

Inter-groups TCPとUDPの2群に別けての検定

7 実験結果と考察

分布の違いを箱髷図を用いて比較し、各ホップ距離に基づく結果をまとめた。各群とグループ別け対応表を表1に示す。A-DはUDPを、E-HはTCPを用いた場合の結果である。箱髷図はデータを昇順に並び替え四分位にし、下辺が第1四分位点(Q_1)、箱の中の線が第2四分位点(中央値)、上辺が第3四

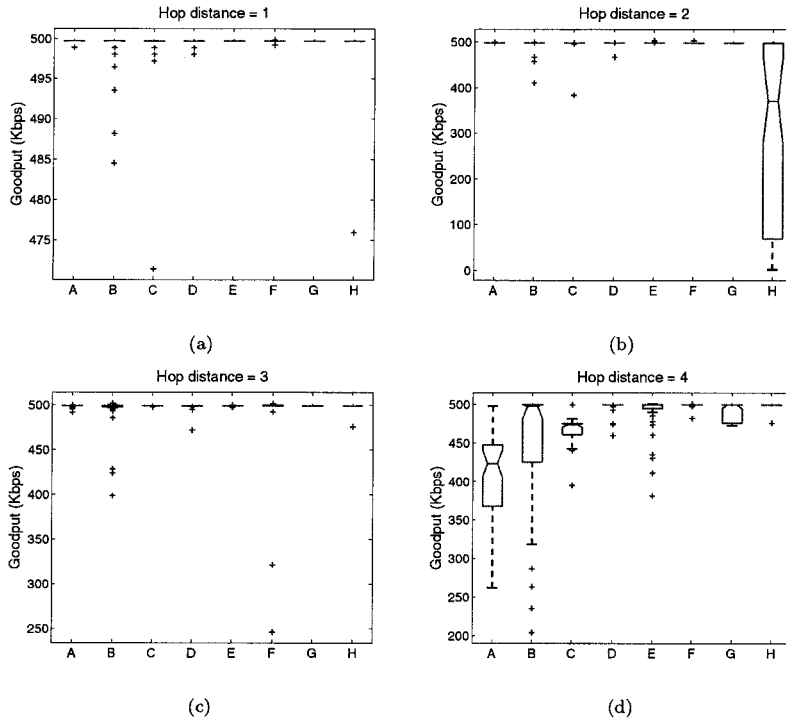


図 2 ホップ距離に基づく Goodput の変化

分位点 (Q3) 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。実験結果を表 2 に示す。有意水準 α から Treatment (T) の信頼度を測る。図 2 にホップ距離に基づく A-H での条件の Goodput 値を示す。端末を静止させている実験なのでホップ距離が 3 までの値は損失も少ない。ただし、図 2(b) の H を見ると Goodput 値が低下している。このときの RTT と Jitter は図 3 と表 2 から見て取れるように、かなり他の A-G 群と比較しても大きい値になった。原因としては、MT なので、OGMs の交換において端末 2 が端末 3、4 と同等のメッセージ数の交換を行ない最短ルートでパケットを転送することができなかったことや、途中のリンクが非対称になりパケット棄却が起こったと推測する。これは、トレースした tcpdump の結果から分かる。また、RTT の増加により TCP の輻輳回避制御の働きにより Goodput の低下がおきたと考えられる。

次に、ホップ数が 4 のデータを見ると、B.A.T.M.A.N より OLSR の Goodput 値は低いことが分かる。トポロジによる性能差を見ても同様なことが言える。これは、OLSR の場合、MPR

ノードの選定のためのパケットや LT の場合だと、トポロジ管理にかかる処理に影響し Goodput が低下したと推測する。逆に最良の隣接ノードのみと OGMs のフラッディングを行う B.A.T.M.A.N はホップ数が増えた場合でも OLSR ほど、性能の低下が見られないことが分かった。しかし、UDP の P_L を見るとかなり高い損失になっている。

KW 検定の結果、 α 値からホスト間のホップ距離による検定 (Intra-groups) では、B, D, F 群で有意水準 5% で帰無仮説が棄却された。Inter-groups の検定では Goodput において 1 → 2, 2 → 3 で有意水準 5% で帰無仮説が棄却された。つまり、この仮説検定において棄却された実験において中央値が異なる分布が存在することが棄却され、中央値に差がない結果が得られたことを示している。

8 むすび

本稿では、小規模な無線アドホックネットワークの実験データの分析を行った。本テストベッドによる OLSR と B.A.T.M.A.N. プロトコルの屋内での伝搬特性が異なるのが分かった。B.A.T.M.A.N. は OLSR をベースに MPR のようなメカニズムを削除し、最良な隣接ノードにフラッディングを行うことで

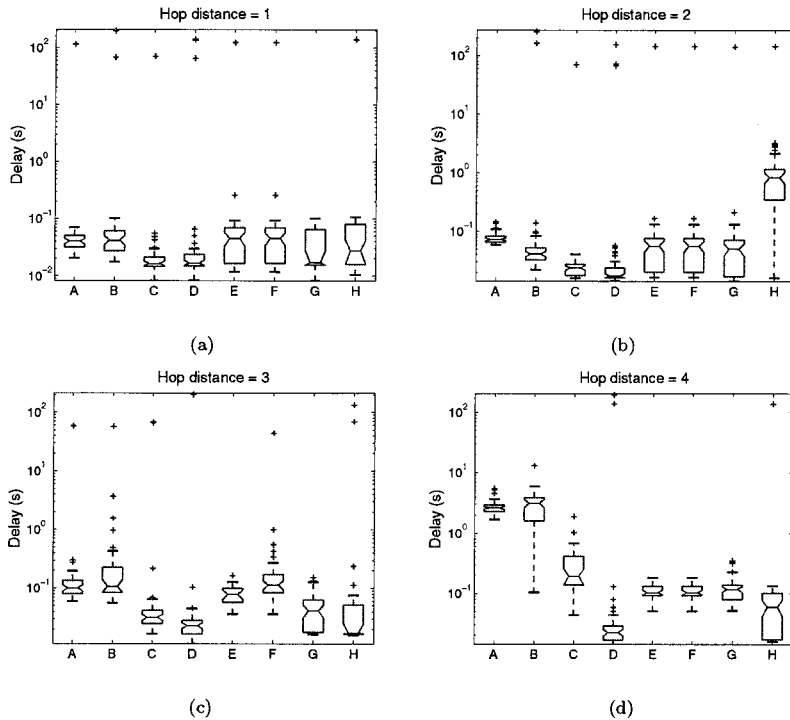


図3 ホップ距離に基づく Round Trip Time の変化

コストを削減することによりホップ数が増えた場合でも OLSR と比較し、安定し高い Goodput を得ることができている。今回利用した B.A.T.M.A.N はまだ開発段階で問題がいくつかあった。今後、MAC プロトコルとの関係や、複数のトラフィックを生成した場合の調査と、新たなスケラビリティの高い経路制御機構について研究を進めていく。本実験を通じて、実験を実施しログを取得・収集・解析と、非常に手間のかかる問題がある。作業を迅速かつ効率的に行える新たなモデルの実装も今後の課題に挙げられる。

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) A. Tønnesen, "OLSRd: Implementation code of the OLSR," <http://www.olsrd.org/>.
- 3) M. Ikeda, G. De Marco, T. Yang, and L. Barolli, "Performance evaluation of a testbed for MANET," *IPSI SIG Notes, 2007-DPS-130/2007-CSEC-36*, vol. 2007, no. 16, pp. 111-116, March 2007.
- 4) 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. of AINA '07, Canada, May 2007*, pp. 7-14.

- 5) 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.
- 6) J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, "Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network," in *Proc. of MobiCom-2005*, 2005, pp. 31-42.
- 7) 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.
- 8) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," RFC 3626 (Experimental), Oct. 2003.
- 9) D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," in *Proc. of MobiCom-2003*, 2003, pp. 134-146.
- 10) A. Neumann, C. Elektra Aichele, and M. Lindner, "B.A.T.M.A.N status report," <https://www.openmesh.net/batman/>.
- 11) "The rt2x00 project," <http://rt2x00.serialmonkey.com/>.
- 12) "D-ITG: Distributed Internet Traffic Generator," <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>.
- 13) A. M. Mood, F. A. Graybill, and D. C. Boes, *Introduction to the Theory of Statistics*. McGraw-Hill Companies, April 1974.