

マルチホップネットワークにおけるクラスターヘッドをクライアントモードにすることによる消費電力削減

大沢 恭平¹ 河竹 純一² 串田 高幸¹

概要: 河川や山間部の屋外の環境監視では、地理的要因でセンサーノードに安定した電源供給設備を用意できるとは限らないため、バッテリーを搭載したセンサーノードでマルチホップネットワークを構築して監視を行う。農地の環境監視では、センサーノードが農作物の画像データを収集し、病害虫の発生予測を可能にする。センサーノードは容量の限られたバッテリーを搭載しているため、消費されるエネルギーを削減する必要がある。APモードを起動する中継ノードの消費電力は他のノードと比較して大きくなり、動作可能時間は短くなる。課題は、中継ノードが電池切れにより停止すると、中継を必要とするノードが孤立することである。本稿では、クラスターメンバーとクラスターヘッドの消費電力量差を縮めることを目的とする。提案では、クラスターメンバーがクラスターヘッドの代わりにAPモードを起動することで、クラスターヘッドの消費電力を削減する。実験では、既存手法と提案手法の両方で、クラスターメンバーからクラスターヘッドに画像データを送信して、クラスターヘッドとクラスターメンバーの消費電力量を測定した。送信画像データサイズは98[kB]、送信間隔は1[min]である。それぞれのノードは送信終了後にsleep状態に移行する。実験の結果、1秒毎の平均消費電力増加量では、クラスターヘッドは0.44[W/s]から0.37[W/s]まで約16%減少した。ただし、クラスターメンバーは0.23[W/s]から0.25[W/s]まで約8%増加した。提案手法ではクラスターヘッドとクラスターメンバーの1秒あたりの平均消費電力量の差は既存手法に比べて約47%小さくなった。

1. はじめに

背景

マルチホップネットワークは広い範囲で利用され、特にヘルスケア、軍事、工業、環境モニタリングで用いられている。農業における環境モニタリングでは、センサーノードは気温、照度、湿度、土壌湿度、監視画像データを収集する。これにより、農作物の成長状況分析や、病害虫の発生予測を行うことができる[1]。WSN(Wireless Sensor Network)はバッテリーを搭載した、複数の小さなノードで構成されている。ノードのサイズが小型化されると、バッテリーのサイズと容量も制限される。それゆえ、これらのノードの消費電力を削減することは重要な課題である[2,3]。

マルチホップネットワークは一つのノードのセンシング可能範囲よりも大きなエリアをモニタリングする時に用いられる。遠隔地に設置されたサーバーにセンシングデータを送信するために、各ノードは他のノードを中継させて

データを送信する。マルチホップネットワークはノード間の通信距離を短くすることができるため、消費電力を削減することができる。長距離の通信がWSNにおける電力消費の主な要因の一つであるから、マルチホップネットワークはノードの省電力化に対する有効な手段である[4]。

クラスター化されたネットワークにおいては、クラスターヘッドがアクセスポイントとなり、他のノード(クラスターメンバー)からWi-Fiを通じてセンシングデータを受信し、まとめて次のノードへ送信する中継ノードとなる。アクセスポイントモード起動時の消費電力はアクセスポイントモード停止時と比較して1.8倍高くなり、クラスターヘッドノードの動作時間は減少する。クラスターの寿命はクラスターヘッドの寿命と等しいと言える。アクセスポイントモードを起動すると消費電力量が増加する原因として、以下が挙げられる。

- Wi-Fiの起動
- 送信パワーの調整

Wi-Fiの起動

Wi-Fi電波を発する機器は、通信相手との情報のやりとりのために無線信号を生成する。このため、電波を発生させるための送信機回路がアクティブになる。送信機回路が

¹ 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

² 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科コンピュータサイエンス専攻
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

電波を生成する過程で、電力が消費される。また、電波を発するアンテナへの電力供給も必要となる。

送信パワーの調整

Wi-Fi の通信では、通信相手までの距離に応じて送信パワーを調整することがある。送信パワーのに応じて消費電力量も変化する。

課題

課題は、クラスターヘッドとクラスターメンバーの消費電力量差が大きいことである。クラスターヘッドはセンシングデータをクラスターメンバーから収集し、サーバーヘデータをまとめて送信する。しかし、クラスターヘッドが停止するとクラスターメンバーのセンシングデータをサーバーに送信することができなくなる。この時のクラスターメンバーを孤立ノードと呼ぶ [5]。図 1 は孤立ノードが発生している状況の例である。

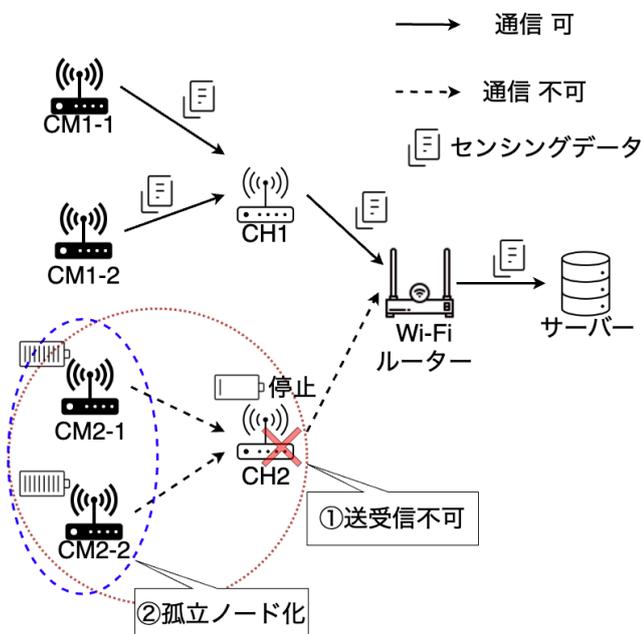


図 1 孤立ノードが発生している例

図 1 の例では CM2-1 と CM2-2 が孤立ノードとなっている。クラスターヘッド (CH2) がバッテリー枯渇によって動作を停止している。クラスターメンバーはサーバーへのセンシングデータの送信を CH2 の中継に依存しているため、センシングデータをサーバーに送信できなくなっている。クラスターメンバーが十分にバッテリー残量を持っていたとしてもそのバッテリーを有効活用できない。したがって、クラスターヘッドとクラスターメンバーの積算消費電力量差を小さくする必要がある。

各章の概要

2 章では、本稿の関連研究について記述する。3 章では、本稿の提案方式について記述する。4 章では、行なった実

装の内容について記述する。5 章では、行った実験と評価を記述する。6 章では、提案方式についての議論を記述する。7 章では、本稿のまとめを行う。

2. 関連研究

ノードをクラスターにグループ化し、クラスターヘッドを選択することで消費電力量を削減する先行研究がある。

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol) はその代表的なプロトコルの一つである [6]。LEACH はクラスターヘッドの選択に確率的アプローチを採用し、ノードが交代でクラスターヘッドになることで電池が早期に枯渇することを防いでいる。ただし、LEACH は全てのノードがサーバーと通信できることを前提としている。実際にはノードの通信範囲は限られているため、マルチホップ通信を必要とする広域での通信には適していない [7,8]。

ICIC アルゴリズムでは、マルチホップネットワークにおいて伝送距離の最も短い経路を選択してデータの送信を行うことでノードの消費電力削減を行っている [9]。この手法で考慮されているのは経路選択までである。したがって、通信方法にさらに改善の余地があると考えられる。

シンクノードを複数配置、またはシンクの再配置によって伝送距離を短くし、センサーノードの消費電力削減を行っている。この手法は地理的、経済的制約の面で課題がある [10]。

3. 提案

提案方式

本提案手法は以下の特徴を持つ。

- Wi-Fi を用いて通信を行う。
- クラスターメンバーがクラスターヘッドの代わりに AP モードを起動する。

本稿の提案手法の目的はクラスターメンバーとクラスターヘッドの消費電力量差を縮めることである。アクセスポイントモードの動作は多くの電力を消費する主な要因の一つである。図 2 は提案手法の概要図、図 3 は提案手法の動作フロー図である。

各ノードは以下の動作を行う。

AP モード起動/停止

送信側ノードのクラスターメンバーは AP モードを起動し、受信側ノードのクラスターヘッドからの接続を待つ。クラスターヘッドへのセンシングデータの送信が終了し次第、AP モードを停止する。

隣接 IoT デバイスとの接続/切断

クラスターヘッドはクラスターメンバーからの Wi-Fi に接続する。クラスターヘッドは接続先であるクラスターメ

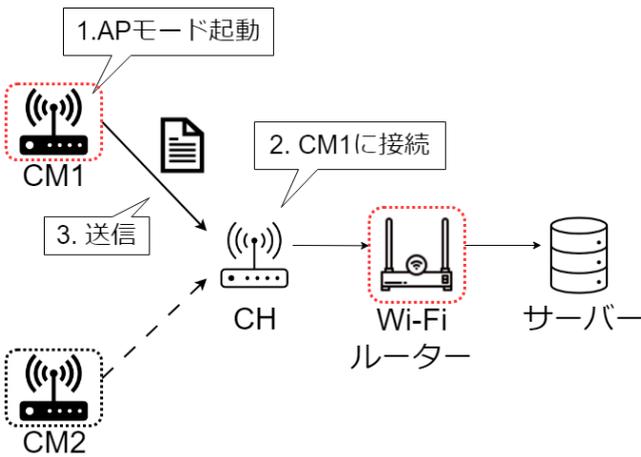


図 2 提案手法概要図

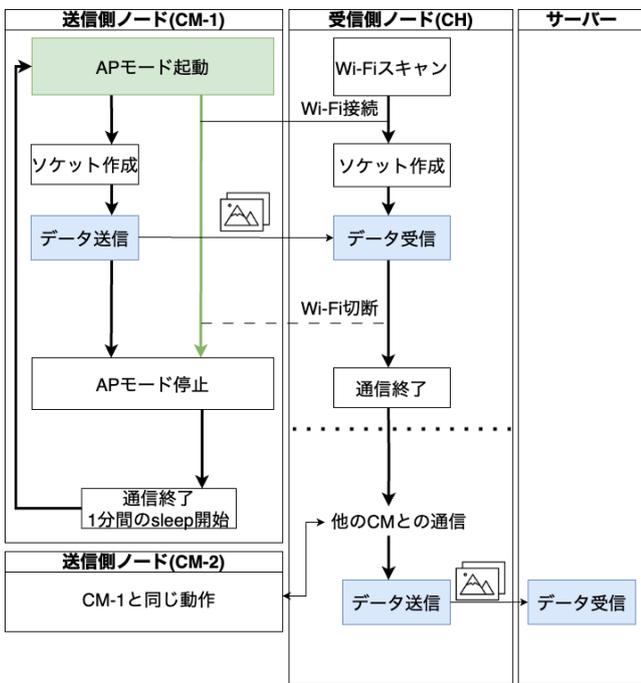


図 3 動作フロー

ンバーの SSID 情報をあらかじめ保持しているものとする。

データの送受信

クラスターメンバーはクラスターヘッドに対してセンシングデータを送信する。通信にはソケット通信を用いる。

クラスターヘッドは、クラスターに属する全てのクラスターメンバーノードからのセンシングデータを受信した後、HTTP リクエストを用いてサーバーに送信する。

sleep によるタイマーの起動

クラスターメンバーは、クラスターヘッドにセンシングデータを送信した後、sleep 状態に移行する。

クラスターヘッドはクラスターメンバーから受信したセンシングデータをサーバーに送信した後、sleep 状態に移行する。

ユースケース・シナリオ

図 4 はユースケースシナリオを示している。提案手法は、農地のモニタリングに適用されることを想定している。IoT デバイスを使用したセンシングの一例は、農地での環境モニタリングで、温度データや葉の画像のデータを収集する。

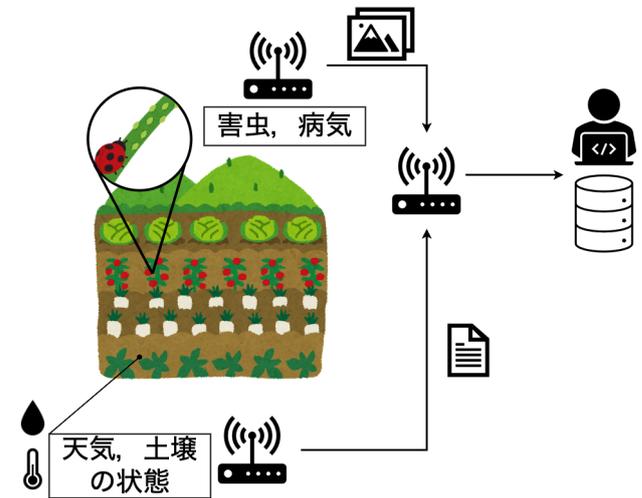


図 4 ユースケース

広い範囲でのセンシングを行う際、LPWA (Low Power Wide Area) ネットワークの使用は消費電力量を削減する最も効果的な方法である [11]。ただし、LPWA ネットワークの帯域幅は音声、ビデオ、画像データの転送には適していない。通信速度は LoRaWAN 方式で最大 50[kbps] である。

	LPWA LoRa 方式
周波数	433[MHz], 868[MHz], 915[MHz], 430[MHz]
通信速度 (最大)	50[kbps]
通信距離 (最大)	15[km]

表 1 LPWA LoRaWAN の特徴

一方、Wi-Fi は長距離通信には適していないが、広い帯域幅を持つ。また、Wi-Fi は最大 7[Gbps] の通信速度を持つ [12]。したがって、画像データの転送が可能である。

	Wi-Fi
周波数	2.4[GHz], 5[GHz]
通信速度 (最大)	7[Gbps]
通信距離 (最大)	100[m]

表 2 Wi-Fi の特徴

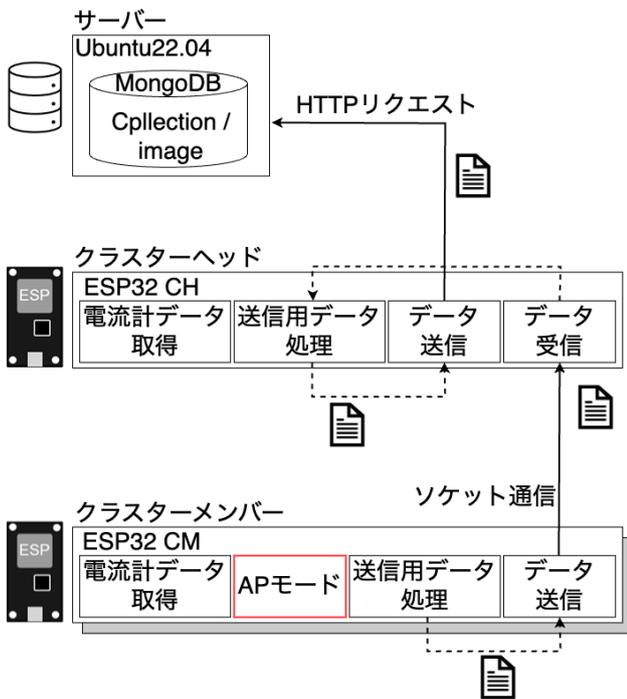


図 5 通信構成図

4. 実装

センシングデータ受信用のサーバーと実験用 IoT デバイスとして ESP32 を用いて実装を行なった。図 5 は ESP32 とサーバーの通信構成図である。

サーバーの OS には Ubuntu22.04, 受信したセンシングデータを保存するデータベースには MongoDB を用いる。クラスターメンバーとクラスターヘッドの通信にはソケット通信を用いる。送信用の画像データには 98[kB] の画像を使用している。

図 5 で用いられている要素については以下に示す。

- AP モード
- 電流計データ取得
- 送信用データ処理
- データ送信
- データ受信

AP モード

AP モードの起動と停止をクラスターメンバーが行う。

電流計データ取得

消費電力量を測定するために、電流計センサーの INA219 から電流測定データを取得する。

送信用データ処理

電流計センサーから取得した値、通信実験用画像データを送信するための下処理を行う。送信データは、95[KB] の画像である。画像データはバイナリデータに変換して送信

する。また、データベースに格納するために体裁を整える。

データ送信

クラスターヘッドは、クラスターメンバーの Wi-Fi を見つけられなかった場合、10[s] でタイムアウトするものとする。クラスターメンバーは、5[s] の間クラスターヘッドからの接続がなかった場合にタイムアウトする。クラスターメンバーがクラスターヘッドにデータを送信する場合、ソケット通信を行う。

クラスターヘッドがサーバーにデータを送信する場合、HTTP リクエストで送信する。

データ受信

クラスターヘッドはソケット通信を用いてクラスターメンバーからデータを受信する。

5. 実験

実験環境

既存手法と提案手法での消費電力量を屋外で計測した。実験で使用した IoT デバイスは ESP32 である。消費電力測定に使用したセンサーは電流計センサーの INA219 である。消費電流計測の間隔は 1[s] に 1 回である。

既存手法と提案手法を比較し、消費電力量差を測定するために ESP32 を 2 台用いて実験を行った。実験における機器の構成について図 6 に示す。評価実験の消費電力量測定のために電流計センサーの INA219 をクラスターメンバー 1 台とクラスターヘッドの ESP32 に搭載した。本稿では、受信側デバイスのクラスターヘッドが Wi-Fi AP モードを起動し、送信側デバイスのクラスターメンバーがクラスターメンバーに接続してセンシングデータの送受信を行うことを既存手法とする。

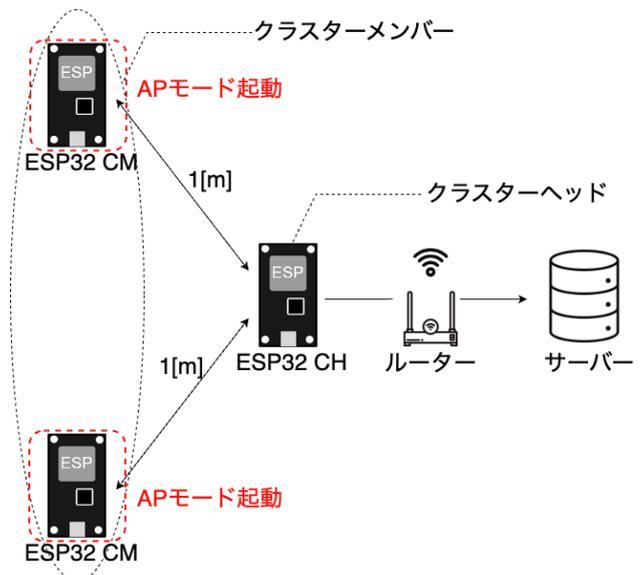


図 6 実験時の機器構成

既存手法の実験は以下のステップで行う。

- 1) クラスターヘッドが AP モードを起動
- 2) クラスターメンバーがクラスターヘッドの Wi-Fi に接続
- 3) ソケット通信を用いてクラスターメンバーからクラスターヘッドにデータを送信
- 4) クラスターヘッドは研究室 Wi-Fi に接続し、データをサーバーに送信
- 5) 1)~4) を 1[min] 毎に繰り返す

提案手法の実験は以下のステップで行う。

- 1) クラスターメンバーが AP モードを起動
- 2) クラスターヘッドがクラスターメンバーの Wi-Fi に接続
- 3) ソケット通信を用いてクラスターメンバーからクラスターヘッドにデータを送信
- 4) クラスターヘッドはもう 1 台のクラスターメンバーと 1) 3) の手順で通信
- 5) クラスターヘッドは研究室 Wi-Fi に接続し、データをサーバーに送信
- 6) 1)~5) を 1[min] 毎に繰り返す

実験結果と分析

実験の結果から電流計測 60[s] 間を図 7 に示す。縦軸は電力の大きさ [W] を表し、横軸は電流計測時間 [s] を表している。

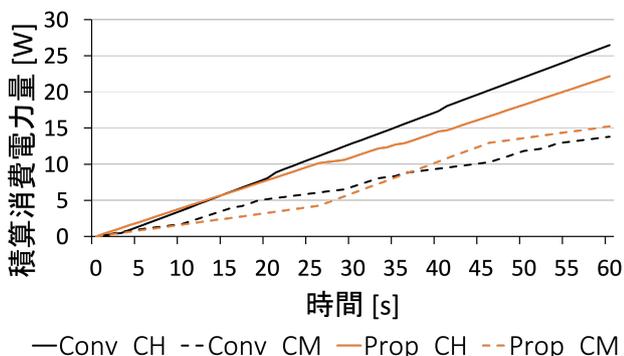


図 7 1 分間の積算消費電力量

図 7 は消費電流計測 60[s] 間の積算電力のグラフである。黒のラインは既存手法を示し、オレンジのラインは提案手法を示す。実線はクラスターヘッドを示し、破線はクラスターメンバーを示す。Conv_CH, Conv_CM は既存手法でのクラスターヘッドとクラスターメンバーを示し、Prop_CH, Prop_CM は提案手法でのクラスターヘッドとクラスターメンバーを示す。

表 3 と表 4 は 1[min] 間の既存手法と提案手法の積算消費電力量である。

既存手法におけるクラスターヘッドとクラスターメン

表 3 既存手法による 1 秒毎の消費電力量

	CH	CM
合計	26.46[W]	13.80[W]
1 秒毎の平均増加量	0.44[W/s]	0.23[W/s]

表 4 提案手法による 1 秒毎の消費電力量

	CH	CM
合計	22.15[W]	15.23[W]
1 秒毎の平均増加量	0.37[W/s]	0.25[W/s]

バーの積算消費電力量差は約 92% で、提案手法では約 45% となった。

既存手法においてクラスターヘッドは毎秒平均約 0.44[W] 消費し、クラスターメンバーは毎秒平均約 0.23[W] 消費している。提案手法ではクラスターヘッドは毎秒平均約 0.37[W] 消費し、クラスターメンバーは毎秒平均約 0.25[W] 消費している。クラスターヘッドとクラスターメンバーの毎秒の消費電力増加量差は提案手法が既存手法と比較して 47% 小さくなった。

この結果から、クラスターヘッドとクラスターメンバーの積算消費電力量差を小さくするという目的が達成されている。

6. 議論

本提案ではクラスターメンバーの AP モードを起動させることで通信を行う。本提案においてはクラスターヘッドとクラスターメンバーは 1 対 1 で通信を行うが、クラスターメンバーの数が大きくなるほど、クラスターヘッドが通信を行う時間が長くなり、消費電力量が増加することが予想される。したがって、本提案手法が消費電力削減に有効では無くなるクラスターメンバーの台数が存在する。

本提案手法によって消費電力を削減できる最大のノードの台数の閾値を求める。1 台のクラスターメンバーと通信を行う際に消費する電力量を計算によって求め、実機での実験を行う。センシングデータを送信するクラスターメンバー数が閾値より多い場合、クラスターヘッドが AP モードを起動して通信を行い、閾値より少ない場合、クラスターメンバーが AP モードを起動する。AP モード起動ノードを動的に切り替えることで、エネルギー消費量の削減が期待できる。

7. おわりに

本稿では、クラスターメンバーとクラスターヘッドのエネルギー消費量の差を縮めることを目的とし、クラスターメンバーはクラスターヘッドの代わりに AP モードを起動する。ESP32 ベースのネットワークを用いて、提案手法と既存手法のエネルギー消費量を比較した。実験の結果、提案手法は既存手法と比較して、クラスターヘッドの消費電力量が小さくなる一方で、クラスターメンバーの消費電力

量は大きくなることがわかった。クラスターヘッドとクラスターメンバーの消費電力量の差は既存手法では約 92[%], 提案手法では約 45[%] であった。クラスターヘッドは平均で毎秒約 0.44[W], クラスターメンバーは平均で毎秒約 0.23[W] の電力を消費する。一方, 提案手法では, クラスターヘッドは平均で毎秒約 0.37[W], クラスターメンバーは平均で毎秒約 0.25[W] の電力を消費する。クラスターヘッドとクラスターメンバーの 1 秒あたりの消費電力の増加量を比較すると, 提案手法の方が 47[%] 小さくなった。

参考文献

- [1] Kassim, M. R. M. and Harun, A. N.: Applications of WSN in agricultural environment monitoring systems, *2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 344–349 (online), DOI: 10.1109/ICTC.2016.7763493 (2016).
- [2] Thiyagarajan, N. and Shanmugasundaram, N.: An Investigation on Energy Consumption in Wireless Sensor Network, *2022 8th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Vol. 1, pp. 1359–1364 (online), DOI: 10.1109/ICACCS54159.2022.9785046 (2022).
- [3] Abderrahim, M., Hakim, H., Boujemaa, H. and al Hamad, R.: Multihop Transmission Strategy to Improve Energy Efficiency in WSNs, *2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, pp. 136–140 (online), DOI: 10.1109/WAINA.2018.00076 (2018).
- [4] Peović, U., Mohorko, J., Benki, K. and Cucej, Z.: Single-hop vs. Multi-hop - Energy efficiency analysis in wireless sensor networks, (online), available from (<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113310843>) (2010).
- [5] Leu, J.-S., Chiang, T.-H., Yu, M.-C. and Su, K.-W.: Energy Efficient Clustering Scheme for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network With Isolated Nodes, *IEEE Communications Letters*, Vol. 19, No. 2, pp. 259–262 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2014.2379715 (2015).
- [6] Omari, M. and Laroui, S.: Simulation, comparison and analysis of Wireless Sensor Networks protocols: LEACH, LEACH-C, LEACH-1R, and HEED, *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416826 (2015).
- [7] Shih, E., Cho, S.-H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A. and Chandrakasan, A.: Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '01*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 272–287 (online), DOI: 10.1145/381677.381703 (2001).
- [8] Song, L., Song, Q., Ye, J. and Chen, Y.: A Hierarchical Topology Control Algorithm for WSN, Considering Node Residual Energy and Lightning Cluster Head Burden Based on Affinity Propagation, *Sensors*, Vol. 19, No. 13 (online), DOI: 10.3390/s19132925 (2019).
- [9] Shah, I. K., Maity, T., Dohare, Y. S., Tyagi, D., Rathore, D. and Yadav, D. S.: ICIC: A Dual Mode Intra-Cluster and Inter-Cluster Energy Minimization Approach for Multihop WSN, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 70581–70594 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3188684 (2022).
- [10] Vincze, Z., Vida, R. and Vidacs, A.: Deploying Multiple Sinks in Multi-hop Wireless Sensor Networks, *IEEE International Conference on Pervasive Services*, pp. 55–63 (online), DOI: 10.1109/PERSER.2007.4283889 (2007).
- [11] Raza, U., Kulkarni, P. and Sooriyabandara, M.: Low Power Wide Area Networks: An Overview, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 19, No. 2, pp. 855–873 (online), DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320 (2017).
- [12] Qadir, Q. M., Rashid, T. A., Al-Salihi, N. K., Ismael, B., Kist, A. A. and Zhang, Z.: Low Power Wide Area Networks: A Survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 77454–77473 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2883151 (2018).