

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE | **電子情報通信学会**
B | **論文誌** 通 信

VOL. J109-B NO. 1
JANUARY 2026

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者
に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられ
ている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

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

奥田 友希^{†,††a)} 大西 真晶^{††b)} 坂野 遼平^{††c)}

Distributed Time Slot Control for a Disaster Notification Wireless Mesh Network

Tomoki OKUDA^{†,††a)}, Masaaki OHNISHI^{††b)}, and Ryohei BANNO^{††c)}

あらまし 既存の通報システムは有線網に依存しており、巨大地震等の国難級災害時には、119番通報等の不通が発生するリスクが指摘されている。これを受けて、我々は各種インフラから独立して動作し、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いる。これは、物件間にて無線によるマルチホップのネットワークを形成し、災害時における一次対応者への通報等を可能とするものである。本研究では、Plumtreeに基づく通報経路の構築、及び、自律分散的なタイムスロット制御の手法を提案する。PlumtreeはPeer-to-Peerネットワーク上にスパニング木を形成するブロードキャスト手法であり、ノード障害等に対するツリー構造の修復機構を備えている。提案手法では、Plumtreeにおいて各ノードが根ノード方向の経路を保持することで、ユニキャストによる通報を可能とする。また、Plumtreeは無線電波の衝突を想定していないことから、各ノードにタイムスロットを割り当て、TDMAをおこなうことで無線の衝突を回避する。しかし、通報経路上における各ノードのタイムスロット番号の並びによっては遅延が増大する問題がある。そこで、提案手法では、タイムスロットの再割り当てを自律的におこなう機構を導入する。具体的には、各ノードが根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号を判断材料として隣接ノードとの間でタイムスロット番号を交換することで、葉ノードから根ノードに向かって昇順にソートされた状態へと漸近させ、通報の遅延時間を抑えることを図る。シミュレーション実験により、提案手法を適用することで根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号について負の相関が得られること、200ノード時の平均通報遅延を約52%低減できること等が確認された。

キーワード 無線メッシュ網, Plumtree, スパニングツリー, タイムスロット制御

1. ま え が き

現在、災害時における通報は119番通報をはじめとする有線インフラに依存している[1]。こうした有線インフラは必ずしも十分に堅牢ではなく、例えば東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）が発生した際には、断線や中継局の機器障害により、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]。2024年

の能登半島地震においても、電話網を含む多数のインフラ被害が報告されている[3]。また、内閣府による南海トラフ巨大地震の被害想定においては、最大930万回線の固定電話の通話支障、基地局の停波による大規模な通信障害等が予想されている[4]。このように大規模な災害では有線網に障害が生じ、119番通報やインターネット通信及びそれらに基づく通報システムが不通となるおそれがある。

そこで我々は、有線網に依存せず、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、災害時の通報網として使用することを検討してきた[5],[6]。独立した防災専用のインフラであれば、堅牢に作り込みやすく、障害発生リスクを抑えられる。この無線メッシュ網は、図1に示すように、物件内の防災設備間、及び物件間にて、無線によるマルチホップのネットワークをそれぞれ形成し、それらネットワーク同士を相互に接続する構想である。

本論文では物件間のネットワークに着目する。本論

[†]工学院大学大学院工学研究科, 八王子市
Graduate School of Engineering, Kogakuin University, 2665-1 Nakano,
Hachioji-shi, 192-0015 Japan

^{††}一橋大学大学院ソーシャル・データサイエンス研究科, 国立市
Graduate School of Social Data Science, Hitotsubashi University, 2-1 Naka,
Kunitachi-shi, 186-8601 Japan

^{†††}能美防災(株) 研究開発センター, 三郷市
R&D Division, NOHMI BOSAI LTD., 1-18-13 Chuo, Misato-shi, 341-0038
Japan

a) E-mail: em24010@ns.kogakuin.ac.jp

b) E-mail: m_oonishi@nohmi.co.jp

c) E-mail: banno@computer.org

DOI:10.14923/transcomj.2025CSP0004

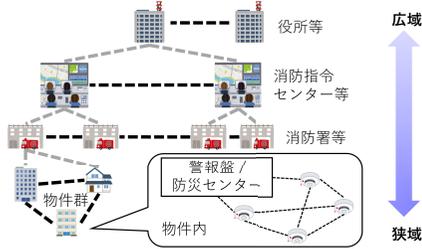


図1 被災通知無線メッシュ網

Fig. 1 Disaster notification wireless mesh network.

文中で扱う通報機構では、物件に設置された煙感知器等の防災機器が検出した情報を、消防指令センター等の一次対応者へと自動送信することを想定する。送信されるデータとしては、検出元の防災機器や送信元となる無線機器の識別子、及び、検出した情報の種類を表すフラグ等の数十バイト程度のメッセージを想定している。なお、防災機器や無線機器の識別子と設置位置の対応関係については設置を担う事業者等により管理され、一次対応者へとあらかじめ共有されているものとする。一次対応者は、本通報機構により、火災等の発生を人手による通報に依らずに把握することができ、迅速な初期消火活動が可能となる。

従来の119番通報システムは、音声通話が可能な高品質回線であり、有線網を経由した通信である。この119番通報の回線を流用した自動通報も考え得るが、火災センサー等の小サイズのデータを自動通報する目的においては、特に音声通話を必要としない無人施設等の場合、過剰設備となる可能性があり、また災害時の回線逼迫に拍車をかけ、人手による緊急通報の妨げとなる可能性がある。加えて、大規模な災害の中心地では、有線網は断線等により機能しないおそれがある。これらの問題点は、機器間のデータ通信に特化し、有線網を経由しない、広域無線メッシュ網を用いることで解決できる。本研究で想定する物件間のネットワークでは、屋内と比べ通信距離が長く、また非常時にはバッテリーや非常電源による稼働が必要となることから、低消費電力かつ長距離通信が可能であるLow Power Wide Area (LPWA) [7]を用いることを想定する。また、電波衝突を回避し確実な通報を可能とするために、時分割多元接続 (TDMA) を用いる。なお、一般にLPWAは狭帯域であるが、防災専用のネットワークであり個々の通報のデータサイズは小さいと考えられることから、伝送速度の不足は生じないものと思われる。

無線メッシュ網において、一次対応者へと通報を届ける方法としては、フラディングや、OLSR [8] や AODV [9] のようなルーティング手法が考えられる。しかしながら、フラディングは多量の通信を発生させることから、LPWAのSTD-T108規格 [10]における電波送出時間制限や、TDMAにおけるタイムスロット制御の影響により、通報遅延の増大やキューのオーバーフローが発生するおそれがある。また、OLSRのようなプロアクティブ型の手法は各ノードが全域的なトポロジー情報を維持管理するオーバーヘッドが大きく、AODVのようなリアクティブ型の手法は経路構築の遅延が問題となる可能性がある。

これに対し、本研究では、Plumtree [11]に基づく通報経路の構築、及び、自律分散的なタイムスロット制御の手法を提案する。Plumtreeは、Peer-to-Peerネットワーク上にスパニング木を形成することでメッセージ数を抑制したブロードキャストを可能とする手法であり、ノード障害等に対するツリー構造の修復機構を備えている。提案手法では、Plumtreeにより一次対応者を根ノードとするスパニング木を構築し、各ノードが根ノード方向の経路を保持することで、ユニキャストによる通報を可能とする。Plumtree自体は有線網を想定した手法であり、無線衝突を回避する機構がないことから、提案手法では各ノードにタイムスロットを割り当て、TDMAを用いることで無線の衝突を回避する。

上記手法により通報経路の構築が可能であるが、経路上における各ノードのタイムスロット番号の並びによっては、遅延が増大し得る問題がある。例えば、経路上各ノードのタイムスロット番号が降順に並んでいた場合、あるノードが通報を転送した後、次のノードが転送するまでにはタイムスロット番号がほぼ一巡するまで待つ必要がある。ノード数の増加に伴いタイムスロット番号が一巡する時間が増大すれば、この問題は一層顕著となる。一般にタイムスロット番号の割り当てはコーディネータを用いて集中制御により行われることが多く [12]、そのような構成であればこの問題の解消は容易であるが、単一障害点となることから、本論文で想定する被災通知無線メッシュ網には適さない。そこで提案手法では、タイムスロット番号の割り当てを各ノードが自律的に調整する機構を導入する。具体的には、各ノードは隣接ノードとの間で根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号の情報を相互に共有する。その上で、より少ないホップ数のノードが

より大きなタイムスロット番号をもつよう、隣接ノード間でタイムスロット番号を交換する。これにより、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ソートされた状態へと漸近させ、通報の遅延時間を抑えることを図る。

本論文は、既発表の国際会議論文[5]を発展させたものである。自律分散的なタイムスロット制御手法の導入、通報遅延の評価等を追加している。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では関連研究及び関連技術について述べる。3. では提案手法について説明する。4. では提案手法の有効性を確かめるための評価実験の内容と結果を示し、最後に5. にて総括する。

2. 関連研究及び関連技術

本研究と関連する既存研究及び要素技術について述べる。

2.1 関連研究

木下らは、防災情報の伝達を想定し、木構造のLPWAネットワークにおける経路制御の検討及び評価を行っている[13],[14]。LPWAモジュール及び各種計測器・出力機器を各所に設置し、市役所等におかれたサーバにて防災情報を解析して市民へ提供するためのネットワークを設計している。特徴としては、根ノードからの深さを考慮した木構造の形成を行っていること、及び、親ノードの冗長化を図っていることが挙げられる。一方、本研究では、Plumtreeに基づくスパニング木を形成しており、2.2.1 に述べるLazy Pushによる木構造の修復機構を備えている点、また、通報遅延を低減するために自律分散的なタイムスロット制御を行っている点が異なる。

町田らは、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行っている[15]。LPWAの一種であるLoRaを利用し、在宅避難者の安否情報を発信するためのモジュールと、避難所において受信するためのゲートウェイを用いたネットワークを構築している。一対一の通信によって安否情報を取得しており、広域をカバーすることが困難である点が課題として挙げられている。一方、本研究では、広域に展開可能なマルチホップ型のネットワークを形成している点が異なる。

Zorbasらは、LoRaWANを用いてゲートウェイと通信を行う複数ノード間において電波の衝突を回避するためにタイムスロットを導入したTS-LoRAを提案し

ている[16]。ハッシュ関数を用いて各ノードが自律的にタイムスロットの割り当てを定める方式が導入されており、スケーラビリティの面で利点を有する。ただし、マルチホップのメッシュネットワークは想定していない点で本研究とは異なっており、必然的に、本研究のような経路上のタイムスロット番号の並びを調整する機構も取り入れられてはいない。

Kanzakiらは、アドホックネットワークにおいてタイムスロットを動的に割り当てる手法を提案している[17]。各ノードの電波が干渉するエリア内のタイムスロットの割り当て状況を把握し、未割り当てのタイムスロットがある場合、そのタイムスロットに自身を割り当てる。これにより未使用スロットを削減し、チャネル利用率を向上させられることをシミュレーションにより示している。一方で、割り当ての公平性に課題が残る点が指摘されている。また、本研究のように、転送経路上の各ノードのタイムスロット番号の並びを自律的に調整する仕組みは取り入れられていない。

2.2 関連技術

提案手法に関連する要素技術として、Plumtree及びTDMAについて述べる。

2.2.1 Plumtree

Plumtreeはノード群がランダムにつながったメッシュ状のPeer-to-Peer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ための手法である[11]。耐障害性をもつゴシッププロトコルと、木構造を組み合わせることで、冗長性を確保しつつメッセージ数を少なく抑えている。各ノードはeagerPushPeers及びlazyPushPeersと呼ばれる2種類の隣接ノード集合をもつ。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2上部に示すように、送信元を除くeagerPushPeersに即座にメッセージを転送する。この転送方式をEager Pushという。初期状態では全隣接ノードがeagerPushPeersに格納され、ブロードキャストはフラッディングとなる。既に受信済みのメッセージを受信した場合、送信元ノードはlazyPushPeersへと移される。送信元においても、送信先ノードをlazyPushPeersへと移す。その結果、図3のようにeagerPushPeersの接続関係がスパニング木を形成した状態となる。以降のブロードキャストでは、各ノードはスパニング木の隣接関係に沿ってメッセージを転送する。

lazyPushPeersはスパニング木の修復に用いる。各ノードは一定間隔でlazyPushPeersにIhaveメッセー

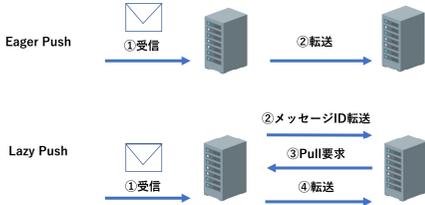


図2 Plumtree における転送方式
Fig.2 Forwarding ways in Plumtree.

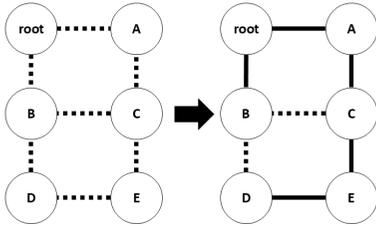


図3 スパニング木の形成
Fig.3 Forming a spanning tree.

ジを転送する。Ihave メッセージには、ブロードキャストメッセージの ID が含まれており、受信したノードは当該メッセージを保持しているかを確認し、未受信の場合は Ihave の送信元ノードへ当該メッセージの送信を要求する。要求を受けたノードはメッセージを送信する。このようにメッセージ ID による確認を経て転送を行う方式を Lazy Push と呼ぶ (図 2 下)。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。これにより、ノード障害等が生じた場合であってもスパニング木を自律的に修復することができる。

2.2.2 TDMA

時分割多元接続 (Time Division Multiple Access, TDMA) は、無線ネットワークにおける通信方式の一種である。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。タイムスロットは、各ノードが電波を発出可能な専用の時間であり、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。各ノードがそれぞれ異なるタイムスロットを使用することで、同一周波数において電波の衝突を避けて通信を行うことが可能となる。図 4 にタイムスロットの例を示す。A, B, C, D の 4 ノードが転送経路を成しており、それぞれのタイムスロット番号は 4, 2, 1, 3 である。ノード A はタイムスロット 1, 2, 3 の間は電波の送信を待ち、タイムスロット 4

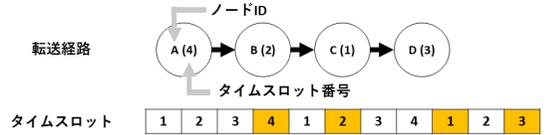


図4 タイムスロットの例
Fig.4 Example of timeslot control.

となったタイミングで送信する。ノード A からのメッセージを受信したノード B は、タイムスロット 1 の間は電波の送信を待ち、タイムスロット 2 となったタイミングで送信する。以降も同様に各ノードが自身のタイムスロットにおいてのみ電波を送信することで、電波の衝突を避けてマルチホップ転送を行うことができる。

本論文では、各タイムスロットに一意な番号 (タイムスロット番号) が割り当てられていること、各ノードは一つのタイムスロット番号をもつこと、タイムスロット番号が小さい順に送信可能となることを想定する。また、タイムスロットが一巡する時間を 1 サイクルと呼称する。

3. 提案手法

3.1 通報経路の構築

Plumtree を用いて、通報経路を構築する手法を提案する。提案手法では、各物件に設置する LPWA 通信可能なモジュールをノードとし、消防指令センター等の一次対応者の在所に設置するモジュールを根ノードとする。各ノードは一意な識別子 (ノード ID) をもつものとし、無線が届く範囲内のノードを隣接ノードとする。

根ノードはスパニング木の形成及び障害検知と修復のために、定期的にブロードキャストを行う。初回ブロードキャスト時に、2.2.1 に述べた Plumtree の仕組みに基づきスパニング木が形成される。このスパニング木は、メッセージが届いた順序に応じて形成されることから、最短経路木に準じた木となる。通常の Plumtree と異なり、提案手法では、ブロードキャストメッセージに経由ノードのノード ID を追記しながら転送を行う。受信した各ノードは、図 5 に示すように、メッセージ内の経由ノードリストをローカルに保持する。これにより、根ノード方向の隣接ノードを認識することが可能となる。

根ノードへの通報時は、各ノードはローカルに保持している経由ノードリストをもとに、根ノード方向の

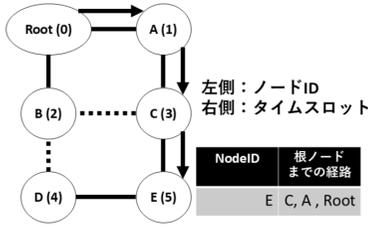


図5 各ノードにおける経路情報保持の例
Fig. 5 Example of path information maintained by each node.

隣接ノードを特定し、当該ノードを宛先とする通報メッセージを送信する。通報メッセージを受信した各ノードのうち、宛先ノード以外は、当該メッセージを破棄する。宛先ノードは、受信したメッセージを、上記と同様の流れで転送する。これにより、通報メッセージが根ノードへとユニキャストされる。

ノード障害等が発生した際には、Plumtreeの修復機構によりスパンニング木の修復を行う。すなわち、各ノードは一定間隔でIhaveメッセージを隣接ノードに送信する。Ihaveメッセージを受信したノードは、該当するメッセージを未受信であればそのメッセージを要求し、Ihaveメッセージの送信元を親ノードとする形でeagerPushPeers, lazyPushPeersの更新を行う。

3.2 分散タイムスロット制御

前述のとおり、提案手法では、電波衝突を回避し確実な通報を可能とするためにTDMAを用いる。3.1に述べた手法により、根ノードへのユニキャスト通報が可能であるが、経路上のタイムスロット番号の並びによっては、遅延が増大する可能性がある。例えば、図4において、ノードAからノードDまでの転送には複数のサイクルを要する。サイクル数が増大する最悪ケースは、転送経路上の各ノードのタイムスロット番号が降順となっている状態であり、その場合は経路長に比例するサイクル数が必要となる。2.2.1に述べたように、Plumtreeではブロードキャストメッセージの重複受信が生じたリンクを除去してスパンニング木を形成するため、根ノードを起点としてタイムスロット番号が小さいノードから優先的につながることとなり、根ノードから遠いほどタイムスロット番号が大きい傾向が生じることが考えられる。通報時は各ノードから根ノードに向かう経路を用いるため、経路上のタイムスロット番号の並びは降順に近い並びとなるおそれがあり、通報遅延の増大が懸念される。もし、図6のように、タイムスロット番号が転送経路に沿って昇順に

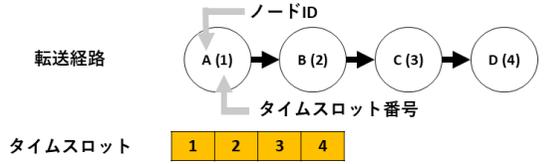


図6 タイムスロットの理想状態
Fig. 6 Ideal timeslot.

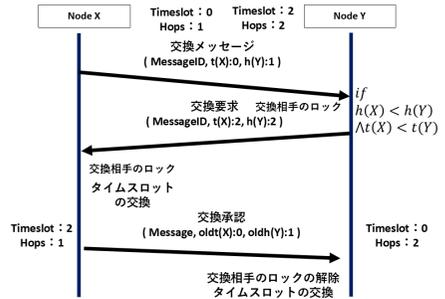


図7 タイムスロット番号交換のシーケンス
Fig. 7 Sequence of exchanging time slot numbers.

並んでいれば、1サイクルでの転送が可能となる。すなわち、提案手法のスパンニング木において、葉ノードから根ノードに向かう経路上各ノードのタイムスロット番号が昇順あるいはそれに近い並びとなれば、通報遅延を低減できるはずである。

そこで本論文では、タイムスロット番号の割り当てを各ノードが自律的に調整する機構を提案する。図7に提案手法のシーケンスを示す。Plumtreeは、2.2.1に述べたように、経路修復のためにIhaveメッセージを定期送信する機構をもつ。提案手法では、各ノードはIhaveメッセージを定期送信する際に、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含めて送信する。Ihaveメッセージを受信したノードは、隣接ノードと自身のホップ数及びタイムスロット番号を比較する。ここで、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Xと受信ノードYについて、次式が満たされる場合、ノードYはノードXにタイムスロット交換要求メッセージを送信する。

$$h(X) < h(Y) \wedge t(X) < t(Y) \tag{1}$$

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番号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拒否することで排他制御をおこなう。交換要求を

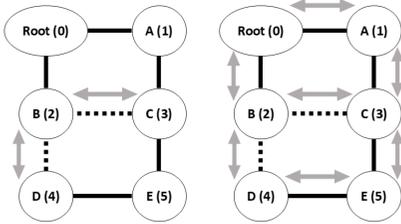


図 8 提案手法 (Lazy) と提案手法 (Eager) におけるタイムスロット交換の違い

Fig. 8 Difference in timeslot exchange between proposed method (Lazy) and proposed method (Eager).

拒否する場合、交換拒否メッセージを送信する。交換要求を受理した場合、当該交換要求メッセージに含まれるタイムスロット番号と自身のタイムスロット番号を交換する。その後、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し、他ノードからの交換要求の拒否状態を解除する。以上の動作を各ノードが行うことで、より少ないホップ数のノードがより大きなタイムスロット番号をもつよう交換が為され、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ソートされた状態へと漸近し、通報の遅延時間を抑えられることが期待できる。Ihave メッセージの定期送信を利用することで、オーバーヘッドも抑えることができる。以降、この手法を“提案手法 (Lazy)”と表記する。

提案手法 (Lazy) では、Ihave メッセージがタイムスロット番号交換のトリガとなる。Ihave メッセージは、無線到達範囲内にある eagerPushPeers の隣接ノードにも届くこととなるが、Plumtree のアルゴリズムにおいては eagerPushPeers は Ihave メッセージの送信対象ではないため、この Ihave メッセージは受信側で破棄される。したがって、図 8 の左側に示すように、提案手法 (Lazy) におけるタイムスロット番号の交換は、スパニング木の枝となっているノード間では行われない。また、根ノードにおいては全ての隣接ノードが eagerPushPeers となることから、根ノードのタイムスロット番号の交換は生じない。これに対し、提案手法 (Lazy) を発展させた手法として、eagerPushPeers の隣接ノードともタイムスロット番号を交換する手法を提案する。この手法を、以降では“提案手法 (Eager)”と表記する。提案手法 (Eager) では、各ノードは Ihave メッセージ受信時、送信元が eagerPushPeers の隣接ノードであっても、当該メッセージを破棄せず、前述のタイムスロット番号交換のプロセスを実行する。た

だし、タイムスロット番号の交換以外の点については Plumtree の動作に準じるよう振る舞う。すなわち、Ihave メッセージに含まれる、ブロードキャストメッセージの ID については、参照せず破棄する。提案手法 (Eager) を用いることで、図 8 の右側に示すように、スパニング木の枝となっているノード間でもタイムスロット番号の交換が行われるようになる。また、根ノードもタイムスロット番号の交換対象となるため、より広い範囲にてタイムスロット番号の調整が為されることが期待できる。

4. 評価実験

本章では、Java 言語で実装したシミュレータを用いて行った評価実験について述べる。

4.1 最短経路木との比較検証

迅速な通報を実現するためには、一次対応者を根ノードとする最短経路木を用いることが望ましい。提案手法では最短経路木に準じるスパニング木の形成が期待できるが、ノード障害等により木構造の修復が生じた場合、最短経路木から乖離する可能性がある。そこで、障害によるそうした影響を確認するために、一定確率で通信の失敗を発生させ、経路長等を最短経路木と比較する検証を行う。

実験のパラメータを表 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。ノードをエリア内にランダムに配置し、一定のロス率において根ノードからのブロードキャストを 5 回実行する。ロス率とは通信が失敗する確率であり、本実験では 0% から 90% までの範囲で変化させている。5 回のブロードキャストにおける最大ホップ数、平均ホップ数、Reliability を算出する。以上の試行をノード配置の乱数シードを変えながら 5 回行い、最大ホップ数、平均ホップ数、Reliability の平均を算出したものを評価指標とする。Reliability は [11] にて用いられている指標であり、全ノード数に対するメッセージが届いたノード数の割合を表す。ロス率が 0% の場合を準最短経路木とみなし、これとロス率が 1% 以上のケースとを比較する。なお、実験中、ノードの位置は変化しないものとする。

図 9 に 100 ノードの場合の結果を、図 10 に 1,000 ノードの場合の結果を、それぞれ示す。

Reliability については、100 ノードの場合、ロス率が 5% を超えるとノードの一部にメッセージが届かなくなり始め、ロス率 70% を超えると、ほぼ全てのノード

表1 最短経路木との比較における実験パラメータ
Table 1 Parameters for comparison with shortest path trees.

パラメータ	値
ノード数	100, 1,000
Lazy Push 間隔	200 ミリ秒
エリアサイズ	1,000 メートル
無線到達範囲	200 メートル

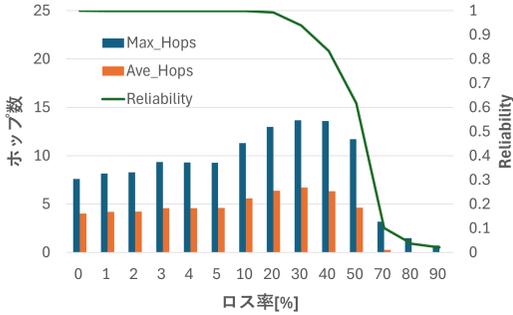


図9 最短経路木との比較 (100 ノード)
Fig. 9 Comparison with shortest path trees (100nodes).

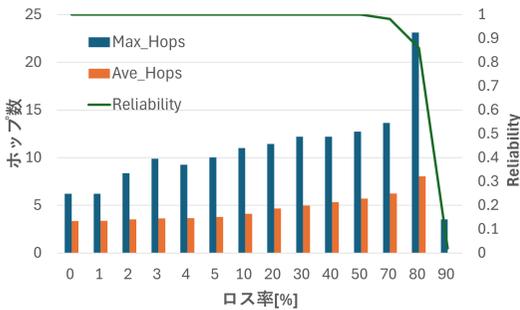


図10 最短経路木との比較 (1000 ノード)
Fig. 10 Comparison with shortest path trees (1000nodes).

にメッセージが届かなくなった。Leitao らの実験 [11] においてもロス率 70% 程度から Reliability は 0 に近づいており、同様の結果が再現されている。1,000 ノードの場合、ロス率が 70% を超えるとノードの一部にメッセージが届かなくなり始め、ロス率 90% を超えると、ほぼ全てのノードにメッセージが届かなくなった。100 ノードの場合と比べ Reliability の減少が抑えられているのは、同一のエリアサイズで実験を行っておりノードの密度が高いために障害発生下でも連結が保たれているためと考えられる。

最大ホップ数は、100 ノードの場合、ロス率 30% においては 13.7 となり、ロス率 0% における約 7.6 と比べ約 1.8 倍となった。70% 以上のロス率では、最大ホップ数が急激に減少した。1,000 ノードの場合、ロ

表2 相関係数の検証における実験パラメータ
Table 2 Parameters for experiments of correlation coefficients.

パラメータ	値
ノード数	50, 100, 200
Lazy Push 間隔	500 ミリ秒
電波送出時間	100 ミリ秒
エリアサイズ	10 キロメートル
無線到達範囲	2 キロメートル
通信終了時間	1,000 秒

ス率を 80% まで増加させると最大ホップ数は 23.1 となり、ロス率 0% における約 6.2 と比べ約 3.7 倍となった。90% 以上のロス率では、最大ホップ数が急激に減少した。ロス率が大きくなった際に最大ホップ数が減少するのは、Reliability が下がり、根ノード付近のノードにのみメッセージが届いているためと考えられる。

平均ホップ数については、100 ノードの場合、ロス率を 30% まで増加させた場合は約 6.7 となり、ロス率 0% における約 4.0 と比較し、約 1.6 倍となった。70% 以上のロス率では、最大ホップ数と同様に、平均ホップ数が急激に減少した。1,000 ノードの場合、ロス率を 80% まで増加させた場合は約 8.0 となり、ロス率 0% における約 3.3 と比較し、約 2.4 倍となった。90% 以上のロス率では、最大ホップ数と同様に、平均ホップ数が急激に減少した。

ロス率 5% までは各ノード数ともに最大ホップ数及び平均ホップ数の増加は限定的であり、最短経路木に近い木構造が維持できていると考えられる。すなわち、ロス率 5% 程度までであれば、提案手法により迅速な通報が可能と考えられる。より大きなロス率においても、ホップ数は増大するものの、ロス率 20% から 40% 程度までであれば Reliability は比較的高く保たれており、一定の通報メッセージ到達可能性が得られている。

4.2 タイムスロット番号交換の効果検証

提案手法によるタイムスロット番号交換の効果明らかにするためシミュレーション実験を行った。実験のパラメータを表 2 に示す。一意なタイムスロット番号を割り当てたノードをエリア内にランダムに配置し、各ノードには 500 ミリ秒間隔で Ihave メッセージを送信させる。根ノードをランダムに決定し、最初にブロードキャストを 1 回実行することでスパンニング木を形成する。なお、本実験ではロス率は 0% としており、実験中のノード位置は変化しないものとしている。以上の実験条件にて、提案手法を適用しない場合、提案手法 (Lazy) を用いる場合、提案手法 (Eager) を用いる場合のそれぞれについて実験を行い、1,000 秒経

表3 ノード数ごとの平均相関係数

Table 3 Average correlation coefficients for each number of nodes.

ノード数	相関係数		
	提案手法未適用	提案手法(Lazy)	提案手法(Eager)
50	-0.091	-0.250	-0.730
100	-0.042	-0.453	-0.711
200	-0.007	-0.674	-0.797

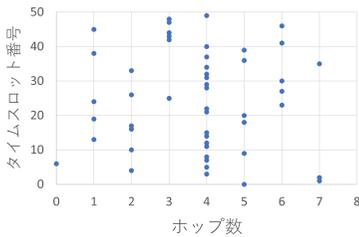


図11 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法未適用, 50 ノード)

Fig. 11 Relationship between the number of hops and time slot number (Without the proposed method, 50 nodes).

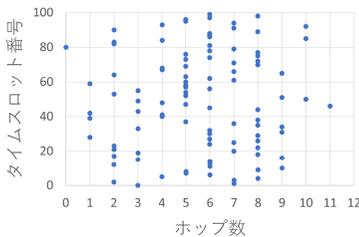


図12 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法未適用, 100 ノード)

Fig. 12 Relationship between the number of hops and time slot number (Without the proposed method, 100 nodes).

過時の各ノードのホップ数とタイムスロット番号との相関を確認する。

各ノード数における相関係数の結果を表3に示す。提案手法未適用時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相関をプロットしたものを図11~13に示す。また、提案手法(Lazy)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相関をプロットしたものを図14~16に示す。同様に、提案手法(Eager)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相関をプロットしたものを図17~19に示す。

これらの実験結果より、提案手法を用いることで、根ノードからのホップ数とタイムスロット番号との間に負の相関関係が得られることがわかる。タイムスロット番号とホップ数に負の相関が得られたことは、

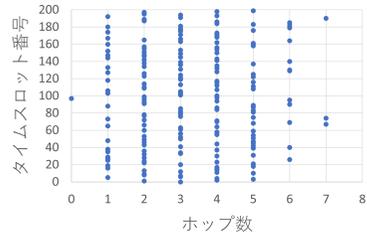


図13 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法未適用, 200 ノード)

Fig. 13 Relationship between the number of hops and time slot number (Without the proposed method, 200 nodes).

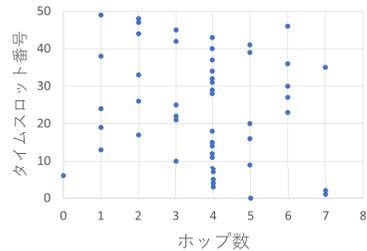


図14 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法(Lazy), 50 ノード)

Fig. 14 Relationship between the number of hops and time slot number (With the proposed method (Lazy), 50 nodes).

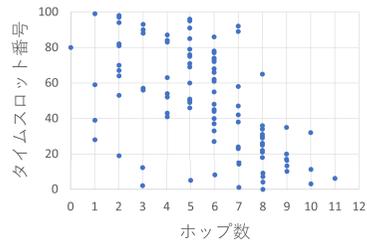


図15 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法(Lazy), 100 ノード)

Fig. 15 Relationship between the number of hops and time slot number (With the proposed method (Lazy), 100 nodes).

ホップ数が多いほどタイムスロット番号が小さくなっていることを示している。すなわち、スパニング木における葉ノード側のタイムスロット番号が小さく、根ノード側のタイムスロット番号が大きい状態となっている。通報時は各ノードから根ノードへ向かう経路を用いることから、経路に沿ってタイムスロット番号が昇順に近い並びとなっており、図6のように通報遅延を低減できると考えられる。提案手法(Lazy)の場合、提案手法未適用時と比べると負の相関が得られているものの、特にノード数が少ない場合において提案手法(Eager)と比べ弱い相関となっている。こ

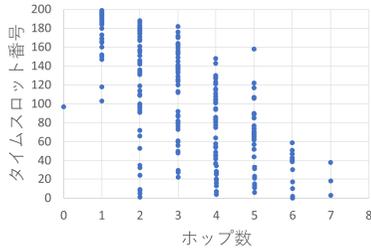


図 16 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法 (Lazy), 200 ノード)

Fig. 16 Relationship between the number of hops and time slot number (With the proposed method (Lazy), 200 nodes).

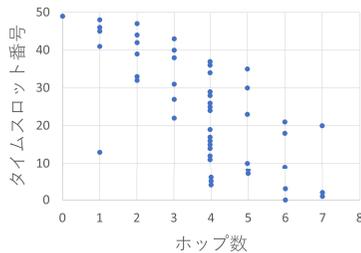


図 17 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法 (Eager), 50 ノード)

Fig. 17 Relationship between the number of hops and time slot number (With the proposed method (Eager), 50 nodes).

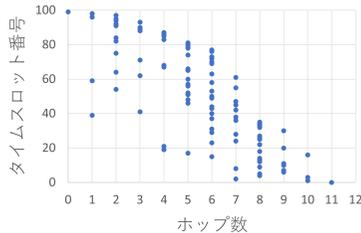


図 18 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法 (Eager), 100 ノード)

Fig. 18 Relationship between the number of hops and time slot number (With the proposed method (Eager), 100 nodes).

これは、エリア内のノード密度が低い場合、各ノードの lazyPushPeers に含まれる隣接ノード数が少なくなり、タイムスロット番号の交換が発生しづらくなるためと考えられる。提案手法 (Eager) ではいずれのノード数においても -0.7 を下回る負の相関が得られており、通報遅延の低減に寄与することが期待できる。通報遅延については 4.4 にて評価を行う。

4.3 タイムスロット番号交換の収束

本節では、タイムスロット番号交換の収束に要する時間を確認する実験について述べる。4.2 と同様の実験設定にて、2 秒ごとに 1,000 秒までの間、根ノード

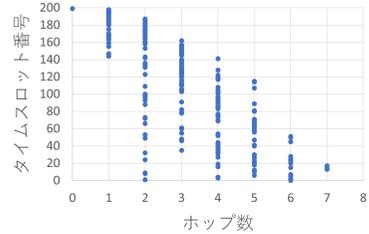


図 19 ホップ数とタイムスロット番号の関係 (提案手法 (Eager), 200 ノード)

Fig. 19 Relationship between the number of hops and time slot number (With the proposed method (Eager), 200 nodes).

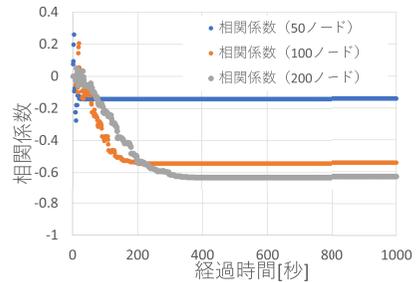


図 20 提案手法 (Lazy) によるタイムスロット番号交換の収束

Fig. 20 Convergence of time slot number exchange by the proposed method (Lazy).

までのホップ数とタイムスロット番号の相関係数を算出する。これを時系列にプロットすることで、タイムスロット番号交換の収束を可視化する。

提案手法 (Lazy) の結果を図 20、提案手法 (Eager) の結果を図 21 にそれぞれ示す。提案手法 (Lazy) では、50 ノードの場合は 40 秒付近、100 ノードの場合は 250 秒付近、200 ノードの場合は 380 秒付近においてタイムスロット番号交換の収束が見られた。提案手法 (Eager) では、50 ノードの場合は 100 秒付近、100 ノードの場合は 550 秒付近、200 ノードの場合は 1,000 秒付近において収束した。

いずれの手法においても、ノード数の増加に伴い、タイムスロット番号交換の収束までの時間が増加している。これは、ノードの密度が増えたことによって交換回数が増えたことが原因であると考えられる。提案手法 (Eager) については、eagerPushPeers もタイムスロット番号交換の対象となることで、より交換回数が増加し、収束に時間を要している。本実験設定においては収束までに最大で 20 分弱を要しているが、想定する被災通知無線メッシュ網は平時に構築し災害時に用いるものであることから、本実験結果程度の収束時

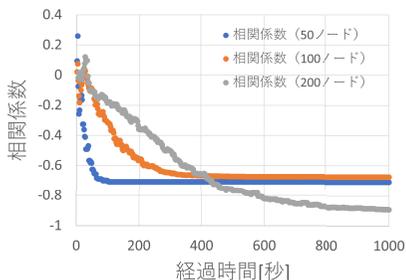


図 21 提案手法 (Eager) によるタイムスロット番号交換の収束

Fig. 21 Convergence of time slot number exchange by the proposed method (Eager).

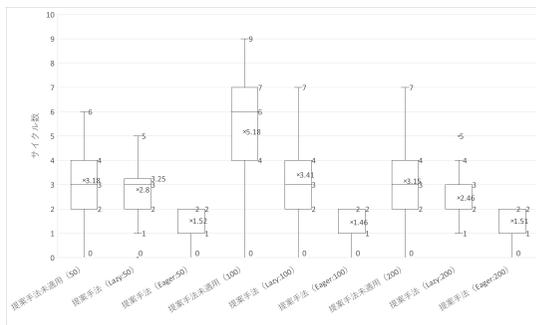


図 22 通報遅延の比較

Fig. 22 Comparison of notification delay.

間は実用上の問題とはならないと考えられる。

4.4 通報遅延評価

タイムスロット番号の交換が通報の遅延低減にどの程度寄与するかを確認するための実験を行った。4.2と同様の実験設定にて、タイムスロット番号の交換が収束した後、すなわち相関係数の変化が停止する時間以降に、全ノードからそれぞれ根ノードへ向けて通報を行う。なお、同時に複数の通報が発生しないよう、タイミングをずらして通報を行う。各通報メッセージが発信されてから根ノードに届くまでに要するサイクル数を計測し、それらの平均値や最大値を算出する。サイクルは、2.2.2に述べたように、タイムスロットが一巡する時間を表している。ノード数と一致する数のタイムスロットを設けている場合、1サイクルは各タイムスロットの時間にノード数を掛けたものとなる。

図 22 に結果を示す。最大サイクル数については、提案手法未適用の場合と比較し、提案手法 (Lazy) では、50 ノードの場合は約 17%、100 ノードの場合は約 22%、200 ノードの場合は約 29%、サイクル数が削減された。提案手法 (Eager) では、50 ノードの場合は約 67%、100 ノードの場合は約 78%、200 ノードの場合は約 71% 削減された。

平均サイクル数については、提案手法未適用の場合と比較し、提案手法 (Lazy) では、50 ノードの場合は約 12%、100 ノードの場合は約 34%、200 ノードの場合は約 22% 削減された。提案手法 (Eager) では、50 ノードの場合は約 52%、100 ノードの場合は約 72%、200 ノードの場合は約 52% 削減された。

提案手法 (Lazy) と提案手法 (Eager) のいずれも、提案手法未適用時と比べサイクル数は削減された。特に提案手法 (Eager) では、どのノード数においても最

大 2 サイクルで通報が完了している。この結果から、葉ノードから根ノードに向かってタイムスロット番号はほぼ昇順にソートされていると考えられる。

5. む す び

本論文では、被災通知無線メッシュ網において、Plumtree を応用し通報経路を構築する手法、及び、タイムスロット番号を自律分散的に調整することで通報時の遅延を低減する手法を提案した。シミュレーション実験により、提案手法を適用することで根ノードまでのホップ数とタイムスロット番号との間に負の相関が得られること、実用的な時間内でタイムスロット番号の交換が収束すること、通報遅延を大幅に削減できることを示した。

本論文ではタイムスロットによる電波衝突の回避を想定しているが、ノード数が増大した場合には 1 サイクルが長大化し、タイムスロットの待ち時間による通報遅延の増大が生じるおそれがある。このため、今後の課題として、タイムスロット制御に加え周波数帯の分割による衝突回避や、より効率的なタイムスロット制御を考えたい。また、根ノードの冗長化や、タイムスロット番号の初期割り当て戦略の検討、実機環境による検証等も検討している。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 24K14935 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] 総務省消防庁防災情報室, “119 番通報の多様化に関する検討会報告書,” 2017. https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento181_35_houkokusyo.pdf (Accessed March 6, 2025).
- [2] 総務省, “情報通信白書平成 23 年版,” 2011. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf> (Accessed March 6, 2025).
- [3] 中央防災会議防災対策実行会議, “令和 6 年能登半

島地震を踏まえた災害対応の在り方について (報告書),” 2024. https://www.bousai.go.jp/jishin/ното/taisaku_wg_02/pdf/hokoku.pdf (Accessed March 6, 2025).

- [4] 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 March 6, 2025).
- [5] T. Okuda, M. Ohnishi, and R. Banno, “A study of disaster notification wireless mesh network applying plumbtree,” IEEE Region 10 Conference, pp.354–357, 2024.
- [6] T. Matsumoto, M. Ohnishi, R. Banno, and S. Yamaguchi, “A study of generating exhaustive cycles in wireless mesh networks for disaster notification,” IEEE Region 10 Conference, pp.1450–1453, 2024.
- [7] GSMA, “3gpp low power wide area technologies white paper,” 2016. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/internet-of-things/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf> (Accessed March 6, 2025).
- [8] IETF, “Optimized link state routing protocol (olsr) rfc 3626,” 2003. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3626> (Accessed March 6, 2025).
- [9] IETF, “Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing rfc 3561,” 2003. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3561/> (Accessed March 6, 2025).
- [10] 一般社団法人電波産業界, “Arib std-t108 1.5 版,” 2023.
- [11] J. Leitaó, J. Pereira, and L. Rodrigus, “Epidemic broadcast trees,” IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems, pp.301–310, 2007.
- [12] D. Zorbas and X. Fafoutis, “Time-slotted lora networks: Design considerations, implementations, and perspectives,” IEEE Internet of Things Magazine, vol.4, no.1, pp.84–89, 2021.
- [13] 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,” 情報処理学会全国大会, pp.239–240, 2024.
- [14] K. Tanaka, H. Maeda, K. Yamashita, Y. Liu, and H. Hazarika, “Implementation and proof experiment of communication network for disaster prevention using lpwa,” Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022 Workshops, pp.47–56, 2022.
- [15] 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,” 情報科学技術フォーラム, pp.371–372, 2023.
- [16] D. Zorbas, K. Abdelfadeel, P. Kotzanikolaou, and D. Pesch, “Ts-lora: Time-slotted lorawan for the industrial internet of things,” Computer Communications, vol.153, pp.1–10, 2020.
- [17] A. Kanzaki, T. Uemukai, T. Hara, and S. Nishio, “Dynamic tdma slot assignment in ad hoc networks,” Int. Conf. Advanced Information Networking and Applications, pp.330–335, 2003.

(2025 年 3 月 14 日受付, 7 月 16 日再受付,
9 月 22 日早期公開)



奥田 友希 (学生会員)

2024 工学院大学情報学部情報通信工学科卒。現在同大学大学院工学研究科情報学専攻在学中。



大西 真晶 (正員)

2002 関西大学総合情報学部総合情報学科卒。2004 関西大学総合情報学研究科知識情報学専攻博士前期課程了。2007 関西大学大学院総合情報学研究科総合情報学専攻博士後期課程了。2007 独立研究開発法人情報通信研究機構研究員。2016 東京工業大学情報理工学院研究員。2018 DLC ネクスト入社。2019 能美防災株式会社入社, 現在に至る。消防設備無線メッシュ網技術研究開発主担当。院生時代より一貫して国難級災害直後でも完全に動作する全国普及可能な防災無線メッシュ網の研究開発に従事。博士 (情報学) (2007 関西大学)。



坂野 遼平 (正員)

2010 北海道大学工学部卒。2012 同大学大学院情報科学研究科修士課程了。2018 東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程了。2012 日本電信電話株式会社入社。2018 東京工業大学情報理工学院研究員。2020 工学院大学情報学部助教, 2022 准教授。2024 一橋大学大学院ソーシャル・データサイエンス研究科准教授, 現在に至る。IoT, オーバーレイネットワーク, 分散台帳等の研究に従事。博士 (理学) (2018 東京工業大学)。ACM, IEEE, IPSJ 各会員。