

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によるノード間の電力負荷分散

大沢 恭平¹ 串田 高幸¹

概要: 広範囲なエリアでの環境モニタリングや短距離無線通信を用いたモニタリングを行う際に、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におけるノードはバッテリーを搭載した小型の IoT デバイスである。マルチホップネットワークではクラスターヘッドが AP モードで Wi-Fi モジュールを起動し、データの中継を行う。AP モードの起動によりクラスターヘッドの消費電力量が高まり、デバイスの動作可能時間は減少する。クラスターヘッドの停止によってクラスターメンバーがデータの中継先を失う孤立ノードの発生が課題となる。本稿では、ユークリッド距離を用いて類似度を計算することで次のクラスターヘッドを求める手法を提案する。基礎実験では、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を測定することで、課題の現実性と提案方式で用いるパラメータの有効性を確かめた。Wi-Fi モジュールのモードによる差は約 12.33[Wh] となったが、クラスターメンバー数による差は約 0.5[Wh] であった。

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、工業、農地での環境モニタリングで用いられている [1]。農地での環境モニタリングでは、センサーノードは気温、二酸化炭素濃度、湿度、日射量、土壌水分、風向、監視画像データを収集する。収集されたデータはサーバーに送信され、農地の環境管理、農作物の成長分析、病害虫の発生予測に使用される [2,3]。マルチホップネットワークにおけるノードはバッテリーを搭載した、小型の IoT デバイスである。ノードの小型化に伴ってバッテリーのサイズと容量も制限される [4-6]。限られたバッテリーで長時間動作することが求められるため、マルチホップネットワークを構成するノードの消費電力を削減することは重要な課題である [7-9]。マルチホップネットワークはシングルホップの通信範囲よりも広範囲なエリアでの使用に適している。遠隔地に設置されたサーバーにセンシングデータを保存するために各ノードは他のノードを中継してセンシングデータをサーバーまで送信する。マルチホップネットワークでは、短距離無線通信を用いながらも広範囲のセンシングを行える他、ノード間の通信距離を短くすることができるため、通信にかかる消費電力を削減できる、したがって、マルチホップ

通信はノードの省電力化に対する有効な手段である [10]。クラスター化されたネットワークでは、センシングデータの中継を行うノードが複数のノードからのデータを集約して次のノードへ送信する。このように中継を行うノードをクラスターヘッド (Cluster Head:CH) と呼び [11]、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 [12,13]。クラスターヘッドは Wi-Fi によるデータの受信時に Wi-Fi モジュールを AP(Access Point) モードで起動する。AP モードでの Wi-Fi モジュールの動作は STA(Station) モードでの動作よりも高くなる。同一のノードをクラスターヘッドとしてシステムの運用を行うことにより、クラスターメンバーとクラスターヘッド間で消費電力量に差ができる。特にボトルネックとなるアクセスポイント付近のノードや多くのノードからセンシングデータを集約するクラスターヘッドの負荷と消費電力量は大きい。

課題

課題は、バッテリー残量の枯渇によってクラスターヘッドの動作が停止することによる孤立ノードの発生である [14]。孤立ノードが発生する例を図 1 に示す。AP モードで動作するクラスターヘッドの消費電力がクラスターメンバーよりも大きいことから、クラスターメンバーよりも早くバッテリーを消耗する。マルチホップネットワークにおいて、データの中継を行うクラスターヘッドノードが停止すると、図 1 中の CM2-1 や CM2-2 のような、CH2 を介さな

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

いとデータをサーバーに送れないクラスターメンバーノードが送信不可状態に陥ってしまう。CM2-1 や CM2-2 のようなノードを孤立ノードと呼び、クラスター単位で孤立している場合は孤立クラスターと呼ぶ。

孤立ノードはバッテリー残量を十分に保持しているが、データをサーバーに送ることができないため、そのバッテリーを有効活用できていない。

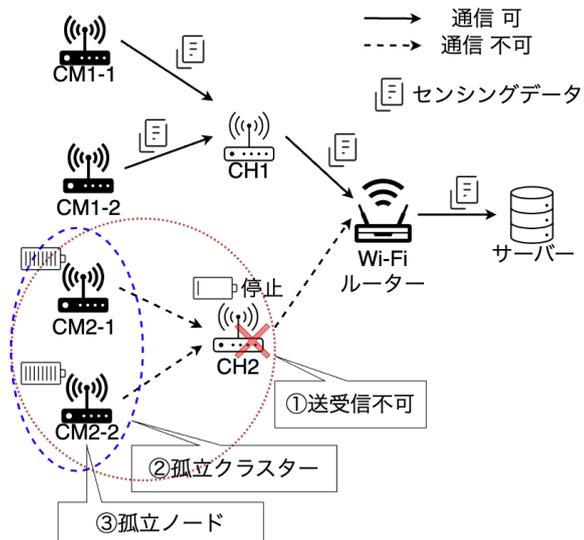


図 1 孤立ノード発生例

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、本稿で行った基礎実験について記述する。4 章では、本稿の提案方式について記述する。5 章では、実装の内容について記述する。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 [15]。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 [16,17]。

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 [18]。

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 [19]。

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 [14,15,20]。

3. 提案

提案方式

本稿の提案方式では、動的なクラスターヘッドの変更によってノード間の電力消費負担を分散させ、ネットワークの寿命を延長することを目的とする。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。

本提案手法を以下の 3 つのセクションに分けて説明する。

- a 初期ネットワーク構築
 - b データの送受信
 - c 類似度の計算
- a. 初期ネットワーク構築

初期のネットワーク構築について述べる。前提条件で述べたように各ノードが接続可能なリンクはあらかじめ固

定されているものとする。また、リンクは実験用にハードコーディングされたものである。図2は初期のネットワークトポロジーを示している。センシングデータはA列からC列方向に送信され、APを介してサーバーに送信される。したがって、クラスターヘッドはB列、C列から選出される。各ノードが通信可能なノードとのリンクはあらかじめ固定されているものとし、そのリンクは破線で図2中に示されている。初期クラスターヘッドは最も通信可能ノード数の多いノードが選出される。例えば図2では、ノードB2はA1, A2, A3, B1, B3の5台からデータを受信可能なリンクを持つ。B列のその他のノードは3台であるから、B2がクラスターヘッドとして選出されている。ここで、B2のみがクラスターヘッドとなるとA4からのデータを受信できなくなるため、B3またはB4もクラスターヘッドとなる必要がある。これらのノードは通信可能ノード数が同数であるため、ランダムにクラスターヘッドを決定する。同様にしてC列はC2, C3がクラスターヘッドとなる。

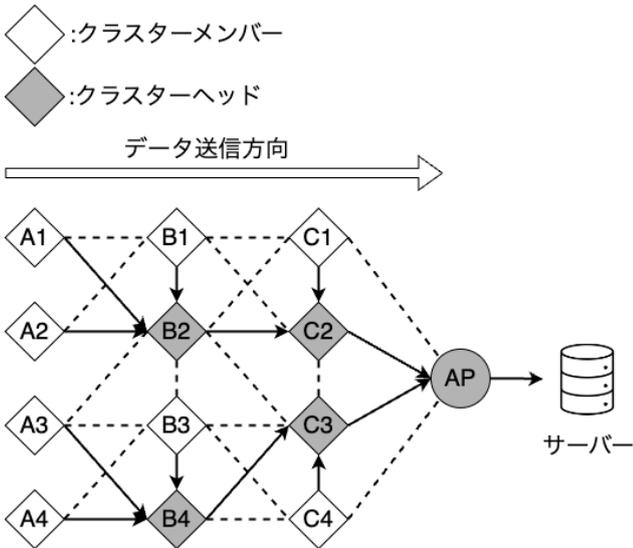


図2 初期トポロジー

b. データの送受信

データは周期的に送信される。データの送受信にはソケット通信を用いる。はじめに、各クラスターヘッドは自身のWi-FiモジュールをAPモードで起動し、クラスターメンバーからの接続を待つ。次に、B列のクラスターヘッドはクラスターメンバーから受信したデータを纏めてC列のクラスターヘッドへの接続を行う。C列のクラスターヘッドはB列のノードからの受信を行なった後、APを介してサーバーへのデータの送信を行う。

c. 類似度の計算

データ送信と同一の周期でクラスターヘッドの選出を行う。本提案方式でのクラスターヘッドの動的選出判断には現在のクラスターヘッドとその他のノードの類似度を用いる。類似度の計算にはユークリッド距離とユークリッド

距離を改変した式を用いる。ユークリッド距離の値は以下の式で算出される。ユークリッド距離の計算に用いるパラメータはバッテリー残量、通信可能ノード数の2つである。

$$Euclid.dist(i, j) = \sqrt{(b_i - b_j)^2 + (n_i - n_j)^2} \quad (1)$$

式(1)中の表記はそれぞれ以下に示す。

- i: 現在のCHノードのパラメータ
- j: 次のCH候補ノードのパラメータ
- b: バッテリー残量
- n: 通信可能ノード数

ユークリッド距離による類似度の計算について述べる。ユークリッド距離とは各特徴量間の直線距離を計算する方法である。バッテリー残量と通信可能ノード数の2つのパラメータを2次元の座標とみなして、現在のクラスターヘッドが選出された時のパラメータとの距離を計算する。ただし、このユークリッド距離の式では、比較対象との”差”のみ考慮する。クラスターヘッドはバッテリー残量が多いほど良いが、ユークリッド距離では、バッテリー残量70[%]を基準にした時の50[%]と90[%]が同じ価値として扱われている。したがって、90[%]に価値の重みを持たせるため、現在のクラスターヘッドのパラメータの値より低いパラメータにはペナルティを与えるように式を改変する。改変した式(2)から類似度を求める。

$$Similarity.score(i, j) = \sqrt{(p * (b_i - b_j))^2 + (p * (n_i - n_j))^2} \quad (2)$$

図2のノード配置での計算の例を以下に示す。また、図3は各ノードのパラメータを散布図としてプロットしたものである。ノードB1, B2, B3, B4はバッテリー残量が前回のクラスターヘッド選出時のB2のバッテリー残量より少ないため、式2によりペナルティが与えられる。また、ノードB1, B3, B4はB2の接続可能ノード数より少ないため、式2によりペナルティが与えられる。

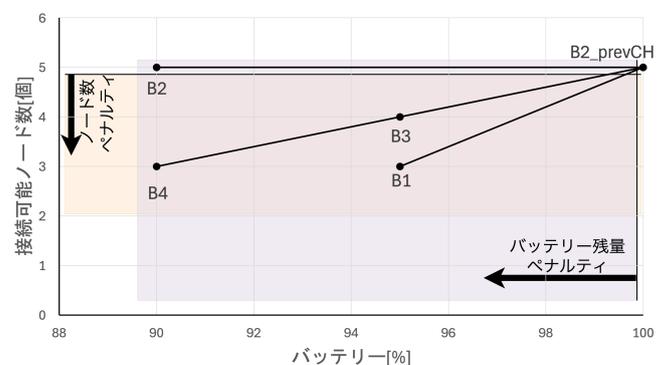


図3 計算前の各ノードのパラメータ関係

B2がクラスターヘッドとして選出時のパラメータが

(バッテリー (b):100, ノード数 (n):5), 一定時間経過後の B1, B2, B3, B4 のパラメータが以下であると仮定する. また, この計算例ではペナルティの値は 2.0 としている.

B1(b:95, n:3)

B2(b:90, n:5)

B3(b:95, n:4)

B4(b:90, n:3)

この時, ノード B1 B4 はノード B2 がクラスターヘッドに選出された時点でのバッテリー残量の 100[%] より低い. 式 2 でのバッテリー残量の差分計算時にペナルティが与えられる. また, ノード B1, B3, B4 はノード B2 の接続可能台数 5 台より少ないため, 接続可能台数の差分計算時にペナルティが与えられる. 各ノードの B2 との類似度の値は以下になる.

B1: 10.77

B2: 20.0

B3: 10.19

B4: 20.39

これにより, 次のクラスターヘッドは最も値の小さい B3 と B1 が選出される.

類似度の算出のパラメータとしてバッテリー残量と通信可能ノード数を選んだ意図を述べる. まず, クラスターヘッドは Wi-Fi モジュールを AP モードで起動する必要があるため, 多くのバッテリーを消費する. したがって, バッテリー残量が十分にあるノードはクラスターヘッドの適正があると言える. 次に, 一度に多くのノードからのデータを受信することができるノードは一度の通信効率が高い. したがって, クラスターヘッドの適正があると言える.

ユースケース・シナリオ

本稿の提案手法は農地での環境モニタリングに使用することを想定している. 農地における IoT デバイスによる環境モニタリングでは, 農場の環境と農作物の管理を目的とし, 気温, 土壌温度, 水量, 光量, 風量, 作物画像データを取得する. 取得した数値データは適切な水やりのタイミング判断に使用でき, 画像データは病害虫の発生や予兆の監視に使用できる.

図 4 はユースケースを示している.

図 4 での構成では, 農地に設置された IoT デバイスが環境データを取得し, マルチホップネットワークを用いて複数のノードを経由し, サーバーにデータを送信する. サーバーに保存されたデータがユーザーの元で可視化される.

実際の IoT を利用したセンシングソリューションの例を挙げる. ワイン用のぶどうであるカベルネ・ソーヴィニオン農園では短時間の気候変化に対応し, 適切な防除を行う必要がある. 短時間での不安定な温度変化によって, ぶどうの成長に悪影響を与える病原菌が発生するためである. このように短時間での環境変化からぶどうを守るためにリ

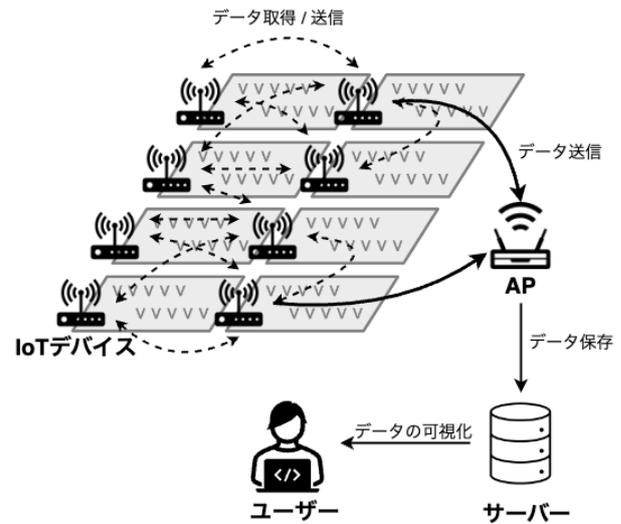


図 4 ユースケース

アルタイムでの環境監視とデータ解析が行われる必要がある. 山梨県のカベルネ・ソーヴィニオン農園ではカメラ, 温度センサー付き IoT デバイスで 10 分間隔でデータを取得し, 無線ネットワークを通じてデータを収集している*1.

本稿の提案手法を用いることで, バッテリーやソーラーパネルからの電力供給で動作する IoT システムを農園に展開することができる. また, Wi-Fi を用いることでデータの送信時に通信速度がボトルネックにならず, モバイルネットワークよりも低コストで運用することが可能である.

4. 実装

提案方式のソフトウェアの実装について述べる. 実装にはデータ受信と類似度計算, クラスターヘッド選出を行うサーバーとノードとして ESP32 を用いる. また, 消費電力計測には電流計センサーの INA219 を用いる. 図 5 は ESP32 とサーバーの構成図である.

類似度計算, CH 決定

提案方式のユークリッド距離の計算とその値を元に次の CH の決定を行う. 実装は Python で行う.

データ送信, 受信

ESP32 同士の通信にはソケット通信を用いる. ESP32 とサーバーの通信には HTTP リクエストを用いる. 自身のバッテリー残量, 受信した他のノードのバッテリー残量情報を送信する.

電流計データ取得

消費電力の取得に電流計センサーの INA219 を用いる. 電流, 電圧, 消費電力を測ることができる.

*1 https://www.maff.go.jp/j/nousin/inobe/6jika/attach/pdf/free_paper-2.pdf

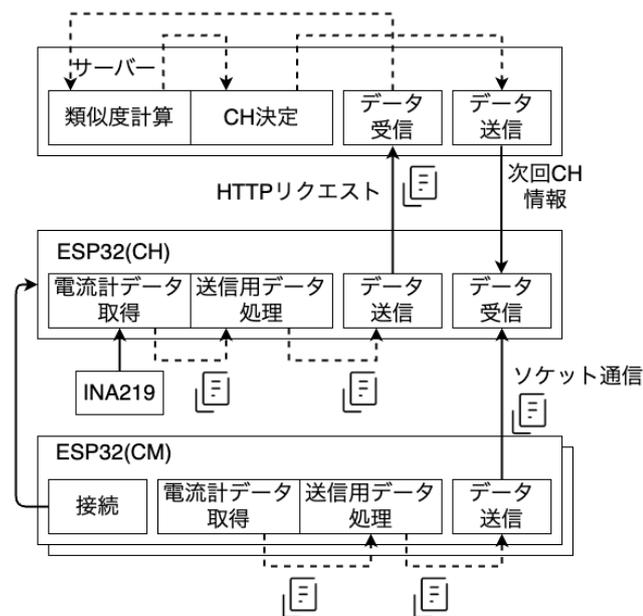


図 5 ソフトウェア構成図

5. 評価実験

実験環境

基礎実験ではクラスターヘッドノードを1台、クラスターメンバーノードを4台用いて消費電力の計測を20[min]行なった。通信データ量は130[byte]程度で、無線通信にはWi-Fiを用いた。ノード間の距離はそれぞれ0.3[m]程度である。本番の実験では実装の章で述べた通り、サーバー1台とESP32を12台用いて実験を行う予定である。屋内での実験を行なった後、ユースケースに合わせて屋外での実験を行う予定である。その際、ノード間の距離は30[m]程度離す。

実験結果と分析

本稿で設定した課題が実際に起こりうるものなのか、提案方式で用いるパラメータとしてバッテリー残量と通信可能ノード数が適切であるのかを確認するため基礎実験を行なった。確認項目は以下の2点である。

- ノードのWi-FiモジュールをAPモードで起動させることとSTAモードで起動させることによる消費電力量の差。
- クラスターメンバーの数によるクラスターヘッドの消費電力の違い。

表1はWi-Fiモジュールのモードによる消費電力量差を示している。クラスターヘッド1台に対し、クラスターメンバー4台で通信を行なった。クラスターヘッドとクラスターメンバーで消費電力量の差が約11.45倍あることから、APモードで起動することとSTAモードで起動することでは消費電力量差に大きな影響を与えることがわかる。

	CM 4 [台]
CH 消費電力	13.51 [Wh]
CM 消費電力	1.18 [Wh]

表 1 Wi-Fi モジュールのモードによる消費電力量差

表2は通信を行うクラスターメンバーの数による消費電力量の差を示している。クラスターメンバーの数が1台の時と4台の時で消費電力量差が約0.5[Wh]であり、大きな差にはなっていないことがわかる。

	CM 1 [台]	CM 4 [台]
CH 消費電力	13.54 [Wh]	14.04 [Wh]

表 2 CM 数による CH の消費電力量差

6. 議論

基礎実験の結果から、APモードでのWi-Fiモジュールの起動の有無が消費電力量差に大きな影響を与える反面、クラスターメンバーの数はクラスターヘッドの消費電力量に与える影響は小さいことが分かった。したがって、APモードでWi-Fiモジュールを起動するクラスターヘッドを動的に変更することは消費電力負担を分散する上で必要なアプローチであると考えられる。また、同一のノードにクラスターヘッドを担わせ続けることはそのノードの寿命を急速に減らす原因となり、課題である孤立ノードを発生させることにも繋がりと考えられる。クラスターメンバーの数はクラスターヘッドの消費電力に大きな影響を与えないが、さらに規模の大きなシステムでの運用を考えると、1台のクラスターヘッドが多くのクラスターメンバーとの通信を行えばクラスターヘッドの台数を減らすことができる。したがって、通信可能台数はクラスターヘッドの選出アルゴリズムのパラメータとして必要である。ただし、式中での重みはバッテリー残量より小さくしても構わないのではないかと。今後、類似度を求める式中でのパラメータの重みを調整することで更に改善させることができると考える。

7. おわりに

本稿ではユークリッド距離を用いてノード間の類似度を求めることによる動的クラスターヘッド選出アルゴリズムを提案した。課題はクラスターヘッドのバッテリー残量がクラスターメンバーよりも早く枯渇してしまうことで孤立ノードが発生することである。基礎実験ではAPモードとSTAモードによる消費電力量の差と、クラスターメンバー数によるクラスターヘッドの消費電力量差を測定し、本稿の課題の現実性と、提案方式においてバッテリー残量と通信可能ノード数をパラメータとして設定することの有効性を示した。

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] 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).
- [4] Thiagarajan, 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).
- [5] 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).
- [6] Samara, G.: Wireless sensor network MAC energy-efficiency protocols: a survey, *2020 21st International Arab Conference on Information Technology (ACIT)*, IEEE, pp. 1–5 (2020).
- [7] 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).
- [8] Haneef, M., Wenxun, Z. and Deng, Z.: MG-LEACH: Multi group based LEACH an energy efficient routing algorithm for Wireless Sensor Network, *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp. 179–183 (2012).
- [9] Lindsey, S. and Raghavendra, C.: PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems, *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, Vol. 3, pp. 3–3 (online), DOI: 10.1109/AERO.2002.1035242 (2002).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Kumrawat, M. and Dhawan, M.: Survey on clustering algorithms of wireless sensor network, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 6, No. 3, p. 2046 (2015).
- [13] Masoud, M. Z., Jaradat, Y., Zaidan, D. and Jannoud, I.: To Cluster or Not to Cluster: A Hybrid Clustering Protocol for WSN, *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*, pp. 678–682 (online), DOI: 10.1109/JEEIT.2019.8717524 (2019).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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).