

バッテリー残量とRSSIをもとにした送信先の選択によるマルチホップネットワークのノードの稼働時間の延長

筒井 優貴¹ 大沢 恭平² 串田 高幸¹

概要：農場では農作物の状態を確認するためにIoTデバイスが使われている。IoTデバイスにはバッテリーで稼働しているものが存在する。バッテリーで稼働しているIoTデバイスはバッテリーが枯渇するとデータの取得、送信ができなくなる。本稿では、バッテリー残量とRSSIをもとにセンシングデータの送信先を選択することでノードの稼働時間を延長する手法を提案する。基礎実験では、送信時の消費電力と中継時の消費電力の測定を行った。その結果、送信時の1秒当たりの消費電力の中央値は約237[mW]、中継時の1秒当たりの消費電力の中央値は約359[mW]であった。評価実験では、提案手法を使用する場合と使用しない場合のノードの稼働時間を比較する。

1. はじめに

背景

Wireless Sensor Network (WSN) はコンピューターネットワークにおいて検索領域や情報集積で最も重要である。WSNは軍事やヘルスケア、農業、工業で利用されている [1-3]。WSNは、環境から情報を取得し、処理、送信を行うことができる [4-6]。農業において、WSNは土壌の水分、温度、湿度、水位をセンサーで測定し、サーバーに送信するために利用される [7,8]。

センサーノードは制限されたコンピューティング能力、小さなメモリサイズとストレージ、狭い通信範囲、低帯域幅、限られたエネルギーというリソースの制約がある。そのため、単一のセンサーでは情報を十分に収集することができない [9]。WSNの最大の課題はエネルギーである [10]。センサーのエネルギーが枯渇すると、エネルギーが補充されない限りセンサーはセンシングや送信の役割を果たすことができなくなる [11]。また、多数のバッテリーを交換することは現実的ではない。そのため、WSNには電力効率の高い技術が不可欠である [12,13]。

ルーティングの目的は、ネットワークリソースを効率的に活用することである [14]。ルーティングプロトコルは、効率的で信頼性の高いプロトコルとなるために、ネットワーク構造、データ送信方法、ノードとリンクの不均一

性、ノードの移動性、消費エネルギー、カバレッジ、接続性、データ集約、サービス品質の問題を考慮する必要がある [15]。センサーをクラスターにグループ化することで、通信帯域幅を節約、冗長なメッセージ交換を回避、ネットワークの寿命を延長、メンテナンスのオーバーヘッドを削減可能という利点が存在する [16,17]。

課題

中継点となるノードは、センシング、送信、受信を行う必要があるため、バッテリー消費量が大きく他のノードより早く使用不可になる。課題は、バッテリーが切れたノードがデータの取得、送信、転送ができなくなることである。図1は課題の概要図である。

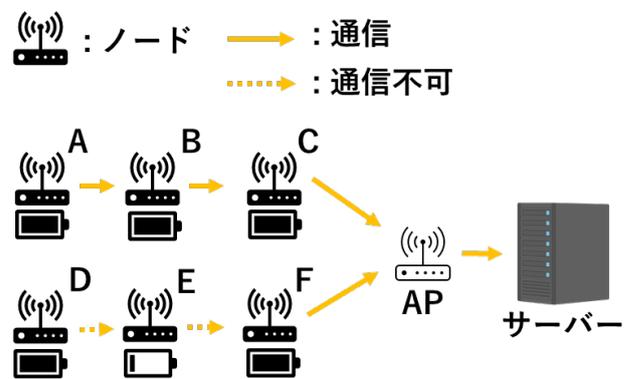


図1 課題

図1では、ノードEのバッテリーが枯渇しており、センシングデータの取得、送信、転送を行うことができ

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

ない。

各章の概要

第2章では関連研究について述べる。第3章では提案方式、ユースケース・シナリオについて述べる。第4章では実装について述べる。第5章では評価実験について述べる。第6章では議論について記述する。第7章では本稿のまとめを記述する。

2. 関連研究

パケット到達率、エンドツーエンド遅延、スループット、エネルギー使用率のバランスが良好なルーティングプロトコルが存在する [18]。しかし、このプロトコルでは、ルーティングの際に残エネルギーを考慮しない問題点がある。そのため、特定のノードのバッテリーが早く枯渇してしまう可能性がある。また、実験環境がシミュレーションであるため、実際の環境においても問題なく動作するか不明である。

動的なネットワークにおいて経路障害からの回復を高速かつ効率的に行い、効率的なフォルトトレランスを提供することを目的として開発された Ad hoc On-demand Distance Vector(AOMDV) というプロトコルが存在する [19]。このプロトコルは、バッテリーの消費量が考慮されていないため、本稿における課題を解決する事ができない。

電波伝搬の変化に応じて動的にルートを構築する Dynamic Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio(D-RCPDS) という手法を提案している論文が存在する [20]。この手法では、通信品質に基づいて、ルーティングや送信出力の変更を動的に行っている。しかし、この手法は、ルーティングの際にノードの残バッテリーを考慮していないため、特定のノードのバッテリーが早く枯渇する可能性がある。また、電波伝搬の状況を取得する際の電力消費が考慮されていない。

大規模 WSN での負荷分散とエネルギー効率に優れた Energy-Efficient Scalable Routing Algorithm(EESRA) というルーティングアルゴリズムが存在する [21]。このアルゴリズムは、クラスタヘッドの負荷を最小化し、クラスタヘッドの選択をランダム化するために3層の階層構造を採用している。このアルゴリズムは、クラスタヘッドの選択がランダムであるため、特定のノードのバッテリーが早く枯渇する可能性がある。また、実験環境がシミュレーションであるため、現実でこのアルゴリズムを使用して省電力化できるか不明である。

3. 提案

本提案では、ノードの稼働時間の延長を目的とする。そのために、バッテリー残量と RSSI をもとに送信先を決定する。本提案手法では、それぞれのノードは通信可能な

ノードがあらかじめ決められて、その通信可能なノードをサーバーは把握していることを前提条件とする。提案手法は3つのフェーズに分かれている。図2に提案手法の概要を示す。図2の説明ではノード A, B, C はそれぞれノード D, E, F と通信可能であるとする。提案手法は以下の3つのフェーズで構成されている。

- ノード情報取得フェーズ
- ルーティングフェーズ
- 送信フェーズ

それぞれのフェーズについては以下のサブセクションで説明する。

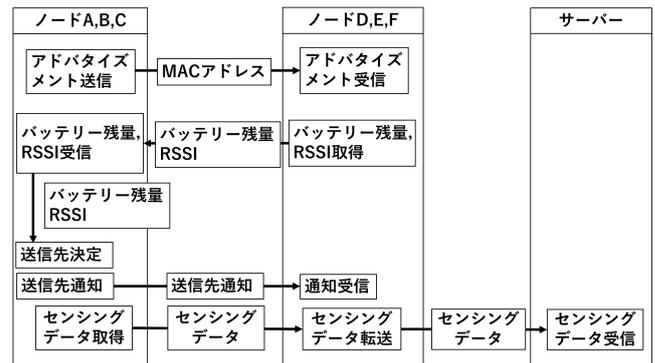


図2 提案手法概要

ノード情報取得フェーズ

ノード情報取得フェーズではサーバーと通信できない全てのノードがアドバタイズメントを送信する。アドバタイズメントを受信したノードは、アドバタイズメントの送信元にバッテリー残量とアドバタイズメント受信時の RSSI の値を返答する。これにより、サーバーと通信できない各ノードは全ての通信先のノードのバッテリー残量と RSSI の値を取得することができる。図3はノード情報の取得を行う際の通信を表した図である。図3においてはノード A がノード D, E と通信可能、ノード B がノード D, E, F と通信可能、ノード C がノード E, F と通信可能であるとする。

ルーティングフェーズ

ルーティングフェーズでは、ノード情報取得フェーズで取得した情報をもとに送信先を決定する。図4は送信先の決定を行う際の通信を表した図である。図4では、ノード A がノード D, E と通信可能、ノード B がノード D, E, F と通信可能、ノード C がノード E, F と通信可能であるとする。また、ノード情報取得フェーズで通信可能なノードの情報を取得した状態であるとする。

このフェーズでは、各ノードが通信先のノードのバッテリー残量の比較を行うことで通信先を決定する。例えば、ノード A の通信先のノード D, E のバッテリー残量が

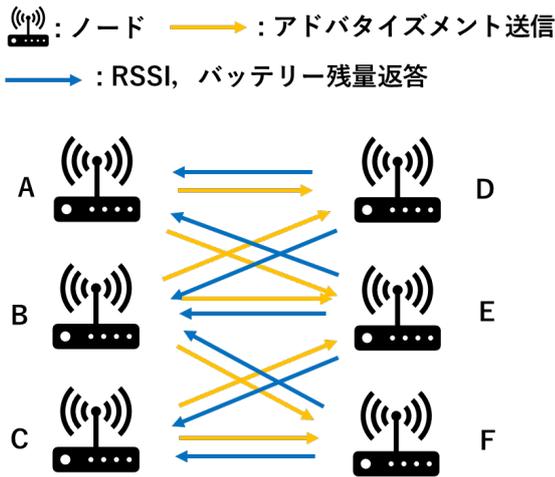


図 3 ノード情報取得

1000[mAh], 2000[mAh] であつたら、ノード D を通信先として選択する。また、バッテリー残量が同じノードが複数あつた場合は、RSSI を比較して通信先を選択する。例えば、ノード B の通信先のノード D, E, F のバッテリー残量が 1000[mAh], 2000[mAh], 2000[mAh] であり、RSSI がそれぞれ -40[dBm], -30[dBm], -40[dBm] であつたら、ノード E を通信先として選択する。送信先を決定したら、送信先に対して通知を行い、送信フェーズでセンシングデータの中継を行わせる。

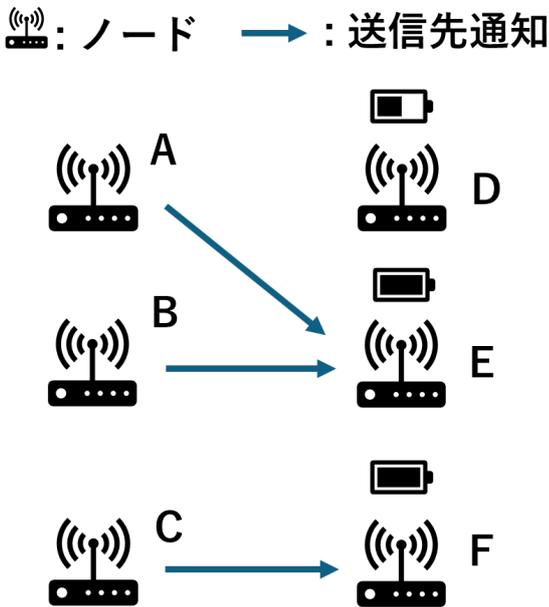


図 4 ルーティング概要

送信フェーズ

送信フェーズではセンシングデータを取得し、ルーティングフェーズで設定したルーティングに基づいてセンシングデータの送信を行う。残バッテリー量がルーティング時

の半分になったら再びノード情報取得フェーズに移行する [22].

ユースケース・シナリオ

農場では、温度や湿度、土壌水分のデータを取得するために IoT デバイスが活用されている [23]. 本提案手法は、農場のデータを取得することを想定している。図 5 にユースケースを示す。

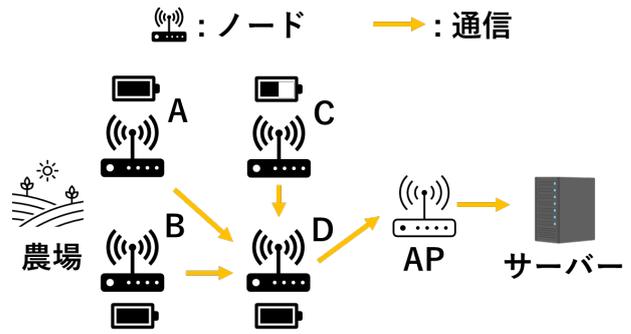


図 5 ユースケース

図 5 では、ノード C のバッテリーが消費されている。本提案手法を利用しない場合、ルーティングが変更されないため、ノード C のバッテリーが他のノードより早く枯渇する。本稿の提案手法を使用することで、バッテリー残量が少ないノードが中継を行わないことによって、ノードの稼働時間を延長することができる。

4. 実装

IoT デバイスとして 6 台の ESP32 を利用し、MicroPython1.22.1 で実装する。通信には ESP-NOW を使用した。図 6 はルーティングソフトウェア概要図である。図 7 はセンシングデータ収集ソフトウェア概要図である。全てのノードに下記のルーティングソフトウェアとセンシングデータ収集ソフトウェアを実装する。最初に、ルーティングソフトウェアを実行する。ルーティングソフトウェアでは、アダプタイズメントを送信する際は、アダプタイズメント送信側のプログラムを実行する。アダプタイズメントを受信する際は、アダプタイズメント受信側のプログラムを実行する。アダプタイズメント受信側のプログラムでは、まずアダプタイズメント受信、RSSI 測定プログラムで、受信時の RSSI の値を測定する。次に、バッテリー残量と受信時の RSSI を返答する。アダプタイズメント送信側のノードは受信したバッテリー残量と RSSI の値に応じてセンシングデータの送信先を決定する。

ルーティングソフトウェアで送信先として選択されたか否かでデータ取得プログラムのみを実行するか、中継プログラムとデータ取得プログラムの両方を実行するか決定する。送信先として選択されなかったノードは、データ取得

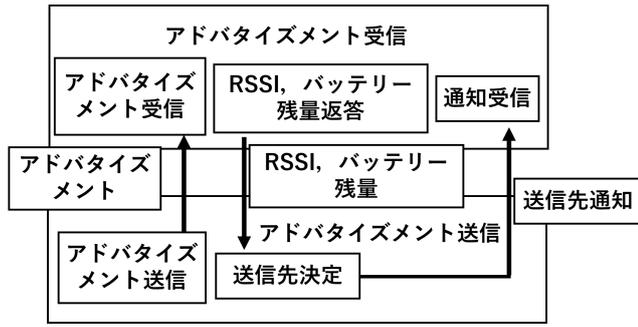


図 6 ルーティングソフトウェア概要図

プログラムを実行する。データ取得プログラムでは、センシングデータを取得してルーティングソフトウェアで決定された送信先に送信する。サーバーへ直接送信できる場合はサーバーへ送信する。中継プログラムでは、センシングデータ中継プログラムを実行し、ルーティングソフトウェアで決定された送信先にデータを送信する。サーバーへ送信できる場合はサーバーへ送信する。サーバーでは送信されたセンシングデータを受信する。

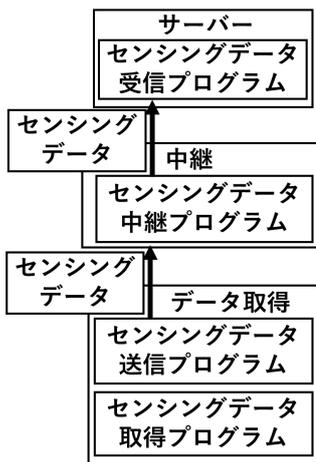


図 7 センシングデータ収集ソフトウェア概要図

5. 評価実験

IoT デバイスとして ESP32 を 6 台、電流計として INA219 を使用し、MicroPython1.22.1 で実装し、評価実験を行う。提案方式適用前のノードの稼働時間と提案方式適用後のノードの稼働時間を比較する。提案方式適用前の実験では、動的にルーティングを行わずに通信し、バッテリーが枯渇するノードが出現するまでの時間を計測する。提案方式適用後の実験では、提案方式を用いてセンシングデータの送信先を決定して通信し、バッテリーが枯渇するノードが出現するまでの時間を計測する。

基礎実験

10 分間通信を行い、送信時の消費電力と、中継時の消費電力を測定した。図 8 は基礎実験の概要を示したもので

ある。

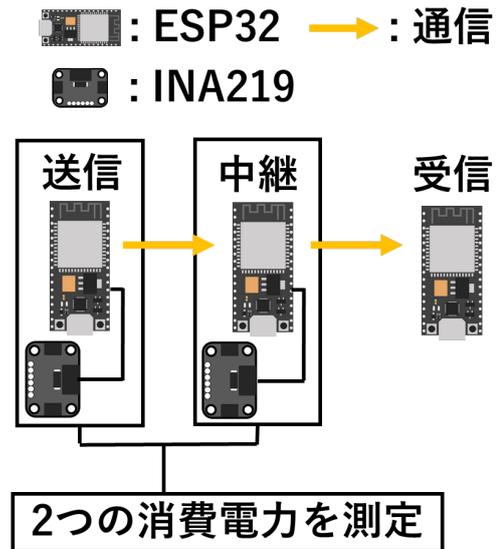


図 8 基礎実験

基礎実験では、IoT デバイスとして ESP32 を 3 台、電流計として INA219 を使用し、MicroPython1.22.1 で実装を行った。

図 9 は 10 分間通信を行った際の送信時の消費電力と中継時の消費電力を測定したものである。

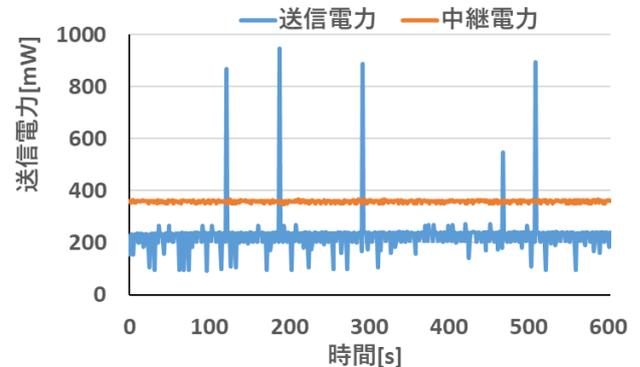


図 9 送信時と中継時の消費電力比較

送信時の 1 秒当たりの消費電力の中央値は約 237[mW] であった。中継時の 1 秒当たりの消費電力の中央値は約 359[mW] であった。このことから、送信よりも中継のほうが 1 秒当たりの消費電力が約 122[mW] 多いことがわかる。したがって、中継を行うノードは、送信のみを行うノードよりも早くバッテリーが枯渇する。

6. 議論

本稿では、バッテリー残量と RSSI をもとに動的に送信先を決定する手法を提案した。本稿では、送信先の決定にバッテリー残量を優先的に使用し、バッテリー残量と同じ

であった場合のみ RSSI を利用して送信先を決定している。しかし、この場合、RSSI が低く通信が安定しないノードに対してもバッテリー残量が多い場合接続されることになる。そのような状況では、パケットロスと再送が多発するため、バッテリーを多く消費する。そのため、RSSI が低い相手には接続しないようにするか、バッテリー残量と RSSI の値を総合的に判断して重みづけを行うアルゴリズムを考案する必要がある。

また、本提案手法では、一つのノードに接続できるノードの台数を考慮していない。一つのノードに対して過剰に通信が集中すると、輻輳が発生したり、バッテリーがすぐに枯渇したりする可能性がある。そのため、一つのノードに接続できる台数を制限するようにする必要がある。

7. おわりに

本稿ではバッテリー残量と RSSI をもとに動的にセンシングデータの送信先を選択することでノードの稼働時間を延長する手法を提案した。課題は、データの中継を行うデバイスのバッテリーが他のデバイスのバッテリーよりも早く枯渇することでデータを送信できなくなることとした。基礎実験では送信時の消費電力と中継時の消費電力を測定した。その結果、送信時の 1 秒当たりの消費電力は約 237[mW]、中継時の 1 秒当たりの消費電力は約 359[mW] であった。評価実験では、提案手法を使用する場合と使用しない場合のノードの稼働時間を比較する。

参考文献

- [1] Ali, A., Ming, Y., Chakraborty, S. and Iram, S.: A comprehensive survey on real-time applications of WSN, *Future internet*, Vol. 9, No. 4, p. 77 (2017).
- [2] Li, B., Li, H., Wang, W., Yin, Q. and Liu, H.: Performance analysis and optimization for energy-efficient cooperative transmission in random wireless sensor network, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, No. 9, pp. 4647–4657 (2013).
- [3] Liao, Y., Qi, H. and Li, W.: Load-balanced clustering algorithm with distributed self-organization for wireless sensor networks, *IEEE sensors journal*, Vol. 13, No. 5, pp. 1498–1506 (2012).
- [4] Losilla, F., Garcia-Sanchez, A.-J., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J. and Haas, Z. J.: A comprehensive approach to WSN-based ITS applications: A survey, *Sensors*, Vol. 11, No. 11, pp. 10220–10265 (2011).
- [5] Yick, J., Mukherjee, B. and Ghosal, D.: Wireless sensor network survey, *Computer networks*, Vol. 52, No. 12, pp. 2292–2330 (2008).
- [6] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: A survey on sensor networks, *IEEE Communications magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102–114 (2002).
- [7] Bandara, T. M., Mudiyansele, W. and Raza, M.: Smart farm and monitoring system for measuring the Environmental condition using wireless sensor network-IOT Technology in farming, *2020 5th international conference on innovative technologies in intelligent systems and industrial applications (CITISIA)*, IEEE, pp. 1–7 (2020).
- [8] Ardiansyah, D., Huda, A. S. M., Pratama, R. G., Putra, A. P. et al.: Wireless sensor network server for smart agriculture optimization, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 621, No. 1, IOP Publishing, p. 012001 (2019).
- [9] Wohwe Sambo, D., Yenke, B. O., Förster, A. and Dayang, P.: Optimized clustering algorithms for large wireless sensor networks: A review, *Sensors*, Vol. 19, No. 2, p. 322 (2019).
- [10] Amutha, J., Sharma, S. and Nagar, J.: WSN strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency: Review, approaches and open issues, *Wireless Personal Communications*, Vol. 111, No. 2, pp. 1089–1115 (2020).
- [11] Seah, W. K., Eu, Z. A. and Tan, H.-P.: Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP)-Survey and challenges, *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, Ieee, pp. 1–5 (2009).
- [12] Abdulla, A. E., Nishiyama, H., Yang, J., Ansari, N. and Kato, N.: HYMN: A novel hybrid multi-hop routing algorithm to improve the longevity of WSNs, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 11, No. 7, pp. 2531–2541 (2012).
- [13] Tubaishat, M. and Madria, S.: Sensor networks: an overview, *IEEE potentials*, Vol. 22, No. 2, pp. 20–23 (2003).
- [14] Waxman, B. M.: Routing of multipoint connections, *IEEE journal on selected areas in communications*, Vol. 6, No. 9, pp. 1617–1622 (1988).
- [15] Sabor, N., Sasaki, S., Abo-Zahhad, M. and Ahmed, S. M.: A comprehensive survey on hierarchical-based routing protocols for mobile wireless sensor networks: review, taxonomy, and future directions, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2017, No. 1, p. 2818542 (2017).
- [16] Elhoseny, M., Farouk, A., Zhou, N., Wang, M.-M., Abdalla, S. and Batle, J.: Dynamic multi-hop clustering in a wireless sensor network: Performance improvement, *Wireless Personal Communications*, Vol. 95, pp. 3733–3753 (2017).
- [17] Yuan, X., Elhoseny, M., El-Minir, H. K. and Riad, A. M.: A genetic algorithm-based, dynamic clustering method towards improved WSN longevity, *Journal of Network and Systems Management*, Vol. 25, pp. 21–46 (2017).
- [18] Wang, Z. and Zhang, J.: Interference aware multipath routing protocol for wireless sensor networks, *2010 IEEE Globecom Workshops*, IEEE, pp. 1696–1700 (2010).
- [19] Marina, M. K. and Das, S. R.: On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks, *Proceedings ninth international conference on network protocols. ICNP 2001*, IEEE, pp. 14–23 (2001).
- [20] Kanzaki, A., Nose, Y., Hara, T. and Nishio, S.: Dynamic route construction based on measured characteristics of radio propagation in wireless sensor networks, *International Journal of Advanced Computer Science*, Vol. 2, No. 3, pp. 85–98 (2012).
- [21] Elsmamy, E. F. A., Omar, M. A., Wan, T.-C. and Altahir, A. A.: EESRA: Energy efficient scalable routing algorithm for wireless sensor networks, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 96974–96983 (2019).
- [22] Rezaeipanah, A., Amiri, P., Nazari, H., Mojarad, M. and Parvin, H.: An energy-aware hybrid approach for wire-

less sensor networks using re-clustering-based multi-hop routing, *Wireless Personal Communications*, Vol. 120, No. 4, pp. 3293–3314 (2021).

- [23] Muangprathub, J., Boonnam, N., Kajornkasirat, S., Lekbangpong, N., Wanichsombat, A. and Nillaor, P.: IoT and agriculture data analysis for smart farm, *Computers and electronics in agriculture*, Vol. 156, pp. 467–474 (2019).