

環境発電駆動センサネットワーク内での分散処理に向けた 環境変化に頑健なノード間欠動作機構の設計と評価

三崎 慎也^{1,a)} 諏訪 博彦¹ 荒川 豊^{1,2} 安本 慶一¹

概要：ショッピングモールなどの人が多数集まる広大な屋内空間において、センサを用いた様々なサービスが開発されつつある。例えば、各所の温度や人の密度を監視し、場所ごとの適切な空調の管理を行ったり、異常検知を行うサービスが考えられる。このようなサービスの実現のためには、環境センサや人感センサなどを多数設置する必要があるが、センサの多くはバッテリーを使用または電源から給電を行うものが多く、メンテナンスのコストがかかる。一方で、センサが出力するデータの分析はクラウドやサーバなどに集約されることが多いが、広域通信による高遅延や通信コストの無駄が生じている。著者らのグループでは、環境発電によってセンサノードを動作させ、メッシュネットワークを構築し、センサネットワーク内で深層学習を行うことで、上記の問題の解決を目指している。これまで、太陽光パネルを使用し、キャパシタへの充放電によって間欠動作を行うモジュールを開発したが、センサノードが一連のセンシング・データ送信動作を終了するのに必要な電力量が充電されてから起動するよう設計しているため、環境の変化(明るさによる充電量の変化)により間欠動作の間隔が変化し一定間隔で動作させることが難しかった。本研究では、太陽光からのバッテリー充電デバイスと時間指定でマイコンを間欠動作できるデバイスからなる新しい環境発電モジュールを設計し、評価を行った。

キーワード：エナジーハーベスト、センサネットワーク、間欠動作

Design and Evaluation of Intermittent Operation Module with Energy Harvesting for Sensor Nodes Adaptive to Environmental Changes

SHINYA MISAKI^{1,a)} SUWA HIROHIKO¹ ARAKAWA YUTAKA^{1,2} YASUMOTO KEIICHI¹

1. はじめに

ショッピングモールなどの商業施設では季節に関係なく、来客者が快適に買い物やイベントを楽しめるように監視カメラや温度などのデータをディスプレイ上に表示させその情報をもとに管理者が直接調整することによって管理業務を行っている。^{*1}しかし、来客者の入出店による外気

の流入やイベントによって発生する一時的な人口密度の変化によって発生する温度変化が発生する中、一括で空調を制御すると快適ではない空間を生み出すことに繋がる。そのため温度管理を行うためのセンサを用いた様々なサービスが開発されている。

これらのサービスにはセンサノードが使用されており、それらの給電方法はバッテリー、直接給電、小型太陽光パネルによるものが多い [1], [2]。しかし、これらの既存の給電方法ではそれぞれ問題がある。バッテリーを使用した場合、センサノードに低消費電力のものを使用したとしても、頻繁にバッテリー交換の必要があるためメンテナンスコストが高くなる。直接給電の場合は、センサノードの故障が発生しない限りメンテナンスの必要はなく、高機能なセ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科
Graduate School of Science and Technology, Nara Institute
of Science and Technology

² JST さきがけ
JST PRESTO

^{a)} misaki.shinya.mq9@is.naist.jp

^{*1} [http://www.jinzai-bank.net/edit/loveshoku/jobdetail.cfm?
JOBDECTNO=36](http://www.jinzai-bank.net/edit/loveshoku/jobdetail.cfm?JOBDECTNO=36)

ンサノードを利用可能であるが電源が必要である。そのため既存のショッピングセンタに設置する場合は大規模な回収工事が必要となる。仮に、ショッピングセンタ建設時にセンサノード用の電源を確保したとしても、今後どのように増加するか予測できないセンサノードに対しては対応できず、将来的な大規模工事は避けられない。小型太陽光パネルを使用しキャパシタへの充放電によって間欠動作させる場合は、バッテリー交換の必要もなく設置コストも低く抑えられる。しかし、環境（明るさ）の変化により間欠動作の間隔が変化することや条件によって全くセンシングできないという問題がある。加えて、センシングしたデータの蓄積・分析・フィードバックを考えた場合、これまでのようなクラウド集中型のデータ処理方式では、データ転送のための電力消費、データ転送遅延などの問題が指摘されている [3]。そのため、センシングだけでなくデータ処理についても周辺のセンサノードが連携し処理する必要がある。これを実現するためには、環境発電のみでセンサノードの動作が可能で、かつセンサネットワークを構築することが可能なモジュールが必要である。

そこで著者らのグループでは、太陽光パネルを使用した環境発電モジュールを試作した [4]。試作したモジュールは太陽光パネルから発電された不安定で微弱な電力によってコンデンサを充放電させることにより一定の電圧をセンサノードに給電し動作させる仕組みとなっている。センサノードの起動、センサによる環境物理量のセンシング、無線通信リンクの確立、データ送信といった一連の処理には一定の時間がかかるため、間欠動作におけるセンサノードの起動前には、コンデンサへの十分な容量の充電が必要になる。このモジュールの出力を小型センサノード SenStick [5] に接続し、動作確認を行った。SenStick では、上記の一連の処理に最大約 20 秒を要することが分かっている。そのため、明るい室内であれば 30 分程度の充電の後、上記一連の処理を実行できることが確認できた。しかし、センサ設置箇所の照度によって充電時間および間欠動作の間隔が変化するため、一定間隔での動作に、本モジュールをそのまま使用することはできない。

上記を踏まえ、本研究では、環境変化に頑健なノード間欠動作モジュールの設計と実装を行う。このモジュールは、文献 [4] で試作した環境発電モジュールに新しく 5 V 出力付きリチウムイオン充電器とタイマモジュールを追加することで実現する。5 V 出力付きリチウムイオン充電器により、環境発電モジュールからの出力からリチウムイオン電池を充電し、タイマモジュールによって、センサノードの動作およびデータ出力が一定間隔で行われるよう制御する。これにより、照度の違いによって間欠動作の間隔が変化することなく動作させることができ、保護回路の追加によってリチウムイオン電池への過充電を防ぐこともできる。さらにタイマモジュールからの信号によりセンサノードの動

作を停止させるよう回路を設計することで、任意のタイミングでセンサノードを停止させることができる。

設計したモジュールが実際の環境下でバッテリー残量を減らすことなく間欠動作を行い続けることができるか確認するために、評価実験を行った。評価実験では、センサノードとして Arduino を使用し、簡単なプログラムを動作させた。間欠動作の間隔を 15 分、30 分、60 分の 3 つのパターンで設定し、120 分間動作させた。この時のリチウムポリマー電池の電圧が 30 分毎にどのように変化するかを計測することで、設計したモジュールの評価を行った。その結果、どの間欠動作間隔であってもバッテリーを充電させながら動作させるということはできないという結果となった。そこで、考察においてモジュールの設計変更について考察した。

2. 関連研究

本研究で設計したモジュールは環境発電によって環境センサから取得したデータに高度な処理を施すことが可能なセンサノードを一定間隔で動作させるものである。本章ではこのモジュールを開発する上で必要な環境センサ、エナジーハーベスト、センサネットワークに関する既存研究、システムを概観する。

2.1 環境センサ

現在、様々なセンサを屋内に設置し、クラウドもしくはサーバ上で機械学習にかけ、快適な環境の管理を行うシステムの研究が進められている [6], [7], [8], [9], [10]。多くのシステムでは設置していても違和感がないように小型化が進められており、回路の簡略化、小型で低消費電力、高性能な通信機器の開発により、様々な環境のデータを取得しデータを送信することのできる低消費電力な手のひらサイズのモジュールが一般になっている。その中でオムロンが開発した環境センサ「2JCIE-BL」*2、「2JCIE-BU」*3が様々な研究、アプリケーションで使用されている [7], [11]。これらのモジュールでは温度、湿度、気圧、照度など 6 種類のセンサーから取得したデータを Bluetooth 通信によって他のデバイスに送信することのできるシステムとなっている。2JCIE-BL, 2JCIE-BU 共にかなり小型のモジュールであり、2JCIE-BL に関してはボタン電池により 6 ヶ月の動作が可能であるため様々な場所に容易に設置が可能であり、メンテナンス回数は少なく済ませることができる。

2.2 環境発電

2.1 で説明したように環境センサモジュールの低消費電力化によって環境発電により、動作するモジュールが多く開発されている。環境発電は太陽光パネル、圧電素子、

*2 <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3723/>

*3 <https://www.fa.omron.co.jp/products/family/3724/>

ゼーベック素子などを使用し、あらゆる環境の事象や変化をエネルギーに変換している。しかし、それらの素子の発電量は微小であり、環境によって変化するため動作させる回路の省電力化もしくは安定して動作させるための工夫が必要となる。MonoWireless が開発したソーラー電源管理モジュール「TWE-EH SOLAR」^{*4}では小型の太陽光パネルによって発電した電力によって TWELITE を動作させることができる。さらに電気二重層コンデンサを接続することにより、光源がなくなったとしてもコンデンサに蓄電された電力によって通信を継続して行うことができる。このような小型の太陽光パネルを使用した低消費電力通信デバイスが様々な通信方式で開発されており、様々なセンサと組み合わせて屋内に設置し、位置推定、行動認識などを行う研究も行われている [2], [12].

その他にも富士通が開発した「ゲリラ豪雨対策に活用できる下水道氾濫検知ソリューション」^{*5}ではゲリラ豪雨による水位の上昇を5分に一度クラウドに送信するシステムを構築しているが給電方式はバッテリーの他に補助電源として熱電変換ユニットを用いてバッテリーに充電を行っている。これによりバッテリーのみによる動作であれば電池交換周期が10ヶ月のところ、この環境発電による補助電源により5年に伸ばすことに成功している。

この他にも様々な環境発電を用いたセンサノードが開発されているがほぼ全てのセンサノードは何らかの通信を行い、データをクラウドもしくはサーバーに集約し、機械学習などの処理を行う。しかし、遅延が発生し、リアルタイムでの処理を行なえず、通信コストの無駄も生じるといった問題がある。そこで森田らは、センサネットワークを構築が可能なセンサノードを動作させることのできる環境発電モジュールの開発を行っている [4]。図1 環境モジュールこのモジュールでは太陽光パネルによって発電された電力を直接給電するのではなく、コンデンサに蓄電させ、ある一定の電圧になると放電し、一定の電圧をセンサノードに給電する仕組みとなっており、これにより今まで環境発電では動作させることのできなかつた高性能なマイコンボードを間欠動作させることが可能となった。しかし、この環境発電モジュールの間欠動作間隔は太陽光パネルの発電量に依存しており、一定間隔で間欠動作を行うことができず、安定した動作が見込めないため、我々が新たに開発する必要があり、次でそれを説明する。

3. 環境変化に頑健な間欠動作モジュール

本研究での目的はセンサネットワークを構築できるセンサノードを環境発電によって動作させる事を目的としている。その為前章で説明した森田らの環境発電モジュールを



図1 環境発電モジュール

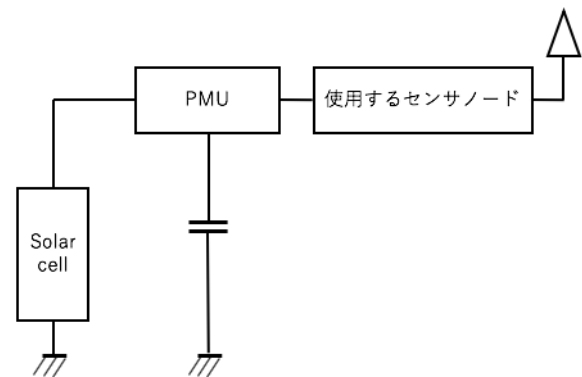


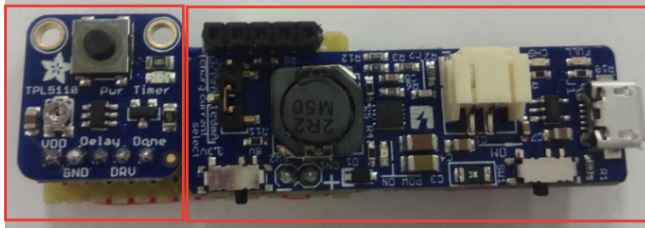
図2 環境発電モジュールの構成概略図

使用する事で解決できるのではないかと考えた。図2に森田らの開発した環境発電モジュールの構成概略図を示す。しかし、このシステムではコンデンサの充放電によって間欠動作を行なっているため環境の変化によって不規則な間隔で間欠動作を行い、任意のタイミングで給電を止めることができない為、処理後に無駄に動作を続けてしまうため電力のロスが発生するといった問題がある。センサネットワークを間欠動作するセンサノードで構築するためには一定間隔でセンサノードが動作する必要があるためこのモジュールでは本研究の目的を果たすことは不可能であると考えた。

そこで新たに5V出力付きリチウム電池充電器とタイマーモジュールを組み合わせた電源制御モジュールを新しく加えることでこの問題を解決できると考えた。新しく考案した環境発電モジュールの構成概略図を図4に示す。このモジュールでは前回のモジュールで直接センサノードに入力していた出力を一度5V出力付きリチウムイオン充電器に送る。5V出力付きリチウムイオン充電器では充電と5Vの出力を同時に行うことができるため、環境の変化によって環境発電モジュールの間欠動作の間隔が変化したとしても接続したモジュールを動作させ続けることが可能となる。さらに保護回路が内蔵されているため照度が高くなり、リチウムイオンポリマーバッテリーが満充電となっても過充電による故障の心配はない。しかし、出力の

^{*4} <https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-EH-SOLAR/index.html>

^{*5} <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/08/15.html>



タイマー
モジュール 5V出力付き
リチウムイオン電池充電器

図 3 電源制御モジュール

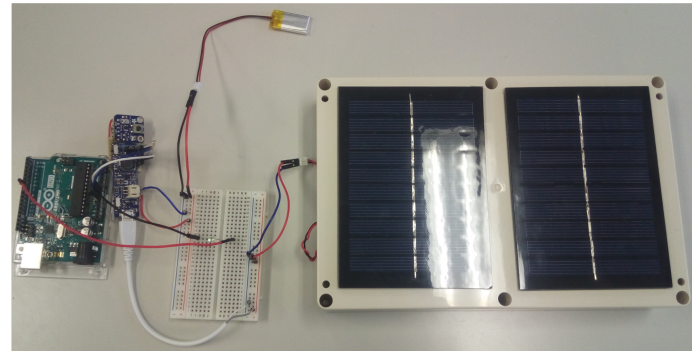


図 5 実験に使用した回路

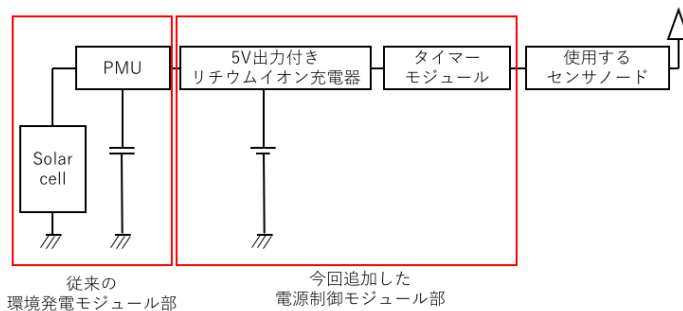


図 4 新しく設計したモジュールの構成概略図

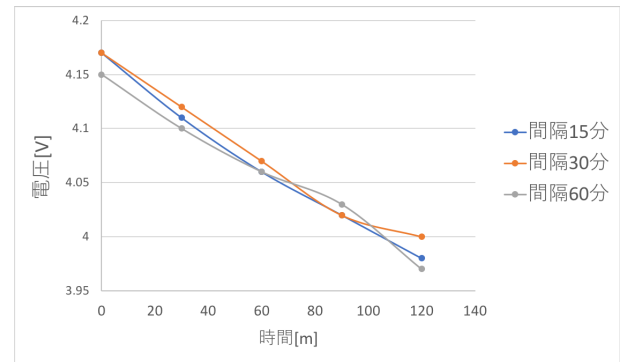


図 6 バッテリーの電圧測定結果 (1000~1300[lux])

on/off の切り替えは手動でしか行えず、このモジュールだけではセンサノードの必要以上に動作させることによって発生する電力のロスを防ぐことができない。そこでタイマーモジュールをセンサノードの入力の前に加えた。このタイマーモジュールは内蔵されている可変抵抗器または外部からの抵抗の入力によって間欠動作間隔の調整を行うことができる。さらにセンサノードからの信号でセンサノードへの給電を止めることができるため一定間隔で間欠動作を行い、必要以上の動作を行わないことによって消費電力をかなり抑えることができる。

4. 評価実験

今回開発したモジュールが実環境でも動作可能であるか、可能であるならば間欠動作のインターバルを何分にすればバッテリー内の容量を減らさずに動作させ続けることができるかを確認するために、評価実験を行った。

4.1 実験条件

開発した環境発電モジュールをオフィスなどの建物内に設置した場合を想定し、太陽光による発電量の変化を少なくするため、研究室の窓から離れた場所に設置した。マイコンを環境発電モジュールが何時間駆動でき、バッテリー容量がどのように変化したかを見るものであり、センサネットワークを構築することのできるマイコンに限定していな

い。そこで、Arduino uno を使用することにした。これは Arduino uno は比較的簡単なプログラムであっても消費電力が大きいため今後、センサネットワークを構築することができるマイコンの選択肢を増やすことができると考えたためである。

4.2 実験方法

環境発電モジュールはコンデンサ内の電圧が 2.55V 以上になると放電を開始し、1 V 以下になると放電を終了する仕組みであるため一度放電させた後、測定を開始する。タイマーモジュールの間欠動作によってマイコンをオフにしている間隔は 15 分、30 分、60 分とし、Arduino は L チカを 1 秒間隔で 5 回を行い、その後、タイマーモジュールに信号を送り、オフにする。この動作を 2 時間繰り返す、バッテリーからの出力電圧を 30 分毎に測定を行う。

4.3 実験結果

1000~1300lux の部屋にモジュールを設置した場合の測定結果を図 6、スタンドライトによって 2000lux に調整した場所にモジュールを設置した場合の測定結果を図 7 に示す。どちらのグラフもモジュールによって給電されているにも関わらず、バッテリーの出力電圧が低下し、バッテリー残量が減っているということが分かる。このことより、このモジュールではエネルギーハーベストを行えないため改良が必要であるということが分かった。

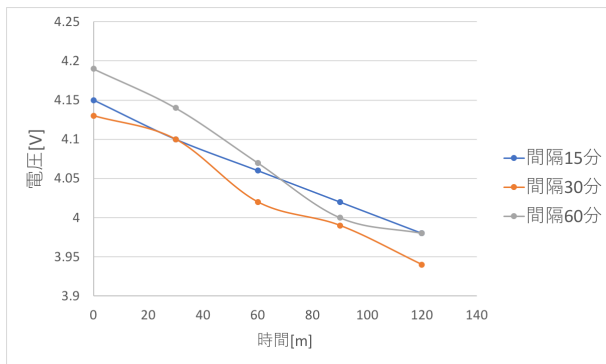


図 7 バッテリーの電圧測定結果 (2000[lux])

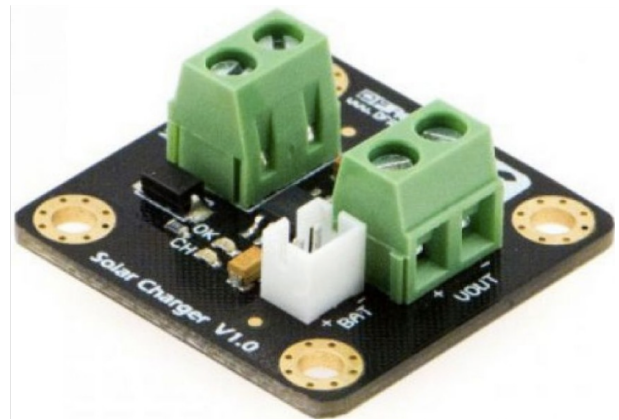


図 8 500mA のソーラー LiPo バッテリー充電器

5. 考察

実験の結果、充電しているにもかかわらずバッテリーの出力電圧が低下していることが確認された。この原因は環境発電モジュールの出力電力の不足にあると考える。環境発電モジュールは、我々の研究室で研究を行っている SenStick と呼ばれるセンサノードの為に作成されており、あまり大きな電力を必要としていなかった。本実験に際し、リチウムポリマーバッテリーを充電するために、環境発電モジュールの出力電圧の昇圧を行った。しかし、それだけでは不十分であるとの結果となった。本問題を解決するための改善案を以下に考察する。

5.1 環境発電モジュールの改良

環境発電モジュールでは前章で述べた通り、コンデンサの充放電によって間欠動作を行なっているが、コンデンサからの出力電圧は 2.55V であり、これを昇圧 DCDC コンバータによって電圧を 5V にまで昇圧している。しかし、昇圧 DCDC コンバータは電圧を上げる事ができるが電流を落としてしまうという問題がある。これではリチウムポリマーバッテリーは十分に充電できないため、昇圧 DCDC コンバータを通さず、5V の出力を行える回路を作成する必要がある。そのため、太陽光パネルの増設、コンデンサの容量の増量を行う必要があると考えられる。

5.2 新たなモジュールの追加と構成変更

本研究での目的は環境変化に頑健なセンサノード間欠動作機構の開発であるため環境発電によって得られた電力をバッテリーに充電し、発電できない状態であっても同じ動作ができる必要がある。そのため電源制御モジュールに 5V 出力付きリチウムイオン充電器を使用した。しかし、充電を行う為には 5V の給電が必要であり、エネルギーハーベストで給電を行うには難しい。そこで、環境発電モジュールの出力電圧を調整し、給電を行なったがコンデンサの間欠動作による給電の遅延やモジュールからの出力は昇圧 DCDC コンバータによって電流量が少なく、充電を行うに

は不十分であるという事が分かった。これらの問題を解決する為には太陽光パネルから直接給電でき、リチウムイオンバッテリーを充電ができるモジュールに置き換える事が必要である。

現在、この問題を解決できるのではないかと考えているモジュールを 2 つ検討している。1 つ目は DFROBOT が開発したソーラー LiPo バッテリー充電器、2 つ目は e-peas semiconductors が開発した AEM10941^{*6}である。どちらも太陽光パネルを直接接続する事ができ、接続されたリチウムイオンポリマーバッテリーの充電とデバイスへの出力を行う事ができる。2 つのモジュールの大きな違いは出力であり、ソーラー LiPo バッテリー充電器の出力電圧は接続されたリチウムポリマーバッテリーの出力電圧であるため、電池の容量が下がった場合、出力電圧も下がる。AEM10941 の出力は 2.2 4.2V, 80mA と 1.8V, 10mA の 2 つから選択でき、安定した出力と接続先のデバイスに合わせて出力を選択する事ができる。この 2 つのモジュールを比較し、今回のモジュールの構成を変更し、問題を解決したいと考えている。

6. おわりに

本研究では環境変化によって発電量が変化したとしても一定間隔で動作させることが可能である環境発電モジュールの設計を行い、評価を行った。しかし、環境発電モジュールの昇圧 DCDC コンバータによる電流量の減少によりあまり充電されず、間欠動作の間隔を長い設定であってもバッテリーの残量が減り続けるという問題が発生したため、問題を解決するための考察を行なった。この考察を元に今回設計したモジュールの構成の変更や環境発電モジュールのパネルの増設、コンデンサ容量を増やすことにより出力される電力上げる改良を行う予定である。

今後はセンサネットワークを構築したセンサノードの給電方法をこのモジュールに置き換え、評価を行い、センサ

^{*6} <https://e-peas.com/products/energy-harvesting/photovoltaic/aem10941/>

ノードに合わせたタイマーモジュールの設定を行い、環境発電で駆動させ、センサネットワークを構築することが可能なシステムの開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] 鈴木章夫, 藤本淳, 伊藤寿浩, 前田龍太郎: 無線センサを用いた大規模電力可視化ネットワーク実証実験, Vol. 52, No. 12, pp. 698–706 (2016).
- [2] 柏本幸俊, 秦恭史, 中川愛梨, 諏訪博彦, 藤本まなと, 荒川豊, 繁住健哉, 小宮邦裕, 小西健太, 安本慶一: エナジハーベスト焦電型赤外線・ドア開閉センサと家電消費電力に基づいた宅内生活行動認識システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 2, pp. 409–418 (2017).
- [3] 中村優吾, 水本旭洋, 諏訪博彦, 荒川豊, 山口弘純, 安本慶一: 地域 IoT サービスに対する計算需要に応じた適応型地産地処りソース配分手法の提案, 「マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム, pp. 1481–1491 (2018).
- [4] Morita, T., Fujiwara, M., Arakawa, Y., Suwa, H. and Yasumoto, K.: Energy Harvesting Sensor Node Toward Zero Energy In-Network Sensor Data Processing, *Mobile Computing, Applications, and Services*, Cham, Springer International Publishing, pp. 210–215 (2018).
- [5] Nakamura, Y., Arakawa, Y., Kanehira, T., Fujiwara, M. and Yasumoto, K.: SenStick: Comprehensive Sensing Platform with an Ultra Tiny All-In-One Sensor Board for IoT Research, Vol. 2017, pp. 1–16 (2017).
- [6] 伊東未奈子, 西 宏章: 快適性指標におけるばらつきを考慮した効率のよい家電制御システム, 計測自動制御学会論文集 Vol50, No.6, 計測自動制御学会, pp. 471–477 (2014).
- [7] 大淵友暉, 山崎俊彦, 相澤清晴, 鳥海哲史, 林幹久: IoT センサを用いたマンション物件計測と快適度評価, 人口知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 1H2–OS–15a–4 (2017).
- [8] Obuchi, Y., Yamasaki, T., Aizawa, K., Toriumi, S. and Hayashi, M.: Measurement and evaluation of comfort levels of apartments using IoT sensors, *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/ICCE.2018.8326169 (2018).
- [9] 玉水一柔, 榊原誠司, 佐伯幸郎, 中村匡秀, 安田 清: 宅内の環境変化と声掛けに基づく在宅高齢者の日常生活行動センシングシステムの検討, 信学技法, 電子情報通信学会 (2017).
- [10] 玉水一柔, 榊原誠司, 佐伯幸郎, 中村匡秀, 安田清: 変化時の行動記録と環境センシングに基づく機械学習を用いた宅内行動認識, 信学技法, 電子情報通信学会 (2017).
- [11] 諏訪博彦, 中村優吾, 野口真史: IoT センシングによる新たな賃貸物件探索指標の検討, 「マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2018) シンポジウム, pp. 1085–1091 (2018).
- [12] 稲葉友紀, 猿渡俊介, 渡辺 尚: エナジーハーベストによって駆動する無線ネットワークのレートレス符号, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム, pp. 101–108 (2013).