

MANET 環境に適した確率的ルーティングアルゴリズムの提案と VoIP を用いた評価

岩田 元[†] 齋藤 彰一[†] 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

あらまし 無線端末の普及にともない、モバイルアドホックネットワーク (MANET) が注目されており、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、文献 [1] で我々が提案した手法に対して、MAC プロトコルと連携したリンク確認手法、学習手法の改良を提案する。さらに、VoIP を用いてシミュレーション評価を行い、提案手法を用いることで、AODV と比較して到達率、遅延時間が改善することを示す。

Proposal of probabilistic routing algorithm adapting to MANET and estimation using VoIP

Hajime IWATA[†], Shoichi SAITO[†], and Hiroshi MATSUO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

Abstract The mobile ad-hoc network (MANET) is paid to attention because mobile terminal became popular. In this paper, we propose a technique that is checking untrusted link in cooperation with the MAC protocol and a new learning method by the improvement of [1]. Also, we estimate the proposed technique by using simulation using VoIP. Result of simulations show that the proposed technique achieves lower packet drop ratio and end-to-end delay than AODV and [1].

1. はじめに

近年、無線端末の急速な普及にともない、MANET (モバイルアドホックネットワーク) [2] が注目されている。MANET では、無線基地局を介して通信を行う従来の無線ネットワークとは異なり、無線端末どうしが自律分散的に直接通信を行うことにより、通信設備を設置することなく無線ネットワークを構築可能である。そのため、災害地、僻地での利用やセンサネットワーク、車々間通信など、様々な無線ネットワークへ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 [3] ~ [6]。

また、Q-Routing [7]、Ants Routing [8] など、強化学習を用いた確率的な手法を、MANET などの頻りにトポロジが変化するネットワークでのルーティングに応用することが考えられている。中でも、ARH (Ant Routing with routing history) [9] は、経路履歴を用い、使用した経路と逆向きの経路を学習することで効率的な学習を実現している。

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かった。例えば、MANET の中でも、複数の端末が 1 個の無線チャンネルを共有し、無指向性のアンテナを用いて通信を行うネットワークを考えると、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)。また、MANET 環境では、パケットの受信状態が非常に不安定な領域 (グレーゾーン) [10] が存在する。

我々は、ARH を改良し、これらの特徴を考慮したルーティング手法を提案してきた [1]。文献 [1] では、傍受したパケットを用いて制御メッセージの削減および学習の効率化を図る手法、リンク確認を行い不安定なリンクの使用を抑制する手法、再送の効率化を行う手法を提案した。

本稿では、MAC 層とのより緊密な連携を行い、より制度の高いリンク確認手法を提案する。また、より効率的な学習を実現するため、学習方式の改良を行う。

さらに、提案手法を用いて、車々間通信を想定したシ

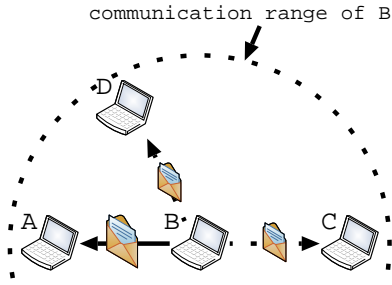


図 1 パケットの送信
Fig.1 Sending packet.

		Next relay node		
		z ₁	z ₂	z ₃
Destination node	d ₁	0.7	0.2	0.1
	d ₂	0.9	0.1	0.0
	d ₃	1.0	0.0	0.0
	d ₄	0.1	0.9	0.0
	d ₅	0.0	0.0	1.0

図 2 ルーティングテーブル
Fig.2 Routing table.

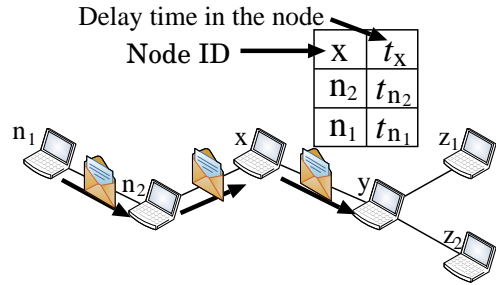


図 3 経路履歴情報
Fig.3 Information of route history.

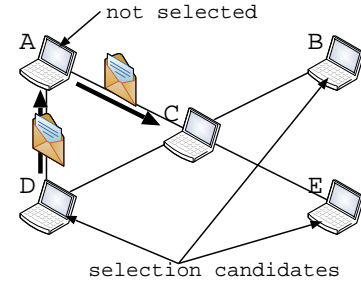


図 4 no return rule
Fig.4 No return rule.

ミュレーション評価を行い、AODV、文献 [1] の手法と比較する。

2. 従来手法

2.1 ARH

ARH は、強化学習を応用したルーティングアルゴリズムであり、中継端末を確率的に選択し、固定的な経路を確立しない。各端末は、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が使用されるように中継端末の選択確率を増加させ、経路を学習する。

2.1.1 経路選択

ARH では、端末 y がパケットを送信する場合、中継端末を、自身が持つルーティングテーブル (図 2) に記録された確率値 $P_y(d, z)$ (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。

2.1.2 経路履歴情報

ARH では、端末が送信するパケットに、送信した端末の 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 3)。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。

2.1.3 経路の学習

各端末は、パケットを受信 (中継) した際に、付加された経路履歴情報を用いて経路の学習を行う。学習は、経路履歴情報に記録された端末 (図 3 の x, n_2, n_1) を宛先としたルーティングテーブルのエントリ全てに対して、式 (1)、式 (2) を用いて行う。

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

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

ここで、 k は学習率、 γ は割引率、 $f(t_{d'})$ は単調非減少関数^(注1)、 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 d' から x までのホップ数である。

式 (1) は確率の変化量を表し、送信元端末からの所要時間 $t_{d'}$ 、ホップ数 h が小さいほど大きくなる。式 (2) で d' 宛のパケットの中継端末として x を選択する確率を Δp だけ増加させた後、確率を正規化することにより、受信したパケットと逆向きの経路を学習する。

2.1.4 no return rule

確率的手法では、パケットが直前の中継端末に戻されることがある。しかし、そのような 2 ホップのループ経路は学習の役には立たない。そのため、ARH では、直前の中継端末に戻す選択は選択肢から除外される。図 4 に例を示す。この例では、C が A からパケットを受けとっている。A、B、D、E は C の近隣端末であり、パケットの中継先候補である。しかし、A は直前の中継端末であ

(注1): 本稿では、 $f(t_{d'}) = t_{d'}$ とし、 Δp は $t_{d'}$ に反比例する。

るため、選択候補から除外され、中継先は B, D または E となる。

2.2 MANET に適応させるための改良

我々は、文献 [1] で、ARH に対して MANET に適応させるための改良として、以下の手法を提案した。本節では、我々が文献 [1] で提案した手法を説明する。

2.2.1 Hello パケットの相乗り

改良手法では、Hello パケットをその他のパケットに相乗りさせることで制御メッセージ数の削減を図っている。この手法では、近隣端末が送信したパケットを傍受し、Hello パケットとみなして処理する。そのため、一定期間パケットを送信していない場合のみ Hello パケットを送信すれば良く、制御メッセージ数が削減できる。

2.2.2 リンクの安定性確認

改良手法では、前節の Hello パケットの相乗りに加えて、Hello パケットに対して到達通知を返し、リンクの安定性を確認する。到達通知パケットから、近隣端末に正しく届いた Hello パケットの割合を計測することにより、不安定なリンクを発見することを可能にしている。さらに不安定なリンクは無効化されるため、安定なリンクのみを用いることができる。また、Hello パケット同様、到達通知を他のパケットに相乗りさせることで制御メッセージ数の増加を抑制している。

2.2.3 学習の効率化

従来の ARH では、パケットを受信しなければ学習を行うことができなかった。改良手法では、近隣端末が送信したパケットを傍受して学習に用い、学習の効率化を図っている。

2.2.4 再送の効率化

IEEE 802.11 など、MANET で利用される MAC プロトコルの多くは再送機構を有する。しかし、MAC プロトコルの再送機構は、パケットの衝突や外乱を想定しており、端末の移動などによる物理リンクの状態変化は考慮していない。そのため、従来の MAC プロトコルの再送機構では、同一の中継先にパケットが再送される。しかし、用いたリンクが不安定であった場合、再送を行っても中継先にパケットが届く可能性は低い。改良手法では、この問題に対処するため、MAC プロトコルを改良し、再送時に以下の処理を行う。

- 送信に失敗したリンクに対して、負の学習を行う。
- 再送されるパケットの中継先を選択しなおす。

3. 提案手法

本章では、文献 [1] の手法に対して改良を行い、より制度の高いリンク確認手法およびより効率的な学習手法を提案する。

3.1 MAC プロトコルと連携したリンク確認

IP 層から MAC 層に渡されるパケットの中には、送信

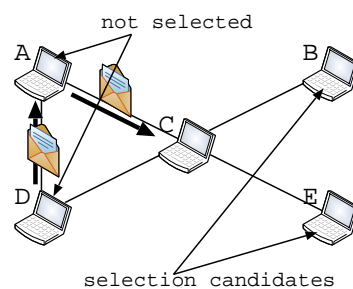


図 5 no return rule の改良

Fig. 5 Improvement of no return rule.

キューのオーバーフローや MAC プロトコルによって破棄され、実際には物理層に渡されないものが存在する。逆に、MAC プロトコルによる再送によって、同じパケットが複数回物理層に渡され、送信される場合もある。これらにより、本来受け取るはずの到達通知を受け取れなかったり、本来受け取る以上の到達通知を受け取ったりするため、リンク安定度が不正確となる。

そこで、MAC プロトコルと連携してリンク確認を行う手法を提案する (詳しくは 4.1 節で述べる)。

3.2 no return rule の改良

確率的な手法である ARH では、no return rule を用いても経路のループが発生する場合がある。

ループ経路を用いてパケットが転送されると、経路長が増加してしまうだけでなく、同一の端末を複数回探索することとなり、探索効率も低下してしまう。

一方で、ARH では、履歴を用いることで過去に中継した端末を調べることが可能である。

そこで、提案手法では、no return rule を改良し、直前の中継端末だけでなく、履歴に含まれる端末全てを中継先の選択候補から除外する。図 5 に D から A を中継したパケットを C が受信した場合の例を示す。この図は図 4 と同一の状況を表している。しかし、改良版 no return rule では、直前端末だけでなく、履歴に含まれる端末も中継先候補から除外されるため、中継先候補は B または D となる。

この拡張により、一度探索された端末にパケットが戻ることがないため、no return rule 以上に探索効率の改善が期待できる。

3.3 経路長に依存しない学習手法

2.1.3 項で述べたように、ARH で用いられる学習アルゴリズムでは、経路長および遅延時間が短いほど学習量が大きくなる。そのため、学習効果が経路長に依存し、宛先までの経路が短い場合には経験への固執が、長い場合には学習速度の問題が発生してしまう [11]。

そこで、提案手法では、式 (1) の学習量を式 (3) に変更し、学習の経路長依存を解決する。

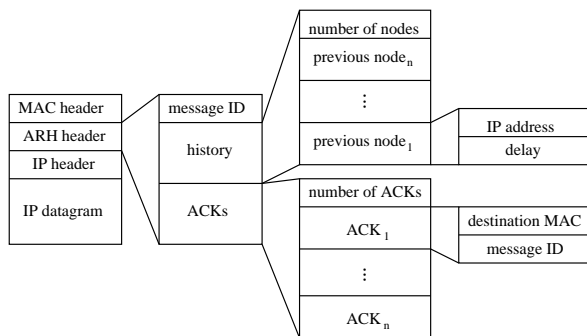


図 6 ヘッダ構造
Fig. 6 Structure of header.

$$\Delta p = \gamma^{(h-h_{\min})} \cdot k \cdot \frac{t_{d \min}}{t_d} \quad (3)$$

ここで、 h_{\min} 、 $t_{d \min}$ はそれぞれ、過去一定時間内に同一のエントリに対する学習に用いられたホップ数 h および内部遅延時間の総和 t_d の最小値とする。式 (3) は、 h 、 t_d の絶対値には依存せず、既知の最小値をもとに学習量を決定するため、提案手法では学習は経路長に依存しにくい。そのため、経験への固執の問題と学習速度の問題を同時に解決することができる。

4. シミュレーション評価

提案手法をネットワークシミュレータ QualNet [12] 4.0.1 上に実装し、シミュレーション評価を行った。

4.1 実装方法

提案手法は IP 層のルーティング機構の他、MAC 層の改良を必要とする。

ルーティング処理のうち、IP 層では以下の処理のみを行う。

- IP ヘッダの更新
- 出力インターフェースの決定

また、以下の処理は MAC 層で実現した。

- パケットの中継先の決定
- パケットの再送
- 経路の学習
- 近隣端末の管理

4.1.1 ヘッダ構造

提案手法のヘッダ構造を図 6 に示す。ARH で必要な経路履歴情報や、提案手法に必要な到達通知は、メッセージ ID と共に MAC ヘッダと IP ヘッダの間に挿入する。これにより、IP ヘッダの長さ制限に依存することなく ARH ヘッダを構築することができる。

ARH ヘッダは、MAC 層からパケットを送信する直前に MAC ヘッダと共に追加され、MAC 層でパケットを受信した時には、履歴情報を退避した後、IP 層にパケットを渡す前に除去される。

1 個のパケットに複数の宛先に対する到達通知を相乗り

可能とするため、到達通知の各エントリには、メッセージ ID の他にそのエントリの宛先を示す MAC アドレスが必要である。

4.1.2 IP 層の処理

IP 層では、上位層または MAC 層から受け取ったパケットを適切な上位層または MAC 層に渡す。この時、ARH ヘッダの構築、中継端末の選択は MAC 層で行うものとし、IP 層では行わないこととした。

4.1.3 送信処理

MAC 層から物理層にパケットを送信する場合、提案手法では以下の処理を行う。

- (1) パケットの中継先の選択
- (2) メッセージ ID の付与
- (3) 経路履歴の付加 (更新)
- (4) 相乗りさせる到達通知の付加
- (5) 最終 Hello パケット送信時刻の更新

パケットの送信に先立って行われる RTS/CTS の交換に必要なため、(1) は RTS 送信前に行う。

一方、(2)~(5) は CTS を受信した後、パケットを送信する直前に行う。これにより、MAC プロトコルによって捨てられ、実際には送信されないパケットへの ID 付与や到達通知の相乗り、再送による重複した ID の付与や到達通知の相乗りを防ぐことができ、物理層のリンク安定度を正確に反映することができる。さらに、MAC フレームが最大サイズを越えない範囲で複数個の到達通知を相乗り可能とした。

4.1.4 受信処理

MAC 層で物理層からパケットを受信 (または傍受) した場合、以下の処理を行う。

- 到達通知キューに到達通知を追加
- Hello パケット到達表の更新
- 経路の学習

処理後、中継先が自身のパケットの場合には、パケットは IP 層に渡され、受信または中継処理が行われる。一方、傍受されたパケットの場合には、IP 層に渡す必要は無いため、破棄される。

4.1.5 再送処理

MAC 層で再送を行う場合、負の学習を行った後、送信処理を行う。負の学習は、ルーティングテーブル中の全ての宛先エントリに対して、 x を負の学習を行う中継先端末、 Δp を負の定数として式 (2) を適用することで行う。

また、MAC 層での送信処理中に、中継端末の選択処理が含まれるため、2.2.4 項で説明した中継端末の再選択処理は、送信処理で実現している。

4.2 実験環境

実験は、車々間通信を想定し、QualNet に実装された VoIP アプリケーションを用いて行った。

初期状態として、1km 四方のエリアに 100m 間隔に縦

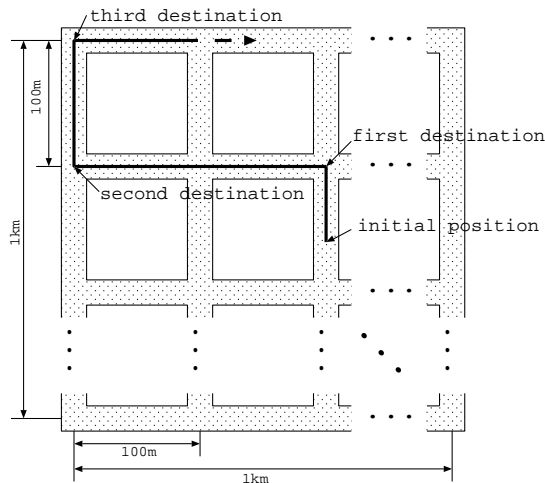


図 7 想定する環境

Fig. 7 Experimental environment.

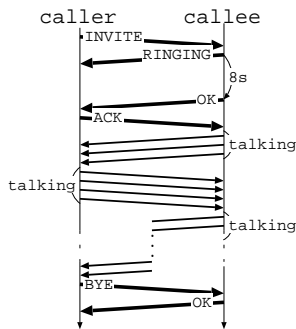


図 8 VoIP フロー

Fig. 8 VoIP flow.

横 11 本ずつの道路を想定し、100 台の端末を道路上にランダムに配置した。端末は、11m/s(約 40km/h)で移動するものとし、移動先は現在走行中の道路上にある交差点がランダムに選ばれる。移動先に到着すると、端末は、交差する道路上にある交差点から新たな移動先を選択した後、右折または左折し、移動先へと向かうものとする(図 7)。

アプリケーションは VoIP(Voice over IP) を用い、ランダムに選ばれた端末がランダムに選ばれた端末に対して SIP(Session Initiation Protocol) を用いて接続要求を送信する。接続要求を受け取った端末は、ユーザの呼び出しを 8 秒間行った後、ユーザが応答し、接続が確立するものとする。

接続が確立すると、端末間で RTP(Real-time Transport Protocol) を用いて会話が行われる。会話は、一方が平均 5 秒の指数分布時間だけ発話した後、発話の終了を受けて他方が同様に発話する。発話中は話し手から 20m 秒毎に 64kbps のレートで VoIP パケットが送信され、聞き手は VoIP パケットを送信しない。

図 8 にフローを示す。図 8 では、呼び出し側が受け手側に向かって通話している。太い矢印が SIP パケット、細

表 1 実験環境

Table 1 Simulation parameter.

シミュレーションエリア	1km × 1km
端末数	100 台
移動速度	11m/s(約 40km/h)
シミュレーション時間	1 時間
MAC プロトコル	IEEE 802.11g
伝送レート	54Mbps
送信電力	23dBm
アプリケーション	VoIP
平均発呼率	60s/回
平均通話時間	300s

表 2 実験で用いたパラメータ

Table 2 Parameter of experiment.

k	3.0 (3.3 節適用) 1m 秒 (それ以外)
γ	0.1 (3.3 節適用) 0.3 (それ以外)
選択確率の最大値	90%
履歴の最大数	20 件
Hello パケットの最大送信間隔	500 m 秒
Hello パケットの有効期間	1.5 秒
到達通知のキュー内での最大遅延	500m 秒
到達通知監視期間	1.5 秒
近隣端末を有効とみなす到達率の閾値	60%
負の学習における Δp	-1%
最短経路長・最短遅延に反映される期間	1 秒

い矢印が VoIP パケットである。

実験環境を表 1 に示す。表 1 の環境では、予備実験による評価で、各端末の送信半径は 290m 程度であった。また、開始される VoIP セッション数は 59 となった。

ルーティングアルゴリズムとして、AODV、文献 [1] の手法、3.1 節を適用した手法、さらに 3.2 節を適用した手法、さらに 3.3 節を適用した提案手法を比較した。AODV は QualNet に実装されたものをデフォルトパラメータで使用した。また、文献 [1] の手法、提案手法に関する実験パラメータを表 2 に示す。3.3 節の手法では、学習式が異なり、同一の値を用いることができないため、予備実験により、適切な k, γ を選択した。

4.3 実験結果

4.3.1 パケット到達率

図 9 に VoIP パケットのドロップ率と VoIP セッション毎のパケットドロップ率の平均値の 95%信頼区間、パケットドロップの内訳を示す。内訳は、TCP パケットと UDP パケットの送信数の総和を 100%に正規化してある。

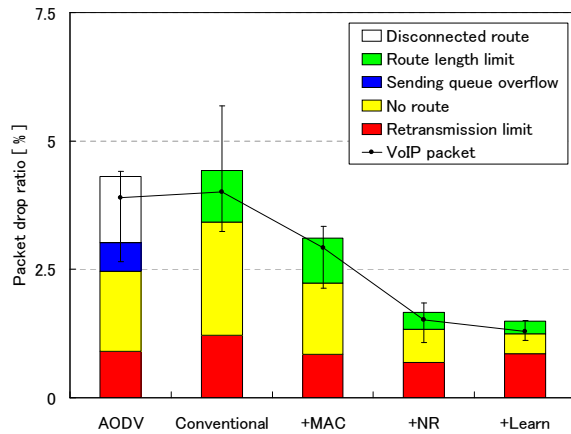


図9 パケットドロップ率
Fig.9 Packet drop ratio.

Retransmission limit は再送回数の限界のため、No route は経路が見つからないまたは選択できる経路が存在しないため、Sending queue overflow は送信キューのオーバーフローのため、Route length limit は TTL が 0 になったため、Disconnected route は使用する経路が切断され、送信がキャンセルされたためにパケットドロップが発生したことを示す。

再送回数の限界によるパケットドロップは、実際には中継先に届いたが ACK が返ってこなかった場合にも発生する。そのため、実際には正しく転送されたにも関わらずパケットドロップにカウントされる場合があり、パケットドロップの内訳の総和は VoIP パケットのドロップ率より高くなる。

MAC プロトコルと連携したリンク確認を行うと、文献 [1] の手法と比較して、再送回数の限界によるパケットドロップが減少した。このことから、MAC プロトコルと連携してリンク確認を行うことで、より正確なリンク安定度を得られるといえる。また、経路がないために起こるパケットドロップ数も減少した。これは、文献 [1] の手法では送信キューにパケットがためられた場合に、実際にパケットが送信される前にパケットが不達と判断され、安定と判断されるリンクがなくなる場合があるためである。MAC プロトコルと連携することで、送信待ちパケットの影響を排除することができる。

no return rule の改良を行うことで、経路長の限界により破棄されるパケットが減少した。これは、経路長が減少したためである (4.3.2 項)。

経路長に依存しない学習手法により、学習効率が向上し、パケットロス率はさらに低下した。

AODV では、再送回数の限界によるパケットドロップが発生した場合、該当リンクが無効化され、送信キュー中のパケットのうち、そのリンクを使用するパケットの送

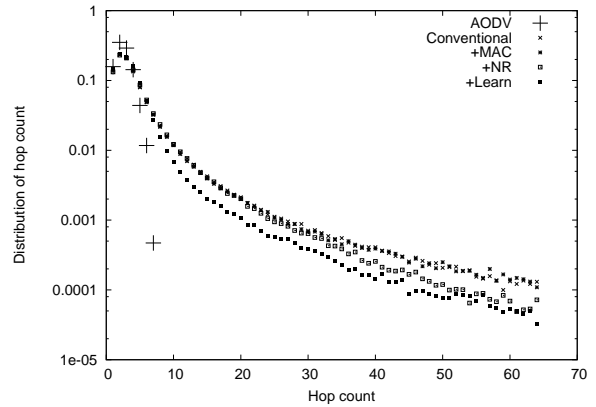


図10 ホップ数の分布
Fig.10 Distribution of hop count.

表3 ホップ数

Table 3 Hop count.

手法	平均ホップ数
AODV	2.60
従来手法	4.51
+MAC	4.47
+NR	4.37
+学習	3.81

表4 遅延時間

Table 4 Delay.

手法	平均値	最大値	中央値
AODV	39.2	6912	20.8
従来手法	24.4	1858	21.1
+MAC	23.8	1893	21.1
+NR	23.0	1257	21.1
+学習	22.3	551	21.0

単位: ms

信がキャンセルされる。そのため、再送回数の限界によるパケットドロップは少なく、無効化されたリンクを用いるパケットが多く破棄される。また、無効化されたリンクが送信元まで伝わらず、無効化された経路が用いられる場合があった。そのため、経路探索の失敗以上に経路がないために破棄されるパケットが増加した。さらに、経路切断による経路再探索中に多量のパケットが待ち行列に入れられ、待ち行列がオーバーフローする場合があった。

4.3.2 経路長と遅延時間

IP パケットに対して、ホップ数の分布を調べた結果を図 10 に示す。また、IP パケットの平均ホップ数を表 3 に、VoIP パケットの遅延時間の平均値、最大値、中央値を表 4 に示す。

文献 [1] の手法では、経路を確率的に選択する。そのため、極端に長いホップ数となる場合があるため、ホップ数の最大値は TTL の限界である 64 となり、平均ホップ数も増加した。一方、AODV では、経路探索を事前に行

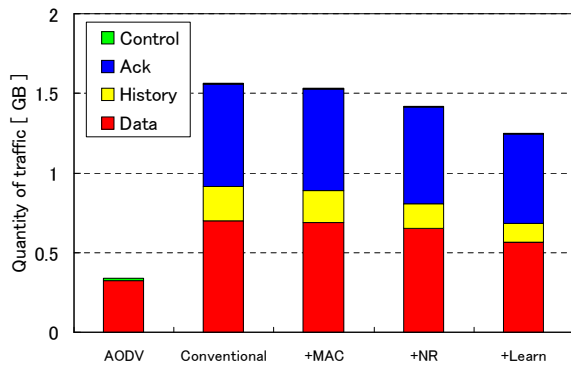


図 11 トラフィック量
Fig. 11 Traffic.

い、常に発見された経路を用いるため、極端な経路長の増加は発生せず、最大値は7となった。そのため、文献[1]の手法ではAODVと比較して遅延時間の中央値は悪化している。しかし、AODVでは経路が切断される度に経路探索が必要となり、パケットの送信が中断されるため、AODVでは経路探索によって遅延時間が増加する場合がある。一方、文献[1]の手法では、経路は確率的に選択されるため、経路が切断された場合もパケットの送信が中断されることはない。そのため、遅延時間の平均値、最大値は文献[1]の手法によって改善される。

no return ruleの改良により、ホップ数・遅延時間の減少が確認できる。このことから、過去に探索した端末を中継先候補から除外することで探索空間が広がり、学習効率が改善されたといえる。

経路長に依存しない学習手法を適用することで、ホップ数・遅延時間はさらに減少した。このことから、学習手法の改良により、さらに学習効率が改善されたといえる。

実時間性を求めるアプリケーションでは、遅延時間の最大値を削減することは重要である。提案手法を用いることにより、AODV、文献[1]の手法と比較して遅延時間の最大値は改善されるため、実時間性を求めるアプリケーションに対して有効といえる。

4.3.3 トラフィック量

図 11 に送信されたトラフィックの総量を示す。

文献[1]の手法では、ホップ数が増加するため、AODVと比較してパケットの転送回数が増加した。また、全ての送信パケットに対して近隣端末が到達通知を返す必要があるため、トラフィックの41.2%を到達通知(ACK)が占める結果となった。

no return ruleの改良および経路長に依存しない学習手法の適用により、文献[1]の手法と比較してホップ数が短くなるため、転送パケット数は減少する。また、到達通知のトラフィック量も減少した。また、ホップ数が短くなるため、経路履歴(History)のトラフィックも減少した。

表 5 MOS 値

Table 5 MOS value.

手法	平均 MOS 値
AODV	3.95
従来手法	3.46
+MAC	4.09
+NR	4.24
+学習	4.26

文献[1]の手法では、Helloパケット、到達通知が他のパケットに相乗りするため、到達通知を除く制御トラフィックは少ない。AODVでも、データパケットに対して制御パケットのトラフィックはわずかであることがわかる。

4.3.4 MOS(Mean Opinion Score) 値

QualNetに実装されたVoIPアプリケーションのMOS値推定機能を用い、MOS値を推定した。MOS値は、事前に設定されたパケットロス率と片道遅延からパケット毎に推定される。パケットロス率は、4.3.1項に示したVoIPパケットのロス率に設定し、端末が受信したVoIPパケットすべてに対する平均を求めた。

結果を表5に示す。推定値は、遅延時間に比べてパケットロス率の影響を大きく受ける。そのため、4.3.1項で示したパケットロス率を反映する結果となった。

また、推定MOS値は、パケットロス率が4%を境に急激に悪化する傾向にある。そのため、パケットロス率が3.89%であったAODVでは推定値は3.95となる一方、パケットロス率が4.01%であった文献[1]の手法では3.46と大きく悪化した。

5. ま と め

本稿では、MACプロトコルと連携したリンク確認手法、過去に中継した端末を考慮して中継先を選択する手法、経路長に依存しない学習手法を提案した。さらに、IEEE802.11gを用いて車々間通信を想定したシミュレーション評価を行い、提案手法の有効性を示した。評価結果から、提案手法を用いることで、ARH、AODVと比較してパケット到達率および最大遅延時間が改善されることを示した。特に、最大遅延時間はAODVと比較して約1/13となり、実時間性を求めるアプリケーションに対して有効である。

確率的な手法であるARHでは、パケットが極端に長い経路で転送される場合があり、平均経路長は増加をする。また、文献[1]の手法では、経路長の増加に加えて、送信されるパケットに対して、近隣端末全てが到達通知を返す必要がある。そのため、トラフィック量が増加してしまう。提案手法では、学習効率が改善され、経路長、トラフィック量の増加を抑制できることを示した。しかし、AODVと比較すると経路長、ホップ数は増加している。

そのため、学習手法をさらに改良し、経路長の増加を抑える必要がある。また、リンク確認に必要な帯域の削減を検討する必要がある。

文 献

- [1] 岩田, 松尾: “確率的ルーティングアルゴリズム arh の manet への適応手法”, 情報処理学会研究報告, **2007-MBL-042**, pp. 105–112 (2006).
- [2] “Ietf manet working group”, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [3] D. B. Johnson, D. A. Maltz and Y.-C. Hu: “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks”, IETF Internet-Draft (2004).
- [4] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer and S. R. Das: “Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing”, IETF RFC 3561 (2003).
- [5] T. H. Clausen and P. Jacquet: “Optimized Link State Routing”, IETF RFC 3626 (2003).
- [6] C.-K. Tho: “Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks”, *Wireless Personal Communications*, **4**, 2, pp. 103–139 (1997).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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 (2002).
- [10] 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).
- [11] 植村, 上野, 辰巳: “驥に固執しない profit sharing 法”, *人工知能学会論文誌*, **Vol.21**, No.1, pp. 81–93 (2006).
- [12] S. N. Technologies: “Qualnet developer”, <http://www.scalable-networks.com/>.