

アドホックネットワーク向け マルチパスルーティングプロトコル実現のための ネットワーク通信メトリクス影響評価

浅沼佑紀^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋修^{†2}

近年の無線技術の発展により、端末同士が自律的にネットワークを形成するアドホックネットワークはさまざまな用途で用いられ始めている。アドホックネットワークにおいて無線通信端末を階層的に管理する有用な手法としてクラスタリングが挙げられる。このクラスタリングを用いたルーティングでは通信経路の作成を効率化でき、安定した通信を実現できるとされている。これを発展させた Cluster-by-Cluster ルーティングでは経路作成の処理を効率化することで、ルーティングオーバーヘッドの削減とパケット到達率の向上が実現可能である。しかし、Cluster-by-Cluster ルーティングでは通信状況の変化に対応していないため、複数の通信が混在する実ネットワーク環境ではネットワーク全体のスループットが低下するという問題がある。この通信状況の変化の一例として、一部経路においてトラフィックが集中することで発生する通信遅延などが挙げられる。

そこで本稿ではネットワーク全体のスループット向上のための柔軟な通信経路選択に向けて、トラフィック量を中心としたメトリクスのネットワークに対する影響を評価した。

Evaluation of the influence of various network metrics for the implementation of the multipath routing protocol on ad hoc network

YUKI ASANUMA^{†1} YOSHITAKA NAKAMURA^{†2} OSAMU TAKAHASHI^{†2}

1. はじめに

近年、無線通信技術の進展や、端末の小型化、高性能化によって、アドホックネットワーク環境は浸透しつつある。アドホックネットワークは基地局などのインフラを必要とせず、無線端末(ノード)同士が自律的に形成するネットワークである。アドホックネットワークに適したアドホックルーティングプロトコル[1]として DSR(Dynamic Source Routing)[2]や AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)[3]に代表されるリアクティブ型プロトコルがある。これらはデータ通信時に使用する経路が長くなると、パケット到達率の低下やルーティングオーバーヘッドの増大が引き起こされることが知られている。このためアドホックネットワークにおいて複数の通信が混在した場合、長経路通信によって輻輳が発生し、通信信頼性が低下しやすくなる。従って、安定した通信を実現するためには、長経路通信の発生を抑制する必要がある。このような環境において有効な手法として挙げられるのが、クラスタリングを用いたルーティング[4]である。ネットワーク上の物理的に近いノード同士でグループ(クラスタ)形成するため、DSR などの非クラスタベースのルーティングと比べて通信時の経路構築などの処理を効率化できる。このクラスタリングを用いたルーティングに対し、更に長経路通信の発生を抑制する改良を加え

たのが、Cluster-by-Cluster ルーティング[5]である。Cluster-by-Cluster ルーティングでは経路キャッシュの仕組みを活用することで新鮮な短経路を生成し、それらを複数組み合わせることで任意の経路を実現している。これによって長経路通信によって生じるパケット到達率の低下やオーバーヘッドの増大などといった問題を解決している。しかし、Cluster-by-Cluster ルーティングは一つの経路を通信開始時から終了時まで使い続けることを前提としており、経路を切り替える仕組みが存在しない。複数の通信が混在するような環境においては各ノードの通信状況が随時変化するため、通信の輻輳やトラフィックの増加によるスループットの低下が発生する。

そこで本稿では、複数の通信が混在する環境下でもネットワーク全体のスループットを維持するルーティングの実現に向け、Cluster-by-Cluster ルーティングに経路切り替え機能を追加する。この経路切り替えに際し有効な複数のネットワークメトリクスを洗い出し、これらのネットワークに対する影響をネットワークシミュレータ ns-2 を用いて評価した。

^{†1} 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
Graduate School of Systems Information Science, Future University Hakodate

^{†2} 公立はこだて未来大学 システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University Hakodate

2. 関連研究

2.1 Cluster-by-Cluster ルーティング

Cluster-by-Cluster ルーティングでは、通常のアドホックルーティングにおける、中継ノードを記録した経路のほか、クラスタ上にオーバレイネットワークを構築し、そのオーバレイネットワーク上でクラスタ間ルーティングを行う。この Cluster-by-Cluster ルーティングの例を図 1 に示す

Cluster-by-Cluster ルーティングは一般的なクラスタベースルーティングと同様に、物理的に近いノード同士でクラスタヘッド(CH: Cluster Head)を中心にクラスタを形成する。CH は各クラスタに 1 つずつ存在し、自分のクラスタ内のノードの情報を集中管理する。また、異なるクラスタ間と通信をする際には、クラスタの境界に位置するノードをゲートウェイ(CG: Temporal Cluster Gateway)に設定し、クラスタ同士の通信の橋渡しを行う。CH, CG どちらにも属していないノードはメンバノード(MN: Member Node)となる。

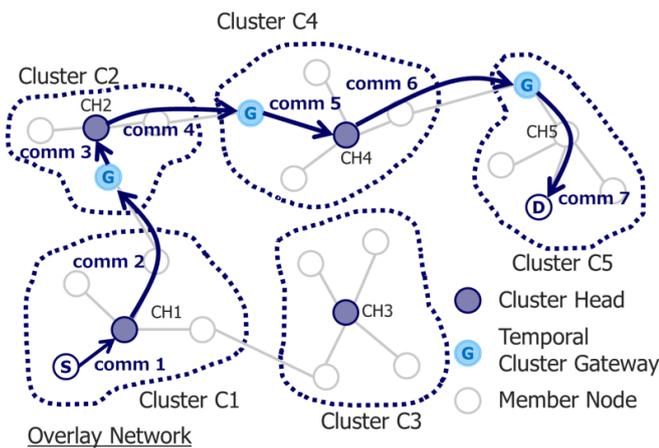


図 1 Cluster-by-Cluster ルーティング

ノード間のデータ通信時には、送信元ノードから宛先ノードが所属するクラスタまで Cluster-by-Cluster でデータを転送する(図 1)。各クラスタの CG と CH から構成されるオーバレイネットワーク上で宛先ノードを指定することにより送信元ノードから宛先ノードまでの 1 本の長経路通信が、各クラスタを単位とする短経路通信に分割される(図 2,3)

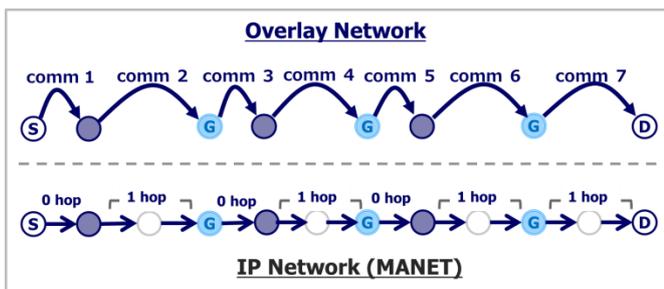


図 2 Cluster-by-Cluster ルーティングにおける通信分割

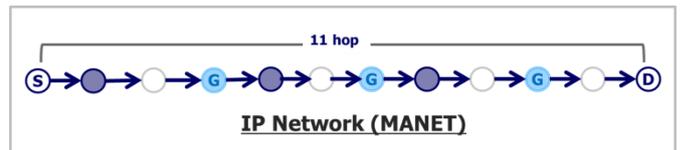


図 3 従来のルーティングの通信経路

2.2 隣接端末を考慮した Cluster-by-Cluster ルーティング

Cluster-by-Cluster ルーティングはノードの個数が多いネットワークで使われることが想定されており、複数のノード上に複数の通信が存在するケースもある。その場合、ある通信が他の通信のパフォーマンスを低下させる恐れがある。この問題に対してネットワークにおけるある種のメトリクスを用いた経路切り替えを適用したのが、隣接端末を考慮した Cluster-by-Cluster ルーティングである[6]。この手法では隣接端末数 N 、平均リンク切断予測時間レベル LLT 、バッテリー残量 B 、ノードの振る舞い T 、を用い、以下の式によってある経路における優先度を求める。

$$\text{優先度} = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{LLT_{average}} + \omega_3 \times \frac{1}{B} + \omega_4 \times \frac{1}{T_{role}}$$

求めた優先度 W を各経路で比較し、 W の値が大きな経路に動的に切り替える。この結果、ネットワークの全体の負荷を分散し、スループットの向上を実現している。

3. 先行研究

3.1 本研究の位置づけ

本稿では Cluster-by-Cluster ルーティングに対する複数のメトリクスを用いた経路切り替え機能の追加に際して、クラスタを形成していないアドホックネットワークに対する各メトリクスの影響を評価する。提案方式はもともとクラスタを形成する前提で作成されているが、本稿では実験環境に合わせ、クラスタ形成部分については言及しない。

3.2 メトリクスにトラフィック状況を用いて経路切り替えを行う Cluster-by-Cluster ルーティング

著者らが先行研究で提案した Cluster-by-Cluster ルーティング[7] (以下、本方式) では、以下の 3 ステップで経路切り替えを行う。

- (1) メトリクスの測定と収集
- (2) 経路における優先度の計算
- (3) 経路の切り替え

Cluster-by-Cluster ルーティングは DSR をベースに構築されており、単一経路しか構築・保持できない。そこで本方式では Cluster-by-Cluster ルーティングを拡張し、プライマリ経路 1 本と代替経路 2 本を構築するようにした。これらの経路を対象に状況に応じて経路切り替えを行うことで、安定化したルーティングを行う。この経路切り替えの基準としてスループットを維持するためのメトリクスが必要で

ある。本方式では4つのメトリクス(ホップ数, トラフィック量, リンク状態, バッテリ残量)を用いて経路切り替えを行っている。

メトリクスを各ノードで測定した後, 送信元ノードへメトリクス情報を渡す際には Cluster-by-Cluster ルーティングに搭載されている Neighbor Feedback を使用する。本方式では Neighbor Feedback によって, 各ノードが送信元ノードへメトリクスを付加したビーコンを送信するよう実装している。

メトリクスのうちホップ数については RREQ の hop count を利用して測定する。各ノードの移動により MN や CG が通信不可能な場所へ移動してしまった場合, Cluster-by-Cluster ルーティングでは動的にホップ数が変化することが考えられるが, 本稿ではノードは固定としているため, ホップ数の変更は考慮しない。また, トラフィック量については各ノードが自身のキューを参照し保持しているパケットの量を調べ, これを traffic として保存する。一般にリンク状態は隣接ノード同士の通信遅延時間を指す。この通信遅延時間を通信経路におけるホップ数で割ることによって当該経路上の1ホップ当たりの平均遅延時間 Link を算出し, リンク状態を表わす指標として用いる。また, 各ノードが自身のバッテリー残量を参照し, B として保存する。

送信元ノードは, 収集したこれらのメトリクスに基づき各経路について優先度 W を計算し, 経路選択基準として用いる。W は以下の式で求める。

$$W = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{\text{traffic}} + \omega_3 \times \frac{1}{\text{Link}} + \omega_4 \times B$$

ここで, N は送信元ノードから宛先ノードまでのホップ数, traffic は当該経路における各ノードのトラフィックの和, Link は当該経路におけるノード間の1ホップ当たり平均遅延時間, B は当該経路におけるノードの平均バッテリー残量を表している。また, それぞれのメトリクスに対し, ω_1 から ω_4 までのパラメータによって重み付けを行っている。経路切り替えは図4のフローチャートに基づいて行う。本方式には2種類の経路が存在し, 送信元ノードの送信要求に対して宛先ノードまでの実際にパケットを通信するプライマリ経路が1本と, 経路切り替えの候補になる代替経路が1本以上構築される。一定時刻に達したら, 送信元ノードはプライマリ経路, 代替経路の全ての経路に対して優先度 W の計算を行う。計算後, W が最も大きい経路をプライマリ経路とし, プライマリ経路を使用して通信を行う。プライマリ経路・代替経路の全てが使用できない場合は, 送信元ノードから改めて送信要求を行い, 通信経路を再構築する(図5)。

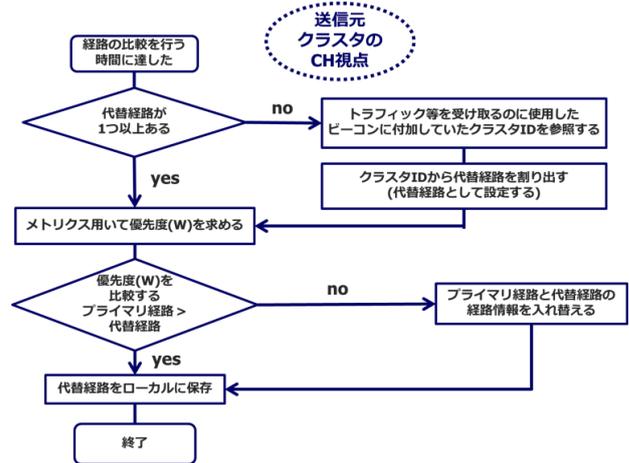


図4 優先度による経路切り替えアルゴリズム

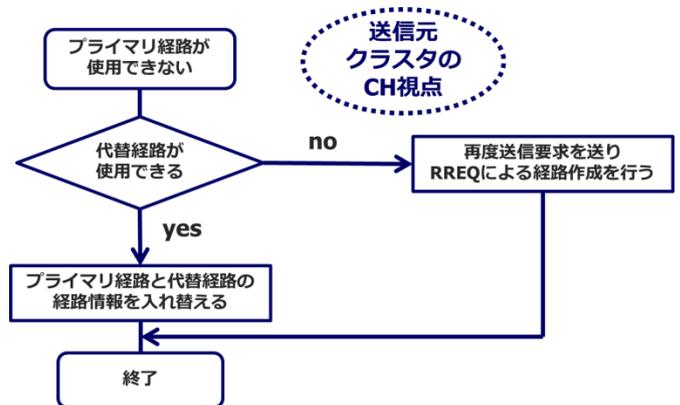


図5 プライマリ経路も代替経路も使用できない場合

3.3 メトリクス基本戦略

一般にスループットに影響を与える要素として, 送信元ノードから宛先ノードまでのホップ数が挙げられる。しかしホップ数だけでは複数の通信が存在した際に対応できず, 特定経路にトラフィックが集中することによって通信の輻輳が発生し, スループットの低下が発生する。従って, トラフィック量をメトリクスに用いることで, 複数の通信が存在した際にも特定経路への通信の集中を防ぎ, スループットの低下を防ぐことができると考えられる。また, ノードの様々な問題によって通信遅延が発生した場合にはスループットが低下する。この場合には通信遅延が発生しているノードを中継しない経路で通信することでスループットの低下を防ぐことができる。この通信遅延をリンク状態とし, メトリクスとして使用する。さらに, ノードはバッテリーを消費して通信を行っているため, バッテリ残量が著しく低下した場合に通信の続行が不可能になる可能性がある。この場合, 通信が断絶され急激なスループットの低下を引き起こす。そこでメトリクスにバッテリー残量を使用することで, バッテリ残量の少ないノードを使用せず, 長期的に通信が可能になると考えられる[8]。

4. 実験と考察

4.1 実験

マトリクスを用いたルーティングの効果調べるため、ネットワークシミュレータ ns-2(Network Simulator version 2) [9]上で評価実験を行った。シミュレーションパラメータを表1に示す。

本実験はマトリクスのネットワークに対する影響を調査するため、ノードを固定したアドホックネットワークにおいて、クラスタを形成せずに行う。ただし、本環境は Cluster-by-Cluster と同様に、宛先ノードから送信元ノードへ各マトリクス情報を伝えるビーコンメッセージを送信するようにしている。また、送信元ノードおよび宛先ノードのバッテリー残量がゼロになると、通信経路によらず通信が不可能になってしまうため、送信元ノードと宛先ノードのバッテリー容量を他のノードの2倍とすることで、実験中に通信が途絶えないようにしている。実験トポロジは図6の通りであり、このトポロジ上で通信A、通信B、通信Cをそれぞれ時刻をずらしながら開始する。その後、優先度 W を計算し、 W に基づいて経路切り替えを行う。この優先度 W は実験1から実験4に合わせて以下の W_1, W_2, W_3, W_4 のように定めた。

$$\text{実験 1 : } W_1 = \omega_1 \times \frac{1}{N}$$

$$\text{実験 2 : } W_2 = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{\text{traffic}}$$

$$\text{実験 3 : } W_3 = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{\text{traffic}} + \omega_3 \times \frac{1}{\text{Link}}$$

$$\text{実験 4 : } W_4 = \omega_1 \times \frac{1}{N} + \omega_2 \times \frac{1}{\text{traffic}} + \omega_3 \times \frac{1}{\text{Link}} + \omega_4 \times B$$

表1 シミュレーションパラメータ

計測時間	1500s
ネットワークサイズ	1200m×1200m
ノード数	36 個
通信プロトコル	UDP
ルーティングプロトコル	DSR

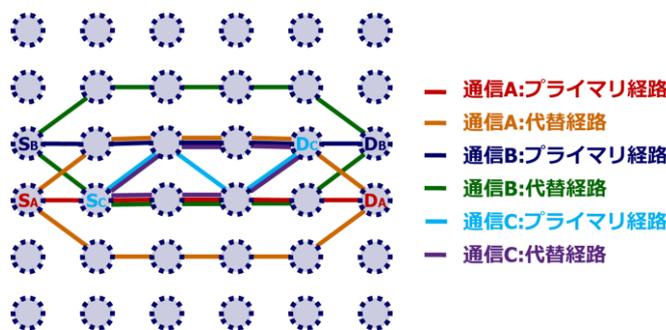


図6 実験のトポロジ

通信 A は 100s に通信を開始し 1200s に通信を終了する。通信 B は 500s に通信開始し、1500s に通信を終了、通信 C は 700s に通信を開始し、1400s に通信を終了する。優先度計算および経路切り替えは全ての実験で 750s 時点で行う。通信に関するパラメータは表2に示す。

表2 通信に関するパラメータ

通信 A の通信時刻	100s-1200s
通信 B の通信時刻	500s-1500s
通信 C の通信時刻	700s-1400s
通信 A の 1 パケットのサイズ	800byte
通信 B の 1 パケットのサイズ	1500byte
通信 C の 1 パケットのサイズ	400byte
パケット送信間隔	10packet/s
優先度 W の計算時刻	750s
W による経路切り替え時刻	750s

4.2 実験結果と考察

実験1の経路切り替えの結果、通信経路は図7のようになり、ネットワーク全体のスループット変動は図8のようになった。マトリクスにホップ数だけを使用し、経路切り替えの優先度に W_1 を用いているため、ホップ数が変化しない本環境では通常の DSR と同じ振る舞いを行った。その結果、経路を切り替えられず、750s 以降、通信が輻輳し、ネットワーク全体のスループットが大幅に低下した。また、1000s 時点で通信 A と通信 C で中継しているノードのバッテリー残量がゼロになり、通信が不可能な状態になった。そのため、1000s 以降では通信 B のスループットが回復し、1500s までほぼ一定のスループットを保ったまま通信することができた。

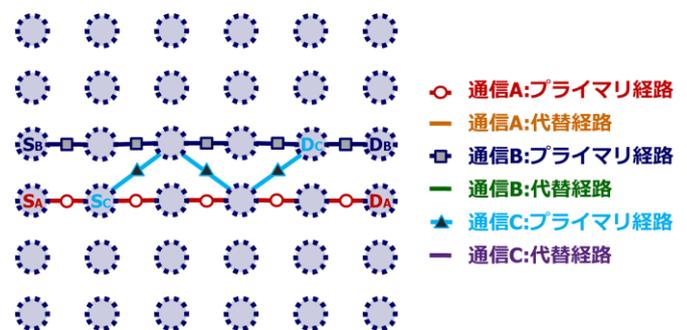


図7 実験1の結果：通信経路

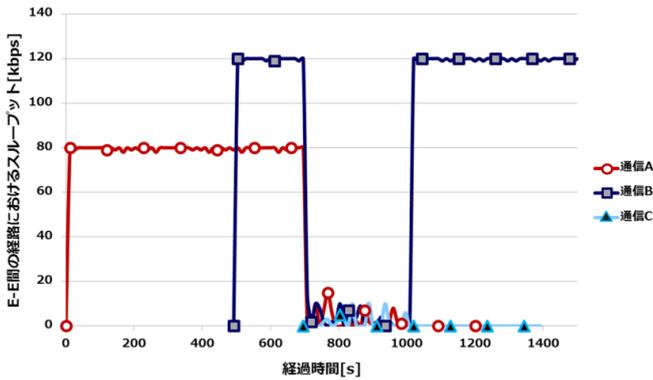


図 8 実験 1 の結果：経路におけるスループット

実験 2 ではメトリクスにホップ数のほか、トラフィックを追加した W_2 を経路切り替えの優先度として用いる。実験 2 の結果は図 9 と図 10 の通りである。ホップ数とトラフィック量を考慮した経路切り替えができたことで、通信が一定のノードに集中することなく、バランス良くノードを使うことができている。しかし、経路切り替えの瞬間は通信が一時的に切断されており、スループットが急激に低下している。また、また、実験 1 では通信 A でバッテリー残量低下による通信断絶が発生していたが、750s に代替経路に通信経路を切り替え、それまでと別のノードを使用して通信したことで、最後まで通信することができている。この結果から、特定の環境下ではメトリクスにバッテリー残量を考慮しなくても、経路切り替えによってネットワークの中で複数の異なるノードを使い、長時間にわたる通信が可能になることがわかる。

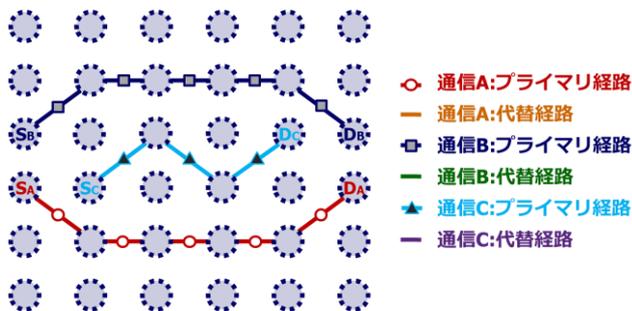


図 9 実験 2 の結果：通信経路

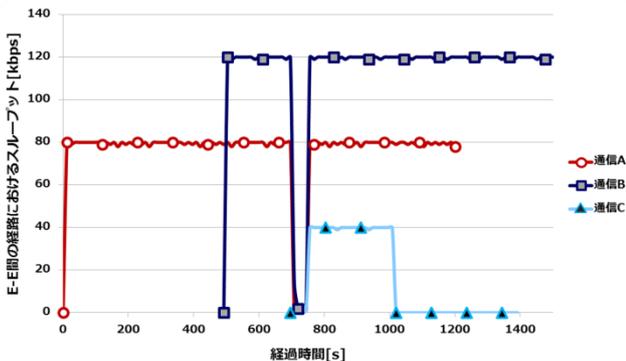


図 10 実験 2 の結果：経路におけるスループット

実験 3 ではホップ数とトラフィック量に加えて、リンク状態(遅延時間)をメトリクスに追加した W_3 を経路切り替えの優先度として用いる。実験 3 の結果は図 11 と図 12 の通りである。通信 A と通信 B において変化はないが、通信 C の通信経路において変化が見られた。これは図 13 のように、ノードをグリッド状に設置したとき、斜め方向のノードに対しての距離がわずかに長くなり、DSR の通信経路作成時に縦か横のノードの方が僅かに早く制御メッセージが到着するためである。しかし、図 12 のスループットの結果を見ると実験 2 と比べて変化がないことがわかる。これは、本実験では各ノードの性能差は考慮しておらず、ノード間に通信を妨害するような障害物が存在しない環境下で UDP 通信を行っていることが理由として考えられる。このため、リンク状態は、各ノードの物理的な性能が異なったり、ノード間に遮蔽物が存在したりするような環境で効果があると予想される。

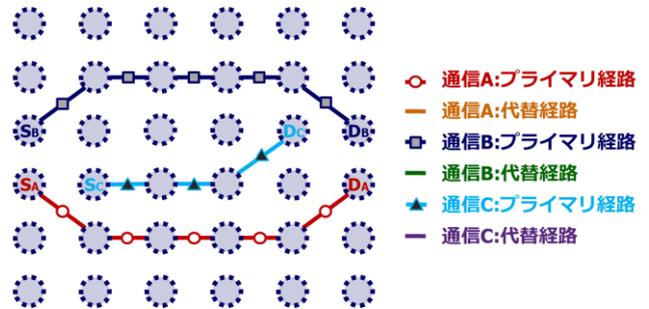


図 11 実験 3 の結果：通信経路

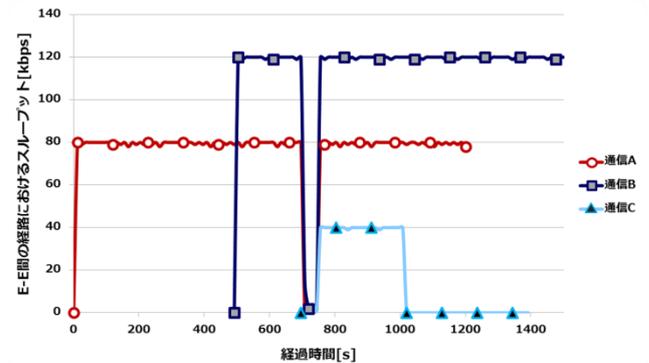


図 12 実験 3 の結果：経路におけるスループット

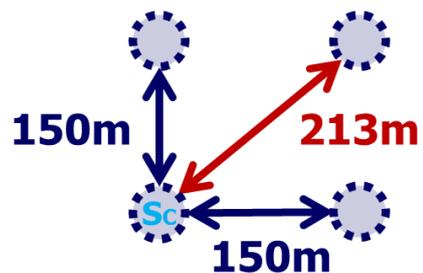


図 13 ノード間の距離

実験4では実験3までのメトリクスにバッテリー残量を追加した W_4 を経路切り替えの優先度として用いる。結果は図14と図15の通りである。実験3と同様、変化がみられるのは通信Cであり、通信経路とスループットの両方で変化が見られる。まず通信経路はよりバッテリー残量の多い方へと切り替わっている。この結果、実験3とは異なり、1000s以降でも通信Cのスループットは低下していない。実験3で通信Cが使用している中継ノードは通信Aが10sより使用していたため、他のノードよりもバッテリー残量が少ない状態にある。このまま通信Cがこれらのバッテリー残量の少ないノードを使ってしまうとさらにバッテリー残量が減少し、最終的にバッテリー残量がゼロになることで通信が不可能になって、急激にスループットが低下することが予想される。そこでバッテリー残量のメトリクスが効果的に働き、通信Cにおいてバッテリー残量の多いノードを中継した経路を使用されるようになった。こうすることでバッテリー残量の減少による通信スループットの低下を防ぎ、通信Cにおいて1000s以降のスループットが向上したと考えられる。

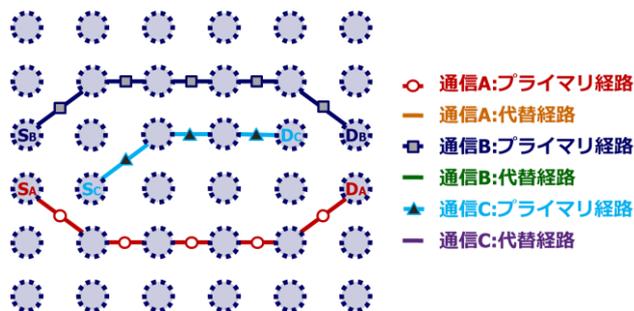


図14 実験4の結果：通信経路

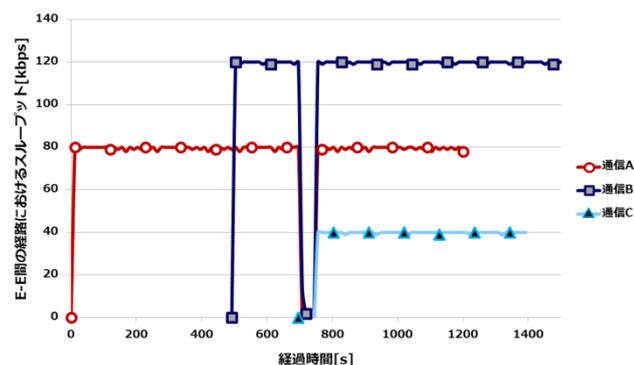


図15 実験4の結果：経路におけるスループット

最後に実験1から実験4におけるネットワーク全体のスループットをまとめたグラフを図16に示す。トラフィック量をメトリクスにネットワーク全体のスループットは向上し、効果が得られていることが確認できる。また、バッテリー残量も通信を長期的に行うためには必要なメトリクスであることがわかった。しかし、リンク状態のメトリクスについては想定ネットワーク環境に適しておらず、効果的には働かなかった。リンク状態のメトリクスは、各ノードに

性能差があることや、ノード間に障害物があるような状況、もしくはMANETのようにノードが移動し、受信できる電波強度が常に変わるような環境で効果があると考えられる[10]。全ての実験を通し、全体的なスループットを見ると僅かではあるスループットに揺れがみられる。これはメトリクス収集のビーコンの影響の結果であり、ノードの個数の多い大規模のネットワークではさらにスループットが低下してしまう可能性がある。

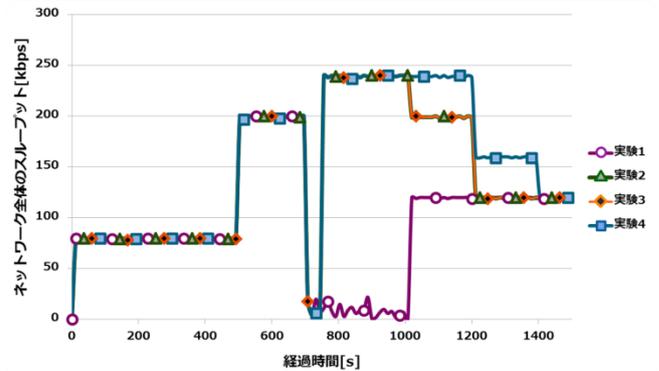


図16 実験1~4のネットワーク全体のスループット

5. おわりに

本稿では、Cluster-by-Cluster ルーティングに経路切り替え機能を追加する際のメトリクスについて、ネットワークに対しての影響をネットワークシミュレータns-2上のシミュレーション実験で評価した。ホップ数、トラフィック量、リンク状態、バッテリー残量経路切り替えの指標として有効であり、これら4つを組み合わせることでネットワーク全体のスループット向上が達成できることを確認した。今後はクラスタを形成したネットワークにおいて提案方式が有効であるかを評価する必要がある。

参考文献

- [1] M. Kumar, R. Rishi, and D.K. Madan "Comparative Analysis of CBRP, DSR, AODV Routing Protocol in MANET," International Journal on Computer Science and Engineering, Vol.2, No.9, pp.2853-2858, 2010
- [2] DSR (Dynamic Source Routing):RFC4728, <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>
- [3] AODV (AD-hoc On-Demand Distance Vector):RFC3561, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [4] J.Y.Yu, P.H.J.Chong, "A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.7, No.1, pp.32-48, 2005
- [5] H. Narumi, Y. Shiraishi, and O. Takahashi, "A Reliable Cluster-based Routing Algorithm for MANET," Proceeding of the International workshop on Informatics (IWIN2009), pp.44-51, 2009
- [6] 鈴木翔太, "MANETs における隣接端末情報を考慮した Cluster-by-Cluster ルーティングプロトコルの研究," 中央大学大学院研究年報, 理工学研究科篇, 第40号, 2010
- [7] 浅沼佑紀, 中村嘉隆, 高橋修, "MANET 上のトラフィック状況をメトリクスとしたクラスタベースルーティングアルゴリズムの提案," 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウム論文集, pp.809 - 814, 2014

- [8] 井口信和, 谷口祐一, 内尾文隆, 瀧寛和, 亀岡孝治, “農場ネットワークのための優先度と電力を考慮した IEEE802.11e によるアドホック通信方式,” 農業情報研究, Vol.16, No.3, pp.81-90, 2007
- [9] The Network Simulator version 2 (ns-2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [10] 田内雅之, 井手口哲夫, 奥田隆史, 田学軍, “MANET における経路切断を回避するルーティング方式の提案と評価,” 情報処理学会研究報告, Vol.2006, No.14, pp.25-30, 2006