

確率的ルーティングアルゴリズム ARH を用いた無線 LAN 環境における ストリーミング配信実験

岩田 元[†] 松尾 啓志[†]

[†] 名古屋工業大学大学院工学研究科

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

E-mail: [†]gensan@matlab.nitech.ac.jp, ^{††}matsuo@nitech.ac.jp

あらまし モバイルアドホックネットワーク (MANET) に期待が寄せられており、様々な MANET ルーティングプロトコルが提案されている。本稿では、確率的ルーティングアルゴリズムの一つである ARH (Ant routing with routing history) に対する、MANET の特徴を考慮した改良手法を提案する。また、提案手法を Linux カーネル 2.6 上に実装し、実環境を用いた実験・評価を行い、AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) および OLSR (Optimized Link State Routing) と比較する。

キーワード アドホックネットワーク, MANET, ルーティング, 強化学習

Media streaming on MANET using probabilistic routing ARH

Hajime IWATA[†] and Hiroshi MATSUO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

E-mail: [†]gensan@matlab.nitech.ac.jp, ^{††}matsuo@nitech.ac.jp

Abstract We propose a technique that reform probabilistic routing algorithm ARH (Ant routing with routing history) using the characteristic of MANET. In this proposed technique, a node sends a hello packet with a data packet, learns route using intercepted (not received) packet, retransmits a packet that is failed to send, and doesn't use unreliable links. Also, we implemented the proposed technique in Linux kernel 2.6 and compare with AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing), OLSR (Optimized Link State Routing), and original ARH by conducting experiments in real environment.

Key words Ad-hoc Network, MANET, Routing, Reinforcement Learning

1. はじめに

近年、無線端末の急速な普及により、MANET (モバイルアドホックネットワーク) に期待が寄せられている。MANET では、無線基地局を介した通信を行う従来の無線ネットワークとは異なり、既存の通信設備を必要とせずに無線ネットワークを構築可能であり、一時的なネットワークを容易に構築できる。そのため、様々な用途での適用が考えられており、MANET ルーティングプロトコルが多数提案されている [1]~[4]。

また、トポロジが頻繁に変化する動的なネットワークでのルーティングアルゴリズムとして、Q-Routing [5] など、強化学習を応用した確率的手法を適用することが考えられている。中でも、Ants Routing [6] や、ARH (Ant routing with routing history) [7] は、確率的に良好な経路を選択するため、最適な経

路を維持しようとする手法に比べ、動的なネットワークに対する適応力が優れている。

ARH は動的なネットワークへの適応を目的としたルーティングアルゴリズムである。しかし、ARH は、移動する端末間の不安定な無線リンクによって構成される MANET 特有の環境を考慮していない。例えば、MANET 環境では、パケットの受信が非常に不安定な領域 (グレーゾーン) [8] が存在する。また、MANET の中でも、複数の端末が 1 個のチャンネルを共有し、無指向性の電波を用いて端末同士が通信するネットワークでは、各端末は近隣端末が送信したパケットを傍受することが可能である (図 1)。

本稿では、ARH に対して改良を行い、上記のような MANET 特有の環境を考慮した手法を提案する。また、提案手法を Linux 上に実装し、IEEE 802.11b 無線ネットワークを用いた実験を

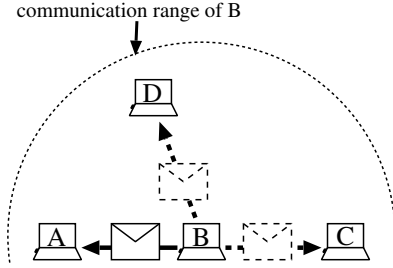


図 1 パケットの送信
Fig. 1 Sending packet.

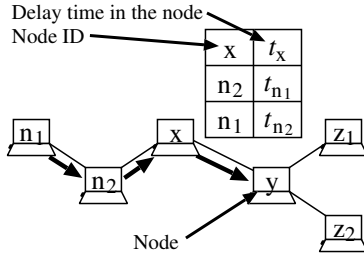


図 2 経路履歴情報
Fig. 2 Information of route history.

行い, AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) [2], OLSR (Optimized LinkState Routing) [3], および改良手法を適用しない ARH と比較する。

2. ARH

ARH は, 強化学習を基本としたルーティングアルゴリズムであり, パケットの転送経路を確率的に選択することで動的なネットワークに対応する. ARH では, パケットを受信した際に, 受信したパケットと逆向きの経路を, 有効な経路として学習する.

2.1 経路選択

ARH では, 端末がパケットを送信する場合, 中継端末を, ルーティングテーブルに記録された確率値 $P_y(d, z)$ (端末 y が, 宛先が d であるパケットの中継端末として近隣端末 z を選択する確率) にしたがって, 近隣端末から確率的に選択する.

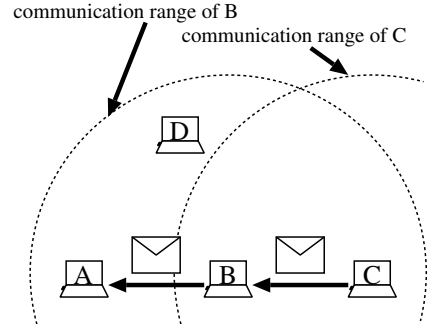
2.2 経路履歴情報

ARH では, 端末が送信するパケットに, 中継端末の ID とその端末内部での遅延時間からなる経路履歴情報を付加する (図 2). 経路履歴情報は, 中継端末がパケットを中継する際に更新される.

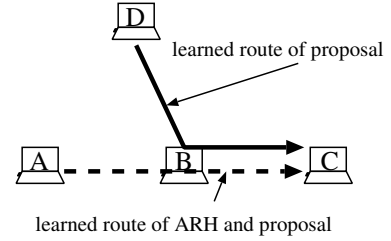
2.3 経路の学習

経路の学習は, 経路履歴情報を用いて, パケットを受信 (中継) した際に行う. 学習は, 経路履歴情報に記録された端末を宛先としたルーティングテーブル全てに対して, 式 (1), 式 (2) を用いて行う.

$$\Delta p = \gamma^h \cdot \frac{k}{f(t_{d'})} \quad (0 < \gamma < 1, k > 0) \quad (1)$$



(a) Forwarding packet.



(b) learned route.

図 3 経路の学習

Fig. 3 Route learning.

$$P_y(d', z) = \begin{cases} \frac{P_y(d', z) + \Delta p}{1 + \Delta p} & (z = x) \\ \frac{P_y(d', z)}{1 + \Delta p} & (z \in \text{neighbor of } y, z \neq x) \end{cases} \quad (2)$$

ここで, k は学習率, γ は割引率, $f(t)$ は単調非減少関数, d' は受信したパケットの経路履歴情報に記録された端末, x は受信したパケットの直前の中継端末, $t_{d'}$ は d' から x までの所要時間, h は y から d' までのホップ数である.

式 (1) は確率の変化量を表し, 式 (2) で d' 宛てのパケットを送信する際に, 中継端末として x を選択する確率を更新し, 受信したパケットと逆向きの経路を学習する.

3. MANET に適応させるための改良方式の提案

3.1 経路の学習

従来の ARH では, パケットを受信した時点で経路の学習を行う. 例えば, 端末 A が図 3 (a) に示す経路で転送されたパケットを受信した場合, 端末 A は, 図 3 (b) の点線の経路を学習する. したがって, パケットの転送経路に含まれない端末 (図 3 の端末 D) は, 他の端末までの経路を学習することができない. しかし, パケットを転送する端末の近隣端末は, 転送されたパケットを傍受することができる. そこで, 傍受したパケットも受信したパケットと同様に経路の学習に用いる改良を行う (端末 D が図 3 (b) の実線の経路を学習する).

このような実装を行うことにより, 経路に含まれる端末だけでなく, パケットを転送する端末の近隣端末も, 他の端末までの経路を学習することができ, 学習効率を高めることができる.

3.2 Hello パケットの相乗り

一般的に、MANET におけるルーティングアルゴリズムでは、近隣端末の管理を行うために、各端末は Hello パケットを定期的にブロードキャストする [2], [3]. しかし、ある端末が送信したデータパケットは近隣端末が傍受でき、Hello パケットと同様に近隣端末の管理に利用できるため、Hello パケットの送信は冗長である。

また、文献 [8] では、変調方式の違いなどにより、Hello パケットはデータパケットと異なる物理的な伝送特性を示し、グレーゾーンの発生原因になっていることが述べられている。

そこで、データパケットに Hello パケットを相乗りさせる手法を用いる。この手法では、端末は近隣端末が送信するデータパケットを傍受し、傍受したデータパケットを Hello パケットと同等に扱う。したがって、各端末は定期的に Hello パケットを送信する必要はなく、一定期間データパケットの送信を行わなかった場合にのみ送信すれば良いため、Hello パケットの送信回数を削減し、無線チャンネルを有効に利用することができる。

また、データパケットに Hello パケットを相乗りさせることにより、Hello パケットとデータパケットの物理的な伝送特性の違いを軽減することができる。

3.3 リンクの安定性確認

提案手法では、3.2 節で説明した Hello パケットの相乗りに加えて、ACK を用いて Hello パケットが届いた端末を調べる手法を用いる。この手法では、各近隣端末に届いた Hello パケットの割合（到達率）を調べることで、各近隣端末が、自身の安定した無線通信範囲内に存在するかどうか判定することができる。したがって、到達率を調べることで、グレーゾーンに存在する端末にパケットを中継しないことが可能となる。

さらに、ACK はデータパケットに相乗りさせることで、無線チャンネルの有効利用を図る。また、3.1 節、3.2 節で示したように、各端末は近隣端末が送信するパケットを傍受できる。したがって、データパケットの中継先端末とは異なる端末に対する ACK を相乗りさせることも可能である。また、1 個のパケットに、同時に複数の ACK を相乗りさせることも可能である。

図 4 にリンクの安定性確認手法を用いたパケット交換方式を示す。この例では、time 1 で B が A にデータパケットを送信し、time 2 で C が D に、time 3 で D が B にデータパケットを送信している。この 3 個のデータパケットには、それぞれ Hello パケットが相乗りしている。また、time 2 で送信されるデータパケットには time 1 で送信されたパケットに対する ACK が、time 3 で送信されるデータパケットには time 1 および time 2 で送信されたパケットに対する ACK が相乗りしている。

3.4 再送

3.3 節で説明した ACK は、パケットを傍受した近隣端末だけでなく、データパケットの中継端末からも送信される。つまり、データパケットを送信した端末は、リンク確認に用いられる ACK から、データパケットが正しく中継されたかどうかを確認することができる。

提案手法では、この情報を用いて、正しく中継されなかったデータパケットの再送を行う。さらに、再送するとき、以下

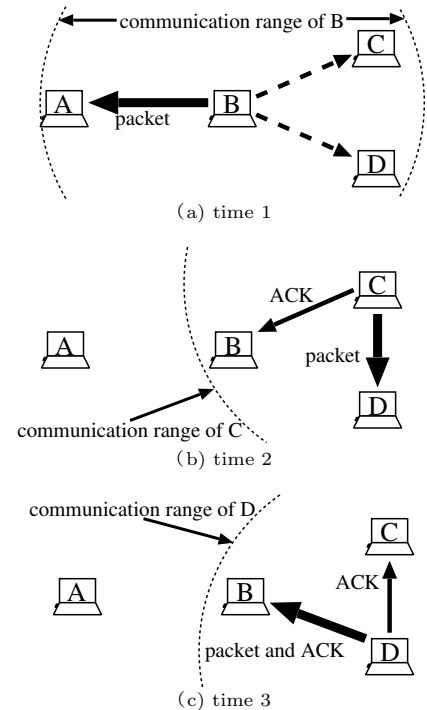


図 4 提案手法でのパケットの交換

Fig. 4 Exchanging packet of proposal.

の処理を行う。

- 再送前に用いた経路を選択する確率を下げる。
- 再送するデータパケットの中継端末の再選択。

これらの処理は、正しくパケットが中継できなかった場合、再送前に用いた経路は信頼できないと考えられるため、再送前の経路の使用を抑制するために行う。

4. 提案手法の実装

提案手法を Linux カーネル 2.6 で動作するカーネルモジュールとして実装した。本章ではその実装方法について述べる。

ARH は、確率的なルーティングアルゴリズムである。そのため、決定的なルーティングを前提としている IP ネットワークのルーティング機構を用いて ARH を実装することは困難である。そこで、OSI プロトコルスタックにおけるデータリンク層とネットワーク層の間に、ARH で必要な処理を行う ARH 層を追加することで ARH を実装した。ARH 層では、以下の処理を行う。

- 有効な無線リンクの管理
- パケットに付加する経路履歴情報の更新
- 経路の学習
- 送信されるパケットの中継端末選択
- 再送

4.1 送信処理

送信処理の際は、ARH 層はデータリンク層の一部として振る舞い、ネットワーク層から送信するデータパケットを受け取って、以下の処理を行う。

- (1) データパケットの中継端末を選択する。
- (2) 経路履歴情報をパケットに付加する。

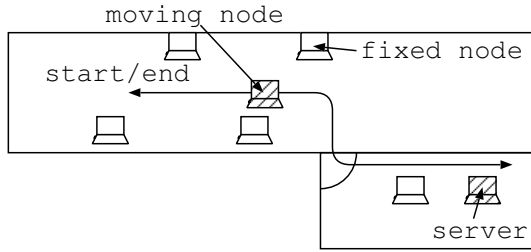


図 5 実験環境

Fig. 5 Experimental environment.

(3) 相乗りさせる ACK をパケットに付加する。

(4) パケットを真のデータリンク層^(注1)に渡す。

提案手法では、送信されるパケットは近隣端末が傍受する必要がある。そのため、パケットは無線ネットワーク上にブロードキャストを用いて送出する^(注2)。

4.2 受信処理

受信処理の際は、ARH 層はネットワーク層の一部として振る舞い、データリンク層から受信したパケットを受け取って、以下の処理を行う^(注3)。

(1) ACK 送信キューに受信したパケットの ACK を挿入する。

(2) 受信したパケットに相乗りしている ACK を解析する(有効な物理リンクを更新する)。

(3) 受信したパケットを用いて経路を学習する。

(4) 受信したデータパケットの中継先が自身であった場合、データパケットをネットワーク層に渡す。自身でなかった場合(傍受したパケットであった場合)、パケットを破棄する。

4.3 中継処理

ARH 層では、データパケットの中継に関する処理は行わず、中継先が自身であるパケットを全てネットワーク層に渡し、ルーティングはネットワーク層が行うことでパケットの中継を実現する。

このようにすることで、パケットはネットワーク層で正しく中継され、宛先まで転送される。また、OS のルーティング機構を利用するため、ARH ネットワークと IP ネットワークの間のゲートウェイとして設定するなど、柔軟な設定を行うことが容易である。

5. 実験と評価

研究室およびその廊下に図 5 のように 6 台の固定端末と 1 台の移動端末を配置し、実験を行った。図 5 の配置では、サーバと最も離れた端末が 2 ホップで通信できる。実験で用いたパラメータを表 1 に示す。

(注1): 以降、本来の OSI プロトコルスタックのデータリンク層、ネットワーク層を ARH 層と区別し、単にデータリンク層、ネットワーク層と表記する。

(注2): データパケットの中継先は ARH 層のヘッダに挿入される。

(注3): 4.1 節で示したように、送信するパケットは無線ネットワーク上にブロードキャストで送出する。したがって、傍受したパケットもデータリンク層から受け取ることができる。

表 1 実験で用いたパラメータ
Table 1 Parameter of Experiment.

共通パラメータ	
k	50/ μ s
γ	0.5
最大経路履歴件数	5 件
選択確率の上限	90%
Hello パケットの最低送信間隔	500ms
再送パラメータ	
パケット受信後、ACK 送信する期限	4ms
最大再送回数	2 回
リンク確認を用いない場合のパラメータ	
Hello パケット有効期間	受信後 1.5s
リンク確認を用いる場合のパラメータ	
到達率測定対象パケット	送信後 1.5s
近隣端末を有効とみなす到達率	以下のパケット 75%以上
1 パケットに相乗りできる最大 ACK 数	6 個
パケット傍受後、ACK 送信する期限 ^(注4)	500ms

表 2 各方式の結果
Table 2 Result of each method.

方法	平均 RTT	パケットロス率
改良なし	5.31 ms	9.0%
Hello のみ	5.01 ms	13.2%
Hello, 学習	4.29 ms	16.4%
Hello, リンク確認	5.63 ms	8.9%
Hello, リンク確認, 再送	6.91 ms	7.3%
Hello, リンク確認, 学習	4.72 ms	8.2%
全て適用	5.94 ms	5.0%
AODV	11.69 ms	13.9%
OLSR	5.25 ms	18.1%

5.1 実験 1

ping コマンドを用いて、33ms 毎に移動端末から 1000 バイトのパケットを送信することで、サーバとの往復遅延時間 (RTT) とパケットロス率を測定し、提案手法の有効性を検証した。さらに、AODV (実装として AODV-UU [11] をデフォルトのパラメータで使用した)、および OLSR (実装として olsrd [12] をデフォルトのパラメータで使用した) と比較した。測定は移動端末を 1m/s 程度の速度で移動させながら 240 秒間行った (測定中に移動端末を 4 往復させた)。

実験結果を表 2 に示す。表 2 から、提案手法のうち、リンク確認を行わない場合は、パケットロス率が増加することがわかる。これは、提案手法の実装では、無線ネットワーク上にブロードキャストを用いてパケットを送出するため、データリンク層で再送が行われなためである。

また、経路の学習方法を変更することで RTT が小さくなることがわかる。したがって、傍受したパケットを用いて経路を学習することで、ネットワークの変化に対する適応力が向上し

(注4): 傍受したパケットの ACK は、リンクの確認にのみ用いる。したがって、すぐに ACK を送信する必要はない。

たとえられる。しかし、グレーゾーンに存在する近隣端末が送信したパケットを経路の学習に用いやすくなるため、リンク確認を行わない場合には、学習方法を変更することでパケットロス率が増加した。

一方、リンク確認を行うことで、パケットロス率は小さくなることがわかる。これは、リンク確認によって、適切にグレーゾーンに存在する近隣端末を中継端末候補から除けたためと考えられる。しかし、よりホップ数の大きい経路を使用することとなり、RTTは大きくなった。

また、再送によって、さらにパケットロス率が下がることがわかる。しかし、再送が原因で、一時的にネットワークが輻輳を起し、パケットロス率が増加することがあり、パケットロス率が0にはならなかった。

OLSRでは、常に最短の経路を維持しようとするため、RTTは小さくなる。しかし、経路の構築にネットワーク全体の情報が必要であるため、頻繁にトポロジが変化するネットワークでは、有効な経路を確立できず、パケットロス率が増加する。また、AODVでは、グレーゾーンに存在する端末を中継端末として使用した場合に、データリンク層でのパケット再送が頻繁に発生し、RTTが増加したと考えられる。

表2から、提案手法を用いることで、少ないRTTの増加で、パケットロス率を小さくすることができていることがわかる。

5.2 実験 2

マルチメディアコンテンツのストリーミング再生を想定し、TCPを用いて、30フレーム/秒のデータ(256kbps)をサーバから移動端末に送信し、移動端末での各フレームの到着時刻を測定することで、改良手法を適用したARHと、改良手法を適用しないARH、AODV、およびOLSRを比較した。測定は1800フレーム(60秒間)行った(測定中に移動端末を1往復させた)。

実験結果を図6に示す。また、ARHについては、サーバから移動端末までの最短ホップ数および移動端末が受信したパケットが使用した経路のホップ数を、AODV、OLSRについてはルーティングテーブルにしたがった経路のホップ数を同図に示す。

図6(a)～(g)では、使用したホップ数にばらつきがある。これは、ARHは確率的なアルゴリズムであり、固定的な経路を確立しないためである。

図6から、学習方法の変更を行わない場合には、1ホップで通信できる場合にも、2ホップ以上の経路を使用していることがわかる。これは、より最適な1ホップの経路を学習できず、2ホップの経路を使い続けるためである。一方、学習方法を変更することで、1ホップの経路を学習し、1ホップの経路を用いていることがわかる。

また、リンク確認を行うことで、より安定な通信を行うことができ、トポロジ変化が及ぼす影響が小さくなることがわかる。

また、改良手法を適用しないARH、AODV、OLSRでは、トポロジが変化する前後でフレームが届かなくなることがわかる。一方、改良手法を適用したARHではトポロジが変化しても安定してフレームが届くことがわかる。したがって、改良手

法を適用したARHを用いた場合、MANET上で移動しながらであっても、安定したマルチメディアコンテンツのストリーミング再生を行うことが可能であると考えられる。

6. 関連研究

Thoが提案したABR(Associativity-Based Routing)[4]では、端末の移動を考慮し、端末間リンクの結合性と呼ばれる概念を用いる。ABRでは、各端末は一定間隔でビーコンをブロードキャストする。近隣端末(1ホップで通信可能な端末)の移動が低速、またはない場合や、近隣端末がビーコンを送信する端末と同一の方向に移動する場合、近隣端末が受信するビーコン数は多くなる。ABRは、受信したビーコン数に基づき、持続性が高いと期待できる経路を選択することで、ネットワークの動的な変化に対応する。

板谷らが提案したOLSR-SS[9]では、OLSRに、Helloパケットの信号強度を監視し、信号強度の変動幅を考慮した中継端末候補選択手法を適用している。OLSR-SSでは、各端末が近隣端末からのHelloパケットの受信信号強度を監視し、各端末が自律的に受信信号強度閾値を求め、受信信号強度が弱い端末を中継端末として使用しない。

また、高橋らが提案したETR(Estimated-TCP-Throughput Maximization based Routing)[10]では、各経路の往復遅延時間および往復パケット喪失率からTCPスループットを推定し、推定値が最良となる経路を用いる。

これらの手法では、最短経路ではなく、より安定した経路を用いることで安定な通信を行うことを実現している。しかし、OLSR-SS、ETRでは、ネットワークの変化に対する適応能力に関しては考慮されていない。

7. まとめと今後の課題

本稿では、ARHに無指向性の電波を用いるMANETの特徴を考慮した改良手法の提案を行った。

提案手法では、近隣端末から傍受できるパケットを利用して、以下の改良を行った。

- 近隣端末が、傍受したパケットを用いて経路の学習を行うこと
- Helloパケットをデータパケットに相乗りさせること
また、グレーゾーンの問題に対応するために以下の改良を行った。
- パケットの中継に双方向かつ安定しているリンクのみを用いること
- パケットの再送を行うこと

さらに、提案手法をLinuxカーネル2.6上に実装し、IEEE802.11b無線ネットワークを用いて実験を行った。実験の結果から、改良手法を適用したARHでは、端末が移動しながら通信を行った場合でも、AODV、OLSR、改良手法を適用しないARHと比較して、安定な通信を行うことが可能であることを確認した。したがって、提案手法を用いれば、MANET上で移動しながらでも、安定したマルチメディアコンテンツのストリーミング再生が可能であると考えられる。

しかし、本稿では、7台、最大2ホップの小規模なネットワー

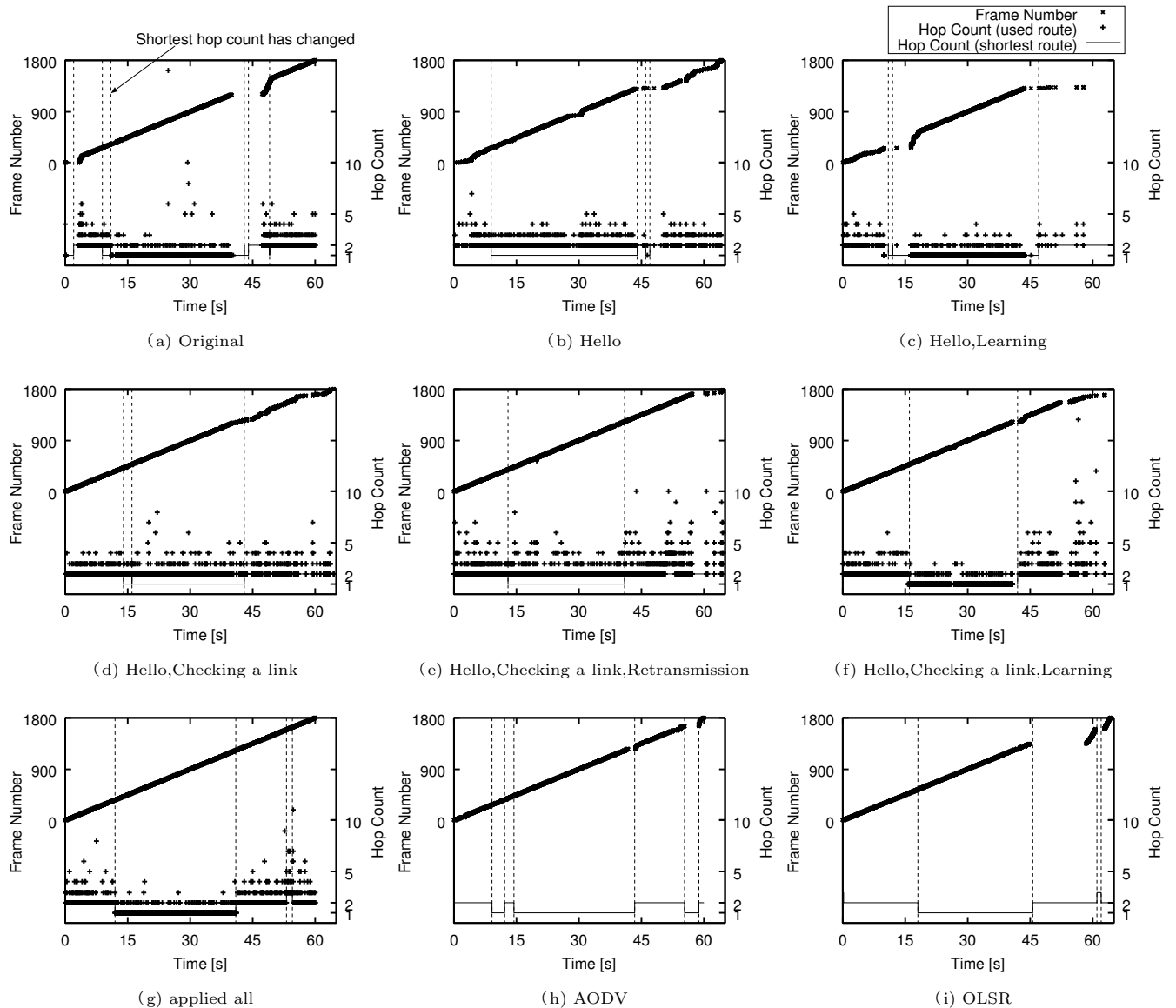


図 6 ホップ数とフレーム番号

Fig. 6 Hop count and frame number.

クでしか実験を行っていない。今後、より大規模なネットワークへ適用し、実証実験やシミュレーションによって提案手法の有効性の検証を行っていく予定である。

文 献

- [1] D. B. Johnson, D. A. Maltz and Y.-C. Hu: “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks”, IETF Internet-Draft (Jul. 2004).
- [2] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer and S. R. Das: “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing”, IETF RFC 3561 (Jul. 2003).
- [3] T. H. Clausen and P. Jacquet: “Optimized Link State Routing”, IETF RFC 3626 (Oct. 2003).
- [4] C.-K. Tho: “Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks”, Wireless Personal Communications, **4**, 2, pp. 103–139 (1997).
- [5] M. Littman and J. Boyan: “A distributed reinforcement learning scheme for network routing”, Technical Report CS-93-165, School of Computer Science, Computer Carnegie Mellon University (1993).
- [6] D. Subramanian, P. Druschel and J. Chen: “Ants and reinforcement learning: A case study in routing in dynamic

networks”, Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, **2**, pp. 832–839 (1997).

- [7] 斎藤, 松尾: “動的な環境下における履歴情報を用いた確率的ルーティング”, 電子情報通信学会技術研究報告. SST, スペクトル拡散, **SST2001-168**, pp. 289–296 (Mar. 2002).
- [8] H. Lundgren, E. Nordström and C. Tschudin: “Coping with communication gray zones in IEEE 802.11b based ad hoc networks”, 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia (WoWMoM 2002), ACM Press, pp. 49–55 (2002).
- [9] 板谷, 長谷川, 長谷川, P. Davis, 門脇, 小花: “不安定な無線通信環境における大規模アドホックネットワークの安定化”, 情報処理学会論文誌, **46**, 12, pp. 2048–2856 (Dec. 2005).
- [10] 高橋, 斎藤, 間, 戸辺, 徳田: “Manet における TCP スループット推定による経路選択機構の実環境評価”, 情報処理学会論文誌, **46**, 12, pp. 2048–2856 (Dec. 2005).
- [11] Uppsala University: “AODV-UU”
<http://core.it.uu.se/AdHoc/ImplementationPortal>.
- [12] UniK-University Graduate Center: “OLSR.ORG”
<http://www.olsr.org/>