

# MANETにおける 低負荷で適応的なハイブリッドルーティング

北村 勇二<sup>1,a)</sup> 吉廣 卓哉<sup>1,b)</sup> Anup Kumar Paul<sup>2,c)</sup> 立花篤男<sup>2,d)</sup> 長谷川輝之<sup>2,e)</sup>

概要：MANET のプロアクティブ型ルーティング方式としては、リンク状態に基づいた OLSR が代表格である。しかし、リンク状態ルーティングは制御メッセージの負荷が比較的大きい点が問題であり、メッセージ負荷を低減することが求められている。一方で、距離ベクトルルーティングにおいては、隣接ノードとの間で定期的に交換する情報は距離ベクトルのみであり、制御メッセージの負荷は小さいが、トポロジ変化時の経路収束時間が長い欠点があり、モビリティのあるネットワークには適していない。本研究では、 $k$ -ホップ以内の範囲ではリンク状態ルーティングを用いて、 $k$ -ホップの範囲外では距離ベクトルルーティングを取り入れた方法を用いて経路制御を行うことで、リンク状態ルーティングの速い経路収束速度と距離ベクトルルーティングの低いメッセージ負荷の両方の利点を併せ持つ新たなハイブリッドルーティング方式を提案する。OLSR との比較評価の結果、提案手法はモビリティのあるネットワークにおいて、通信性能を低下させることなく制御メッセージの負荷を低減できることを示した。

## 1. はじめに

MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK) とは、移動する情報端末により一時的かつ自律的に構成されるネットワークであり、モバイル端末を用いてマルチホップネットワークを構築するための基礎技術として盛んに研究がなされている。MANET では無線通信が前提となるため、端末間の通信容量が低い。このため、できるだけ制御メッセージの負荷を抑えた経路制御プロトコルを設計することが重要である。

一般的に、MANET の経路制御プロトコルは、事前に経路表を作成しておくプロアクティブ型の経路制御プロトコルと、通信要求が発生してから経路探索を行うリアクティブ型のプロトコルに分類される。このうち、多数のノードから通信要求が発生する通信量が多いネットワークでは、常時全ノード間の経路を経路表で管理しておくプロアクティブ型の経路制御プロトコルが向いていると言われ、代表的なプロトコルとして OLSR (Optimized Link-State Routing)[1] が挙げられる。しかし、一般的にプロア

クティブ型プロトコルはリンク状態型アプローチに基づくため、制御メッセージによる負荷が比較的大きく、スケーラビリティに欠ける問題がある。一方で、AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)[2] に代表されるリアクティブ型プロトコルは距離ベクトル型アプローチに基づいているため、制御メッセージの負荷は小さくスケーラビリティに優れるが、通信要求時に経路探索を行うことで通信遅延が大きくなる問題がある。DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)[3] のように、距離ベクトルに基づいたプロアクティブ型プロトコルも存在する。この種のプロトコルは、制御メッセージの負荷が小さくて済むが、トポロジ変化時の経路収束が遅いことが問題となる。プロアクティブ型プロトコルのように経路収束が早く、かつ、距離ベクトル型プロトコルのように制御メッセージの負荷が小さい経路制御プロトコルの開発が望まれている。

本研究では、各ノードが、宛先が自分から  $k$  ホップ以内にあればリンク状態型ルーティングを用いて経路計算を行い、それ以外の宛先ノードに対しては距離ベクトル型ルーティングを用いることで、スケーラビリティの高いハイブリッドルーティングプロトコルを提案する。提案プロトコルに類似した経路制御プロトコルとして、ZRP[5] が存在する。ZRP は、距離が  $k$ -ホップ以内の宛先にはプロアクティブ型ルーティングを用い、それ以外の宛先にはリアクティブ型ルーティングを用いることにより、スケーラビリティを高めるプロトコルである。しかし ZRP では、距離

<sup>1</sup> 和歌山大学システム工学部  
930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan

<sup>2</sup> KDDI 総合研究所  
2-1-15, Ohara, Fujimino, Saitama, 356-8502, Japan

a) s181017@center.wakayama-u.ac.jp

b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

c) anup@kddilabs.jp

d) at-tachibana@kddi.com

e) teru@kddilabs.jp

が  $k$ -ホップより大きいノードに対して AODV に基づいたリアクティブ型ルーティングを用いるため、通信開始までに遅延が生じる問題がある。AODV の代わりに DSDV のようなプロアクティブ型ルーティングを用いることも容易に考えられるが、距離ベクトルルーティングである限り、トポロジ変化が発生した場合の収束速度が遅い問題がある。これは、リンク状態ルーティングが適用されている  $k$ -ホップの範囲内でトポロジ変化が生じた場合でも同様である。これに対して本研究では、リンク状態ルーティングと距離ベクトルルーティングをうまく組み合わせた経路計算法を新たに設計し、 $k$ -ホップの範囲内のトポロジ変化に対してもリンク状態型ルーティングと同等の経路収束速度を実現する。

本論文の構成は以下の通りである。2章では、リンク状態型ルーティングのスケラビリティを向上する手法に関する既往研究について述べる。3章では、提案手法の基礎となるリンク状態ルーティングの仕組みを説明する。4章では提案手法の詳細を述べ、5章で性能評価を行う。最後に、6章で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

リンク状態型ルーティングプロトコルのスケラビリティを向上する手法は、古くから研究されてきた研究テーマであり、多数の既往研究がある。OLSR[1] は、リンク状態型ルーティング手法を MANET に適応させるために、MPR (Multi Point Relay) と呼ばれる仕組みを用いて制御メッセージの負荷を低減している。MPR とは、制御メッセージを中継するノードを限定することにより、制御メッセージがネットワーク全体にフラッディングされることを保証しつつ、制御メッセージの負荷を低減する仕組みである。OLSR では、MPR を用いて広告するリンクを限定する仕組みにより、さらに制御メッセージの負荷を低減する。これらの MPR によるメッセージ負荷削減効果は大きく、特にノード密度が高い MANET において絶大な威力を発揮する。しかし、MPR という効果的な仕組みを用いても、制御メッセージの負荷は依然として大きく、スケラビリティが十分に確保されたとはいえない。

TBRPF[7] は、リンク状態型ルーティングの制御メッセージを、最短経路に沿ったリンクを通してのみ広告することで、制御メッセージの広告負荷を低減するルーティングプロトコルである。つまり、各ノードには最短経路の計算に必要なリンク情報のみが広告され、全ノードが同じトポロジを共有するわけではない。このため、トポロジ変化時には新たな最短経路に沿ったリンクの広告が必要となり、経路収束が遅くなる欠点がある。

Fisheye ルーティング [9] は、各ノードが定期的に隣接ノードに広告するリンク状態メッセージの送信時間間隔を、近くのものほど小さく、遠方のものほど大きくするこ

とで、メッセージ負荷を低減する方法である。この方法はリンク状態型ルーティングであれば適用できる汎用性の高い方法であるが、遠距離ノードへの経路に一度矛盾が生じると、これが解消されるまでに時間がかかる欠点がある。

リンク状態型ルーティングを階層化することにより、制御メッセージの負荷を減らす提案がいくつもなされている [10][11][12][13][14]。例えば、Ros らは OLSR に 2 階層の階層構造を導入し、クラスタ内では OLSR と同様の処理を行い、クラスタ間には上位階層のためのメッセージを追加することで、OLSR の通信負荷を低減する手法 C-OLSR を提案した [10]。Ge らは複数階層の階層構造により、通信負荷を低減する Hierarchical OLSR を提案した [11]。しかし、階層化による方法は、クラスタヘッドの選出や (クラスタヘッドを持たない手法の場合でも) クラスタ間処理のためのメッセージの追加により処理が複雑化する。また、クラスタヘッドの故障やクラスタヘッド間の通信障害等によりネットワーク全体への影響が大きく、耐障害性が低下する問題がある。また、トポロジ変化がクラスタ内であれば高速に経路収束できるが、そうでない場合には経路収束速度が遅くなる欠点もある。

## 3. リンク状態型ルーティング

### 3.1 動作概要

提案手法はリンク状態型ルーティング法を拡張することにより、制御メッセージの負荷を低減し、スケラビリティを向上する。本章では、リンク状態型ルーティングの動作を簡単に述べておく。

リンク状態型ルーティングは、Dijkstra の最短経路計算アルゴリズムに基づいて設計されている。各ノードはまず、Hello メッセージを用いて隣接ノードを検出し、隣接ノードとのリンクを確立する。次に、確立したリンクの集合をリンク状態メッセージ (以後、LS メッセージと呼ぶ) としてネットワーク全体にフラッディングする。全ノードが LS メッセージをフラッディングすると、ネットワーク上の全ノードが、ネットワーク全体のトポロジを把握できる。このトポロジを入力として Dijkstra のアルゴリズムが実行されることで、最短経路が計算され、経路表が生成される。

本論文では、リンクを  $l = (h, t)$  で表現する。ここで、 $h$  はリンクの始点、 $t$  は終点を表す。ノード  $v$  が発行する LS メッセージには  $v$  から各隣接ノード  $t_i$  へのリンクの集合  $L_v = \{l_i | l_i = (v, t_i), i = 1, 2, \dots, n_v\}$  の情報が含まれる。ここで  $n_v$  は  $v$  の隣接ノードの数である。ノード  $w$  が LS メッセージを受信すると、 $L_v$  に含まれる全てのリンクがリンク状態データベース  $D$  に格納される。その結果、 $D$  には、全てのノードが発行した LS メッセージに含まれる、ネットワークの全リンクの最新情報が格納される。つまり、全ノードがネットワーク全体のトポロジを共有できる。

リンク状態データベース  $D$  を最新の状態に保つために、

$D$  内のリンクは一定時間更新がなければタイムアウトし、 $D$  から削除される。受信した LS メッセージに含まれていたリンクは、シーケンス番号により最新のものであることが確認された上で、その更新時刻を現在時刻で更新する。これに対して、リンク  $l$  が切断された場合等には、それ以降には  $l$  の更新が行われなため、一定時間後にタイムアウトし、 $D$  から削除される。

各ノードは、 $D$  が更新されると、Dijkstra アルゴリズムにより最短路を再計算し、経路表を更新する。なお、MANET における代表的なリンク状態型ルーティングプロトコルである OLSR においては、前述の通り、MPR を用いた広告リンクの制限が行われるため、 $D$  にはネットワーク上の全てのリンク情報が格納されるわけではない。しかし、最路上のリンク（の少なくとも一つ）は広告されることが保証されており、必ずネットワーク上の最短路が計算されるため、経路表の構築においては支障がない。

### 3.2 メッセージ負荷

リンク状態型ルーティングはネットワークトポロジを全ノードで共有するため、距離ベクトル型ルーティングに比べてメッセージ負荷が高い。一般的には、前者は定期的に Hello メッセージと LS メッセージを広告するのにに対して、後者が広告するのは距離ベクトルのみである。距離ベクトルは、宛先 (IP アドレス) と距離 (多くの場合、ホップ数が用いられる) の組を、ネットワーク上の全宛先に対して定義した集合であり、この程度の情報を一定時間毎に隣接ノードに広告することは、経路計算を行うにあたって最低限必要の負荷であり、これ以上低減することは難しい。

Hello メッセージは、各ノードにより定期的にブロードキャストされ、隣接ノードを発見し、接続を確認する役割がある。LS メッセージは、一般的に Hello メッセージよりも長い周期で広告され、前述の通り、ネットワークトポロジを全ノードで共有する役割がある。LS メッセージには、Hello メッセージにより隣接関係を確認できた隣接ノードの IP アドレスの集合が含まれており、送信ノードの IP アドレスと合わせるとリンクの集合を表す。一般にリンク状態ルーティングでは、一定時間毎に、各ノードが生成した LS メッセージ全てを含んだ制御パケットがブロードキャストされる。(パケットサイズが大きい場合には複数のパケットに分割される。) これは、広告される全リンクの情報が一定時間毎にブロードキャストされることを示しており、メッセージ負荷が大きい。

OLSR では、前述の通り、MPR によりメッセージ負荷を低減することができるが、それでもメッセージ負荷は大きく、スケーラビリティの問題は依然として残っている。メッセージ負荷を距離ベクトル型ルーティングと同等の水準まで低減できることが望ましい。

## 4. 提案手法

### 4.1 概要

本研究では、リンク状態型ルーティングを距離ベクトルルーティングの仕組みを用いて拡張し、ネットワークトポロジ変化時の収束速度を維持しながら、メッセージ負荷を大幅に低減しスケーラブル化する新たなハイブリッドルーティング法を提案する。

基本的なアイデアは、各ノードが、 $k$ -ホップ以下の距離にある宛先に対してはリンク状態型ルーティングの仕組みにより経路表を計算する一方、 $k$ -ホップより遠い宛先に対しては距離ベクトルルーティングの仕組みを取り入れた経路計算を行うことである。これにより、 $k$ -ホップ以内のノードに対してのみリンク状態型ルーティングのメッセージ負荷がかかり、それ以外のノードに関しては距離ベクトルと同等の負荷で済む。仮に  $k$ -ホップ以下の距離にあるノードの数が一定程度であると仮定すると、リンク状態ルーティングのメッセージ負荷は一定程度と見なせる。つまり、ノード数が増大した場合でも、ノード数に比例する距離ベクトルルーティングのメッセージ負荷が増大するだけで済み、スケーラビリティが向上する。

しかし、工夫せずにこれを実現すると、トポロジ変化に対する経路収束速度が、距離ベクトルルーティングに準じた低い性能になる。 $k$ -ホップの範囲内でトポロジ変化が起きた際には、ノードがその部分のトポロジ情報を保持しているから、リンク状態ルーティングの収束速度を実現したいのだが、遠い宛先の経路計算が全て距離ベクトルルーティングに基づいてなされるため、そうはならない。これを解決し、 $k$ -ホップより遠い宛先に対する収束速度をリンク状態ルーティングと同等にするために、本研究では、距離ベクトルルーティングの部分に「前ホップ」の考え方を導入し、距離ベクトルルーティングの仕組みをリンク状態ルーティングに統合して経路計算を行う。

### 4.2 制御メッセージ

提案手法は、リンク状態型ルーティングを拡張したものであり、制御メッセージも、リンク状態型ルーティングを基にして拡張する。前述の通り、リンク状態型ルーティングの LS メッセージは各ノードで作成されたリンク集合を伝達する。ネットワーク上のノード数を  $N$  とおくと、各ノードは、一定時間毎に  $N$  個の LS メッセージを全ての隣接ノードに対してブロードキャストする。これに対して提案手法では、各 LS メッセージの TTL (Time To Live) を  $k$  に設定してフラディングすることで  $k$ -ホップの範囲に広告する。また、 $k$ -ホップより遠い宛先への経路計算を行うために、新たに DV (Distance Vector) メッセージを送信する。

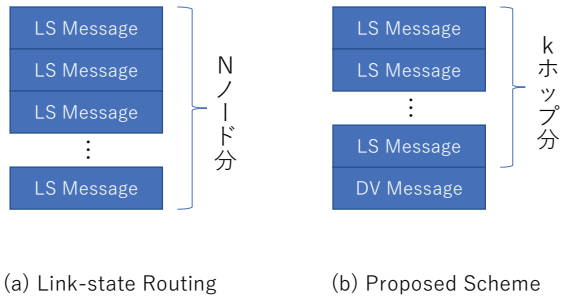


図 1 提案手法におけるメッセージの拡張

図 1 に、各ノードが一定時間毎に送信するメッセージ群を示す。図 1(a) は従来のリンク状態ルーティングにおいて一定時間毎に送信されるメッセージ群を示し、ネットワーク上のノード数を  $N$  とした場合に、原則として各ノードが生成した  $N$  個の LS メッセージを送信する必要がある。これに対して提案手法では、 $k$ -ホップの範囲にあるノードが発行した LS メッセージ群と、新たに追加する DV メッセージを送信することになる。 $k$ -ホップの範囲外のノードに対するメッセージ負荷量が、DV メッセージのサイズに圧縮されることにより、特に大規模なネットワークにおいて、大幅にメッセージ負荷が削減される。

DV メッセージは、一般的には、各宛先に対する距離 (ホップ数) の集合から成る。つまり、宛先アドレスと、その宛先への距離の組の集合である。しかし、次節で述べるように、提案手法では、宛先アドレスと、その宛先への前ホップの組の集合で代替するため、純粋な距離ベクトルルーティングとは少し異なる。

#### 4.3 提案ハイブリッドルーティングの動作

LS メッセージが  $k$ -ホップの範囲に広告されることにより、各ノードは  $k$ -ホップの範囲のネットワークポロジを把握することができる。つまり、 $k$ -ホップ以内の宛先に対しては、Dijkstra アルゴリズムを用いることで、最短路を計算できる。

一方、DV メッセージは、基本的には距離ベクトルルーティングと同等の動作により、最短路を計算する。一般的な距離ベクトルルーティングでは、DV メッセージは距離ベクトルを隣接ノードに伝える。距離ベクトルは、そのノードが知る全ての宛先に対する距離から成る。つまり、各宛先  $v$  に対して、宛先  $v$  への距離を  $d$  とおくと、距離ベクトルは、全宛先  $d$  に対する  $(v, d)$  の集合と見なせる。各ノードは、各宛先に対して、全隣接ノードから受信した距離のうち最短のものをを選び、その隣接ノードを次ホップとした上で、距離を 1 ホップ増加して自分の距離ベクトルに加える。

これに対して、提案手法では、距離ベクトルとして、「前ホップ」の情報をを用いる。つまり、提案手法の距離ベクトル

(にあたる情報) は、全宛先  $v$  に対して  $(v, p)$  で表される組の集合であり、 $p$  は前ホップ、つまり、宛先  $v$  に到達する最短路における、 $v$  の一つ手前のノードを指す。

各ノードにおいて、前ホップを用いて距離ベクトルルーティングと同等の経路計算を行う方法を述べる。まず、全隣接ノードから得た DV メッセージの情報をを用いて、ネットワークポロジを構成する。宛先  $v$  に対する前ホップ  $p$  が DV メッセージ中にあれば、それは、リンク  $(p, v)$  が最短路に含まれることを意味する。 $p$  を宛先とした前ホップも DV メッセージに含まれていることを考慮すると、DV メッセージに含まれるリンクを統合すると、任意の宛先に到達できる最短路木を構成できることがわかる。

提案手法では、リンク状態データベース  $D$  は、 $k$ -ホップ以内のトポロジ情報を含むことになる。ここに、隣接ノードから得た DV メッセージに含まれるリンク (前述のリンク  $(p, v)$ ) を追加する。これにより、 $D$  は、ネットワーク上の全ノードに到達できるグラフとなる。ただし、全隣接ノードから得た DV メッセージを統合したものであるため、 $k$ -ホップより遠い宛先に対して、複数の経路が存在し得ることに注意する。

各ノードは、隣接ノードから LS 及び DV メッセージを受信すると、これらにより  $D$  を更新し、 $D$  上で Dijkstra アルゴリズムを動作させることで、経路表を計算する。その上で、各宛先  $v$  に対して、計算した最短路における前ホップ  $p$  を用いて  $(p, v)$  を作成し、この集合をそのノードの「距離ベクトル」とする。この操作は、各宛先に対して、隣接ノードから得た経路のうち最短のものをを選び、自分の距離ベクトルを構成しており、距離ベクトルルーティングを模倣するものである。従来の距離ベクトルルーティングの距離の代わりに前ホップを用い、リンク状態ルーティングの経路計算法と組み合わせることにより、距離ベクトルルーティングと同等の動作を実現している。

最後に、DV メッセージのエントリの生成方法を述べる。従来の距離ベクトルルーティングでは、DV メッセージのエントリ、つまり、各宛先とそこに至る距離は、隣接ノードからの DV メッセージ受信時に生成する。つまり、宛先を隣接ノード、距離を 1 ホップとしたエントリが作成され、これがネットワークに伝播していく。これに対して提案手法では、DV メッセージの各エントリ、つまり宛先と前ホップの組は、不要なメッセージ負荷を避けるために、 $k$ -ホップ離れたノードにおいて生成される。各ノードは  $k$ -ホップの範囲内のネットワークポロジを知っており、その範囲で宛先への最短路を計算することで、各宛先への前ホップを計算できる。各ノードは、 $k$ -ホップの距離にある宛先に対しては、このような方法で DV メッセージのエントリを生成し、それ以外の宛先に対しては、前述のように、隣接ノードからの DV メッセージとリンク状態ルーティングを組み合わせることで DV メッセージのエントリを生成する。

#### 4.4 経路ループ

一般にルーティングにおいては、最短路の分散計算が行われるため、トポロジ変化時に一時的にノード間の経路情報の不整合が発生し、経路表の次ホップが一時的に閉路を構成することがある。これを経路ループ (Routing Loop) と呼ぶ。ループが発生すると、ループパケットが通信資源を大きく浪費するため、ネットワークの通信性能に与える影響は甚大である。

距離ベクトルルーティングにおいては、このようなループとして、無限カウント問題が発生することが知られている。しかし提案手法では、隣接ノードから得た DV メッセージから自分の DV メッセージを生成する際にリンク状態データベース  $D$  を介しているため、無限カウント問題が生じない。その代わりに、トポロジの変化が伝搬する際に近隣ノードのリンク状態データベースが一時的に同期しない状態になることで、一時的な経路ループが生じる可能性がある。これは、リンク状態ルーティングで発生する問題と同じである。

#### 4.5 スケーラビリティ

リンク状態ルーティングにおいては、各ノードが一定時間毎にネットワーク上の全リンクの情報を広告する。一般にリンク数はノード数の数倍程度あり (密な MANET ではノード数  $N$  に対して最大  $N^2$  であり得る)、ネットワークが大きくなるとメッセージ負荷が大きくなる。一方、距離ベクトルルーティングでは、各宛先に対して一つの距離、あるいは提案手法であれば前ホップのみの情報で済むため、大幅にメッセージ負荷を低減できる。

提案手法では、 $k$ -ホップの範囲内ではリンク状態ルーティングに準じたメッセージ負荷となるが、それ以外の宛先に対するメッセージ負荷は距離ベクトルルーティングに準ずる。 $k$ -ホップの範囲に存在するリンク数は一定程度とみなせるため、ネットワークサイズが大きくなった際にもメッセージ負荷は線形程度の拡大で抑えられ、スケーラビリティが確保されている。

### 5. 評価

#### 5.1 評価手法

提案手法をネットワークシミュレータ ns-3[15] に実装し、通信性能を OLSR と比較した。ノードが移動しトポロジが変化する状況で OLSR と同等の対応能力を持つかどうかを確認すると同時に、制御メッセージの負荷がどの程度低減しているかを調べる。

2000[m]×2000[m] の正方形のフィールドに 100 ノードを配置した。ノードは Random Way Point モデル [16] に従って移動させ、移動速度は 10[m/s]、停止時間は 0[秒] とした。ランダムに選んだ送受信ノード間で 10 本の CBR(Constant Bit Rate) フローを発生させた。全フローの送信レートは

表 1 シミュレーションパラメータ

Item	Value
フィールドサイズ	2000[m]×2000[m]
モビリティモデル	Random Way Point
ノード速度	10[m/s]
ノード停止時間	0[sec]
通信フロー	10 CBR Flows
送受信ノード	ランダム選択
パケットサイズ	64[Bytes]
無線通信規格	IEEE802.11g (11[Mbps])
送信電力	10[dBm]
LS_RANGE	3 [hops]
経路制御プロトコル	提案手法と OLSR
シミュレーション時間	200[秒]

統一し、合計送信レートを 5[kbps]-280[kbps] の間で変動させた。パケットサイズは 64[Bytes] とした。無線通信規格には IEEE802.11g を用い、速度は 11[Mbps] で固定した。RTS/CTS は用いていない。送信電力は 10[dBm] とした。おおよその通信距離は 300-400[m] である。ノード間の平均距離は概ね 3.5 ホップ程度であった。提案手法のパラメータ LS\_RANGE は 3 ホップとした。経路制御プロトコルとして、プロアクティブ型の OLSR と、ハイブリッド型の提案手法を比較した。シミュレーション時間は 200[秒] とし、100[秒] の時点で経路が収束したと見なして CBR 通信を開始した。表 1 に上記パラメータをまとめる。

評価指標としては、送信レートを変動させながら、スループットとパケット損失率により通信性能を調べた。また、シミュレーション全体における制御パケットによる負荷量を調べ、制御メッセージによる負荷が低減しているかどうかを確認した。

#### 5.2 評価結果

図 2 にスループット、図 3 にパケット損失率を示す。提案手法と OLSR の双方ともに、送信レートが上がると比例してスループットが上がり、概ね 240[Kbps] 程度でネットワークの許容上限に達していることがわかる。パケット損失率も、240[Kbps] あたりから大きくなっており、ネットワークの許容量に達したことを裏付けている。提案手法と OLSR はどちらも同等の性能を記録しており、提案手法が LS\_RANGE=3 ホップ以上を距離ベクトルに基づいた経路制御方式に変更したことによる通信性能の低下は見られなかった。

一方、シミュレーションを通した制御メッセージの負荷を表 2 に示す。提案手法は、OLSR のメッセージ負荷と比較して約 20.5%の低減を実現したことが明らかになった。

以上により、提案手法は、モビリティのあるシナリオにおいて、トポロジ変化に対する耐性を低下させることなく、メッセージ負荷を低減できることが明らかになった。OLSR は MPR によりメッセージ負荷を低減する仕組みを

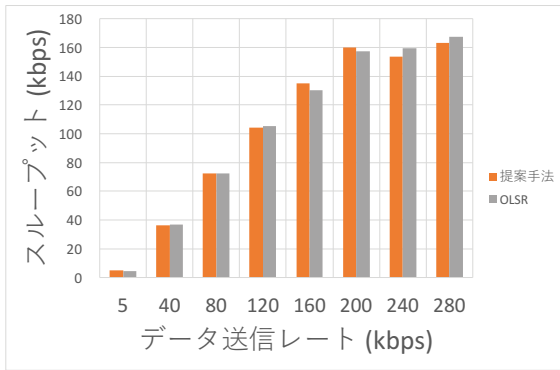


図 2 スループット

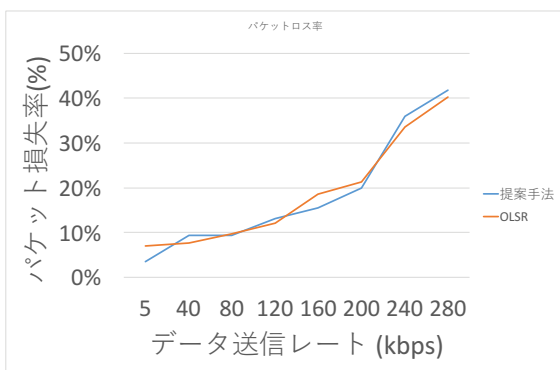


図 3 パケット損失率

表 2 制御メッセージ負荷

OLSR	5,328,668 [Bytes]
提案手法	4,236,508 [Bytes]
低減率	20.5%

備えているが、それを、さらに改善することができた。

## 6. まとめ

本研究では、リンク状態型ルーティングプロトコルの経路収束速度と距離ベクトル型ルーティングプロトコルのメッセージ負荷の軽さを併せ持つハイブリッドルーティングプロトコルを提案した。本ルーティングプロトコルでは、一定ホップ以内の宛先に対する経路をリンク状態ルーティングで、それより遠い宛先に対する経路を距離ベクトルルーティングを組み入れた方法で計算することで、双方の利点を併せ持つハイブリッドルーティングを実現している。シミュレーション評価の結果、モビリティのあるシナリオで通信性能を低下させることなく、OLSR に比べて制御メッセージの負荷を 20.5%程度低減することができた。

今後の課題の一つは、提案手法のスケーラビリティを調べることである。今回のシナリオでは平均が約 3.5 ホップの場合に 20.5%の負荷低減を実現したが、より大きなネッ

トワークでは、負荷低減効果はより大きいものと考えられる。ネットワークサイズに対してメッセージ負荷が概ね比例することを示すことにより、提案手法の優れたスケーラビリティを明らかにしたい。また、ある程度のモビリティがある状況において、LS\_RANGE の値に応じた耐故障性の程度を調査し、どの程度の LS\_RANGE 値が実用上必要であるかを明らかにしたい。

## 参考文献

- [1] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing (OLSR)," IETF RFC3626, 2003.
- [2] C. Perkins and E. Belding-Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF RFC3561, 2003.
- [3] C. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination- Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", Proc. Of SIGCOMM '94, 1994
- [4] J. Moy, "OSPF Version 2," IETF RFC2328, 1998.
- [5] Z. J. Haas and M. R. Pearlman, "The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol," ACM/IEEE Trans. Net., Vol. 9, No. 4, pp. 42738, 2001.
- [6] E. Baccelli, P. Jacquet, D. Nguyen, T. Clausen, "OSPF Multipoint Relay (MPR) Extension for Ad Hoc Networks," IETF RFC2328, 1998.
- [7] R. Ogier, F. Templin and M. Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)," IETF RFC3684, 2004.
- [8] D.Oran, Editor, "OSI IS-IS Intra-domain Routing Protocol," IETF RFC1142, 1990.
- [9] G. Pei, M. Gerla, and T.W. Chen, "Fisheye State Routing: A routing Scheme for Ad hoc Wireless Networks," IEEE International Conference on Communications, 2000.
- [10] F.J. Ros and P.M. Ruiz, "Cluster-based OLSR Extensions to Reduce Control Overhead in Mobile Ad-hoc Networks," In Proc. IWCMC'07, 2007.
- [11] Y. Ge, L. Lamont, "Hierarchical OLSR - A Scalable Proactive Routing Protocol for Heterogeneous Ad Hoc Networks," In Proc. WiMob'05, 2005.
- [12] N. Nikaein, H. Labiod and C.Bonnet, "DDR-Distributed Dynamic Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks," First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC), 2000.
- [13] N. Nicaein, C. Bonnet, N. Nikaein, "HARP-Hybrid Ad-hoc Routing Protocol," International symposium on telecommunications, 2001.
- [14] B. Guizani, B. Ayeb, and A. Koukam, "A New Cluster-based Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks," In Proc of Communications and Information Technology (ICCIT'12), 2012.
- [15] ns-3, <https://www.nsnam.org/>
- [16] D. B. Johnson, D. A. Malts, "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Mobile Computing, The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Vol.353, pp.153, 1996.