

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11784

研究課題名（和文）平時・緊急時両立する耐災害IoTシステムに関する研究開発

研究課題名（英文）Building Disaster Resilience IoT System for Both Normal and Emergency Use

研究代表者

李 鶴 (LI, HE)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40759891

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、平時・災害時両用する耐災害IoTシステムを提案する。このIoTシステムを構築することで、IoTデバイスは平時には一般的なサービスを提供し、災害時には緊急サービスを提供できる。効率的なエネルギー最適化に基づいて、デバイスは電源供給が中断されてから1週間近くで動作できる。さらに、このシステムは、許容できるエネルギー消費で災害時でもAIサービスを提供する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、災害時における通信維持という重要課題に取り組むことで、学術的および社会的意義を持つ。学術的には、平時と緊急時の両用機能できる革新的な耐災害IoTシステムを提案し、エネルギー効率の高いデバイスとネットワークの設計を進展させた。社会的には、このシステムが災害対応能力を向上させ、信頼性の高い通信とAIサービスを提供することで、生命の保護と緊急管理の改善に貢献する。これらの成果は高影響の学術誌で発表された。

研究成果の概要（英文）：This research propose a disaster-resistant IoT system that can be used both during normal times and in disaster situations. By building this IoT system, the IoT devices can provide general services during normal times and emergency services during disasters. Based on efficient energy optimization, the devices can operate for nearly a week after the power supply is interrupted. Additionally, this system can provide AI services during disasters with acceptable energy consumption.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：IoT 耐災害 LPWA

## 1. 研究開始当初の背景

通信インフラの障害は、従来の通信システムが使えなくなった被災地から情報を受信することが難しいため、災害管理における重大な問題である。総務省によると、2018年の北海道地震では大規模な停電が全道の295万戸に及び、最大約6,500の基地局が停波した。故障した基地局の20%は、地震発生から丸二日間復旧しなかった。通常は、緊急時の通信を確保するために専用バックアップネットワークを構築するが、基地局の設置などに要する費用が高いため、全エリアをカバーすることは現実的でない。一方、近年多くのIoTデバイスが溢れており、大手企業のエリクソンは2022年までにIoTデバイスは180億台近くになると予測している。実際に、登別市では官民連携により、灯油タンクにIoTデバイスを取り付けて残量を把握できるスマートメーターの設置を推進している(2018年4月室蘭民報朝刊)。IoTデバイスの通信は、携帯電話回線と異なるLPWANと呼ばれる専用の省電力広域ネットワークが利用される。通常、これらの通信リンクはIoTデバイス専用の通信リンクとして利用されている。そこで、本研究では平時に使用されているIoTデバイスおよび通信リンク(LPWAN)を緊急時のネットワークに利用することに着眼した。IoTデバイスの密度とカバレッジは緊急信用の大規模なネットワークの構築に適しているうえ、IoTデバイスはエネルギー消費が非常に少ないため長期運用が期待できる。さらに、LPWANも超省電力であるため、災害発生後の停電時にも省エネな通信リンクとして理想的である。例えば、LPWAN技術の一つであるLoRaのゲートウェイは7ワットしか消費しないため、標準的な自動車用バッテリーを使用すると100時間以上も稼働できる。また、LoRaを利用したIoTデバイスの中には、5年以上バッテリー交換不要なものも存在する。

しかし、既存のIoTデバイスを利用して緊急ネットワークを構築するには、平時と緊急時の利用条件の違いから技術的課題が残る。本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、災害発生後に素早く緊急ネットワークを構築するための要件を満たしながら、コスト重視の日常利用可能なIoTシステムをいかに実現するかということである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、日常利用できるIoTシステムをベースとし、災害発生後二日～一週間持続可能な緊急ネットワークを構築するための基盤技術を研究開発することである。図1に示すように、提案する平時・緊急時両用のIoTシステムは次の三つのレイヤーで構成される。

(1) 平時・緊急時両用IoTデバイス：平時に使用できるIoTデバイスに緊急信用のモジュールを搭載し、災害発生後はIoTハブとしてユーザデバイスに通信サービスを提供する。

(2) 平時・緊急時両用サブネットワーク：各IoTデバイスを接続し、サブネットワークを構築してローカルエリアの通信をカバーする。

(3) 平時・緊急時両用LPWAN：IoTデバイス向けのLPWANネットワークを利用して、サブネットワークに長距離インターネット接続を提供する。

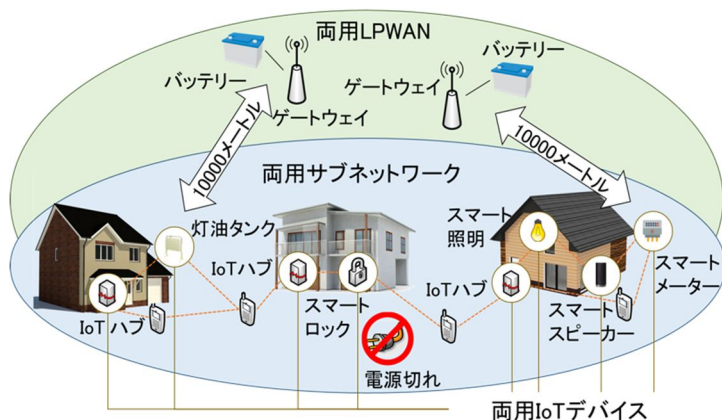


図1: 3つのレイヤーからなる耐災害IoTシステム

## 3. 研究の方法

平時・緊急時両用のIoTシステムを実現するために、次の3つタスクに取り組む。

(1) 平時・緊急時両用のIoTデバイスの設計(2020年度)

本研究では、平時に利用されているIoTデバイスを緊急時にはIoTハブとして利用するが、既存のIoTデバイスでは対応できない。本タスクでは、IoTデバイスによって構築されたサブネットワークを簡単に制御・管理し、ユーザデバイスに通信サービスを提供するための緊急通信モジュールを開発する。さらに、エネルギー消費及びハードウェアコストを最小限に抑えつつ、緊急時の稼働時間を最大化するシステムを設計する。具体的には次の通りに実行する。

汎用IoTプラットフォームを基盤とした緊急通信モジュールを開発する。緊急通信モジュールはWiFiやBluetoothなど既存の通信モジュールを利用し、緊急時のIoTデバイスにおけるエネルギー制御に係るバッテリー管理や電源割り込みハンドリング、そして自律的にサブネットワーク構築するためのD2Dブリッジで構成される。

バッテリーの最適な容量及びコストと稼働時間の最大化の問題に取り組む。停電後稼働不能となる IoT デバイスを想定し、予備バッテリーの装備が必要である。通常、バッテリーの容量はデバイスの大きさとコストによる制限があり、バッテリーが大きいほど稼働時間も長くなるため、バッテリーの容量と稼働時間はトレードオフである。

提案手法は、Arduino 及び Raspberry Pi 等の汎用 IoT プラットフォームで小規模なデモシステムを開発・検証後に、数値解析・シミュレータによる大規模の性能評価も行う。

#### (2) 平時・緊急時両用のサブネットワークの構築 (2021 年度)

各 IoT デバイスによる通信プロトコルは通常各々異なるため様々な通信リンクが存在する。本タスクは、異なる通信リンクでサブネットワークを構築するための通信モジュールを開発し、通信ノードおよびサブネットワーク全体のエネルギー利用効率を高めるための通信経路選択アルゴリズムを提案する。具体的には次の課題に取り組む。

Wi-Fi、Bluetooth 又は ZigBee 等の異なる通信プロトコルをブリッジできる通信モジュールを開発する。

通信ノード間のリンクのエネルギー消費量とノードのバッテリーレベルを考慮して各データの最適な通信経路を選択するアルゴリズムを提案する。図 2 の例では、バッテリーに余裕のあるノードはサブネットワーク間の仲介役として低エネルギー消費なリンクを利用してデータ転送する。

提案手法はタスク 1 のデモシステムに実装後、小規模のサブネットワークを構築し検証する。大規模サブネットワークでの性能評価はシミュレーションにより行う。

#### (3) 平時・緊急時両用の LPWAN の構築 (2022 年度)

本研究では、LPWAN の中でもオープンな通信規格である LoRa を利用してシステムを開発する。平时に利用される LoRa リンクは IoT デバイス向けのため超低ビットレートだが、緊急通信時に通信量が大幅に増加し、その結果、エネルギー消費も急増する可能性が高い。緊急時に主にその影響を受けるのがサブネットワークと LoRa ゲートウェイ間の橋渡し役である IoT デバイスであるため、本タスクでは、IoT デバイスのバッテリーを節約するための動的なスリーピングアルゴリズムを提案する。提案手法は、数値解析・シミュレータによる性能評価後、LoRa モジュールを搭載した IoT デバイスを用いてデモシステムの実験も行う予定である。

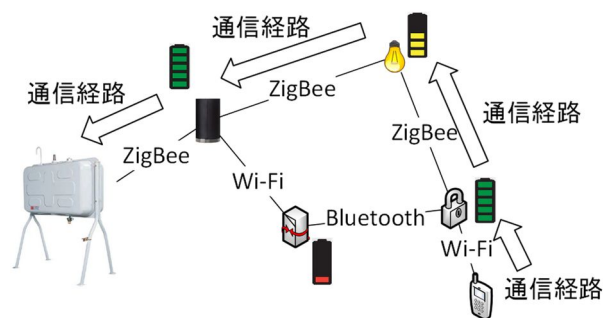


図 2 : 両用サブネットワークにおけるエネルギー効率を考慮した通信経路選択の例

## 4. 研究成果

### (1) IoT デバイス向け平時・緊急時両用の AI システムの構築

通常、ほとんどの AI システムは高スペックのハードウェア向けに設計されているため、IoT デバイスは AI サービスを提供するのに十分な計算能力を持っていない。クラウドベースの AI システムは、IoT デバイスとクラウドの間に大きな遅延をもたらし、リアルタイムサービスをサポートするのが難しく、災害時にはクラウドからの接続が中断されるため、状況はさらに悪化する。この研究では、クラウドなしで遅延を大幅に削減した IoT デバイスでの AI サービスをサポートする軽量 AI システムを構築している。提案された AI システムは、アクセスネットワークと IoT デバイスの間に、多様なハードウェアで配置され、さまざまな AI モデルをサポートし、平常時と災害時の両方で AI サービスを提供する。この研究成果は、インパクトファクターの高い国際学術論文誌 IEEE Wireless Communications Magazine (IF=12.9)などで発表した。

### (2) IoT 向け AI 処理のエネルギー消費の最適化

AI は災害管理において重要な役割を果たすため、IoT デバイスで AI 処理をサポートする必要がある。しかし、既存の AI モデルの複雑さにより、AI タスクの処理には通常、大量の電力が消費され、本研究では、平時と災害時の両方で AI サービスをサポートするために AI 処理を追加する。限られた電力供給で災害時に AI 処理をサポートすることは困難である。エネルギー消費を削減するために、本研究では AI タスクのパラメータを最適化し、軽量の AI モデルを適用して、IoT およびエッジデバイスで十分な精度の AI サービスを提供できる。この研究成果は、グリーンコンピューティング領域にトップ国際学術論文誌 IEEE Transactions on Green Communications and Networking (IF=4.8)などで発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Li He, Ota Kaoru, Dong Mianxiong	4. 巻 30
2. 論文標題 Learning IoV in 6G: Intelligent Edge Computing for Internet of Vehicles in 6G Wireless Communications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 96 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MWC.017.2200089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuan Xingyu, Li He, Ota Kaoru, Dong Mianxiong	4. 巻 8
2. 論文標題 Building Energy Efficient Semantic Segmentation in Intelligent Edge Computing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Green Communications and Networking	6. 最初と最後の頁 572 ~ 582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGCN.2023.3321113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chen Zhenke, Li He, Ota Kaoru, Dong Mianxiong	4. 巻 20
2. 論文標題 HyScaler: A Dynamic, Hybrid VNF Scaling System for Building Elastic Service Function Chains Across Multiple Servers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Network and Service Management	6. 最初と最後の頁 4803 ~ 4814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNSM.2023.3277552	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wang Zheng, Wu Bin, Ota Kaoru, Dong Mianxiong, Li He	4. 巻 168
2. 論文標題 A multi-scale self-supervised hypergraph contrastive learning framework for video question answering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 272 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2023.08.057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li He, Ota Kaoru, Dong Mianxiong	4. 巻 37
2. 論文標題 AI in SAGIN: Building Deep Learning Service-Oriented Space-Air-Ground Integrated Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Network	6. 最初と最後の頁 154 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MNET.001.2000512	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Zhenke Chen, He Li, Kaoru Ota, Mianxiong Dong
2. 発表標題 Deep Reinforcement Learning for Aol Aware VNF Placement in Multiple Source Systems,
3. 学会等名 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	董 冕雄  (DONG MIANGXIONG)  (20728274)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授   (10103)	
連携研究者	太田 香  (OTA KAORU)  (50713971)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授   (10103)	
連携研究者	徐 建文  (XU JIANWEN)  (50942893)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・文部科学省卓越研究員 (助教)   (10103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	北京郵電大学			