

OLSR における局所的な輻輳を回避するマルチパスルーティング

梶清貴^{†1} 吉廣卓哉^{†2}

概要：モバイルアドホックネットワーク (MANET) は、モバイル端末を用いた無線マルチホップネットワーク構築技術として盛んに研究されている。しかし、通信が局所集中すると、深刻な輻輳が発生し、通信性能が低下することが一つの課題である。通信性能を向上するためには、輻輳領域を適応的に迂回するマルチパスルーティングが有効である。しかしながら、OLSR に代表されるプロアクティブ型ルーティングプロトコルでは、輻輳領域を柔軟に迂回できる予備経路の構築は、まだ実現されていない。そこで著者らはこれまでに、OLSR を拡張して追加の経路表を一枚加えることで、輻輳が検知されると、推定される輻輳領域を避けるようにパケットを迂回させるマルチパスルーティング法を提案した。しかし、ネットワークトポロジによっては、一枚の追加経路表では適切な迂回路をうまく構築できない場合があり、通信性能の向上には限界があった。そこで本研究では、追加の経路表をもう一枚加え、二枚の追加経路表を柔軟に切り替えることにより、この問題を軽減し、より効率的な通信を実現するマルチパスルーティング法を提案する。

Multi-path Routing to Avoid Local Congestion in OLSR

Kiyotaka KAJI^{†1} Takuya YOSHIHIRO^{†2}

1. はじめに

近年、IEEE802.11 等の無線通信技術は急激に普及し、社会に不可欠なインフラ技術になりつつある。無線通信技術の発展に伴い、スマートフォンや、ノートパソコン、携帯ゲーム機などの移動端末が次々と開発され、その結果、ネットワークインフラを必要とせず、移動端末同士が自律的にネットワークを構成させ、より広い範囲の接続性を確保する MANET(Mobile Ad hoc NETWORK)が注目されている。

一般に、無線通信では、電波干渉、障害物、或いはノードの移動等を要因として、通信品質が不安定になりやすい欠点がある。通信品質が低下したリンクに通信が流入すると容易に輻輳が発生し、これがボトルネックとなることでネットワークの通信性能が大幅に低下する。このため、輻輳箇所を適応的に回避できるようなマルチパスルーティング法が望まれており、MANET において、数多くのルーティングプロトコルが提案されている。

MANET のルーティングプロトコルは、一般的に二種類に分類される。一つは、AODV[1]に代表されるリアクティブ型プロトコルである。リアクティブ型プロトコルは、通信要求に応じて経路探索を開始し、経路表を構成する。このため、必要以上の制御メッセージが発生せずネットワークへの負荷を抑えられるが、通信を開始するまでの遅延が生じる欠点がある。リアクティブ型プロトコルでは、輻輳や通信切断に対応するために、予め複数の経路を計算しておき、故障耐性の向上や負荷分散を行う手法が数多く提案

されている[2][3][4]。これらは、各宛先に対して複数の経路を用意しておき、状況に応じてトラフィックを振り分ける、或いは経路を柔軟に切り替えることで、単一経路の場合と比較して効率の良い通信を実現する。ここで、無線マルチホップネットワークの場合には、輻輳や通信品質の劣化は一定の範囲を単位として発生すると考えられる。これに対して江藤ら[5]は、空間を正方形のグリッド領域に分割し、同じ領域を通らないような複数経路を計算することで、一定範囲で発生する輻輳や通信品質の劣化に対応する手法を提案した。このようにリアクティブ型経路制御では、無線通信の特性を考慮して一定領域で発生する通信障害に対応するマルチパスルーティングが実現されているが、OLSR 等のプロアクティブ型経路制御においては、そのような柔軟な迂回路の計算は実現されていない。

一方、OLSR[6]に代表されるプロアクティブ型プロトコルでは、定期的な制御メッセージの交換により、全ての宛先への経路を常に維持することができる。このため、通信要求の発生時には遅延なく通信を開始できるが、定期的なメッセージ交換によるネットワークへの負荷が比較的大きい。プロアクティブ型プロトコルでは、各ノードがネットワーク全体のトポロジを把握し、このトポロジを基に経路を計算するため、トポロジを共有しないリアクティブ型経路制御と比較して、より柔軟な迂回路を計算できる潜在能力を持つと考えられる。

ところが、プロアクティブ型プロトコル上で提案されている複数経路を用いた経路制御法は数少ない。その一つである MP-OLSR(Multi-path OLSR)[7]では、リンクやノードを共有しない独立した経路 (disjoint path) を計算するが、一定の領域を避けるような迂回路は提供できない。また、

^{†1} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University
^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

経路制御のためにソースルーティングを用いる必要があるためスケーラビリティの問題があり、ネットワークの規模が大きくなるとオーバーヘッドが大きくなる。

有線ネットワークでリンクやノードの故障時に迂回路を用いて即時に通信を復帰する IP Fast Reroute 法を MANET に適用する試みもある[8][9]が、これらは次ホップリンク又は次ホップノードを迂回する経路を計算するのが典型的である。つまり、IP Fast Reroute 法における迂回路は、最短経路に対してはリンクやノードを共有しない独立経路 (disjoint path) であり、比較的小さい迂回を行う。しかし、MANET で輻輳が発生した場合には、その原因となる電波の干渉範囲はそれよりも大きいため、より大きく迂回されることが望ましい。

そこで著者らはこれまでに、OLSR を拡張して追加の経路表を一枚加えることで、輻輳が検知されると、推定される輻輳の領域を避けるようにパケットを迂回させるマルチパスルーティング法を提案した[11]。しかし、ネットワークポロジによっては、一枚の追加経路表では適切な迂回路をうまく構築できない場合があり、通信性能の向上には限界があった。そこで本研究では、追加の経路表をもう一枚加え、二枚の追加経路表を柔軟に切り替えることにより、この問題を軽減し、より効率的な通信を実現するマルチパスルーティング法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。2 章では、関連研究について紹介し、それらの問題点について述べる。3 章では、2 章で述べた問題点を改善する提案手法を説明する。4 章ではシミュレーション評価を行い、その結果を考察する。5 章でまとめとする。

2. 関連研究

本章では、MANET におけるマルチパスルーティングに関する関連研究を紹介する。また、著者らが提案した、プロアクティブ型経路制御プロトコルにおいて一定領域を迂回するマルチパスルーティング法を紹介したうえで、その問題点を指摘する。

2.1 関連研究

MP-OLSR(Multi-Path OLSR)[7]は、OLSR を拡張し、複数経路を用いた負荷分散を可能にする。MP-OLSR では、Multi-Path Dijkstra アルゴリズムにより複数経路を計算し、ソースルーティングを用いてパケットを転送する。ここで計算される複数経路は、ノード或いはリンクを共有しない独立経路 (Disjoint Paths) であり、リアクティブ型プロトコルでも同等の経路が計算可能である。また、ソースルーティングはパケットヘッダ内に経路情報を含めるため、ホップ数が増加するとオーバーヘッドが大きくなる欠点がある。

一方、有線ネットワークにおいてリンクやノードの故障に対応した迂回路を計算する IP Fast Reroute 法を MANET に適用する試みもある[8][9]。迂回路はネットワークポロジから計算され、宛先までの次ホップリンク又は次ホップノードを避ける経路となる。これは、最短経路に対して、リンクやノードを共有しない独立した経路を計算することにあたる。

上記の手法らは、リンク故障やノード故障などの障害に対して有効である。しかし、MANET で輻輳が発生した場合には、その原因となる電波の干渉範囲は大きく、一定範囲のノードに影響がある。そのため、一定範囲の輻輳を考慮した、より大きく迂回する経路が必要となる。

2.2 輻輳領域を考慮に入れたマルチパスルーティング

輻輳の領域を推定し、領域を避けるような迂回路を用いて、適宜に経路を切り替えるマルチパスルーティング法を著者らは提案した[11]。この手法は、OLSR 等のプロアクティブ型経路制御プロトコルを拡張する。つまり、ネットワークポロジを用いて、各ノードが各宛先までの最短経路を計算し、最短経路における次ホップノードを経路表に保持することを行うが、この手法では、通常の経路表 (以後、最短経路表と呼ぶ) に加え、迂回路を保持した迂回経路表を一枚追加する。

この手法の迂回経路表の構築方法は以下のとおりである。この手法は、宛先に対する次ホップリンクに対して輻輳を検知した場合、最短経路に沿った 2 ホップ先のノードを輻輳の中心であると仮定して (以後、輻輳中心ノードと呼ぶ)、輻輳中心ノードの半径 1 ホップの領域 (つまり、輻輳中心ノードとその隣接ノード群) を輻輳領域と考える。迂回経路表は、最短次ホップノードと輻輳中心ノードの組に対して、輻輳領域に含まれない隣接ノードを一つ選択し、そのノードを迂回次ホップノードとして、迂回経路表に保持する。提案手法では、最短次ホップノードへのリンクに対して輻輳を検知した場合、迂回経路表を参照することにより、輻輳領域を避ける迂回路へパケットを転送する。迂回経路表の構築方法の例を図 1 に示す。

図 1 のネットワークは、ノード v_1, v_2, \dots, v_6 を含む複数のノードにより構成される。ノード v_1 、ノード v_2 において、それぞれの迂回経路表の構築手順を説明する。ある宛先に対してのノード v_1 、ノード v_2 が示す最短経路は、それぞれ $v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow \dots$ 、または、 $v_2 \rightarrow v_6 \rightarrow v_5 \rightarrow \dots$ 、となり、図 1 に示す矢印に沿って経路が構築されるとする。

v_1 において、最短次ホップノード v_4 へのリンク (v_1, v_4) に対して輻輳を検知し、パケットを迂回路に転送する場合を考える。リンク (v_1, v_4) に対して輻輳を検知した場合、 v_4 の次ホップノードである v_5 を輻輳領域の中心と仮定し、中心ノードに隣接するノードも輻輳領域に含める。よって、 v_5 に隣接するノードは輻輳領域に含まれるため、迂回経路表は

輻輳領域に含まれないノードを迂回次ホップノードとして選択する必要がある。そのため、最短次ホップノード v_4 と輻輳の中心である v_5 に対応する迂回次ホップノードとして、 v_5 に隣接しないノード v_2 が選択され、 v_2 へパケットを転送する。

次に、ノード v_2 に着目すると、 v_2 において、宛先に対しての最短次ホップノードは v_6 である。しかし、 v_6 は輻輳の中心と仮定した v_5 と隣接しているため、輻輳領域に含まれており、パケットを転送できない。 v_6 が輻輳領域に含まれる場合、迂回経路表を用いて、迂回次ホップノードへパケットを転送する。迂回次ホップノードは、輻輳領域に含まれないノード（すなわち輻輳領域の中心ノードと隣接しないノード）が選択されているため、今回の場合、ノード v_3 が迂回次ホップノードとなり、パケットを v_3 に転送する。

すると、 v_1 からパケットを転送する時に、 v_4 が輻輳状態であっても、迂回経路表を利用することによって、 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow \dots$ とパケットを転送し、輻輳領域を避けることができる。しかし、この手法では、ネットワークトポロジによっては迂回路が適切に選べず、経路がループする問題が発生する可能性がある。

2.3 迂回路上で発生する経路ループ問題

迂回経路表の構築は、輻輳領域に含まれないノードを迂回次ホップノードとして選択する。そのため、迂回次ホップノードは輻輳領域に対して時計回りの迂回路、または反時計回りの迂回路が考えられる。図2において、ノード v_5 を輻輳領域の中心とする場合、ノード v_1 はノード v_5 に隣接しないノード v_2 を迂回次ホップノードとして選択する。ノード v_1 は時計回りの迂回路を想定して、輻輳領域を避けるように迂回次ホップノードを選択している。同様にノード v_2 においても、ノード v_5 を輻輳領域の中心とした場合、ノード v_5 に隣接しないノード v_1 が迂回次ホップノードとして選ばれる可能性がある。ノード v_2 は反時計回りの迂回路を想定して、輻輳領域を避ける迂回次ホップノードを選択している。以上のことから、輻輳領域に対して迂回路の進行方向が互いに違っているため、 v_1 からパケットを迂回路へ転送する際に、 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots$ とパケットがループし、経路ループ問題が発生する。

経路ループ問題は、パケットが迂回路に転送されると発生する可能性がある。経路ループが発生すると、通信が集中し迂回路が輻輳状態になり、通信性能が大幅に低下する。そこで、本研究では、迂回経路表をさらに一枚追加し、二枚の迂回経路表を用いることで、この問題を低減させる仕組みを加え、より効率的な通信を実現するマルチパスルーティング法を提案する。図3において、以前の迂回経路表による迂回路を迂回次ホップ経路A、追加した迂回経路表による迂回路を、迂回次ホップ経路Bとする。ノード v_2 において、迂回次ホップ経路Bを利用することで、ノード v_3

にパケットを転送し、経路ループの発生を抑制することができる。経路ループが軽減することで大幅な通信性能の改善が見込める。

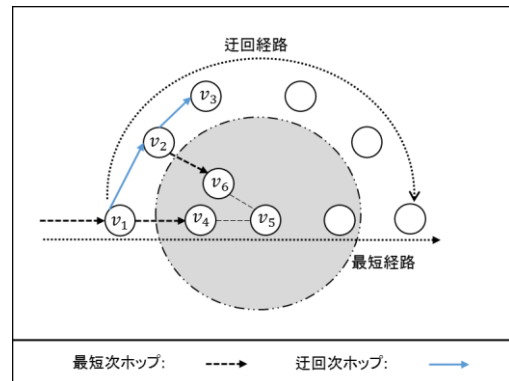


図1 迂回経路を用いるパケット転送

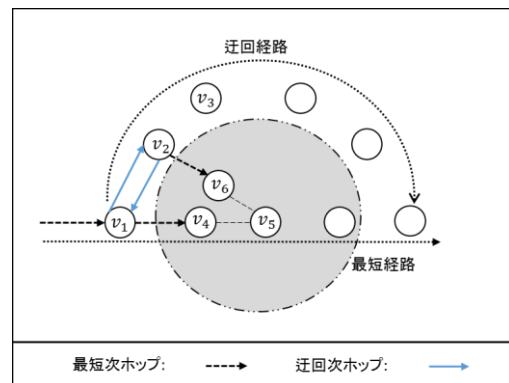


図2 迂回パケットにより発生する経路ループ問題

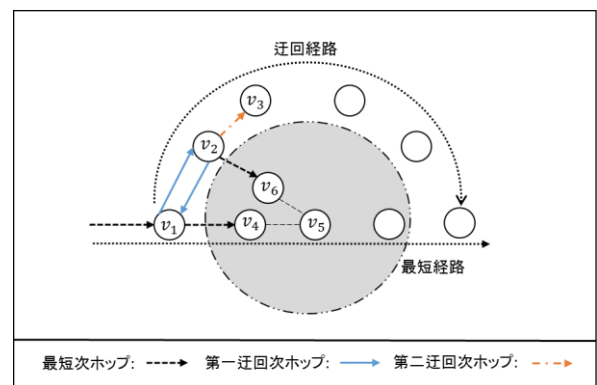


図3 迂回経路表を二枚利用した場合の経路決定

3. 迂回経路の構築と利用

3.1 提案手法の概要

提案手法は、ある宛先へのパケットの次ホップリンクに対して輻輳の検知を行い、輻輳を検知した時に、そのパケットを迂回路に転送する手法である。無線ネットワークにおける輻輳は一般に広範囲にわたることから、提案手法は輻輳を検知した時に最短路に沿って2ホップ先のノード（以後、輻輳中心ノードと呼ぶ）の周囲1ホップ先のノード

ド群を輻輳の領域であると考え、この領域を迂回するようにパケットを転送する。また、二枚の経路表を追加することで、迂回路上で発生する経路ループ問題を改善する。

提案手法の実装方法は、経路制御プロトコルとパケット転送処理を拡張する。具体的には、次の4つの拡張を行うことで、輻輳に対する迂回を実現する。

- A) 輻輳検知機能の追加
- B) 最短経路表への輻輳中心ノードの追加
- C) 第一迂回経路表、第二迂回経路表の追加
- D) パケットヘッダへの輻輳中心ノード格納領域の追加
- E) 隣接ノード表の追加
- F) パケット転送処理の変更

まず、拡張 A) について述べる。輻輳を検知するためには、IEEE802.11 で用いられているアクセス制御方式 CSMA/CA で利用されるフレーム再送回数を用いる。輻輳の検知、及び経路の切り替え動作の詳細については、3.3 節で述べる。

次に、拡張 B) について述べる。最短経路表に輻輳中心ノードを追加する。輻輳検知時には、輻輳領域を推定するために、迂回すべき領域の中心である輻輳中心ノード（つまり、最短経路に沿った2ホップ先ノード）を知りたい。このため、最短経路表に1カラムを追加して、2ホップ先ノードのアドレスを格納するようにする。提案手法における最短経路表の構成例を表1に示す。最短経路表は、宛先ノードに対して、通常の最短経路に沿った次ホップノードである最短次ホップノードと2ホップ先のノードである輻輳中心ノードを保持する。

次に、拡張 C) について述べる。第二の経路表として迂回経路表を追加する。迂回経路表は二枚用意し、両方共に最短次ホップノードと、迂回すべき領域の中心である輻輳中心ノードの組に対して、迂回次ホップノードを保持する。このため、二枚の迂回経路表は、表2および表3に示すような3つのカラムを持つ。ここでの迂回次ホップノードとは、パケットを迂回路に転送する際の次ホップノードを表す。提案手法は、宛先に対してパケットを転送する際、最短経路表を参照して、最短次ホップノードと輻輳中心ノードを得る。最短次ホップノードへのリンクに対して輻輳を検知した場合、得られた最短次ホップノードと輻輳中心ノードを用いて、迂回経路表を参照し、迂回次ホップノードを得る。

また、二枚の迂回経路表を用意するのは、経路ループの問題を改善するためである。図4において、輻輳領域の中心ノードを v_{12} とする場合、ノード v_1 から宛先であるノード v_{10} までの迂回路を考える。ノード v_5 まで、パケットは $v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_5$ と輻輳領域に対して時計回りの迂回路を通り、転送されているとする。ノード v_5 において、 v_7 を迂回次ホ

ップノードとして選択する場合は考えられる。これは、反時計回りの迂回路を想定しているためである。 v_7 にパケットを転送すると、パケットが今までの迂回路の方向に対して逆に進んでいることから、経路がループする可能性が考えられる。それを阻止するために、提案手法では、前ホップノードと迂回次ホップノードが隣接している場合、逆方向の迂回次ホップノード（つまり、第二迂回経路表における迂回次ホップノード）へパケットを転送することで、経路ループの可能性を低減する。

次に、拡張 D) について述べる。多くの場合、パケットが輻輳領域を迂回するためには、迂回次ホップノードを複数回用いなければならない。そこでパケットヘッダに輻輳中心ノードを格納するフィールドを用意する必要がある。輻輳中心ノードがフィールドに記録されることで、パケットが迂回中であることを示すと同時に、そのパケットが迂回すべき領域を特定する情報を持つ。これらの情報を利用することによって、迂回次ホップノードを複数回用いることができる。

次に、拡張 E) について述べる。拡張 C) より、経路ループ問題の対策として、前ホップノードと迂回次ホップノードが隣接しているかを調べる必要がある。そのために、各ノードは、周囲のノードの隣接関係を記録する隣接ノード表を用意する。隣接ノード表は、1ホップ先のノードである1ホップノードと、1ホップノードに隣接する1ホップ先のノードの集合である隣接ノード集合を保持する。このため、隣接ノード表は、表4に示すような2つのカラムを持つ。パケット転送時に隣接ノード表を参照することによって、次ホップノードに対して隣接する1ホップ先のノードを調べることができる。

最後に、拡張 F) について述べる。通常、パケットを受け取ったノードは、経路表から宛先に対しての最短次ホップノードを参照し、最短次ホップノードへパケットを転送する。提案手法では、最短次ホップノードへパケットを転送する前に、最短次ホップノードへのリンクが輻輳状態にあるかを調べ、リンクに対して輻輳を検知した場合、迂回経路表を参照して、パケットを迂回路へ転送する。パケット転送処理の詳細については3.2節で説明する。

3.2 パケット転送処理

通常状態では、最短経路表によって、パケットは最短経路を通って宛先まで転送される。その途中で輻輳を検知した場合には、輻輳領域を迂回するようにパケットを転送する。あるノードにおいて、パケットが迂回路に転送される際の処理手順(1)から(4)までを以下に示す。

- (1) (最短次ホップへのリンクに対して、輻輳を検知)
宛先に対しての最短次ホップノードを最短経路表から参照し、最短次ホップノードに対してのリンク

の輻輳を調べる。最短次ホップノードに至るリンクで輻輳が検知されなければ、パケットを最短次ホップノードに転送する。最短次ホップノードに至るリンクで輻輳が検知された場合、手順(2)に進む。

- (2) (輻輳検知時、迂回路を利用したパケット転送処理)
 最短次ホップノードに至るリンクで輻輳が検知されると、ノードはパケットヘッダに輻輳中心ノードを記録する。次に、得られた最短次ホップノードと輻輳中心ノードを用いて第一迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップノードにパケットを転送する。この際、迂回次ホップノードで輻輳が検知されれば、第二迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップにパケットを転送する。第二迂回路表で参照した迂回次ホップにおいても、輻輳が検知された場合、さらなる輻輳を抑制するためにパケットは破棄される。
- (3) (迂回中のパケットに対してのパケット転送処理)
 パケットに輻輳中心ノードが記録されていれば、最短経路表を参照し、最短次ホップノードを得る。最短次ホップノードがパケットに記録された輻輳中心ノードに隣接していれば、最短次ホップノードは迂回すべき輻輳領域の内部にある。この場合には、第一迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップノードにパケットを転送する。この際、迂回次ホップが前ホップノード（パケットを現在のノードに対して送信した前のノード）と隣接している場合、迂回次ホップノードが経路ループを引き起こす可能性があるため、手順(2)と同様に、第二迂回路表における迂回次ホップノードにパケットを転送する。また、第一迂回路表における迂回次ホップノードへ至るリンクに輻輳が検知された場合、第二迂回路表における迂回次ホップノードを用いてパケットを転送する。この際、迂回次ホップノードに至るリンクに対しても輻輳が検知される、あるいは前ホップノードと隣接している場合、パケットを破棄する。
- (4) (迂回中のパケットを最短経路へ戻す転送処理)
 手順(3)で、最短次ホップノードが輻輳中心ノードに隣接していなければ、以後は迂回路表を使う必要がない。パケットヘッダから輻輳中心ノードを削除し、最短次ホップノードにパケットを転送する。この際、最短次ホップノードに至るリンクに輻輳が検知されれば、手順(1)と同様に、再び輻輳中心ノードを記録して迂回次ホップノードにパケットを転送する。

パケット転送処理の例を図4に示す。図4のネットワークにはノードが複数存在し、ノード v_1 , v_2 , ..., v_{12} に着目して、 v_1 から v_{10} にパケットを転送する場合を考える。各ノードの最短経路表および二枚の迂回路表は予め構築されているものとする。ノード v_1 の最短経路表および二枚

の迂回路表の構成例を表1から表3までに示す。 v_1 から v_{10} への最短経路は $v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{10}$ であり、リンク(v_1 , v_3)に輻輳が発生していると仮定する。このとき、パケットは以下のように転送処理される。

手順(1)より、 v_1 は v_1 が持つ表1の最短経路表から最短次ホップノードと輻輳中心ノードを得る。宛先 v_{10} に対しての最短次ホップノードは v_3 、輻輳中心ノードは v_{12} である。

手順(2)より、 v_3 へのリンクで輻輳が検知されると、ノード v_1 はパケットヘッダに輻輳中心ノード v_{12} の情報を記録し、最短次ホップノード v_3 と輻輳中心ノード v_{12} を用いて、表2の第一迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップノード v_4 にパケットを転送する。迂回次ホップノード v_4 に対しても輻輳を検知した場合には、表3の第二迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップノード v_2 にパケットを転送する。

手順(3)より、パケットを受け取った v_4 は、パケットヘッダに輻輳中心ノードの情報が記録されているため、 v_4 の最短経路表から宛先 v_{10} に対しての最短次ホップノード v_3 を得る。 v_3 は v_{12} に隣接するノードであり輻輳領域に含まれているので、パケットを最短次ホップノードに送らず、迂回次ホップノードへ転送する。ノード v_4 は最短次ホップノード v_3 とパケットヘッダに記録されている輻輳中心ノード v_{12} を用いて、第一迂回路表を参照し、迂回次ホップノード v_1 を得る。しかし、 v_1 は前ホップノードなので、 v_1 にパケットを転送すると、経路ループ問題が発生する。そのため、第二迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップノード v_5 にパケットを転送する。

手順(3)より、パケットを受け取った v_5 も v_4 の処理と同様に、 v_5 の最短経路表から宛先 v_{10} に対しての最短次ホップノード v_6 を得る。 v_6 は輻輳中心ノード v_{12} に隣接するノードのため、パケットを最短次ホップノードに送らず、迂回次ホップノードへ転送する。ノード v_5 は最短次ホップノード v_6 とパケットヘッダに記録されている輻輳中心ノード v_{12} を用いて、第一迂回路表を参照し、迂回次ホップノード v_7 を得る。しかし、ノード v_7 は前ホップノード v_4 と隣接するノードなので、 v_7 にパケットを転送すると、経路ループ問題が発生する。そのため、第二迂回路表を参照し、得られた迂回次ホップノード v_8 にパケットを転送する。

手順(4)より、パケットを受け取った v_8 も v_4 の処理と同様に、 v_8 の最短経路表から宛先 v_{10} に対しての最短次ホップノード v_9 を得る。 v_9 は輻輳中心ノード v_{12} に隣接するノードではないため輻輳領域に含まれない。よって、最短次ホップノードを用いてパケットを転送する。この際に、パケットヘッダに記録されている輻輳中心ノードを削除する。

このように、最短次ホップノードと輻輳中心ノードを参照し、輻輳エリアを避けると同時に、このエリアから極力離れないようにパケットを転送する。迂回路表は、OLSRによって得られる経路情報を元に作成することが可能であ

り、その構築方法は 3.4 節で説明する。

ノード v_1 における最短経路表		
宛先ノード	次ホップノード	輻輳中心ノード
v_{10}	v_3	v_{12}
v_{11}	v_3	v_{12}
v_5	v_4	v_5

表 1 ノード v_1 の最短経路表
(図 4 のネットワークより)

ノード v_1 における第一迂回経路表		
次ホップノード	輻輳中心ノード	第一迂回 次ホップノード
v_3	v_{12}	v_4
v_4	v_5	v_3
v_4	v_7	v_3

表 2 ノード v_1 の第一迂回経路表
(図 4 のネットワークより)

ノード v_1 における第二迂回経路表		
次ホップノード	輻輳中心ノード	第二迂回 次ホップノード
v_3	v_{12}	v_2
v_4	v_5	v_{13}

表 3 ノード v_1 の第二迂回経路表
(図 4 のネットワークより)

ノード v_1 における隣接ノード表	
1ホップノード	隣接ノード集合
v_4	v_3, v_{13}
v_3	v_4

表 4 ノード v_1 の隣接ノード表

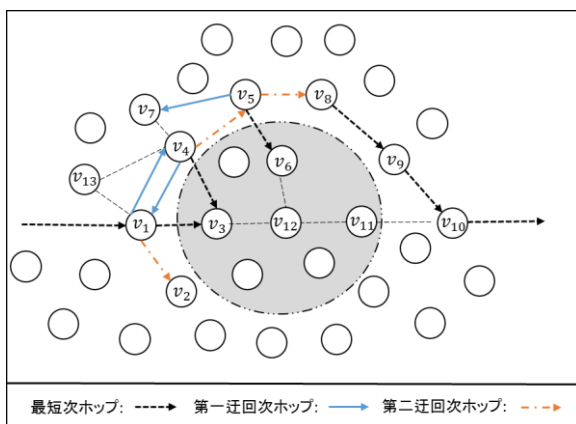


図 4 迂回路を用いたパケット転送処理 例

3.3 輻輳検知方法

提案手法では、各ノードが IEEE802.11 に準拠したインタフェースを一つ持ち、ルーティングプロトコル OLSR が動作する。IEEE802.11 はデータリンク層のデータフレームを送信し、返答の ACK フレームを受信すると、データフレームが宛先に届いたと判断する。一定時間 ACK フレームを受信されなければ、データフレームを再送する。再度 ACK フレームを受信されない場合には、ACK フレームが返るまでデータフレームの再送を繰り返す。データフレームの再送回数が規定回数に達すると、フレームは破棄される。

提案手法では、フレームの再送回数を用いて輻輳を検知する。具体的には、過去 k 回のデータフレームの再送回数の平均をリンク毎に計算し、その値が閾値 T_k 以上であれば輻輳が発生したと判断する。輻輳判定は、データフレームを送信する度に行う。また、輻輳発生後、一定時間を輻輳状態と判断し、3.2 節の packets 転送処理の手順(2)に従って packets を転送する。また、迂回中の packets である場合、手順(3)に従って packets を転送する。

3.4 迂回経路表の構築

迂回次ホップノードは最短次ホップノードと輻輳中心ノードとの組み合わせに対して決定する。また、OLSR の制御 packets である Hello packets により自身から 2 ホップ先までのノード情報が得られる。OLSR によって得られる 2 ホップ先までのノード情報を迂回次ホップノード計算の際に利用する。

初めに、迂回次ホップノード決定の際に必要な集合 N^2 を定義する。あるノード v において、 v から 2 ホップ離れたノード集合を集合 N^2 とする。また、 v に隣接するノード a に対して、集合 N^2 の要素の中で a と隣接するノードの集合を集合 N_a^2 と表記する。

次に迂回次ホップノード決定の手順を見ていく。あるノード v において、最短次ホップノード p と輻輳中心ノード c に対して手順 I ~ IV を行うことにより迂回次ホップノードを決定する。以下の手順は、全ての可能な最短次ホップノード p と輻輳中心ノード c の組に対して、それぞれ実行される。

- I. 集合 N_p^2 を求め、 N_p^2 の少なくとも一つの要素と、ノード v の両方に隣接するノードの集合を得る。そのノード集合を迂回候補集合とする。
- II. 手順 (I) により決定した迂回候補集合の要素は、迂回候補集合内の他の要素と隣接しているかを調べ、隣接している数を計算する。その値を隣接数とする。
- III. 手順 (I) により決定した迂回候補集合から、輻輳領域に含まれない (すなわち、 c に隣接しない) 2

つのノードの組み合わせを考え、2つのノードの組み合わせの中から、互いに隣接せず、かつお互いの隣接数の和が最小となる2つのノードを選び、それを第一迂回経路表と第二迂回経路表の迂回次ホップノードとして、それぞれ決定する。

- IV. 手順(III)で迂回次ホップノードが決定できない場合は、手順(I)により決定したノード集合から、輻輳領域に含まれないノードの中で、隣接数が最も小さいノードを1つ選び、それを第一迂回経路表の迂回次ホップノードとして決定する。

手順(III)、手順(IV)より隣接数が小さいノードを迂回次ホップノードとして選択する理由として、隣接数が小さいということは周りのノード数が少なく、輻輳の影響を受けている可能性が少ないためである。

図5を例に、迂回経路表作成の過程を説明する。ノード n_1 における、ある宛先への最短経路を $n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_3 \rightarrow \dots$ とする。最短次ホップノードは n_2 、輻輳中心ノードは n_3 となる。以下に n_1 における、輻輳中心ノード n_3 に対する迂回次ホップノードを計算する例を示す。

はじめに、 n_1 から2ホップ先のノードの中から n_2 に隣接するノード集合 $N_{n_2}^2$ を求める。集合 $N_{n_2}^2$ は図5のような n_4, n_5 を含むノードが選ばれる。

次に、手順(I)より、迂回候補集合を求める。集合 $N_{n_2}^2$ の要素少なくとも一つの要素と n_1 の両方に隣接するノードからなる集合を迂回候補集合とする。

次に、手順(II)より、選ばれた迂回候補集合の要素は、他の迂回候補集合の要素との隣接数を求める。隣接数が少ないノードは他のノードの干渉が少なく、迂回次ホップノードに適している。図5では、ノード n_6, n_7 が、それぞれ隣接数が少ないノードとして選ばれる。

最後に、手順(III)より、迂回候補集合の要素の中から隣接数が少なく、かつ互いに隣接しないノードの組みを選び、それぞれを迂回次ホップノードとする。図5では、ノード n_6, n_7 が、隣接数が少なく、かつ互いに隣接していないため、迂回次ホップノードに選ばれる。

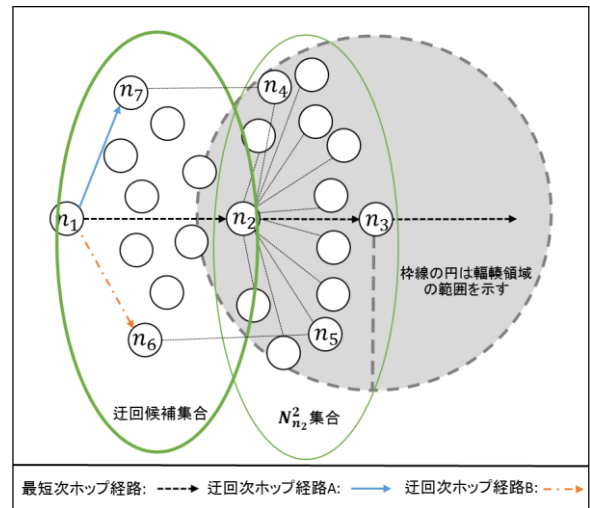


図5 n_1 における迂回次ホップノードの決定

4. 提案手法の評価

4.1 実験シナリオ

提案手法は、局所的に輻輳が発生した場合に、適応的にパケットを迂回させることで、通信性能を向上することを意図している。局所的な輻輳を模擬するために、本評価シナリオでは、ネットワーク上に妨害電波を発生するノード(以後、妨害ノード)を設置したシナリオにおいて、通信性能を評価した。このシナリオでは、妨害ノード近くで通信が行われた場合、輻輳が発生し通信品質が低下する。そこで、輻輳の影響を避ける大回りの迂回により、輻輳領域を避けた迂回通信を行うことによる通信性能の向上を評価した。

評価実験はネットワークシミュレータ Scenargie Ver1.7[10]を用いた。ルーティングプロトコルとして OLSR を用い、Scenargie に実装されている OLSRv2 を用いる。提案手法を実装したうえで、提案手法と既存の OLSRv2、迂回経路表が1枚のみである文献[11]の手法を比較した。以後、それぞれを「提案手法」「迂回経路表なし」「迂回経路表1枚」と表記する。

シナリオについて述べる。1200m×1200m のフィールド上に、固定ノード100個をランダムな位置に配置する。各ノードは IEEE802.11 に準拠したインタフェースを1つ備え、その通信速度は 6Mbps とする。妨害ノードをフィールドの中央に配置し、他のノードと同様の IEEE802.11 インタフェースを備える。妨害ノードは 512 バイトのブロードキャストフレームを 1Mbps で送信し続けることとする。ただし、妨害ノードも他ノードと同一のチャンネルで動作し、CSMA/CA の動作に従うため、送信タイミングは周囲の通信状況に応じて前後する。

フィールドの左辺中央と右辺中央にそれぞれ送信ノードと受信ノードを配置し、パケットサイズ 512 バイトの CBR(Constant Bit Rate)通信を発生させる。送信レートは 100kbps から 500kbps まで変動させた。

CBR 通信の開始時間は、ルーティングプロトコルの動作が安定したシミュレーション開始 30 秒後に設定し、1 分後に妨害ノードがブロードキャストを開始する。シミュレーション開始 1 分後から 5 分間にわたって、パケット到達率の集計を行った。試行回数は 10 回とし、それらの平均値を計測結果とする。試行ごとの初期ノードの配置はランダムに変更する。

4.2 実験の結果と考察

集計したパケット到達率を図 6 に示す。横軸は CBR の送信レート、縦軸はパケットの到達率を示す。100kbps から 200kbps の送信レートでは、低い送信レートのため輻輳による障害が発生する可能性は低いことから、妨害ノードの影響を受けるものは少なく、すべての手法で 100% 近くの到達率になっている。そして、250kbps 以降から、「迂回経路表なし」におけるパケット到達率の急激な低下が見られ、妨害ノードの影響が大きいことがわかる。一方、「迂回経路表 1 枚」、および提案手法は迂回路を活用することで、パケット到達率の低下を抑制している。

「迂回経路表 1 枚」と提案手法を比較すると、「迂回経路表 1 枚」においてパケット到達率の低下が著しい。これは、迂回路において、パケットがループし通信が集中することから発生する経路ループ問題が原因であることが確認された。図 7 に実験シナリオで計測した TTL によるドロップパケット数を示す。「迂回経路表 1 枚」の TTL によるドロップパケット数は全ての送信レートにおいて、一定数存在する。TTL の数が増えることによって経路ループによる可能性が多くなり、ループ箇所通信が集中することによって、他の通信への影響を考えられるため、TTL によるパケット損失を減らすことが望ましい。一方、提案手法においては、TTL によるパケット損失は少なく、経路ループの発生を低減させていることがわかる。提案手法では迂回経路表を二枚用意することで、経路ループを抑制しており、迂回路での輻輳が緩和され、迂回が上手く働いている。

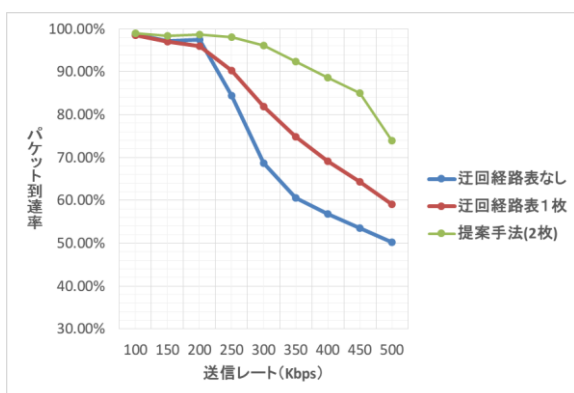


図 6 実験シナリオにおけるパケット到達率

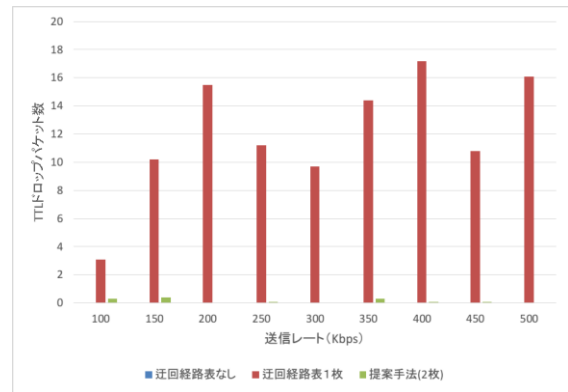


図 7 実験シナリオにおける TTL ドロップパケット数

5. おわりに

本研究では、無線アドホックネットワークにおいて局所的に発生する輻輳に対応するために、輻輳を検知し、輻輳中心を仮定して、その周囲 1 ホップの範囲を迂回するような迂回路の構築手法を提案した。そして、迂回路において発生する経路ループ問題の対策案として、迂回経路表を二枚用意し、適切に迂回路を切り替えることで、経路ループの可能性を低減させ、通信性能の低下を抑えるマルチパスルーティング法を提案し、シミュレーションの評価を行った。

評価の結果、実験シナリオにおいて提案手法の有効性を示せた。しかし、今後の課題は多くある。まず、実験シナリオが不足していることが挙げられる。今回用いたシナリオでは、環境の一部を表したものでしかなく、例えば、妨害ノードが複数存在する場合や、ノードが移動する環境における提案手法の有効性はまだ示せていない。今後は、輻輳が想定される様々な環境において、提案手法の有効性を示すとともに、提案手法における問題点を改善し、多くの環境に対応する迂回路構築手法を検討したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24700069 の助成を受けた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- Perkins, C. and Belding-Royer, E.: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV), IETF RFC3561, 2003.
- Tsai, J. and Moors, T.: A Review of Multipath Routing Protocols From Wireless Ad Hoc to Mesh Network, in Proceedings of the ACoRN Early Career Researcher Workshop on Wireless Multihop Networking, Australia, 2006.
- Wang, L., Zhang, L.F., Shu, Y.T., Dong, M. and Yang, O.W.W.: Multipath Source Routing in Wireless Ad Hoc Networks Proc. IEEE CCECE, Halifax, Nova Scotia, Canada, pp.479-483 (May 2000)
- Lee, S.j. and Geria, M.: Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Network, Proc. IEEE ICC 2001, Vol.10, pp.3201-3205 (2001).
- 江藤大, 油田健太郎, 岡崎直宣, 朴美娘: アドホックネットワークにおけるゾーン重複のない複数経路構築手法の提案と評価,

情報処理学会論文誌, Vol.53, No.1, pp.336-341 (Jan. 2012)

6) Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing, IETF RFC3626, 2003.

7) Yi, J., Adnane, A., David, S. and Parrein, B.: Multipath Optimized Link State Routing for Mobile Ad-hoc Networks, Ad Hoc Networks, Vol. 9, Issue 1, pp.28-47 (2011).

8) Hansen, A.F., Egeland, G. and Engelstad, P.: Could Proactive Link-State Routed Wireless Networks Benefit from Local Fast Reroute?, 6th Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR2008), pp.453-462 (2008)d.

9) 湯川陽平, 吉廣卓哉: OLSR における迂回路構築法に関する一考察, 情報処理学会研究報告, 2013-DPS-155 (2013).

10) Scenargie, Space-Time Engineering, "Scenargie VisualLab," available from (<https://www.spacetime-eng.com/jp/>) (accessed 2014-10-23)

11) 梶清貴, 吉廣卓哉: OLSR における輻輳回避のための迂回路構築手法, マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO)2013 シンポジウム, pp.1577-1583 (2013).