

分散タイムスロット制御を適用した 被災通知無線メッシュ網における通報遅延評価

奥田 友希[†] 大西 真晶^{††} 坂野 遼平^{†††}

[†] 工学院大学大学院 工学研究科 〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1

^{††} 能美防災（株）研究開発センター 〒341-0038 埼玉県三郷市中央 1-18-13

^{†††} 一橋大学 大学院ソーシャル・データサイエンス研究科 〒186-8601 東京都国立市中 2-1

E-mail: [†]em24010@ns.kogakuin.ac.jp, ^{††}m.oonishi@nohmi.co.jp, ^{†††}r.banno@r.hit-u.ac.jp

あらまし 既存の通報システムは有線ネットワークに依存しており、巨大地震等の国難級災害時には、119番通報などに大規模な通信障害が起こるとされている。そこで、平時から各種インフラから独立して動作する、耐障害性をもつ被災通知無線メッシュ網の構築を提案してきた。このメッシュ網は Plumtree アルゴリズムを用いることで、耐障害性の具備と効率的なブロードキャストを実現している。この手法はツリー上のタイムスロット割り当てによって遅延性能への悪影響が考えられる。そのため、従来手法はタイムスロットの再割り当てを自律的に行うことで解決を目指した。具体的には各ノードがタイムスロット制御メッセージを送信し、条件に合致したノードのみとホップ数を指標としてタイムスロット番号を交換する。しかし、タイムスロット制御メッセージの送信相手が限られていることから、十分な改善が為されない問題があった。本稿では、すべての隣接ノードにタイムスロット制御メッセージを送信する手法を新たに検証する。これにより、より葉ノードから根ノードに向かってタイムスロット番号が昇順に並ぶことが期待でき、ユニキャストの遅延時間を抑えられると考えられる。シミュレーション実験によりタイムスロット番号の交換の収束を従来手法と比較した結果、ホップ数とタイムスロット番号により強い負の相関が見られた。

キーワード Plumtree, スパニングツリー, タイムスロット

Evaluation of Notifying Delay in a Disaster Notification Wireless Mesh Network Applying Distributed Time Slot Control

Tomoki OKUDA[†], Masaaki OHNISHI^{††}, and Ryohei BANNO^{†††}

[†] Graduate School of Engineering, Kogakuin University 2665-1 Nakano, Hachioji-city, Tokyo, 192-0015 Japan

^{††} R&D Division, NOHMI BOSAI LTD. 1-18-13 chuo, Misato-shi, Saitama, 341-0038 Japan

^{†††} Graduate School of Social Data Science, Hitotsubashi University 2-1 naka, Kunitachi-shi, 186-8601 Japan

E-mail: [†]em24010@ns.kogakuin.ac.jp, ^{††}m.oonishi@nohmi.co.jp, ^{†††}r.banno@r.hit-u.ac.jp

Abstract The existing emergency notification system relies on wired networks, and it is believed that large-scale communication disruptions, such as those affecting 119 emergency calls, can occur during catastrophic disasters like massive earthquakes. To address this, we have proposed the construction of a disaster-resistant wireless mesh network that operates independently of various infrastructures during normal times. However, this method may have a negative impact on delay performance due to the allocation of timeslots on the tree. Therefore, the previous method aimed to solve this problem by autonomously reassigning timeslots. Specifically, each node sends a timeslot control message and exchanges timeslot numbers with only those nodes that match the conditions, using the number of hops as an indicator. However, there was a problem that the number of nodes to which timeslot control messages could be sent was limited. In this method, timeslot control messages are sent to all neighboring nodes. This is expected to result in timeslot numbers aligning sequentially from leaf nodes towards the root node, potentially reducing unicast delay times. After confirming the convergence of timeslot number exchanges, a negative correlation was observed between hop count and timeslot number.

Key words Plumtree, Spanning tree, timeslot

1. はじめに

現在の通報網は有線電話網である 119 番通報が基本である。また、現状の家屋やビル等の物件からの通報は主に有線インフラに依存している [1]。しかし、東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）が発生した際には、断線や通信障害といった中継局の被災により、被災地の約 25% の消防本部で 119 番通報の途絶が発生した [2]。また、内閣府は南海トラフ巨大地震の被害想定を出しており、固定電話は最大 580 万回線の通話支障、及び基地局の停波により大規模な通信障害が予想されている [3]。これらのように大規模な災害では既存の有線網は途絶し、その上の携帯キャリア網やインターネット、119 番通報などに通信障害が生じるおそれがある。そのため、災害通信専用の被災通知無線メッシュ網が求められる。

そこで我々は、各種インフラから独立して動作する無線メッシュ網を構築しておき、災害時の通知に使用することができるネットワークを検討した [4]。この無線メッシュ網は Plumtree アルゴリズムをユニキャスト拡張し、メッシュ状のネットワークにスパニングツリーを形成することで、耐障害性の具備と効率的なブロードキャストを実現している。しかし、ツリー上のタイムスロット割り当てによって悪影響が考えられる。Plumtree では早く届くノードがツリーの葉となる。そのため、早く届いた木経路順にタイムスロットを割り振ると、タイムスロットの待ち時間が遅延を増大すると考えられる。この問題に対し、タイムスロットの再割当を各ノードが自律的に行うことで解決を目指してきた [5]。具体的には、各ノードが自身に割り当てられたタイムスロット番号と根ノードまでのホップ数を指標として、交換要求のメッセージを送信する。交換要求メッセージは Plumtree のツリー修復用メッセージである Ihave メッセージに重畳して送信する。このメッセージに沿ってタイムスロット番号を隣接ノードと交換することで、葉ノード側となるタイムスロット番号が小さくなることで問題の解決を行なった。しかし、Ihave メッセージはツリーの枝以外の隣接ノードとのやりとりのみをする事から、この方法では根ノードを超えたタイムスロット交換が行われないという問題点がある。

本稿では、この問題の解決のために、タイムスロット交換の相手にツリーの枝も含めることを提案する。ツリーの枝を含めることで、より多くのノードペア間でタイムスロット交換を行うことが可能となり、根ノードをまたぐタイムスロット番号の割り当てが改善されることが期待できる。

2. 関連技術

2.1 Plumtree

Plumtree はノード群がランダムにつながったメッシュ状の P2P ネットワークにおいて、効率的にブロードキャストをする為の手法である [6]。耐障害性を持つゴシッププロトコルと、ツリーを組み合わせ、効率的かつ冗長性を確保する。各ノードは eagerPushPeers と lazyPushPeers という隣接ノードの集合を持つ。図 1 に Plumtree における 2 つの通信方式を示す。隣接ノードからブロードキャストメッセージを受信したノードは、

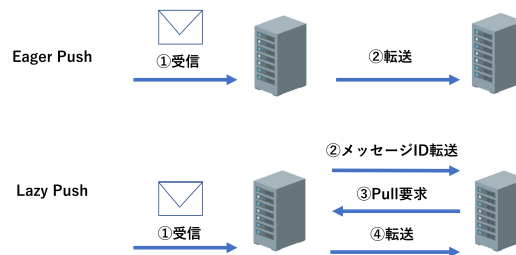


図 1 Plumtree の通信方式

Fig. 1 Communication ways in Plumtree

送信元を除く eagerPushPeers に即座にメッセージを送信する。この通信方法を Eager Push という。初期状態では全隣接ノードが eagerPushPeers に格納されるため、ブロードキャストはフラディングとなる。もしメッセージが重複した場合は送信元を lazyPushPeers へと移す。送信元においても同様の処理を行う。結果、図 2 のように eagerPushPeers の接続関係がスパニングツリーを形成した状態になる。2 回目以降のブロードキャストでは、各ノードはスパニングツリーの隣接関係に沿ってメッセージを転送する。lazyPushPeers はスパニングツリーの修復に用いる。各ノードは一定間隔で lazyPushPeers に Ihave メッセージというメッセージ ID のみを転送する。メッセージ ID を受信したノードは該当するメッセージを保持しているかを確認し、未受信の場合はメッセージ ID の送信元であるノードへ該当メッセージの要求をする。要求を受けたノードはメッセージを送信する。これらの lazyPushPeers を用いた通信を Lazy Push と呼ぶ。なお、Lazy Push によりメッセージを受信したノードは、送信元ノードを lazyPushPeers から eagerPushPeers へと移す。また、送信元においても同様の処理を行う。Plumtree はこれらの 2 つの通信方式を組み合わせることで耐障害性を持ち、効率的なブロードキャストを可能としている。

2.2 TDMA

TDMA (Time Division Multiple Access) 方式は、時分割多重接続と呼ばれる、無線ネットワークにおける通信方式の一つである。通信に用いる周波数を一定時間毎に分割して共有する多重化方式のことである。TDMA では、通信時間全体をタイムスロットと呼ばれる一定の長さの時間枠に分割する。タイムスロットとは、各ノードが電波を发出可能な専用の時間を示しており、各ノードはその時間内のみ電波を送信することができる。そして、各ノードがそれぞれ異なるタイムスロットを使用するため、同一周波数においての複数の通信を可能とする。よって、各ノードが電波を同時に出して衝突が起こるといった障害を防ぐことができる。図 3 は 0 番目から 5 番目までの 6 つのノードに割り振られたタイムスロットを表している。各ノードは割り当てられたタイムスロット内でのみデータを送信することが可能である。例えば、タイムスロット番号として 0 が割り当てら

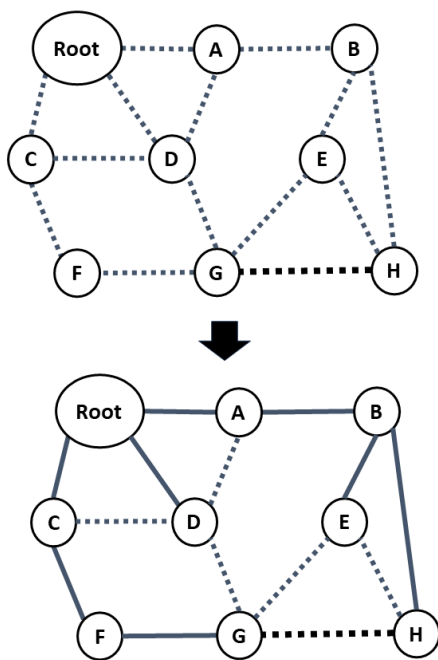


図2 スパニングツリーの形成
Fig. 2 Forming a spanning tree

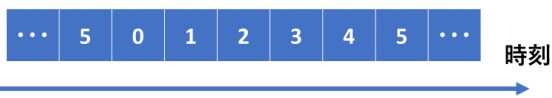


図3 タイムスロットの例
Fig. 3 Example of timeslot

れたノードの場合、0のタイムスロットの時間がやってきた場合のみ通信が可能となる。

2.3 関連研究

木下らの研究では、ツリー型LPWAネットワークにおける経路制御をおこなっている[7]。この研究では、市役所等におかれたサーバを中心に、LPWAモジュールや計測器等を展開し、防災情報を解析・市民へ提供するネットワークを構築している。経路制御では、電波強度RSSIを測定し、受け取った複数の上方向の経路情報を保持させ、経路候補表として冗長化させたツリー型のトポロジーを実現している。通報網の障害発生時において、復旧通信回数を約96%、復旧経過時間を約73%削減しており、有効であるといえる。本研究では、無線メッシュ網にツリーネットワークを構築しており、経路制御の方法が異なる。また、一次対応者への通報に重きを置いており、タイムスロットを考慮したタイムスロット制御を目指す。

町田らの研究では、LPWAを利用した災害時における安否情報共有ネットワークの検討をおこなっている[8]。この研究はLPWA通信方式のLoRaを利用して、在宅避難者の安否情報を発信する為のモジュールと、避難所で受信するためのゲートウェイをもちいたネットワークを構築した。この研究では、一対一の通信によって安否情報を取得しており、地域全体をカ

バーすることが困難という課題がある。本研究では、Plumtreeを用いたマルチホップ型ネットワークであるため、地域全体をカバー可能なネットワークを構築できると考えられる。

3. 被災通知無線メッシュ網

本章では、我々が提案している被災通知無線メッシュ網[4]について述べる。このネットワークは、各種インフラから独立して動作する無線メッシュ網であり、災害時の通報に使用することを考える。独立した防災専用のインフラであれば、堅牢に作りこみやすく、障害発生リスクを小さくできる。通知内容は防災センサの異常事態の通知、通報のみを想定し、地域の任意の場所から一次対応者までの経路を構築しておく。例えば、建物内での通知などであれば防災センター、建物間であれば地域の消防指令センター等の一次対応者への通知、通報を想定する。

また、提案する無線メッシュ網は、Low Power Wide Area (LPWA)[9]の利用を想定する。緊急通報や携帯キャリアの帯域を使用せず、低消費電力かつ広範囲の地域をカバーできるため、LPWAが適していると考えられる。また、被災通知は最低限の通報ができればよいため、データサイズは小さく、広帯域を必要としない。一般に低ビットレートであるLPWAでも伝送速度の不足は生じないものと考えられる。

提案した無線メッシュ網では、衝突回避のためにTDMAによるタイムスロット制御を想定する。ルーティング方式として、確実な通報の為にはフラッディングが考えられるが、多数のメッセージが生じてしまい、LPWAのSTD-T108規格[10]の電波送出時間制限やタイムスロット制御が遅延につながる。そのため、被災通知無線メッシュ網へPlumtreeを適用し、メッセージ数を抑える手法を提案した。

この手法では、Plumtreeを拡張して各ノードに経路表を持たせ、根ノードへのユニキャストを可能としている。しかし、ツリー上のタイムスロット割り当てによって悪影響が考えられる。Plumtreeでは先に届く経路がスパニングツリーの枝となる。そのため、タイムスロットの順序が早いノードとのリンクが根ノード方向の枝になりやすいと考えられる。この手法では、タイムスロット番号が小さい順にタイムスロットが回ってくることを想定する。しかし、ユニキャストを行う際は葉ノードから根ノードへ向かってメッセージを転送するため、タイムスロットの順序が遅いノードから早いノードへと順番に転送が生じ、タイムスロットの待ち時間によって遅延が増大すると考えられる。一方、送信ノードから被災通知が起こった際、送信ノードから他のノードを経由して根ノードまでタイムスロット順に並んでいる場合、各ノードは受信後すぐに自身のタイムスロットになるため、即座に転送を行うことができる。このため、通報全体の転送時間は最短となる。被災通知は迅速に届くことが求められるため、このようなタイムスロット順が望ましいと考えられる。

以前の手法[5]では、タイムスロットの再割当を自律的に行うことで問題の解決を目指してきた。各ノードは、根ノードまでのホップ数の情報に基づき、隣接ノードであるlazyPushPeersとのタイムスロット番号交換の必要性を判断し、交換要求の

メッセージを送信する。Plumtree では経路修復用に、定期的に lazyPushPeers に Lazy Push が送信される。このメッセージにタイムスロットに関する情報を載せ、その情報をもとにタイムスロット番号を隣接ノードと交換することで、葉ノード側ほどタイムスロット番号が小さくなることを可能とする提案をしてきた。しかし、この手法ではツリーの枝となるノードとは、タイムスロット交換が行われないという問題点がある。Plumtree では、根ノードは隣接ノードのすべてが eagerPushPeers となるため、lazyPushPeers に交換要求を行う現状のタイムスロット交換では、根ノードを超えた交換がされない。そこで、本稿では、タイムスロット交換要求メッセージを送信する相手に eagerPushPeers を含めることで、タイムスロット番号の再割り当てをさらに改善する手法について提案する。この手法によって、葉ノードから根ノードへ向かってタイムスロット番号がより昇順に近づき、タイムスロットの待ち時間がより短くなることが考えられる。

4. 提案手法

本稿では、根ノードまでの迅速な通知、通報を実現するために、自律的にタイムスロットを交換する手法を提案する。前提として、各ノードは無線が届く範囲を隣接ノードとする。また、一次対応者を固定的な根ノードとし、すべてのノードは識別子をもつ。初回のブロードキャストでは、一次対応者がいる根ノードから Eager Push を行う。その到着順を利用して準最短経路木を作成する。各ノードは受信した Eager Push があった場合は隣接ノードすべてに送信する。このとき、Eager Push には経由したノードの ID を載せる。すなわち、各ノードは転送時に自身の ID をメッセージに追記する。Eager Push を受信したノードはその情報をもとに、図 4 のように自身から根ノードに至るまでのノード ID の経路表を保持する。このように各ノードが根ノード方向の隣接ノードを認識することで、スパニングツリーが構築される。二回目以降のブロードキャストでは、各ノードはスパニングツリー上の隣接関係に沿ってメッセージを転送する。

各ノードが行うタイムスロット制御について説明する。図 5 に提案手法の概要を示す。また、図 6 に提案手法の交換手順を示す。あるノード A がある隣接ノード B に Ihave メッセージを送信する際、メッセージに根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号を追記して送信する。このとき、Ihave メッセージの送信相手は lazyPushPeers のほかに eagerPushPeers を含む。なお、eagerPushPeers と lazyPushPeers はともに隣接ノードに含まれるため、追加で電波発信を要することはない。Ihave メッセージを受信したノード b は通常の Lazy Push の動きの他に、受信した根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号を確認する。ここで、あるノード x のホップ数を $h(x)$ 、タイムスロット番号を $t(x)$ と表すこととする。Ihave の送信元ノード A と受信ノード B について、次式が満たされる場合、ノード B はノード A にタイムスロット交換要求メッセージを送信する。

$$h(A) < h(B) \wedge t(A) < t(B) \quad (1)$$

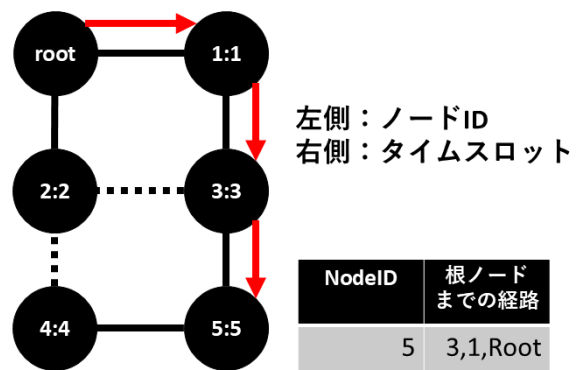


図 4 ノードが保持する経路表例

Fig. 4 Example of a routing table maintained by node

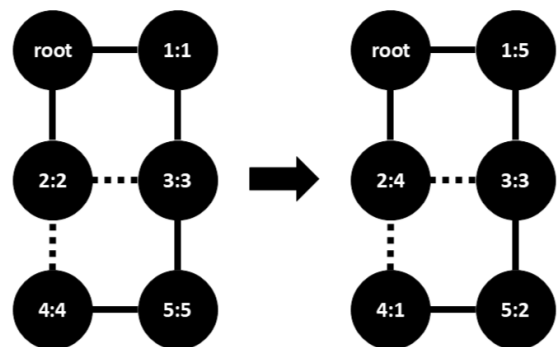


図 5 タイムスロット交換

Fig. 5 Exchange of timeslot

その際、交換要求メッセージには、自身のノード ID とタイムスロット番号を含める。

同時に、このタイムスロット交換が終了するまで他のノードからの交換メッセージを無視することで排他制御を行う。この交換要求は、最初に届いたノードを受理する。もし、他の交換要求を受け付けられない状態であれば、交換拒否メッセージを送信する。次に、交換要求を受け取ったノード A は、受信したノード B のタイムスロット番号と自身の持つノード A のタイムスロット番号を交換する。タイムスロット番号交換後に、ノード A 自身の元のタイムスロット番号を交換承認メッセージとして送信する。また、他のノードからの交換関連のメッセージを無視するモードを解除する。各ノードは Ihave メッセージを定期的に隣接ノードに送信するため、タイムスロットの入れ替えが自律的に起こり、葉ノード側のタイムスロットが小さくなるようにタイムスロットが整理される。

5. 評価実験

5.1 ノード密度のタイムスロット交換への影響検証

ノードが十分な密度で存在していない場合、Ihave メッセージが届かずにタイムスロットの交換が満遍なく行われな可能性が考えられる。そこで、同サイズのエリアにてノード数を変化させた場合のタイムスロット交換の効果を確認するため、Java 言語で実装したイベント駆動のシミュレータを用いた実験

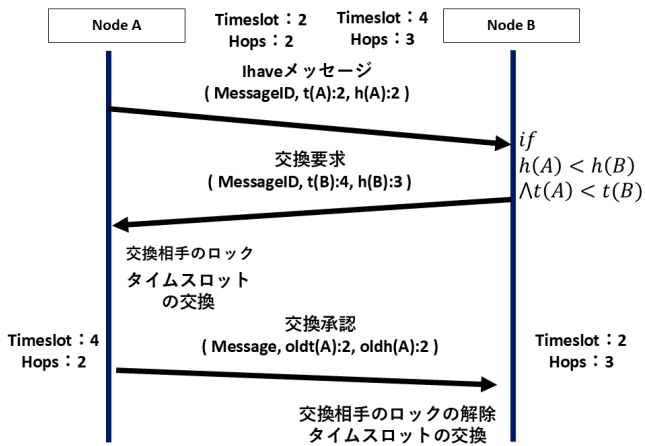


図6 タイムスロット交換手順
Fig.6 Procedure for exchanging a timeslot

表1 実験のパラメータ
Table 1 Parameters of the experiment

パラメータ	値
ノード数	50, 100, 200
Lazy Push 間隔	500ms
エリアサイズ	10km
無線到達範囲	2km
通信終了時間	1000000ms

を行った。実験では、シミュレータのノード数を 50, 100, 200 と変化させ、1,000,000 ミリ秒経過時のノードのホップ数とタイムスロット番号の相関係数を確認する。前提として、各ノードの配置はランダムなものとし、実験でのノードの位置は不変とする。また、初期のタイムスロット番号は、ノード ID と同じとする。実験時のパラメータを表 1 に示す。エリアサイズはシミュレータ内の四方の広さを表している。ランダムに決定したノードを根ノードとして、スパニングツリーを形成する。この実験を従来手法 [5] における lazyPushPeers のみを交換対象とした実験と比較し、本手法と比較する。

各ノード数における相関係数のシミュレーション結果が表 2 である。また、従来手法の各ノード数における根ノードからのホップ数とタイムスロット番号の対応関係をプロットしたものを図 7, 9, 11 に示す。提案手法の各ノード数における根ノードからのホップ数とタイムスロット番号の対応関係をプロットしたものを図 8, 10, 12 に示す。

グラフと表より、提案手法のほうが、従来手法より負の相関が強くなるのがわかる。従来手法では、ノードの密度が少ない状態であると、Lazy Push が届く相手が少なくなる。よって、初期のノード配置によってタイムスロット番号の交換相手に偏りが発生してしまい、弱い負の相関となっていた。しかし、提案手法では、タイムスロット交換メッセージの対象を eagerPushPeer も含めたことで、より強い負の相関となったと考えられる。これは、従来手法と比較してより多くのノードペア間でタイムスロット交換が行なわれたことに起因すると考えら

表 2 各ノード数における Ihave メッセージ数と相関係数の平均の比較
Table 2 Comparison of the average number of Ihave messages and Correlation coefficients for each number of nodes

ノード数	Ihave メッセージ数		相関	
	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法
50	163,297	263,439	-0.250	-0.730
100	1,569,508	1,984,014	-0.453	-0.711
200	7,130,807	8,073,305	-0.674	-0.797

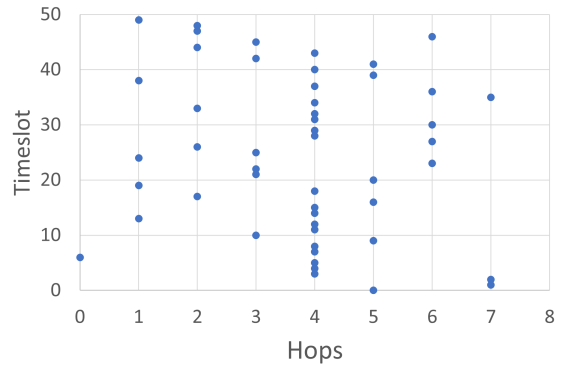


図 7 1,000,000 ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係 (従来手法:50 ノード)

Fig.7 Relationship between the number of hops and time slot number at 1,000,000 milliseconds passed (Previous Method:50nodes)

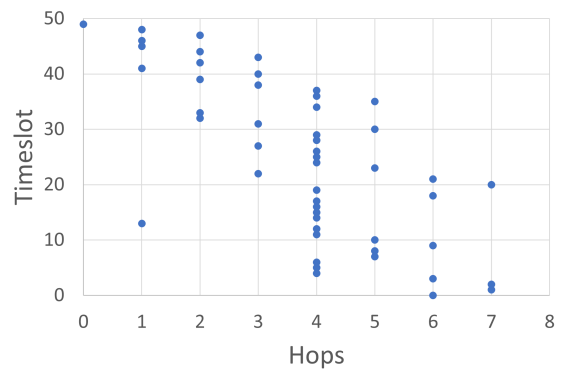


図 8 1,000,000 ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法:50 ノード)

Fig.8 Relationship between the number of hops and time slot number at 1,000,000 milliseconds passed (Proposed Method:50nodes)

れる。このことから、提案手法の各ノードのタイムスロット交換が有効に働き、通報までのタイムスロットが原因となる遅延をより減らすことが期待できる。

また、提案手法では従来手法より Ihave メッセージの数が増加している。これは、タイムスロット交換メッセージに eagerPushPeers も含んだことによって生じている。これにより収束までの時間が増加した。収束までの時間が増加した件については次の実験結果で記載する。

5.2 タイムスロット交換の収束

次に、タイムスロット交換の収束を確認する。シミュレータ内において 2,000 ミリ秒ごとに 1,000,000 ミリ秒までの間、5.1 節の実験と同様に相関係数を従来手法と比較する。時間毎の相

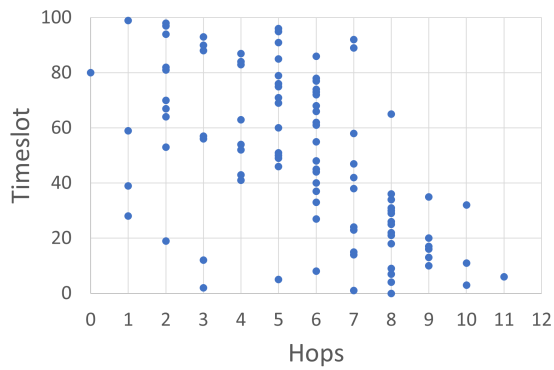


図9 1,000,000 ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係 (従来手法:100 ノード)
Fig. 9 Relationship between the number of hops and time slot number at 1,000,000 milliseconds passed (Previous Method:100nodes)

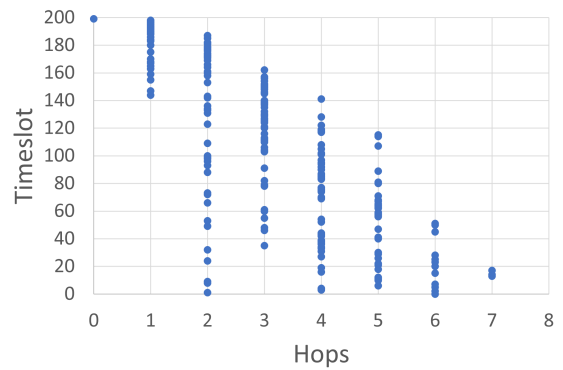


図12 1,000,000 ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法:200 ノード)
Fig. 12 Relationship between the number of hops and time slot number at 1,000,000 milliseconds passed (Proposed Method:200nodes)

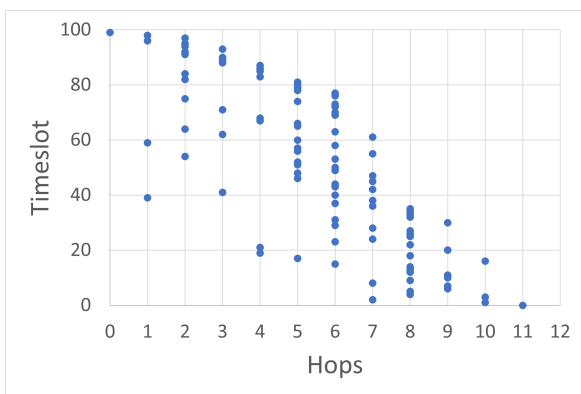


図10 1,000,000 ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法:100 ノード)
Fig. 10 Relationship between the number of hops and time slot number at 1,000,000 milliseconds passed (Proposed Method:100nodes)

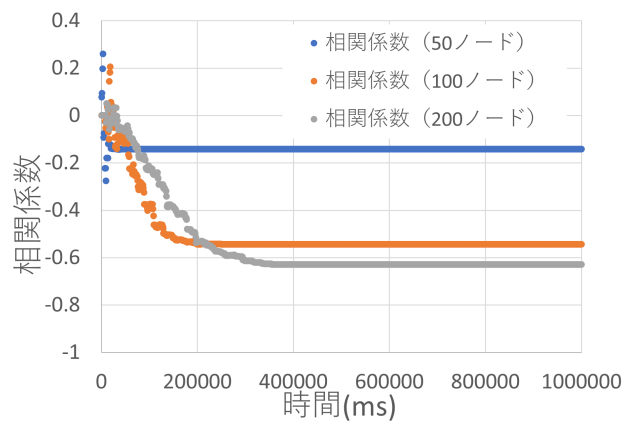


図13 タイムスロット交換の収束 (従来手法)
Fig. 13 Convergence of time slot exchange (Previous Method)

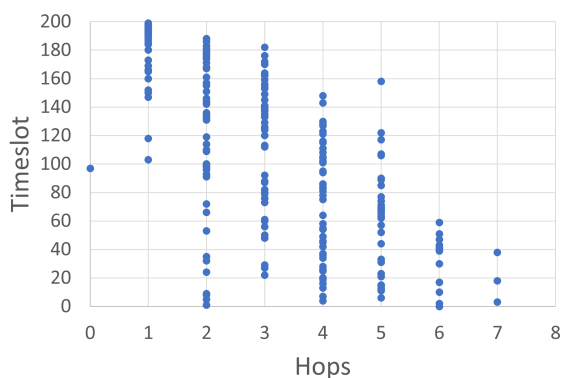


図11 1,000,000 ミリ秒経過時のホップ数とタイムスロット番号の関係 (従来手法:200 ノード)
Fig. 11 Relationship between the number of hops and time slot number at 1,000,000 milliseconds passed (Previous Method:200nodes)

関係数を確認することで、タイムスロット交換の収束を確認する。実験のパラメータは表1と同様である。

従来の実験結果を図13、提案手法の実験結果を図14に示す。従来手法では50ノードの場合は時間が40,000ミリ秒付近、100ノードの場合は時間が250,000ミリ秒付近、200ノードの場合

は380,000ミリ秒付近にタイムスロット交換が収束した。これに対し、提案手法では50ノードの場合は時間が100,000ミリ秒付近、100ノードの場合は時間が550,000ミリ秒付近、200ノードの場合は1,000,000ミリ秒付近にタイムスロット交換が収束した。

従来手法と同様に、ノード数が増えることによって、タイムスロットの交換の収束までの時間が増加した。これは、ノードの密度が増えたことによってタイムスロット交換の回数が増えたことが原因であると考えられる。タイムスロット交換メッセージは、無線の届く範囲に対してすべてに送信される。よって、各ノードがタイムスロットを交換するノードが増加し、収束までの時間が増加した。また、提案手法では eagerPushPeers もタイムスロット交換相手の対象としているため、従来手法より収束の時間が増加した。このネットワークは防災用のネットワークを想定しており、通常時は使うことは想定していないため、収束まで大きな時間がかかることは問題ないといえる。

6. おわりに

本稿では、Plumtreeを適用した被災通知無線メッシュ網において、通報時のタイムスロットによる遅延を少なくするために、

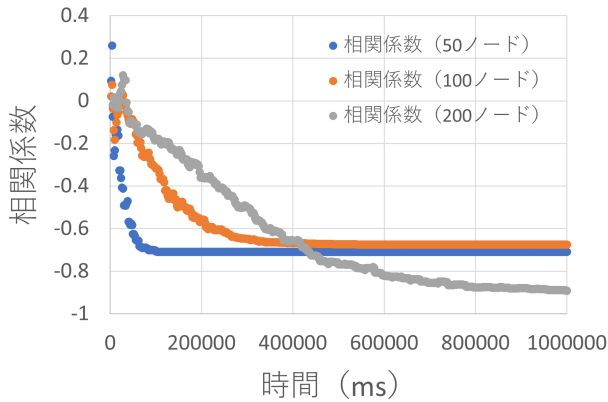


図 14 タイムスロット交換の収束 (提案手法)

Fig. 14 Convergence of time slot exchange (Proposed Method)

葉ノード側のタイムスロット番号が大きくなるようなタイムスロット交換手法を提案した。この有効性の検証として、従来手法である lazyPushPeers のみを対象としたタイムスロット交換と、提案手法である eagerPushPeers も対象としたタイムスロット交換において、ノードの密度ごとに、根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号の相関係数、およびタイムスロット交換の収束に要する時間の評価を行った。結果として、提案手法のほうが従来手法と比べ、根ノードまでのホップ数が多いノードとなる葉ノードのタイムスロット番号が小さくなり、提案手法の有効性を示せた。

本稿では、災害時等の通報の際に、根ノードとなる消防指令センター等がダウンすることは想定していない。しかし、実際の災害時にはそのような状況が考えられる。そのため、根ノードの動的切り替えといった対策が必要だと考えられる。

謝辞 本研究の一部は JST さきがけ JPMJPR21P8 の支援を受けたものです。本研究の一部は JSPS 科研費 24K14935 の支援を受けたものです。

文 献

- [1] 総務省, “公共安全 LTE”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd243420.html> (accessed Jan. 23, 2025).
- [2] 総務省, “東日本大震災における情報通信の情報”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf> (accessed Jan. 23, 2025).
- [3] 内閣府, “南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ”, https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/index.html (accessed Jan. 23, 2025).
- [4] 奥田友希, 大西真晶, 坂野遼平, “被災通知無線メッシュ網への Plumtree 適用における最短経路木との比較検証”, SITE2023-69, IA2023-75, vol.123, SITE-421,IA-422, pp.7-11, 2024.
- [5] 奥田友希, 大西真晶, 坂野遼平, “Plumtree を適用した被災通知無線メッシュ網における分散タイムスロット制御の検討”, NS2024-99, vol.124, no.197, pp.46-51, 2024.
- [6] Joao Leitao, Jose Pereira and Luis Rodrigus, “Epidemic Broadcast Trees”, IEEE SRDS, 2007.
- [7] 木下誠也, 田中和明, “ツリー型 LPWA ネットワークにおける経路制御のシミュレーション評価”, 情報処理学会第 86 年全国大会論文集, pp.239-240, 2024.
- [8] 町田皓惟, 中川泰宏, “LPWA を利用した災害時における安否情報共有ネットワークの検討”, FIT2023, 第 22 回情報科学技術フォーラム, 2023.
- [9] GSMA, “3GPP Low Power Wide Area Technologies White Paper”,

Oct 7, 2016

- [10] 一般社団法人電波産業界, “920MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 標準規格 ARIB STD-T108”, 1. 5 版, 3 月 3 日, 2024.