

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

奥田 友希[†] 大西 真晶^{††} 坂野 遼平[†]

[†] 工学院大学 〒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

E-mail: [†]jx20059@ns.kogakuin.ac.jp, ^{††}m_oonishi@nohmi.co.jp, ^{†††}banno@cc.kogakuin.ac.jp

あらまし 南海トラフ巨大地震等の国難級災害時には、119 番通報網などに大規模な通信障害が起こるとされている。そこで本研究では、平時から各種インフラから独立して動作する LPWA による無線メッシュ網を構築しておき、一次対応者への通報を可能とすることを考える。一次対応者への被災通知は低遅延かつ確実に届くことが求められる。冗長性を得られる方法としてフラッディングが挙げられるが、多数のメッセージが生じることからタイムスロット制御により遅延が増大する懸念がある。そこで本研究では耐障害性を有しメッセージ数を抑えることができる Plumtree に着目し、被災通知無線メッシュ網への適用を検討する。具体的には、Plumtree を拡張し、一次対応者を根ノードとする全域木において、根ノードへのユニキャストを可能とする経路表構成手法を提案する。評価実験によって最短経路木とホップ数を比較した結果、ロス率 5% までは微増であり、50% まで増加させた場合も約 2.5 倍であった。

キーワード Plumtree, LPWA, スパニングツリー, 最短経路木

Comparison of Spanning Trees by Applying Plumtree to a Disaster Notification Wireless Mesh Network to Shortest Path Trees

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

[†] Kogakuin University 2665-1 Nakano, Hachioji, Tokyo, 192-0015 Japan

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

E-mail: [†]jx20059@ns.kogakuin.ac.jp, ^{††}m_oonishi@nohmi.co.jp, ^{†††}banno@cc.kogakuin.ac.jp

Abstract In the event of a national disaster such as a huge Nanlai Trough earthquake, large-scale communication failures are expected to occur in 119 call network. Therefore, in this study, a wireless mesh network using LPWA that operates independently from various infrastructures is constructed in normal times, and communication to first responders is assumed. Disaster notification to first responders must be delivered reliably with low latency. Flooding is a method that can provide redundancy, but there is concern that time slot control will increase the number of messages and increase latency. In this study, we focus on plum trees as an algorithm that is fault-tolerant and message reducing algorithm and consider its application to disaster notification wireless mesh networks. Specifically, we propose a routing table construction method that extends Plumtree and enables unicast to the root node in a global tree where the primary correspondent is the root node. To construct such a wireless mesh network, we propose a method to configure a route table at each node to construct a tree network based on Plumtree, in which the first responder is the root. Evaluation experiments showed that the number of hops in the shortest path tree increased slightly up to a 5% loss rate, and increased up to a 50% loss rate, the number of hops did not increase more than about two and a half times.

Key words Plumtree, LPWA, spanning tree, shortest pass tree

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。

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 番通報などにも通信障害を起こすと予想される。また、平時においても通信障害といった問題がある。令和 4 年に起きた KDDI の大規模な通信障害では、119 番通報が平時に比べ約 63% 減少し、通報件数全体に占める KDDI の割合が約 1/3 に縮小したことが確認された。このときの通信障害は輻輳が主な原因であり、汎用インフラゆえに通信量が多く、輻輳をより悪化させた。そしてこの通信障害が 119 番通報まで妨げた [5]。

そこで、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、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、堅牢に作り込みやすく、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、通報は最低限の通知ができればよく、広帯域を必要としないため、Low Power Wide Area (LPWA) [6] を使用した無線メッシュ網の構築が考えられる。

本研究で構築する LPWA 無線メッシュ網において持つべき要件について考える。まずは、一次対応者までの迅速な通報である。通報において、大きな遅延が発生することは問題である。そのため、一次対応者まで短い経路長で遅延の少ない通報を目指す必要がある。次に、ノード故障等の障害時に確実に届く必要がある。大規模災害時にはノードの故障やリンクの途絶といった障害が起こる。障害が起こった際の対応を可能とするため、本研究ではノードをメッシュ状につなぎ冗長経路を確保する。そして、無線の衝突回避の為にタイムスロット方式を想定する。確実な通報のためにはフラッディングが考えられる。しかし、フラッディングでは多数のメッセージが生じ、電波送出時間制限やタイムスロット制御によって遅延が発生する。この遅延が一次対応者への迅速な通報を妨げるという問題点が考えられる。

本研究では、耐障害性をもち、メッシュ網にスパニングツリーを形成して少ないメッセージ数でブロードキャストを行える手法である Plumtree [4] をベースとした一次対応者を根とする木構造ネットワークを構築する。また、一次対応者への迅速な通知、通報をするために、Plumtree を拡張し、各ノードに経路表を持たせ、一次対応者へのユニキャストを可能とする手法について提案する。

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行う為

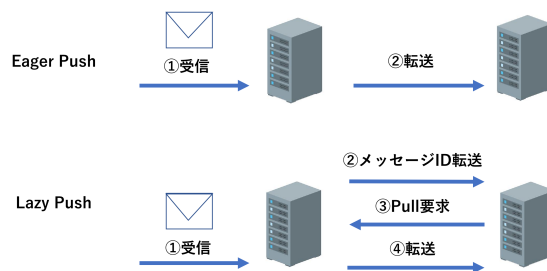


図 1 Plumtree の通信方式

Fig. 1 Communication ways in Plumtree

の手法である。ゴシッププロトコルとツリーを組み合わせることで効率的なメッセージの送信が可能である。各ノードは eagerPushPeers と lazyPushPeers という 2 つの隣接ノードの集合をもつ。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、送信元を除く eagerPushPeers のノード群に即座にメッセージを送信する。この通信方法を Eager Push と呼ぶ。初期状態では全隣接ノードを eagerPushPeers に入れるため、初回のブロードキャストはフラッディングとなる。各ノードは Eager Push を受信した際、そのメッセージが受信済みか否かを確認する。そのメッセージが受信済みである場合は送信元を eagerPushPeers から 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となる。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。

もう一つは、Lazy Push という通信方法である。lazyPushPeers は修復に利用する。各ノードは一定間隔で lazyPushPeers にメッセージ 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、未受信であればメッセージ ID を送信したノードに該当するメッセージの要求を行う。要求を受けたノードはメッセージを送信する。この通信方式を Lazy Push と呼ぶ。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 は以上の 2 つの転送方式を組み合わせ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可能としている。

2.2 LPWA

近年 IoT の通信手段として LPWA が注目を集めている。IoT は、従来インターネットに接続されていなかった様々な物をネットワークで結び、相互で情報交換や制御、連携を行う仕組みである [8]。この仕組みには広域に展開された各種センサからデータを円滑に収集できる通信が必要となる。特に、産業用途などの通信容量は小さいが大量接続することが求められる通信用途、ニーズにおいては、低コストであることや、センサ機器に組み込み、長期間使えるような低消費電力などの要件に対応する必要がある [9]。そのような通信の要件を実現する無線技術として、LPWA が注目されている。LPWA と他の通信方式

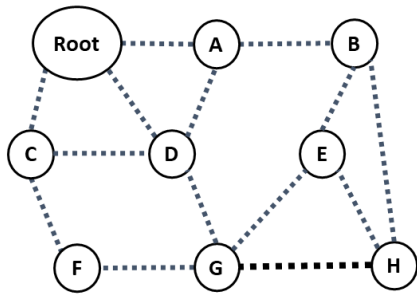


図2 スパニングツリーの形成
Fig. 2 Forming a spanning tree

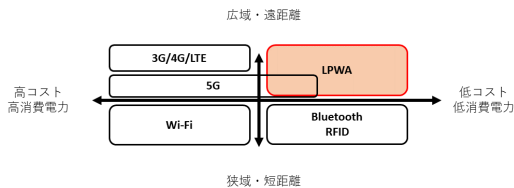


図3 LPWAの各種通信方式との関係

Fig. 3 Relationship between LPWA and other means of communication

との関係を図3に示す。具体的な技術としては「LoRaWAN」「Sigfox」「NB-IoT」などが挙げられる。これらに共通する思想として、通信速度を犠牲にする代わりに省電力であることや遠距離通信、低コストを実現することが挙げられる[10]。IoTが主に取り扱うセンサの計測データはデータサイズが小さい。そのため、必ずしも高速通信を用いる必要はない。実際のLPWAの通信速度は数kbpsから数百kbps程度と低速である。しかし、一般的な電池で数年から数十年に渡って運用可能な省電力性や数kmから数十kmもの通信が可能な広域性を有している[7]。

3. 提案手法

提案手法の概要を図4に示す。本研究では、単一の一次対応者への迅速な通知、通報を実現する為に最短経路木に準じた木を作成する。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

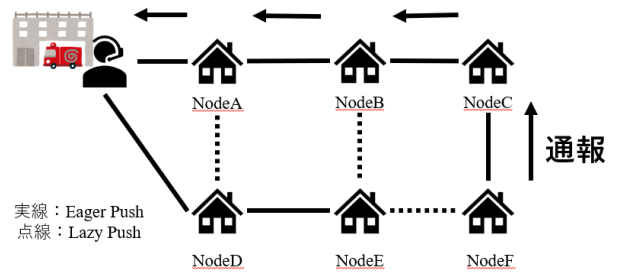


図4 提案手法の概要

Fig. 4 Overview of the proposed method

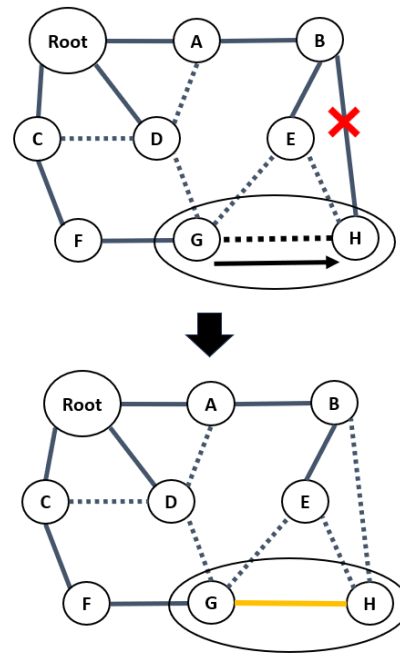


図5 スパニングツリーの修復

Fig. 5 Spanning tree repair

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、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。

経路修復の概要を図5に示す。経路修復は既存のPlumtreeと同様にLazy Pushを行う。一定間隔でメッセージIDのみを隣接ノードに送信する。受信したノードは、該当するメッセージを受信しているか確認し、未受信であればそのメッセージを要求する。要求を受けたノードはメッセージを送信し、メッセージIDを送信したノードを親とする木構造を構成する。このようにして、ノード故障等の際にはスパニングツリーの修復が為される。

根ノードへの通報は、あるノードを起点として、各ノードの持つ経路表から親となるノードIDに通報メッセージを送信す

表 1 実験のパラメータ

Table 1 Parameters of the experiment

ノード数	100, 1000
Lazy Push 間隔	200ms
エリアサイズ	1000m
無線到達範囲	200m

る。親となるノードに送信を繰り返すことで根ノードに通報メッセージが届き、通報を実現とする。

4. 評価実験

4.1 最短経路木との差分評価

迅速な通知、通報は最短経路木が望ましい。そこで、最短経路に準じた木経路の経路長を確認する実験を行う。実験では Java 言語で実装したシミュレータを用いて実験を行った。実験では、Plumtree の最初のブロードキャストで作られる最短経路木からロス率を 0 から 80% まで変化させ、意図的に障害を起こす。その後、提案手法通りに準最短経路木を作成する。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。実験時のパラメータを表 1 に示す。Side_Length はシミュレータ内の四方の広さを表しており、Com_Range は無線の届く範囲を表している。

ロス率 0% で最短経路木を作成し、その後、ロス率を変化させて 5 回ブロードキャストを行う。その結果、準最短経路木が作成される。このときの 5 回のブロードキャスト中の最大ホップ数や平均ホップ数、Reliability を確認した。なお、Reliability はノードにメッセージが行き届いた割合を表す。このように、最短経路木と修復によって作成された準最短経路木にどれだけ差分が出るかを確認した。

4.2 実験結果

各ロス率における Reliability 及び最大ホップ数、平均ホップ数のシミュレーション結果について、100 ノードの場合を図 6、1000 ノードの場合を図 7 に示す。

まず Reliability では、100 ノードにおいて、ロス率が 10% 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、ほぼすべてのノードにメッセージが届かなくなった。そして、1000 ノードでは、ロス率が 40% 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 80% を超えると、ほぼすべてのノードにメッセージが届かなくなった。

次に最大ホップでは、100 ノードにおいて、ロス率が 5% までの増加で 4 ホップ増加し、40% まで増加させた場合は 17 ホップとなり、約 2 倍のホップ数となった。70% 以上のロス率では、Reliability が下がり、最大ホップ数が急激に減少した。1000 ノードでは、ロス率が 5% までの増加で 4 ホップ増加し、50% まで増加させた場合は 27 ホップとなり、約 2.5 倍のホップ数となった。80% 以上のロス率では、最大ホップ数が急激に減少した。

平均ホップでは、100 ノードにおいて、ロス率が 5% までの増加で約 1 ホップ増加し、40% まで増加させた場合は約 9 ホップとなり、約 2 倍未満のホップ数となった。70% 以上のロス

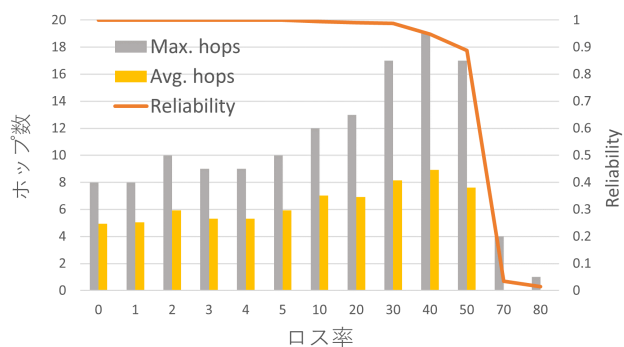


図 6 最短経路木と提案手法の平均・最大ホップ数 (100 ノード)

Fig. 6 Average and maximum number of hops for the shortest path tree and the proposed method(100nodes)

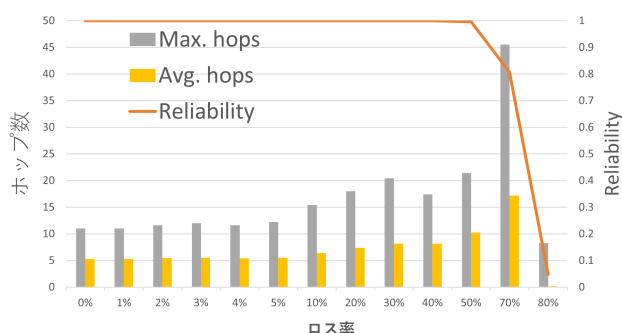


図 7 最短経路木と提案手法の平均・最大ホップ数 (1000 ノード)

Fig. 7 Average and maximum number of hops for the shortest path tree and the proposed method(1000nodes)

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。1000 ノードでは、ロス率が 5% までの増加で約 0.3 ホップ増加し、50% まで増加させた場合は約 2 倍のホップ数となった。80% 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。

4.3 考察

100 ノードの実験結果において、Reliability はロス率 40% から減少し、70% を超えると 0 に近い値となった。Leitao らの実験 [4] 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。また、本実験で減少が早く見られた原因はノードの密度、及び通信可能距離が足りなかったことが考えられる。ノードの配置によって、孤立したノード群ができ、非連結なグラフとなったことで Reliability が下がってしまったのではないかと考えられる。1000 ノードでは十分な密度となっており、ロス率 70% から Reliability が大幅に減少する。よって、ノードの密度が高いため障害時にも連結が保たれ、Plumtree の経路修復機構によりメッセージが多くのノードに到達していると考えられる。

各ノード数においてロス率が増えると最大ホップ数及び平均ホップ数は同様の増え方をしている。ロス率 5% までは各ノード数ともに微増であり、これらの値は準最短経路木が作成できたといえる。よって、迅速な通報に用いることが可能であると考えられる。ロス率を 50% まで増加した場合、どちらのノ-

表2 遅延評価のパラメータ

Table 2 Parameters of Delayed Evaluation

N	全ノード数
d	1 ホップにかかる遅延
t	電波送出時間
hop	根ノードまでの経路長

表3 解析的な比較

Table 3 Analytical comparison

	フラディング	提案手法
1 ホップにかかる時間	t+d	t+d
経路全体にかかる時間	平均: $((t+d)*N/2)*hop$ 最大: $((t+d)*N)*hop$	$(t+d)*hop$

ド数の場合においても平均ホップ数は2倍未満のホップ数であった。最大ホップ数においても2.5倍未満のホップ数であった。このことからロス率が50%のような環境では、迅速な通報に使えない。実験結果から最大ホップ数と平均ホップ数により、ロス率に比例して経路が伸びたことが挙げられる。しかし、Reliability が下がるとノードに情報が行き届かなくなりホップ数が減少した。

4.4 解析的な評価

本研究では前提としてLPWA無線を使用する。そのため衝突回避にタイムスロット制御を用いる。タイムスロット制御にはある時間にチャンネルを割り当てるため、1ホップ毎に遅延が発生する。これらの想定に基づき、提案手法の通報と既存手法であるPlumtreeのブロードキャストを用いた通報（フラディング）の解析的な評価を行った。今回使用したパラメータを表2に示す。

1ホップにかかる時間と経路全体にかかる時間を評価した。評価結果を表3に示す。まず、どちらの手法も1ホップにかかる時間は送出時間tと遅延時間dの合計である。経路全体にかかる時間を考えると、フラディングでは一回の通信のために自身の番が来るまで待つ必要があるため、平均でN/2、最大でN必要となる。そのため、一ホップにつき経路長分かかる。提案手法では通報の際、通報のメッセージのみを送信するとして考えると、経路長分の送出時間や遅延時間となる。

解析的な評価より、フラディングよりも提案手法の方が迅速な通報が可能であるといえる。また、全ノード数が増加するほど、提案手法の方が待つタイムスロットが短いため、経路全体にかかる時間が短くなるといえる。

5. おわりに

本研究では一次対応者への迅速な通知、通報をするために、Plumtreeを拡張し、各ノードに経路表を持たせることで一次対応者へのユニキャストを可能とする手法について提案した。この有効性の検証として最短経路木と提案手法の平均ホップ数及び最大ホップ数の差分及び通報における遅延の解析的な評価をおこなった。結果として、提案手法において準最短経路木が作成され、提案手法の有効性が示された。

今回の実験ではノードの密度によってReliabilityが下がったことが挙げられる。そのため、ノード配置と適切な通信範囲についての調整が必要である。さらに、今回のシミュレータでは実機を用いていないため、実機による実験を行い、迅速な通報に使用できるかを検証する。また、通報時に確実に届けることを可能とするため、通報が届かなかった際の再通報の手段を考察していく。また、今回の提案手法では一次対応者が1ノードであったが、一次対応者が複数いる場合の経路についての準最短経路木の作成を目指す必要がある。

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。

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. 18, 2024).
- [2] 総務省, "東日本大震災における被害情報", <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf> (accessed Jan. 14, 2024).
- [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/nankaitrough_info.html (accessed Jan. 18, 2024).
- [4] Joao Leitao, Jose Pereira and Luis Rodrigus, "Epidemic Broadcast Trees", IEEE SRDS, 2007.
- [5] 総務省, "119番通報の現状について", https://www.soumu.go.jp/main_content/000842197.pdf (accessed Jan. 17, 2024).
- [6] 秀島裕人, 興津俊幸, 工藤雅彦, 太田優希, "LPWA(Low Power Wide Area)対応情報通信端末の開発", 明電時報, 2019.
- [7] 山中直明, 馬場健一, "通信ネットワーク技術の基礎と応用", コロナ出版社, 2022.
- [8] 総務省, "LPWA", <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc133220.html> (accessed Jan. 14, 2024).
- [9] 総務省, "IoTを支える通信技術としての5G", <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd111340.html> (accessed Jan. 18, 2024).
- [10] 坂東大輔, "IoT開発がしっかりわかる教科書", 株式会社加藤文明社, 2020.