

RSSIにもとづく送信出力の変更による IoTデバイスの省電力化

山本 真也¹ 大沢 恭平¹ 串田 高幸¹

概要: マルチホップ通信は農業、医療、産業、交通の分野でモニタリングや監視に活用されている。環境によって、中継するIoTデバイス間の距離は均一になるとは限らない。加えて、IoTデバイスに安定した電源供給もできるとは限らない。課題は、ノード間の通信において必要以上の電力を使用してデータを送信する点にある。本提案では、IoTデバイスの送信出力を変動させ省電力化を行う。基礎実験として、IoTデバイスの送信出力ごとの通信可能な距離やパケットロス率を調べるためにノード間の距離を離して通信をする実験を行った。結果としては-90[dBm]以上ならばIoTデバイスは安定して通信が行えることが分かった。評価実験ではノード間の距離を50[m], 100[m]の順に離し、送信出力を最大にして通信をする場合と送信出力を変更して通信する場合を比較した。その結果、ノード間の距離が50[m]の場合、送信出力を変更し通信したことで消費電力を約4.76[mW]削減することができた。ノード間の距離が100[m]の場合、送信出力を変更し消費電力を約0.23[mW]削減することができた。

1. はじめに

背景

Wireless Sensor Network(WSN)は、現代社会において多岐にわたる分野で利用されている。農業、医療、産業、交通、中でも農業の分野でモニタリングや監視に活用されている [1]。WSNにはシングルホップ通信とマルチホップ通信がある。シングルホップ通信では、ノードがシンクノードに直接データを送信する。マルチホップ通信ではノードが中継ノード経由してデータをシンクノードに送信する [2]。マルチホップ通信を活用することで、広範な通信範囲を確保し気温、湿度、光量、風速をリアルタイムでモニタリングが可能になる。また、データを送信する際の消費電力を制御する送信出力制御がある。送信出力制御を行うことにより、IoTデバイスの通信範囲や通信リンクの信頼性を変動させることができる。これらは、消費電力量とトレードオフの関係にある [3]。

IoTデバイスがセンサから受け取ったセンサデータを物理的な接続を必要としない無線通信を介してサーバに送信する手法として、クラスタリングがある。クラスタには一つのCluster Head(CH)に接続するCluster Member(CM)がある。基本的にCHはアクセスポイント(AP)としての役割を担う。CMはセンサノードとして配置され、センサ

データをCHに送信する。この際にCHはCMから送信されるデータを収集し、まとめてサーバや他のノードへ送信する。農地での運用では、CMにセンサを取り付けて気温や湿度のデータを取得しCHに送信する [4]。CHはCMから受信したデータをまとめてサーバに送信し、サーバで処理され最終的にユーザーに提供される。クラスタリングはWSNの消費電力を削減する効果的な手段である [5]。

また、IoTデバイスの消費電力を抑える方法として送信出力を操作する方法がある。IoTデバイス間の通信品質を分析する際に、受信信号強度インジケータ(RSSI)が使用される [6]。RSSIは受信する機器が受信した信号の強さを測定することができる [7]。送信出力を強くすれば送信先のノードに届く信号も強くなりRSSIの値も高くなる。逆に、送信出力を弱くすれば送信先のノードに届く信号も弱くなりRSSIの値も低くなる。この性質を用いて動的な送信出力の制御が行える。

IoTデバイスは小型化が進みスペースを必要とせず、少ない電力で動作するようになった。しかし、小型化されたIoTデバイスは、バッテリーのサイズも小さくなりエネルギーの供給量が限られる。実際に使用する場合、バッテリー交換が容易に行えるとは限らない [8,9]。ノードの消費電力を削減することによってバッテリーの交換頻度が減り、長時間にわたって稼働し続けることができる。

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

課題

課題は、ノード間の通信において必要以上の電力を使用してデータを送信する点にある。例えば、図1のようなRSSIが-60[dBm]の良好な通信環境で送信出力を変更せずに通信していると仮定する。基礎実験の結果より、IoTデバイスはRSSIが-90[dBm]以下になるとノード間で接続できなくなる。基礎実験については後ほど詳述する。加えて通信が確立すると通信中のパケットロスが発生しなかった。つまり、RSSIが-90[dBm]以上なら通信は可能である。この例の状況では、必要以上の電力を使用しているといえる。このような状況を課題として挙げる。図2は接続が不安定

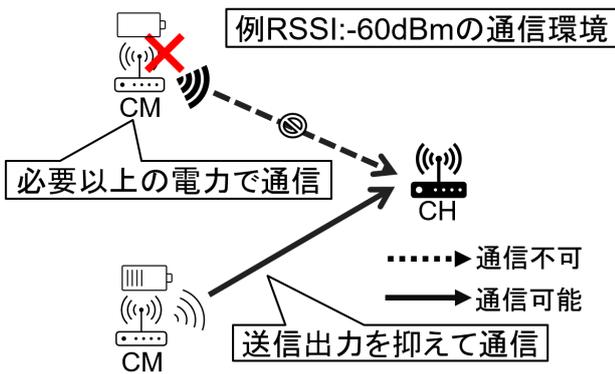


図1 送信出力制御によるノードの寿命の減少

になる状況である。送信先のノードと距離がある場合や障害物が存在する場合、送信出力を不十分な値に設定すると通信が不安定となる [10]。その結果、図2のように送信先のノードとの接続が難しくなる。マルチホップ通信を使用してデータのやり取りを行う際、常に通信が可能な位置にノードがあるとは限らない。障害物の有無や地形によってノードの配置を増やすか、送信出力を制御する必要がある。データを送信するノードが送信先のノードやサーバに対して、適切にデータを送信可能な出力に設定することは困難である。

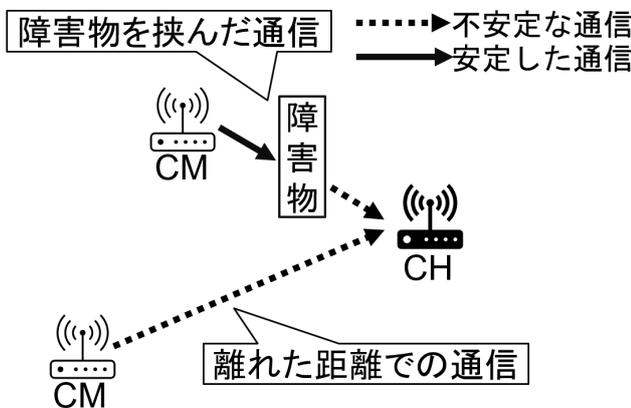


図2 接続が不安定になる状況

基礎実験

送信出力ごとの通信可能な距離やパケットロス率を調べるために基礎実験を行った。実験は電波干渉や障害物の影響を受けないようにするため、東京工科大学八王子キャンパスのグラウンドにて実験を行った。使用するデバイスはESP32である。この基礎実験ではESP32の送信出力を変更しながら、距離ごとのRSSIの値とパケットロス率を求めることを目的とする。ESP32は送信出力を制御する変数として、txpowerを使用する。この変数はtxpower2からtxpower21の範囲で調整可能である。実験の手順と詳細を説明する。手順としては以下の6つである。

- (1) 送信側のESP32と受信側のESP32の距離を20[m]離す。
- (2) 100個のパケットを送信
- (3) 100個のパケットを受信し、受信するたびにRSSIを計測
- (4) 100回計測したRSSIを平均化しその距離のRSSIを設定
- (5) 計測が完了したら送信側のESP32を10[m]ずつ離し、繰り返しRSSIを計測
- (6) 送信側と受信側で接続不能になったら送信出力を変更し、手順1から5を繰り返す

ESP32を2台用意する。デバイス間を20[m]から10[m]ずつ離しながら100[m]まで計測した。パケットロス率を計算するためにUDP通信を用いる。送信側のESP32はAPモードを起動し、一回の計測でパケットを100個送信する。受信側のESP32はSTAモードで起動し、パケットを受信するタイミングでRSSIを計測した。パケットを100個送信したら、10[m]距離を離してもう一度パケットを送信する。受信側のESP32がAPに接続できなかった場合、距離を20[m]に戻し送信出力を変更して計測を再び始める。

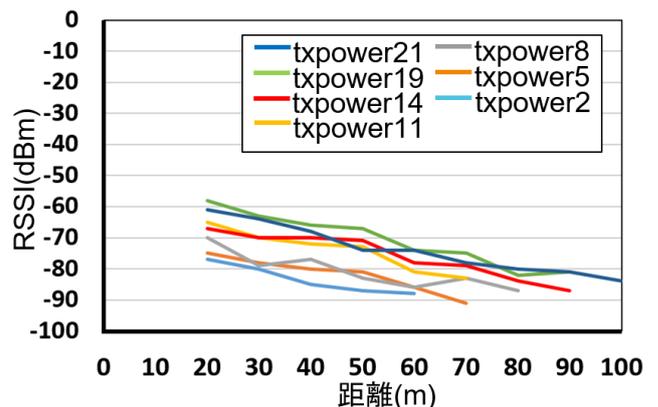


図3 送信出力ごとの通信可能距離

基礎実験で求めることができた送信出力ごとの通信可能距離を図3に示す。要素数が多いため図3ではtxpower21,19,14,11,8,5,2で得た結果を表示している。縦軸は取得したRSSI[dBm]を表している。RSSIの値は100回

計測した平均値を使用している。横軸は IoT デバイス間の距離 [m] を表している。デバイスの向きや湿度といった干渉により誤差はあるが、送信出力が増加すれば比例して通信距離が伸び RSSI も高くなる。txpower5 の時に接続ができなかった距離が、出力を下げた txpower4 で繋がるということはなかった。加えて、RSSI の値が-90[dBm] 以下になると通信が行えないことがわかる。今回の実験ではパケットロス率を計測していた。しかし、デバイス間で通信が始まればパケットロスが発生することはなかった。これらのことから、-90[dBm] 以上ならばデータの欠落を発生させずに通信が行えることが分かる。

各章の概要

第 2 章では、本論文の関連研究を説明する。第 3 章では、本研究の提案手法を説明する。第 4 章では、提案手法の実装を説明する。第 5 章では、実験環境と実験の結果の分析を説明する。第 6 章では、提案、実験、評価が本研究の課題を解決しているかを議論する。第 7 章では、本稿のまとめを行う。

2. 関連研究

WSN 内でノードの消費電力を均等に分散しネットワーク全体の寿命を向上させる LEACH と呼ばれる通信プロトコルがある [11]。LEACH は、ランダムで CH が選択され CM からデータを集約しサーバーに送信する。通信が終了するとまたランダムで CH が選択される。一度 CH に選ばれたノードは一巡するまで再度 CH に選ばれず、近くの CH に接続する CM として機能し通信が再開される。しかし、LEACH はセンシングフィールド内のすべてのノードがシンクノードに接続できる状況が前提条件として提案されている [12]。大規模なセンシングフィールドでは、使用する IoT デバイスの伝送距離によって前提条件を満たすことが難しくなる。

ボディアエリアネットワーク (BAN) 用の送信出力制御プロトコルが提案されている [13]。これは RSSI に基づいて送信出力を調整する際に、電波通信品質 (LQI) を使用して信号の減衰と干渉を区別している。通信に干渉がない場合、動的に変化する範囲に RSSI を維持するように送信出力を制御する。干渉があった場合は、干渉を避けるために使用されているチャンネルを変更している。この研究では、BAN を想定しているためノード間の通信範囲が短く 5[m] 以内を想定している。そのため、ノードを広範囲に展開する状況では適用することができない。

制御アルゴリズムの Proportional Integral Derivative (PID) を用いた動的な送信出力制御が提案されている [14]。PID を用いることにより電波干渉による急激な RSSI の変化に対応しながらも、状態を維持することを可能にしている。この研究では、実験をシミュレーション、

屋内でのみ行っており本稿のユースケースシナリオに沿った環境での実験が行われていない。

3. 提案

提案方式

本提案の目的は IoT デバイスの送信出力を抑えることによって消費電力を削減することである。図 4 に提案手法の概要を示す。IoT デバイス同士で通信を行う際、データ

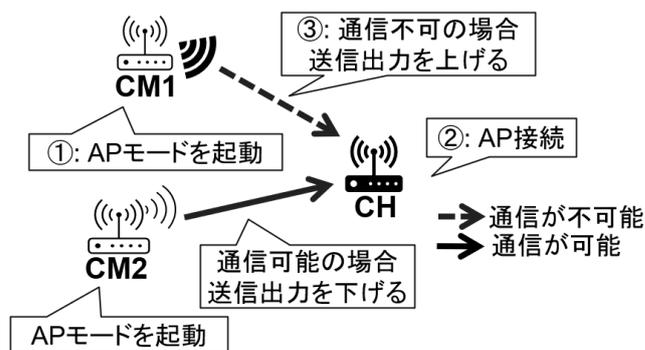


図 4 提案手法概要図

を送信するデバイスが AP となり送信出力を変更する。受信側ノードと接続が完了しない場合、送信側のノードは送信出力を上昇させ再度通信を行う。受信側ノードと接続が完了した場合、送信側ノードはデータを送信する。受信側ノードは、AP に接続するために STA モードで起動する。接続が完了したら、受信側ノードは AP の RSSI を計測する。計測した値の平均値を送信側ノードに送り返す。送信側ノードはその RSSI の値から送信出力を下げるか、維持するかを決定する。送信出力下げる場合、以上の工程を繰り返す。送信出力を維持する場合、送信側ノードが受信側ノードに対しセンシングデータを送信し、通信を終了する。送信出力を決定する基準となる RSSI は-80[dBm] とする。取得した RSSI の平均が-80[dBm] より高い場合は送信出力を下げる。また、-80[dBm] より低い値ならば送信出力を維持する。基準値を-80[dBm] にした理由としては、-90[dBm] を基準値にしてしまうと接続が途絶えたり、再び送信出力の制御を行わなければならない。そのため-90[dBm] からマージンを取り-80[dBm] とした。

提案手法の手順について詳しく説明する。提案手法の工程としては以下の 4 つである。

(1) AP モード、STA モードの起動

送信側ノードは AP モードとタイマーを起動し、受信側ノードが接続するのを待機する。受信側ノードは RSSI を計測するために STA モードで起動し送信側ノードに接続する。

(2) 通信経路の確立と送信出力の設定

図 5 は送信出力の変更の詳細である。受信側ノードが送信側ノードに接続に成功したら、受信側ノードは

送信側ノードの RSSI を計測し計測結果を送信側ノードに送信する。ノード間の通信にはソケット通信を用いる。計測結果が $-80[\text{dBm}]$ より高い場合、送信出力を下げる。また、送信側ノードのタイマーが切れ計測結果を受け取れなかった場合、つまり受信側ノードが AP に接続できなかった場合は、送信側ノードの送信出力を上げる。

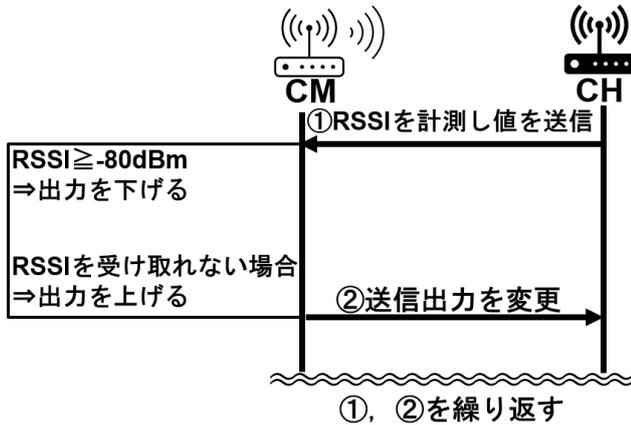


図 5 送信出力の変更の詳細

(3) データの送受信

送信側ノードは受信側ノードに対し収集したセンサデータを送る。センサデータの送信には、ソケット通信を用いる。

(4) 通信終了

データの受信が完了したらネットワーク機能を停止し通信を終了する。

ユースケース・シナリオ

センサやデバイスから農作物の栽培に関するデータを集めて、高品質の農作物の栽培、収穫量の向上がスマート農業化で期待されている [15, 16]。そのため本稿は農地のモニタリングにおいて使用されることを想定する。ユースケースシナリオを図 6 に示す。農地のモニタリングでは、温度や湿度の気象データや土壌の pH、栄養素含有量の土壌データを収集する。

前提として、周囲に電波を発生させ電波干渉を引き起こすものがなく、かつ直接の電源供給が行えない状況を仮定する。

4. 実装

IoT デバイスには ESP32 を使用し、IoT デバイスのソフトウェアは MicroPython で実装する。ESP32 同士の通信にはソケット通信を用いる。

図 7 は ESP32 の構成図である。送信側ノードには AP モード起動、送信出力変更、データ送信の 3 つの要素がある。受信側ノードには STA モード起動、RSSI 値送信、

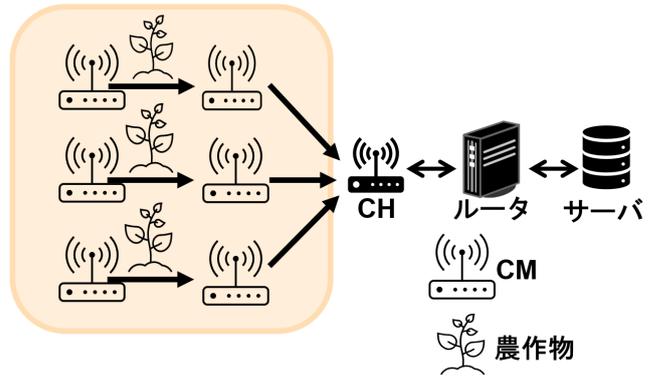


図 6 ユースケースシナリオ

データ受信の 3 つの要素がある。各要素については以下で説明する。

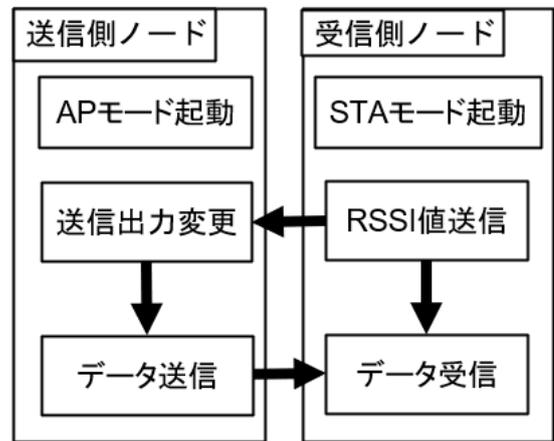


図 7 実装構成図

- AP モード起動
- 送信出力変更
- データ送信
- STA モード起動
- RSSI 値送信
- データ受信

AP モード起動

送信側ノードが AP の起動、停止を行う。

送信出力変更

受信側ノードから RSSI を受け取り、その値をもとに送信出力を変更する。RSSI の値が $-80[\text{dBm}]$ 以上だった場合、送信出力を下げる。受信側ノードが AP に接続することができず RSSI を受け取れなかった場合、20[s] でタイムアウトし送信出力を上げる。以上の工程を繰り返す。

データ送信

変更した送信出力で通信を行う。送るデータはセンサデータを想定した 20bytes のテキストデータを送信する。

STA モード起動

受信側ノードが STA モードの起動、停止を行う。AP に 20[s] 間接続できなければタイムアウトする。

RSSI 値送信

送信側ノードの AP に接続したら RSSI を計測する。100 回計測し平均値を送信側ノードに送信する。

データ受信

送信側ノードからデータを受信する。

5. 評価と分析

送信出力を最大にして通信を行う場合と送信出力を変更し通信を行う提案手法で IoT デバイスの消費した電力量を計測して評価を行う。

実験環境

実験では IoT デバイスに ESP32 を使用する。また、消費電流の計測には INA219 を使用する。送信出力を変更する送信側ノードに INA219 を取り付け計測する。実験環境の概要を図 8 に示す。実験は IoT デバイス間の距離が 50[m] の場合と、100[m] の場合で行う。最初に IoT デバイスの距離を 50[m] 離し実験する。提案手法を用いた通信を 1 分間、送信出力を変更しない状態での通信を 1 分間の順に行う。消費電流の計測はパケット送信時に行う。パケットは 1 秒間に 1 回送信する。提案手法で計測する際は、送信出力を変更した後の通信で消費電流計測を行う。次に、IoT デバイスの距離を 100[m] 離し最初と同様に通信を行う。

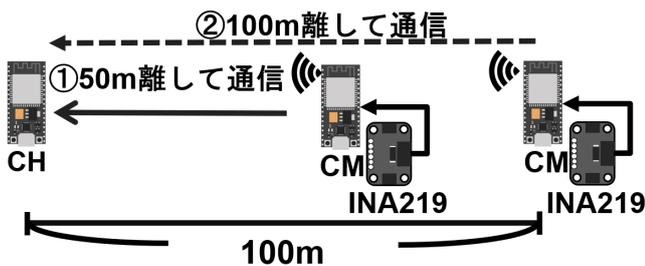


図 8 実験環境の概要

実験結果と分析

1 分間計測を行った実験結果を図 9 に示す。縦軸は消費電力量 [W] を表し、横軸は経過時間 [s] を表している。IoT デバイス同士の距離を 50[m],100[m] 離し提案手法を用いて通信を行い、次に最大の送信出力である txpower:21 で通信を行った。その結果、50[m] では txpower2 を用いて通信を行い、100[m] では、txpower20 を用いて通信が行った。

表 1 は実験において用いられた txpower:2, txpower:20, txpower:21 の 1 分間の平均消費電力である。結果と

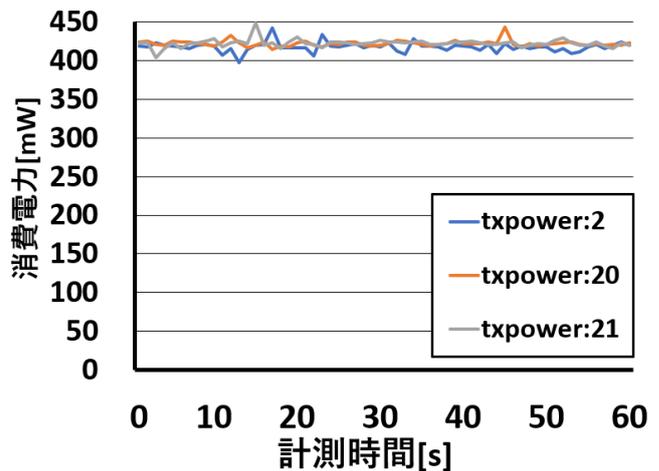


図 9 1 分間の消費電力

しては txpower:2 で通信した際の平均消費電力は約 417.36[mW], txpower:20 で通信した際の平均消費電力は約 421.89[mW], txpower:21 で通信した際の平均消費電力は約 422.12[mW] となった。最大出力である txpower:21 と比べ、txpower:2 では削減した電力は約 4.76[mW] となり電力削減率は 1.13 %であった。また、txpower:20 では削減した電力は約 0.23[mW] となり電力削減率は 0.05 %であった。

この結果より送信出力を変動させ IoT デバイスの消費電力を削減する目的は達成された。

表 1 各送信出力における平均消費電力

	txpower:2	txpower:20	txpower:21
平均消費電力	417.36[mW]	421.89[mW]	422.12[mW]

6. 議論

本提案では、手動で送信出力を変更し通信を行っている。STA モードで起動しているノードがソケット通信の受信サーバとして機能している。AP モードで起動しているノードはサーバにデータを送信する。ノード間でソケット通信を行うには先にネットワークを形成する必要がある。AP モードの起動タイミング、STA モードの起動タイミング、ソケット通信に用いるサーバの起動タイミング、データを送信するタイミング、これらのタイミングを調整することによって動的に送信出力を変更することができる。

また、CM でのみ送信出力を変更している。CH でも送信出力を変更することにより、CM と CH の消費電力量差が縮まりクラスタ全体の生存時間が増加することも期待できる。

今回行った実験は障害物や電波干渉がない状況である、東京工科大学のグラウンドにて行った。今後は、より汎用性のある障害物や電波干渉を考慮した状況での送信出力制御が課題となる。

7. おわりに

本稿では、課題としてノード間の通信において必要以上の電力を使用してデータを送信する点を挙げた。それに対して、送信側ノードの送信出力を変更して通信し消費電力量を削減する手法を提案した。基礎実験では、距離ごとのRSSIとパケットロスを計測し、IoTデバイスの通信限界を調べた。その結果、IoTデバイスは-90[dBm]以上の値であればパケットロスを発生させずに通信できることが分かった。評価実験では送信出力を最大にした場合の通信と送信出力を変更した場合の通信と比較を行った。実験の結果、ノード間を50[m]離して通信した際、送信出力を変更したことにより消費電力を約4.76[mW]削減することができた。またノード間を100[m]離して通信した際は、消費電力を約0.23[mW]削減することができた。

謝辞 本テクニカルレポートの作成にあたり、ご助言を賜り、また丁寧に指導して下さいました東京工科大学コンピュータサイエンス学部の五十嵐 蓮さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] Othman, M. F. and Shazali, K.: Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System, *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 1204–1210 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302> (2012). International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012).
- [2] Chauhan, V. and Soni, S.: Energy aware unequal clustering algorithm with multi-hop routing via low degree relay nodes for wireless sensor networks, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 12, pp. 1–14 (online), DOI: 10.1007/s12652-020-02385-1 (2021).
- [3] Kotian, R., Exarchakos, G., Stavros, S. and Liotta, A.: Impact of Transmission Power Control in multi-hop networks, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 75, pp. 94–107 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.10.010> (2017).
- [4] Mahajan, H. B., Jummarkar, A. A., Tiwari, M., Tiwari, T. and Upadhyaya, M.: LCIPA: Lightweight clustering protocol for industry 4.0 enabled precision agriculture, *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 94, p. 104633 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104633> (2022).
- [5] Bajaber, F. and Awan, I.: Adaptive decentralized re-clustering protocol for wireless sensor networks, *Journal of Computer and System Sciences*, Vol. 77, No. 2, pp. 282–292 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2010.01.007> (2011). Adaptivity in Heterogeneous Environments.
- [6] Kim, S. and Eom, D.-S.: Link-State-Estimation-Based Transmission Power Control in Wireless Body Area Networks, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol. 18, No. 4, pp. 1294–1302 (online), DOI: 10.1109/JBHI.2013.2282864 (2014).
- [7] Sadowski, S. and Spachos, P.: RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 30149–30161 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2843325 (2018).
- [8] Raghunathan, V., Ganeriwala, S. and Srivastava, M.: Emerging techniques for long lived wireless sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 44, No. 4, pp. 108–114 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2006.1632657 (2006).
- [9] Schmidt, D., Berning, M. and Wehn, N.: Error correction in single-hop wireless sensor networks - A case study, *2009 Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition*, pp. 1296–1301 (online), DOI: 10.1109/DATE.2009.5090865 (2009).
- [10] Hughes, J. B., Lazaridis, P., Glover, I. and Ball, A.: A survey of link quality properties related to transmission power control protocols in wireless sensor networks, *2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.23919/ICAC.2017.8082064 (2017).
- [11] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 10 pp. vol.2– (online), DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982 (2000).
- [12] 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).
- [13] Kim, S., Kim, S. and Eom, D.-S.: RSSI/LQI-Based Transmission Power Control for Body Area Networks in Healthcare Environment, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, Vol. 17, No. 3, pp. 561–571 (online), DOI: 10.1109/TITB.2012.2227335 (2013).
- [14] Priyesh, P. P. and Bharti, S. K.: Dynamic transmission power control in wireless sensor networks using P-I-D feedback control technique, *2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pp. 306–313 (online), DOI: 10.1109/COMSNETS.2017.7945391 (2017).
- [15] Haseeb, K., Ud Din, I., Almogren, A. and Islam, N.: An Energy Efficient and Secure IoT-Based WSN Framework: An Application to Smart Agriculture, *Sensors*, Vol. 20, No. 7 (online), DOI: 10.3390/s20072081 (2020).
- [16] Patil, K. A. and Kale, N. R.: A model for smart agriculture using IoT, *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPIC)*, pp. 543–545 (online), DOI: 10.1109/ICGTSPIC.2016.7955360 (2016).