

マルチホップネットワークでノードの類似度を用いた クラスターヘッド選択アルゴリズム

大沢 恭平¹ 串田 高幸¹

概要: 広範囲なエリアで行われる環境モニタリングでは、複数の IoT デバイスを經由してサーバーまでセンシングデータを送信する、マルチホップネットワークが用いられる。マルチホップネットワークで使用される IoT デバイスはバッテリー駆動であり、搭載されるバッテリーは小型なものである。したがって、小型のバッテリーでデバイスを長時間動作させるにはノードの省電力化が課題となる。本稿では MVED プロトコルを提案する。MVED プロトコルは消費電力量をノード間で分散し、平滑化することで孤立ノードの発生を遅らせることを目的としている。実験では、バッテリー容量が 1,000[mAh] である 5 台のノードを用いて既存手法の LEACH プロトコルと MVED プロトコルでの消費電力量を測定した。5 台のノードの稼働時間を測定し、LEACH プロトコルの標準偏差が約 5,326[sec] であったのに対し、MVED プロトコルでは約 2,024[sec] と、約 62[%] の改善が見られた。

1. はじめに

背景

マルチホップネットワークはヘルスケア、軍事、農業の分野で使用される [1]。農地の環境モニタリングでは、センサーノードは気温、湿度、土壌湿度、監視画像データの収集を行う。これらのデータは農地の環境整備、作物の成長分析、病害虫の発生予測に利用される [2]。センサーネットワークは複数の小型 IoT デバイスのノードで構成され、それぞれのノードはバッテリーが搭載されている。センサーノードのサイズの制約に伴ってバッテリーサイズも制限されるため、ノードは限られた電力で動作する必要がある。したがって、バッテリー消費を最適化することは重要な課題である [3]。マルチホップネットワークはシングルホップ通信と比較して広範囲のセンシングに適している。遠隔地にあるサーバーにセンシングデータを保存するために、各センシングノードはサーバーまで他のノードを中継してセンシングデータを送る必要がある。短距離のマルチホップを行うことで、ノード間の通信距離の短縮と消費電力量の削減ができる。したがって、マルチホップ通信はノードの消費電力量削減に効果的な手法である [4]。クラスター化されたネットワークにおいて、複数のノードから受信したセンシングデータを集約し、次の中継ノードに送信するノード

をクラスターヘッド (Cluster Head: CH) と呼び、中継を行わないノードをクラスターメンバー (Cluster Member: CM) と呼ぶ [5, 6]。クラスターヘッドは多くのノードからの通信を行うこと、送受信するデータサイズが大きいことから、クラスターメンバーと比較して消費電力量が多くなる。

課題

課題は、クラスターヘッドがバッテリー枯渇によって停止することによる孤立ノードの発生である [7]。孤立ノード発生の例を図 1 に示す。

クラスターヘッドとして動作するノードの消費電力量はクラスターメンバーノードの消費電力量よりも多いことから、クラスターヘッドのバッテリーは早く枯渇する。マルチホップネットワークでは、センシングデータの中継を行うクラスターヘッドが動作を停止すると、他のノードに影響が及ぶ。例えば、図 1 中のクラスターメンバーである CM2-1 と CM2-2 は、クラスターヘッドである CH2 を中継してサーバーにセンシングデータを送信する。CH2 がバッテリー枯渇によって停止するとデータの中継先がなくなり、センシングデータの送信ができなくなる。CM2-1 と CM2-2 は孤立ノードとなっている。クラスター内の全てのノードがサーバーと通信できなくなると、孤立クラスターと呼ばれる。バッテリーが十分に残っているにも関わらず、孤立ノードとなったノードのバッテリーを有効活用できていない。

¹ 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

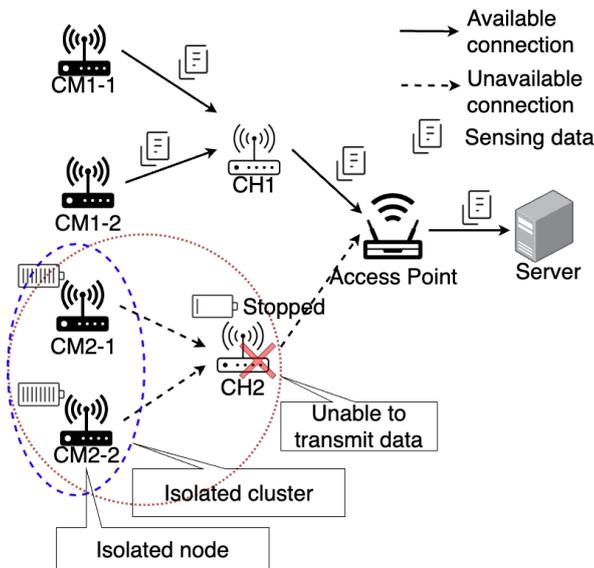


図 1 孤立ノードの発生

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、実装の内容について記述する。5 章では、評価実験の実験環境、実験結果と分析について記述する。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ランダムに選択することでノードの消費電力量を分散させる先行研究がある。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 [8]。LEACH はクラスターヘッドの選択に確率的なアプローチを採用し、各ラウンドごとにクラスターヘッドが変更される。ノードが交代でクラスターヘッドになることで消費電力量をノード間で均一にしている。クラスターヘッドは TDMA(Time Division Multiple Access) を使用してクラスターメンバーにセンシングデータの送信権限を与える。センサーノードは指定されたタイミングでセンシングデータを送信するため、他のノードとの電波干渉や競合が抑えられるというメリットがある。ただし、ノード間で同期をとる必要がある。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。また、LEACH プロトコルはセンシングエリア内に多数のノードが配置されている場合に最も有効な手段である。それゆえ、ノード数が少数である場合には効果を発揮しない [9, 10]。

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。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 [11]。

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 [12]。

HEED はエネルギー効率の高い CH を選出するアルゴリズムである。初期段階として、各ノードはエネルギー量情報を保持している。各ノードは自身の残存エネルギー量と隣接ノードとの通信距離からクラスターヘッドとしての適正を計算する。各ノードは、計算によって求めた値が閾値より高い場合、クラスターヘッドを担う。このアルゴリズムでは、隣接ノードとの通信が必要なため、ノード数の多い環境ではクラスターヘッド選出に大きな通信コストがかかる。また、クラスターサイズを均等に分割できるという条件がある [7, 8, 13]。

3. 提案

提案方式

本提案手法は各ノードのバッテリー残量を平滑化し、ネットワークの動作時間を延長することを目的とする。バッテリー残量と接続可能ノード数からスコアを算出し、次のクラスターヘッドを選出する。MVED(Multi-Variable Energy Distributed algorithm) を提案する。なお、本提案方式では、以下の項目を前提条件として設定する。

- リンクは固定とし、変更されることはない。
- サーバーは 1 台である。
- サーバーは、各ノードが接続可能なノードのリストをあらかじめ保持している。
- データの取得頻度、送信頻度はすべてのノードで同一とする。
- 各通信において全てのノードからデータを受信可能なクラスターヘッドの配置でなければならない。

図 2 は初期のネットワークトポロジーを示している。各ノードが接続可能なリンクはあらかじめ固定され、ハードコーディングされたものである。本提案方式では、図 2 中の Cluster Head ノードがクラスターヘッドの候補であり、この中から 1 台クラスターヘッドとして選出する。つまり、各 Cluster Head 候補ノードは自身に所属しているリーフノードからセンシングデータを受信し、5 台から選出された別のクラスターヘッドにセンシングデータを転送する。

主なアルゴリズムのステップは以下に示す。

ノード情報収集

各ノードは現在のバッテリー残量と接続可能ノード数を測定、取得し、クラスターヘッドに送信する。クラスターヘッドは全てのノードから情報を収集し、この情報を次のクラスターヘッド選択に使用する。

正規化

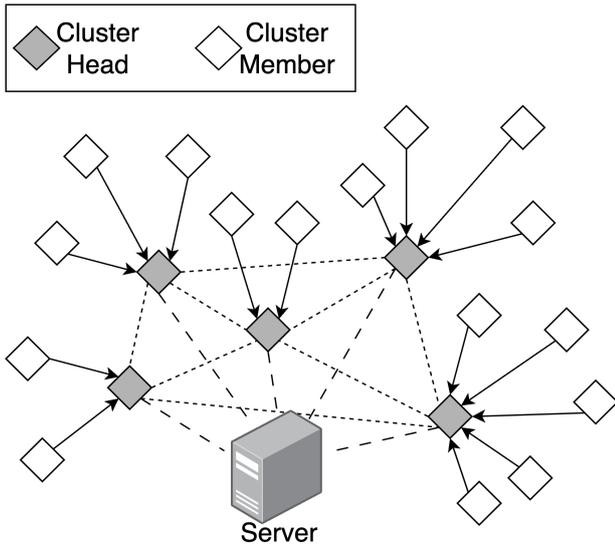


図 2 初期トポロジー

各ノードから収集されたバッテリー残量情報と接続可能ノード数情報は正規化される。正規化は2つのパラメータを同じスケールで比較するために使われる。正規化は以下の式から0-1の範囲で算出される。

$$\text{Normalized Value} = \frac{\text{Current Value} - \text{Min Value}}{\text{Max Value} - \text{Min Value}}$$

本稿では、バッテリー残量 $b(0 \leq b \leq 100)$ と接続可能ノード数 $n(0 \leq n)$ であり、2値のスケールが異なるため、正規化を行う必要がある。

類似度 (スコア) 算出

それぞれのノードについて、正規化されたバッテリー残量と接続可能ノード数の値から類似度スコアが算出される。スコアは、クラスターヘッドに適正のあるノードほど低い値となる。スコアは以下の式から算出される。

$$\text{Sim_score}(i, j) = \sqrt{(p * (b_i - b_j))^2 + (p * (n_i - n_j))^2} \quad (1)$$

クラスターヘッド選出

ユークリッド距離の値は2点が類似しているほど小さくなる。したがって、最も低いスコアを持つノードが次回のクラスターヘッドとして選出される。

ユースケース・シナリオ

本稿で提案する手法は農地での環境モニタリングへの応用を想定している。農地に設置されたIoTデバイスを用いた環境モニタリングでは、農場の環境および作物の効率的な管理を目的として、気温、土壌湿度、水量、光量、風量、作物の画像データを取得する。これらのデータは、数値情報が適切な灌水タイミングの判断に役立ち、画像データは病害虫の発生や予兆の検出に活用される。図3は、本手法

のユースケースを示している。

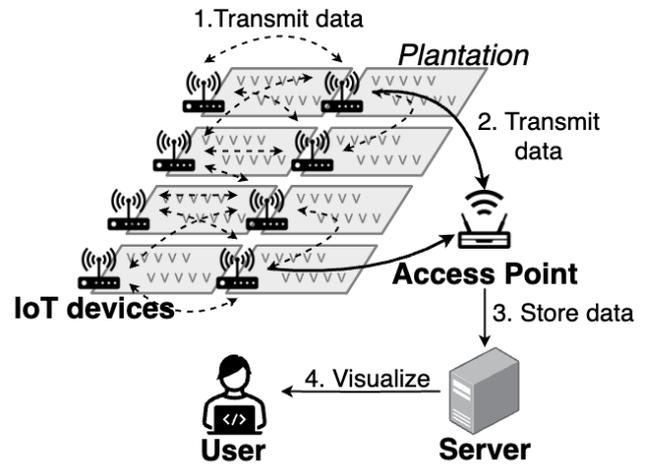


図 3 ユースケース

図3に示されるように、本システムでは農地に配置されたIoTデバイスが環境データを収集し、マルチホップネットワークを利用して複数のノードを介しながらサーバーへデータを送信する。その後、サーバーに蓄積されたデータはユーザーによって可視化され、必要な防除の判断材料として利用される。

具体的なIoTセンサーを用いたセンシングソリューションの例として、ワイン用ブドウの品種であるカベルネ・ソーヴィニヨンの栽培農園が挙げられる。このような農園では、短時間での気候変化に迅速に対応し、防除対策を適切に行うことが求められる。特に、急激な温度変化はブドウの成長に悪影響を及ぼす病原菌の発生を招く可能性があるため、リアルタイムでの環境監視とデータ解析が重要となる。山梨県にあるカベルネ・ソーヴィニオン農家では、カメラや温度センサーを搭載したIoTデバイスを用い、10分ごとにデータを取得し、無線ネットワークを介して収集している。

本稿の提案手法を導入することで、バッテリーやソーラーパネルによる電力供給で動作するIoTシステムを農場に展開できる。また、Wi-Fiを使用することでデータ送信時の通信速度を確保しつつ、モバイルネットワークを利用するよりも低コストでの運用が可能となる。

4. 実装

提案手法のソフトウェア実装について説明する。本実装では、データの受信、類似度の計算、クラスターヘッド(CH)の選出を行うノードとしてESP32を使用した。また、消費電力の計測には、電流センサーINA219を使用した。図4にESP32とサーバーの構成を示す。

類似度計算

提案方式のユークリッド距離の計算を行い、ノードごとのスコアを計算する。スコアを元に、次のクラスターヘッ

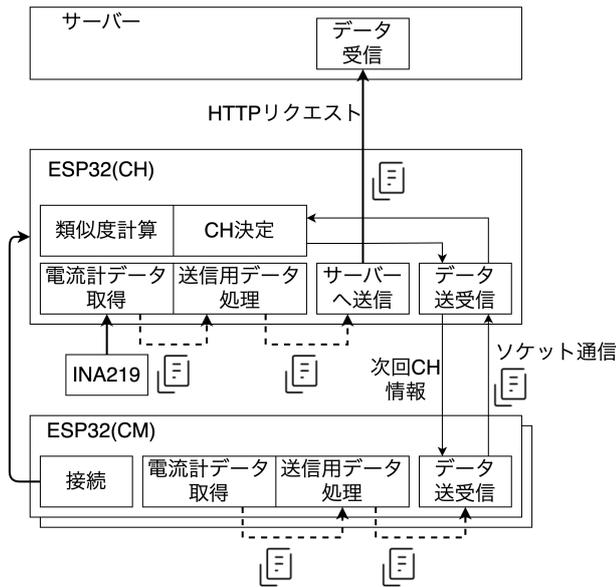


図 4 ソフトウェア構成図

ドの選出を行う。

データ送信, 受信

ノード間の通信にはソケット通信を用いる。クラスターメンバーはクラスターヘッドに対し、自身のバッテリー残量、接続可能ノード数の情報を送信する。クラスターメンバーはレスポンスとして、次回のクラスターヘッドのノード情報を受け取る。

電流計データ取得

消費電力の取得には電流計センサーの INA219 を用いる。測定した値からノードのバッテリー残量を計算する。

5. 評価実験

実験環境

実験では、ノードとして ESP32 を 5 台使用した。すべてのノードは消費電力量を計測するために INA219 を搭載している。ノード間の通信間隔は 5[sec] である。各ノードのバッテリー容量は 1000[mAh] に設定した。表 1 に実験環境を示す。

台数	5
通信間隔	5[sec]
バッテリー容量	1000[mAh]
ノード間距離	約 1[m]
通信規格	Wi-Fi

表 1 実験構成

既存手法として LEACH プロトコルを用いたクラスターヘッド選出を行う。毎通信後に、python の random モジュールを使用して疑似乱数生成を行い、次のクラスターヘッドを選出する。提案手法として MVED プロトコルを用いたクラスターヘッド選出を行う。

実験結果と分析

LEACH プロトコルと MVED プロトコルでの実験における、バッテリー残量の推移を図 5 と図 6 に示す。また、各項目についての計測結果を表 2 にまとめる。

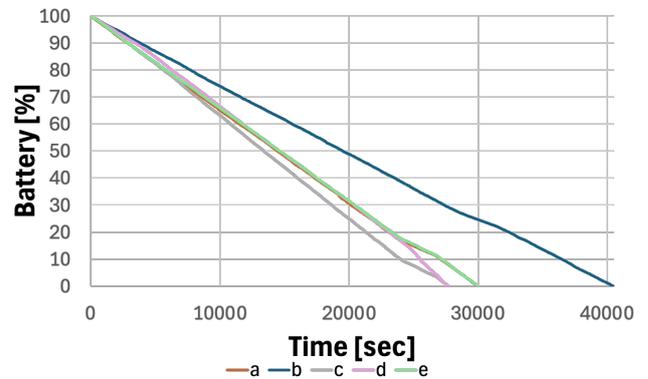


図 5 LEACH 消費電力

図 5 において、LEACH プロトコルでは、各ノードのバッテリー残量にばらつきが見られた。ノード b が最長の稼働時間を記録し、40,490[sec] 間稼働した。一方、ノード d が最短の稼働時間を記録し、稼働時間は 27,721[sec] であった。各ノードの平均稼働時間は約 31,176[sec] で、最長ノードと最短ノードの差は 12,769[sec] であった。標準偏差は約 5,326[sec] であった。

この結果で見られたバッテリー残量のばらつきにより、クラスターヘッドの早期の停止が発生し、孤立ノードの発生が増加した。図 7 は孤立ノードの数の推移を表す。稼働時間が最長ノードと最短のノードの稼働時間差は、クラスターヘッドの停止によって孤立ノードを抱えたままネットワークが稼働している時間と同義であり、全稼働時間 (40,490[sec]) のうち孤立ノードを抱えたまま稼働している時間の割合は約 32[%] であった。

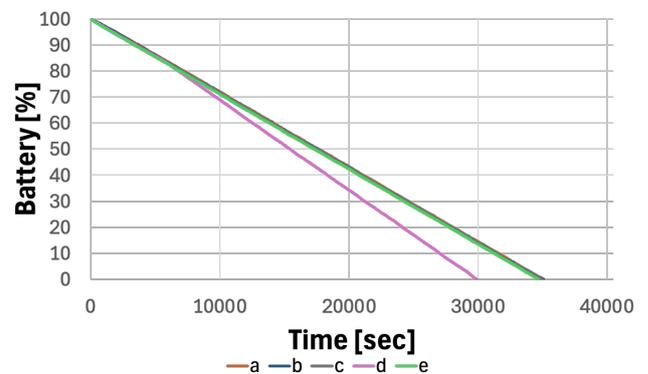


図 6 MVED 消費電力

図 6 において、MVED プロトコルでは、LEACH と比較して各ノードのバッテリー残量のばらつきは小さかった。ノード a が最長の稼働時間を記録し、35,112[sec] 間稼働した。

働した。一方、ノード d が最短の稼働時間を記録し、稼働時間は 29,920[sec] であった。各ノードの平均稼働時間は約 33,956[sec] で、最長ノードと最短ノードの差は 5,192[sec] であった。標準偏差は約 2,023[sec] であった。

図 6 より、MVED プロトコルのクラスターヘッド選出によるバッテリー残量のばらつきは LEACH プロトコルと比較して小さいことがわかる。図 7 より、全稼働時間 (35,112[sec]) のうち、孤立ノードを抱えたまま稼働していた時間の割合は約 15[%] であった。

	LEACH	MVED
最長	40,490[sec]	35,112[sec]
最短	27,721[sec]	29,920[sec]
差	12,769[sec]	5,192[sec]
平均	約 31,176[sec]	約 33,956[sec]
標準偏差	約 5,326[sec]	約 2,023[sec]
孤立ノードがある時間の割合	約 32[%]	約 15[%]

表 2 LEACH, MVED 実験結果

図 7 は孤立ノードの台数の推移を図 5 と 6 から抜粋し、比較したのものである。全てのリーフノードが孤立ノードになる時間は MVED の方が早いですが、LEACH では、全てのリーフノード (17 台) のうち 14 台を早期に孤立ノードにしている。

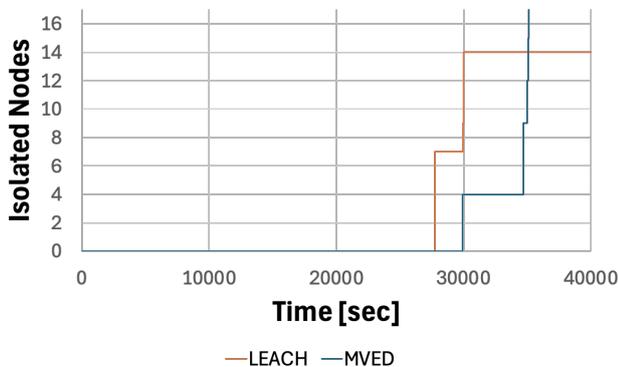


図 7 孤立ノードの台数

6. 議論

本稿の提案手法である MVED はユークリッド距離を用いたスコアの算出をノードで行っている。大規模ネットワークでは、計算量の増大に伴い、消費電力も増加するため、サーバーで計算処理を行うことでノードへの負担を減らす必要がある。また、現在はスコア計算時の“バッテリー残量”と“接続可能ノード数”の重みが同じであるため、各値の重みを調整することでさらにバッテリー残量の平滑化が可能である。

LEACH プロトコルのクラスターヘッド選出はランダム

に行われるため、本稿の実験で得られた結果より良い結果にも悪い結果にもなり得ることに注意が必要である。今後は、LEACH プロトコルでの実験数を増やすことで平均的な性能を測り、MVED との性能比較を行う必要がある。

ノード間距離によって、本稿のトポロジーのようにクラスターヘッド候補ノード同士で接続できないシチュエーションが考えられるが、ネットワーク内でクラスタリングを行うことで動作させることが可能である。ただし、マルチホップ通信を行うためにそれぞれのクラスターで最低 1 台ずつ他のクラスターと通信できるノードが存在することが必要である。

7. おわりに

本稿ではバッテリー残量と接続可能ノード数から各ノードのスコアを算出し、そのスコアを元にクラスターヘッドの選出を行う MVED プロトコルを提案した。実験結果より、MVED プロトコルはノード間の消費電力量を平滑化し、孤立ノードが発生するまでの時間を延ばすことが示された。各ノードの平均稼働時間は、LEACH プロトコルで約 31,176[sec]、MVED プロトコルで約 33,956[sec] であった。また、全稼働時間のうち孤立ノードを抱えたままネットワークが稼働している時間の割合は LEACH プロトコルと MVED プロトコルでそれぞれ約 32[%] と約 15[%] であった。LEACH プロトコルの標準偏差が約 5,326[sec] であったのに対し、MVED プロトコルでは約 2,024[sec] と、約 62[%] の改善が見られた。

参考文献

- [1] Ahlawat, B. and Sangwan, A.: Energy Efficient Routing Protocols for WSN in IOT: A Survey, *2022 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON)*, Vol. 1, pp. 380–385 (online), DOI: 10.1109/COM-IT-CON54601.2022.9850649 (2022).
- [2] Arora, S., Nijhawan, G., Verma, G. and Patel, R. J.: A systematic survey on various energy harvesting systems for WSN applications, *2021 International Conference on Industrial Electronics Research and Applications (ICIERA)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/ICIERA53202.2021.9726530 (2021).
- [3] Abraham, J. A. and Felix Arokya Jose, A.: Literature Survey on Reliable event detection in WSN using aggregation of data, *2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, pp. 841–843 (online), DOI: 10.1109/ICCMC.2018.8488027 (2018).
- [4] Pešović, U. M., Mohorko, J. J., Benkič, K. and Čučej, Ž. F.: Single-hop vs. Multi-hop–Energy efficiency analysis in wireless sensor networks, *18th telecommunications forum, TELFOR* (2010).
- [5] Izadi, D., Abawajy, J. and Ghanavati, S.: An Alternative Clustering Scheme in WSN, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 4148–4155 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2015.2411598 (2015).
- [6] Kumrawat, M. and Dhawan, M.: Survey on clustering al-

- gorithms of wireless sensor network, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 6, No. 3, p. 2046 (2015).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Priyadarshi, R., Singh, L., Randheer and Singh, A.: A Novel HEED Protocol for Wireless Sensor Networks, *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 296–300 (online), DOI: 10.1109/SPIN.2018.8474286 (2018).