

ツリー型 LPWA 通信網における 強靱な経路制御の提案と評価

木下誠也¹ 田中和明^{2*}

¹九州工業大学 大学院情報工学府 情報創成工学専攻

²九州工業大学 大学院情報工学研究院 知的システム工学研究系

概要: 本研究では、強靱なツリー型 LPWA 通信網を構築する経路制御プロトコルを新たに提案し、シミュレーション上で評価した。災害の多発する日本では、停電時でも情報を伝達できる方法が必要とされている。そこで筆者らは、省電力性と広域性を備える LPWA 通信技術を用いた防災情報通信網を開発している。しかし、従来の経路制御プロトコルは通信効率が悪く、経路の冗長性が低い。よって、深さと電波強度を考慮し、上方向経路を冗長化した経路制御プロトコルを提案した。シミュレーション上で評価した結果、データ転送に掛かる通信の回数削減と信頼性向上がみられた。さらに、障害時の復旧通信回数を約 96%、復旧経過時間を約 73%削減した。

キーワード: 災害時通信, 経路制御プロトコル, ネットワークシミュレーション

Proposal and Evaluation of Resilient Routing for Tree LPWA Networks

Seiya Kinoshita¹ Tanaka Kazuaki^{2*}

¹Kyushu Institute of Technology, Graduate School of Computer Science and Systems Engineering

²Kyushu Institute of Technology, Faculty of Computer Science and Systems Engineering

Abstract: This paper proposed a new routing protocol to construct resilient tree LPWA networks. In Japan, there is a need for a method to transmit information even during disasters. Thus, the authors developed a disaster prevention network using LPWA communications technology, which has low-power consumption and wide-area coverage. However, the previous routing protocol has poor communications efficiency and low route redundancy. Therefore, the proposed routing protocol considers multiple uplink routes, depth, and radio wave strength. Simulation results showed that the efficiency of communications improved. Furthermore, the number of recovery communications and the recovery time were reduced by approximately 96% and 73%, respectively, in the event of a network failure.

Keywords: disaster communications, routing protocol, network simulation

1. はじめに

我が国は災害が発生しやすい国土を有している。その中で、自治体による災害リスク情報の収集方法や停電時でも情報を伝達できる方法が必要とされている。そこで筆者らは、図1に示すように、災害時も伝達可能な low-power wide-area (LPWA) 通信技術を用いた防災情報通信網を開発している。本通信網は、市役所等に置かれたサーバ (HQ) を中心に LPWA モジュールや計測器、出力機器を展開し、防災情報を解析・市民へ提供する。

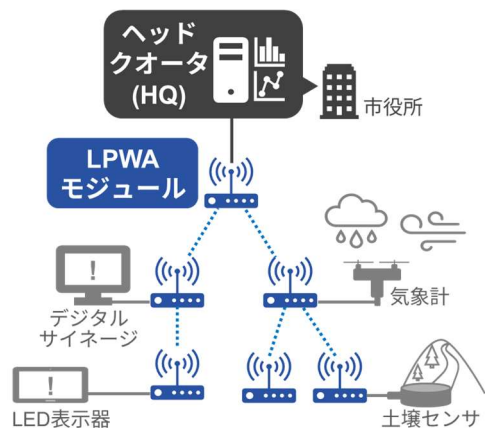


図1 LPWA 防災情報通信網

ここで LPWA とは、太陽電池で半永久的に運用できる省電力性と数 km 単位で通信できる広域性をもつ無線通信技術である。しかし、表1に示すように、LPWA の伝送速度は携帯回線のそれと比較して、1/20,000 以下である。そのため、本通信網の実証実験には多くの手間がかかり、経路制御プロトコルの十分な検証に至っていない。特に、従来の経路制御は通信効率が悪く、経路の冗長性が低い。本研究では、強靭な通信網を構成する経路制御プロトコルを提案し、シミュレーション上で検証・評価する。

表1 LPWA と携帯回線の比較[2][3][4][5]

	LPWA (LoRa)	4G/5G
通信速度[Mbps]	0.016	290
送信時間間隔[ms]	4400	≤ 1

2. ツリー型 LPWA 通信網

LPWA 防災情報通信網 (図1) は、通信網の中核となるヘッドクォータサーバ (HQ) と LPWA モジュール、気象計や土壌センサ等の計測機器、LED 表示器やデジタルサイネージ等の出力機器から構成される。この通信網はセンサから計測機器からデータを収集、HQ で解析した後、必要であれば通信網に災害情報を伝搬する。伝搬された情報は最終的に出力機器に表示され、市民へ提供される。

さて、防災情報通信網は HQ と末端機器の通信を基本としており、HQ を中心としたツリー型トポロジーである。防災情報通信網を単純化すると図2のように、1個のルートノード (HQ) と複数の非ルートノード (LPWA モジュール) から成る有向木グラフとして置き換えられる。各非ルートノードはルートノード側に親ノードを持ち、この親子関係は矢印で表すことにする。ここで、この親子関係は、電波の到達する範囲 (通信可能範囲) 内で、経路情報を含んだパケットの交換によってアルゴリズムに従い設定される。これが経路制御である。

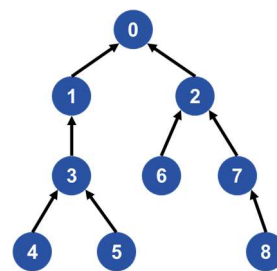


図2 ツリー型通信網

3. 従来の経路制御プロトコル

従来の経路制御プロトコル[1]では、ルートノードから発信される Alert パケット#1 を介して経路情報を交換していた。Alert パケットは任意のメッセージ Message と時系列カウンタ Seq, 送信ノードの識別子 SenderID を含む。Seq は自然数であり、パケットの時系列を管理するためにルートノードがパケットを発信する度にインクリメントされる。

Alert: {Message, Seq, SenderID} #1

各ノードは経路情報として自身の識別子 MyID と親ノードの識別子 UplinkID, 前回のパケット受信時の時系列カウンタ PreviousSeq を保持する。アルゴリズム1に経路制御の従来手法を示す。

アルゴリズム1 従来の経路制御

- 1: ルートノードが Alert パケットを発信 (このとき Seq はインクリメントされる)
- 2: パケット受信ノードは Seq > PreviousSeq となるときのみ処理 3, 4 へ
- 3: Alert パケットの SenderID を自身の UplinkID に割り当て
- 4: Alert パケットの SenderID を自身の MyID に書き換えて中継
- 5: 全ノードの PreviousSeq が更新されるまで処理 2-4 を繰り返す

このアルゴリズムはルートノードから発信・中継されたパケットを基に上方向の経路を決定する単純なものである。特に、パケットの送信ノードを親ノードとして無条件に割り当てる"早い者勝ち"のアルゴリズムであることに留意いただきたい。

ここで、防災情報通信網はコネクションレス型・非同期である。この性質により、各ノードは不規則なタイミングで通信をすることになる。そのため、従来手法ではパケットの受信順によっては非効率な通信網を構築する。

例えば図2におけるノード5が、先にノード8から Alert パケットを受信した場合、ノード8を親ノードとして割り当て、図3のようなネットワークを構築する。ノード5とルートノードとの通信において、これはノード3よりホップ数の多い、物理的に遠く信頼性が低い経路である。つまり、余計な通信の発生やデータロスの原因となる。

さらに、各ノードは上方向経路の情報を1本しか保持していない。よって、被災等によりノードが故障した際は、配下の通信網が孤立する。このとき、各ノードは代替経路を持たないため、通信網全体を再構築しなければならず、必要以上に時間を要する。これは、防災情報通信網という性質上、被災の可能性が高い河川や山間にもノードを設置するため、改善すべき問題である。

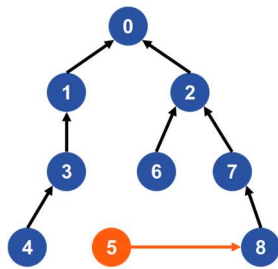


図3 非効率なネットワーク

4. 提案する経路制御プロトコル

通信回数を減らすため、ノードが保持する経路情報に深さ(ルートからの辺数)を追加する。また、通信信頼性の向上を狙い、各ノードはパケット受信時に電波強度 received signal strength indicator (RSSI) を測定し、受け取った経路情報に付加する。なおフリスの伝達公式によれば、任意の2つのノード間のRSSIは、定数 M, N とノード間距離 d を用いて、式(1)で計算される。

$$RSSI = M - 10N \log_{10} d \quad (1)$$

さらに、複数の上方向経路の情報を保持させ、経路候補表 *CandidateTable* として冗長化する。*CandidateTable* には通信可能範囲内の親となり得るノード(候補ノード)の識別子と深さ、RSSI情報 $\{ID, Depth, RSSI\}$ の配列が格納される。そし

てこれら候補ノードの経路情報は、深さの小さい順、深さが同じならばRSSIの大きい順で並べられる。ここで、各ノードは、*CandidateTable*の1番目の候補ノードを親ノードとして割り当てる。こうして、*CandidateTable*で複数の上方向経路を保持することによって、最善な親ノードを選択でき、万が一親ノードが故障した際にも、迅速に上方向経路を再選択できる。

そして、経路情報の交換は送信ノードにおける論理時計 *SenderClock*、親ノード識別子 *SenderUplinkID*、深さ *SenderDepth* を加味した Hello パケット#2を介して行われる。また、ネットワーク障害時に *CandidateTable* に保持していた上方向経路が存在しなくなった場合、*Alone* パケット#3を用いて新しい経路情報を要求する。アルゴリズム2に提案手法を簡単に示す。

Hello: {1, *SenderClock*, *SenderID*,
SenderUplinkID, *SenderDepth*} #2
 Alone: {3, *SenderClock*, *SenderID*} #3

アルゴリズム2 提案する経路制御

- 1: ルートノードが Hello パケットを発信
 - 2: パケット受信ノードは RSSI を付加した経路情報を深さの小さい順、深さが同じならば RSSI の大きい順で並べ、*CandidateTable* へ追加または更新
 - 3: *CandidateTable* の1番目の経路が変更されたときのみ処理4,5へ
 - 4: *CandidateTable* の1番目のノードを親ノードとして選択
 - 5: Hello パケットを自身の経路情報に書き換えて中継
 - 6: 全ノードの *CandidateTable* の追加や更新が終わるまで処理2-5を繰り返す
 - 7: 各ノードは近隣ノードを定期的に監視親ノードの故障検出時は処理8以下へ
 - 8: *CandidateTable* から親ノードを再選択ただし、*CandidateTable* が空であれば *Alone* パケットを発信・新しい経路情報を要求
 - 9: 新しい経路情報の Hello パケットを発信し処理2へ、配下の通信網のみ再構成
-

なお、各ノードは子ノードリスト *DownlinkIDs* も保持し、循環ネットワークを回避している。経路情報交換の際に、*DownlinkIDs* に子ノードの識別子を保存し、*CandidateTable* に格納された上方向経路の情報のうち、該当する子ノードの経路情報を削除している。

5. シミュレーション評価実験

この章では、実験で用いたシミュレーションプログラムと、経路制御の従来・提案手法の比較実験について説明する。

5.1 シミュレーションプログラム

経路制御の検証を簡素化するため、著者はツリー型 LPWA 通信網の振る舞いを確認できるシミュレーションプログラムを開発した。図 4 にデモ例を示す。図中の青色ノードはパケット送信済ノード、黄色ノードは親未割当ノード、灰色ノードは故障ノードを表している。また、図 5 にシミュレーションの簡単なフローチャートを示している。

シミュレーションでは、経路制御プロトコルに沿ったネットワーク全体の処理を再現できる。ユーザーは二次元座標系の任意の場所にノードを配置でき、ルートノードから経路制御パケットを発信することもできる。さらに、任意のノードの故障、各ノードの保持する経路情報の閲覧、経路制御に掛かる通信回数や経過時間の測定も可能である。このシミュレーションは各ノードの送信処理（ステップ）ごとに進行する。なお、通信網の非同期性を考慮し、各ノードの送信処理はパケット受信順で重み付けされ、ステップごとに無造作に選択されて実行される。

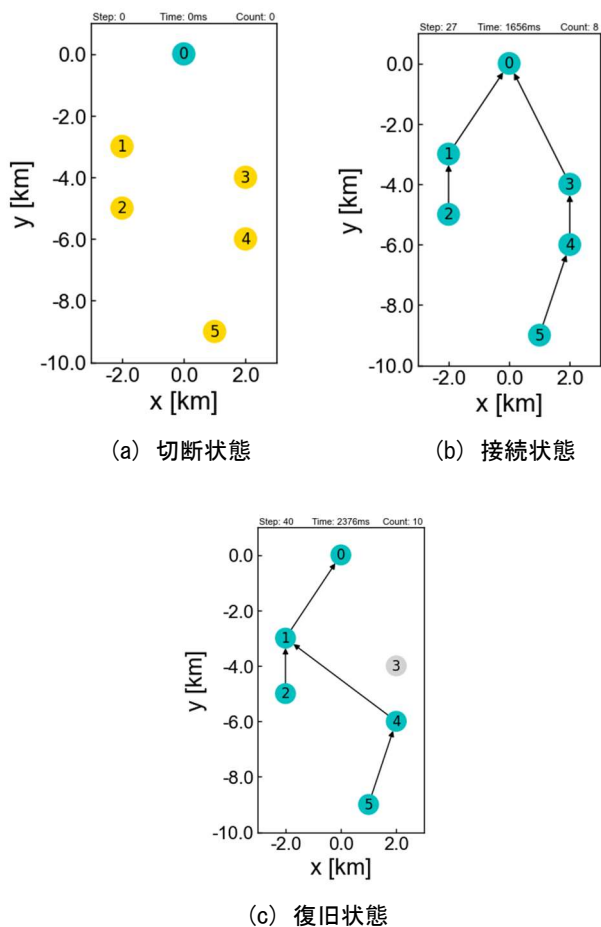


図 4 ネットワークシミュレーション

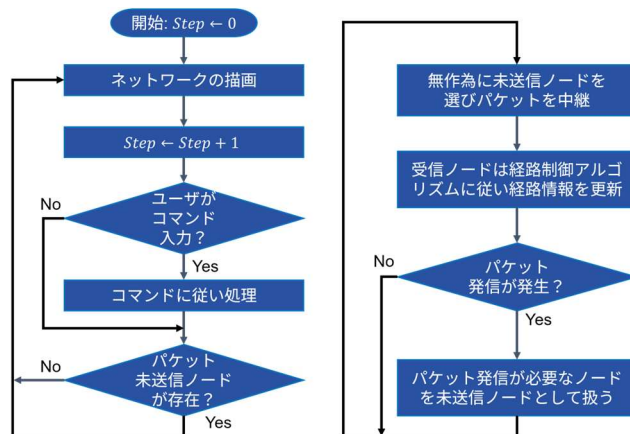


図 5 シミュレーション簡易フローチャート

5.2 経路制御の比較実験

前述のシミュレーションプログラムを用いて、従来手法と提案手法による比較実験をした。まず、図 6 に示すように、無作為に配置された 61 個のノード群において、各手法に沿ってネットワークを構築させる。このとき、構築された 2 つのネットワークについて、それぞれすべてのノードの深さ平均値と経路の RSSI 平均値を測定する。次に、それぞれのネットワークについて、無作為に選んだ 1 個のノードを故障させ、ネットワークが復旧するまでのノードの通信回数と経過時間を測定する。以上一連の試行を 100 回繰り返す、各値の平均値を算出する。

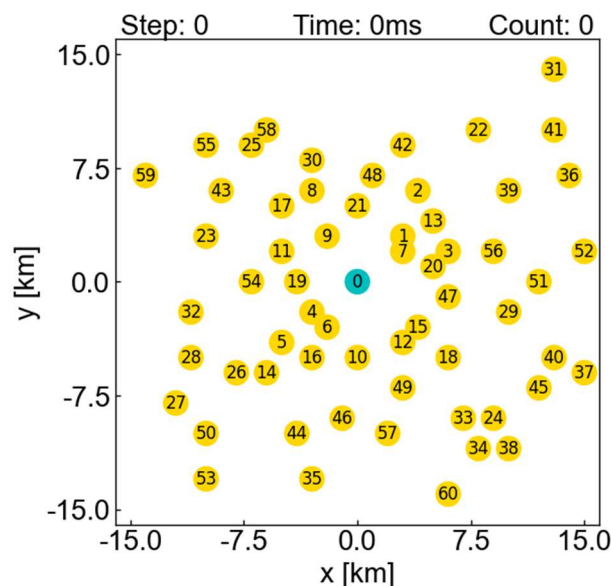


図 6 初期ネットワーク

5.3 シミュレーション条件

- 二次元座標系に 1 個のルートノードと 60 個の非ルートノードを配置する.
- 非ルートノードはルートノードを中心に, 通信可能範囲に 1 個以上のノードが存在するように無作為に配置する.
- 通信可能範囲は半径 5.0km 以内である.
- 任意の 2 個のノードにおける RSSI は式(1)で算出する.
- $1.0 \times 10^{-3} \leq \text{通信可能範囲} \leq 5.0$, $-140.00 \leq \text{RSSI} \leq -30.00$ と仮定すると, M, N は式(2)から導出される.

$$\begin{cases} -30.00 &= M - 10N \log_{10}(1.0 \times 10^{-3}) \\ -140.0 &= M - 10N \log_{10} 5.0 \end{cases} \quad (2)$$

- $\text{RSSI} \leq -140.00$ のとき, 2 個のノード間の通信が可能と仮定する (パケットエラー率 $\leq 1\%$) [2].
- 通信は理想的なものとし, 障害物による通信干渉等の確率的な要素は考慮しない.
- 1 回の送信時間は 72ms である (帯域幅: 125kHz, 拡散率: 7) [2].
- 送信休止時間は送信時間の 10 倍と仮定する.
- ノードはパケットを送信した後, 送信休止時間の分だけ通信を停止する.
- ノード A とその通信可能範囲内にあるノード B は同時にパケットを送信できない. つまり, このような場合は送信時間を経過時間に加算する.
- キャリアセンスにかかる時間やノードの故障検知にかかる時間は考慮しない.
- 経過時間はすべてのノードがパケットを送信可能になるまで加算する.
- 最大深さは 20 とし, ノードは自身が保持する深さ情報が 20 を超えたとき, Hello パケットを送信できない. なお, ネットワーク障害時に孤立ネットワークが発生したときは, 孤立ネットワーク内のノードの処理が終わるまで経過時間が加算される.

6. 結果と考察

表 2 に経路制御の比較実験の結果を示す. また, 図 7, 8 に各手法を用いて構築されたネットワークを示す. ただし, 図 7 は一例である. 同様に, 図 9, 10 に再構成されたネットワークの一例を示す. なお, 図中の青色ノードはパケット送信済ノード, 黄色ノードは親未割当ノード, 灰色ノードは故障ノードを表している.

表 2 シミュレーション結果 (100 回試行平均値)

評価指標	従来手法	提案手法
ノード平均深さ	3.00	2.85
経路平均 RSSI [dBm]	-137.09	-136.42
復旧通信回数	59.80	2.67
復旧経過時間 [ms]	2035.44	555.12

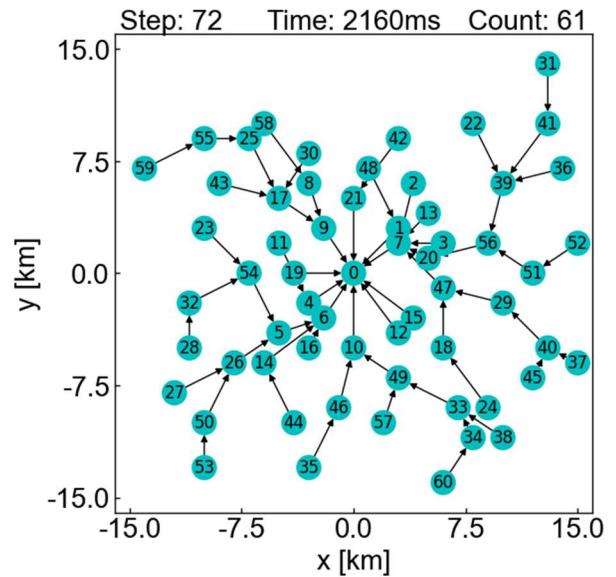


図 7 従来手法による構築ネットワーク

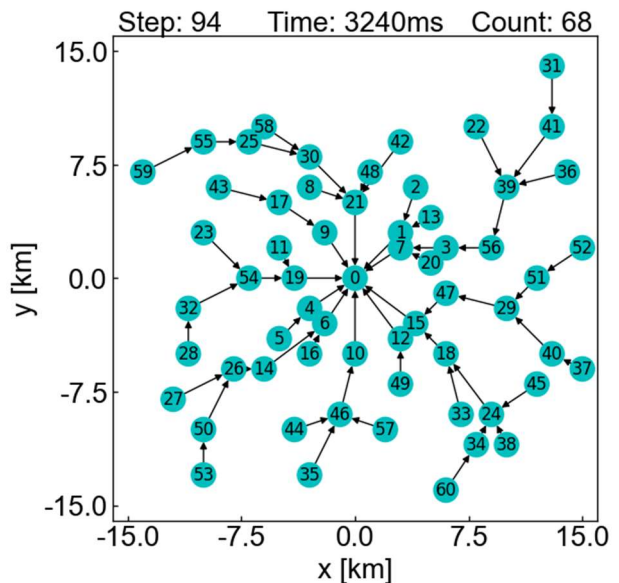


図 8 提案手法による構築ネットワーク

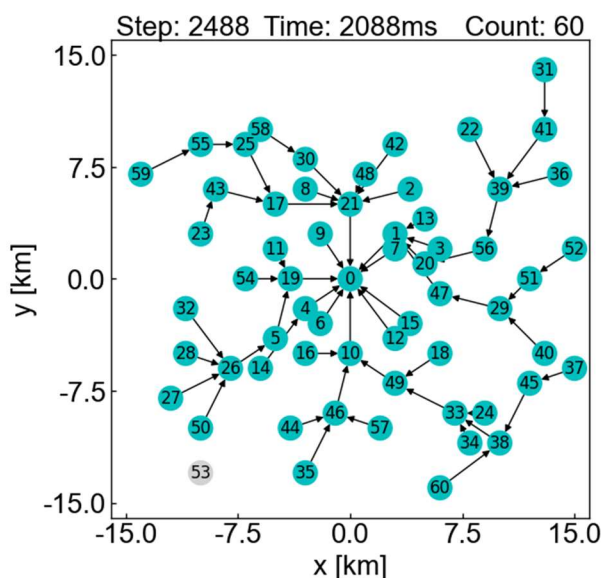


図9 従来手法による再構成ネットワーク
(ノード 53 故障)

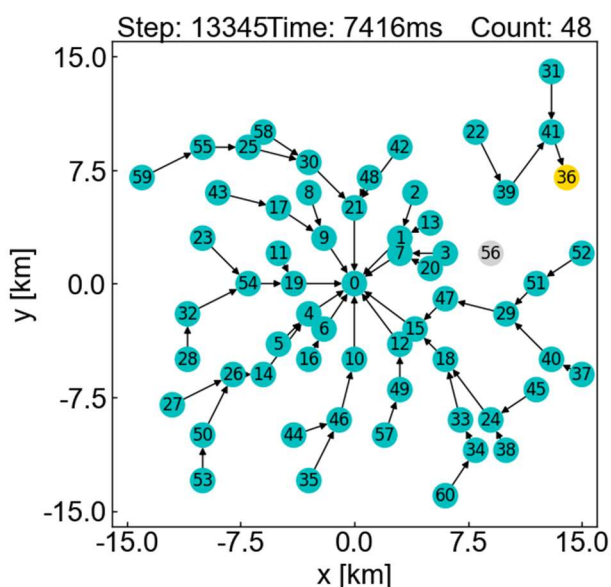


図10 提案手法による再構成ネットワーク
(ノード 56 故障)

提案手法は従来手法と比較し、平均深さが 0.15 減少、平均 RSSI が 0.67 増加し、いくらか通信の回数と信頼性の向上を達成した。提案手法と従来手法で僅差であるのは、シミュレーションの理想環境下では、両手法ともルートノードからほぼ放射状に経路制御が進行するためである。より現実的な評価をするには、シミュレーションプログラムの改良や実証実験での検証が求められる。

また、提案手法は復旧通信回数を約 96%、復旧経過時間を約 73%削減した。通信網の障害発生時において、提案手法は大きく有効である。

7. おわりに

提案した経路制御プロトコルは、ツリー型 LPWA 通信網における通信回数の削減と信頼性の向上に寄与した。さらに、障害発生時の復旧効率を大きく向上させ、通信網の強靱化に成功した。

この経路制御プロトコルの更なる検証と LPWA 防災情報通信網の本格運用のため、シミュレーション環境の改善や LPWA モジュール実機への実装、そして実証実験での検証が期待される。

謝辞

福島県三春町および福岡県添田町の皆様には、LPWA 防災情報通信網の実証実験にご協力いただいておりますこと、深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Tanaka, K., Maeda, H., Yamashita, K., Liu, Y., Hazarika, H.: 'Implementation and Proof Experiment of Communication Network for Disaster Prevention Using LPWA', ICCSA 2022 Workshops. ICCSA 2022, vol 13379, pp.47-56
- [2] EASEL. "920MHz 帯 LoRa/FSK モジュール (超低消費電力) ES920LR3". <https://easel5.com/service/products-information/products/wireless-module/es920lr3/>, 2023-06-26.
- [3] docomo. "実効速度計測結果". https://www.docomo.ne.jp/area/effective_speed/, 2023-07-09.
- [4] SORACOM. "LoRaWAN の仕様とネットワークアーキテクチャー". <https://blog.soracom.com/ja-jp/2017/03/13/bootcamp-lorawan/>, 2023-06-27.
- [5] 総務省. "新世代モバイル通信システム委員会技術検討作業班における検討状況". https://www.soumu.go.jp/main_content/000538001.pdf, 2023-07-07.