

分散型深層学習に向けた 環境発電駆動センサネットワークシステムの設計

三崎 慎也¹ Stirapongsasuti Sopicha¹ 諏訪 博彦¹ 安本 慶一¹

概要: 大量の IoT デバイスが普及する中で、置くだけで周辺デバイスと協調し稼働する IoT システムが求められている。このようなシステムは、環境センサや人感センサなど多種のセンサで構成されるが、これらのセンサの多くはバッテリーやインフラからの給電を必要とするものが多く、定期的なバッテリー交換や配線工事など設置・維持のためのコストがかかる。また、センサが出力するデータの分析はクラウドサーバ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。これらの問題に対し、著者らは、環境発電によってセンサノードを動作させ、無線メッシュネットワークを構築することで、バッテリーレス・クラウドレス環境における分散型深層学習の実現を目指す。本研究では、屋内光で動作可能な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環境発電モジュールとメッシュネットワークシステムの設計について述べる。

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、BLE メッシュネットワーク、分散型深層学習

Design of Sensor Network System Driven by Energy Harvesting for Distributed Deep Learning

SHINYA MISAKI¹ STIRAPONGSASUTI SOPICHA¹ SUWA HIROHIKO¹ YASUMOTO KEIICHI¹

Abstract: The past decade has witnessed a huge growth in IoT/sensor devices which are crucial to develop ubiquitous services through Wireless Sensor Networks (WSNs) consisting of those devices. Generally, the WSN may consist of several types of sensors such as environmental sensor, wearable sensor and so on integrated in microcomputers as sensor nodes. However, the deployment and maintenance of a WSN takes a lot of costs due to power consumption of sensor nodes supplied by batteries. Furthermore, data processing using a cloud-based server has a non-negligible latency and computational cost when all sensors sending their data directly to the cloud server. To solve these problems, we employ the wireless mesh network consisting of sensor nodes with energy harvesting modules and let them cooperate to process/analyze the sensor data through distributed deep learning. In this paper, we propose the design of a sensor node with solar panel based energy harvester and intermittent microcomputer operation module and the mesh network system by such energy harvesting sensor nodes.

Keywords: energy harvesting, sensor network, intermittent operation, BLE mesh network, distributed deep learning

1. はじめに

大量の IoT デバイスが普及する中で、置くだけで周辺デ

バイスと協調し稼働する IoT システムが求められている。このようなシステムは、環境センサや人感センサなど多種多様なセンサで構成されるが、これらのセンサの多くはバッテリーやインフラからの給電を必要とするものが多く、定期的なバッテリー交換や配線工事など設置・維持のための

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

コストがかかるという問題がある。

そこで注目されるのが、環境発電による給電である。これまで、多くの環境発電を用いたセンシングデバイスが開発されている。しかしながら、それらの多くはセンシングのみを行い、処理はデータをクラウドサーバに送って実施したり、センサデバイス内に蓄積し事後的に解析したりしている。しかし、実サービスにおいては、リアルタイムな分析や効率的に定期的な分析を必要とする場合も多く、事後解析では対応できない可能性がある。クラウドへのアップロードも、広域通信による遅延や通信コストの無駄が生じており、将来的なIoT機器の爆発的な普及にともなって、通信遅延の不確実性がより大きくなっていく可能性がある。加えて、クラウドへの全データのアップロードは、プライバシーやセキュリティの観点からも好ましくなく、新たなソリューションが求められている。

新たなソリューションとして著者らが着目するのが、「情報流 (IFoT): 多数のデータストリームを実時間で融合・編集し利活用するための技術」[1]のフレームワークである。著者らは、このフレームワークに基づいて、クラウドに頼らないIoTデバイス間の連携による情報処理技術の研究に着手している[2], [3]。この技術の実現には、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同士が連携し処理する必要がある。加えて、これらのセンサノードからなるシステムの消費電力を抑えるためには、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求められる。

そこで著者らのグループでは、センサノードに給電するための太陽光パネルを使用した環境発電モジュールを試作している[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Lipoバッテリーの充電を行いつつ、タイマモジュールによってセンサノードの間欠動作間隔を調節し、センサネットワークを構築可能なセンサノードを動作させることが可能となっている。このモジュールでは1000lux以上での環境で動作することが確認できているが、屋内での平均の明るさは750lux程度であるため、屋内すべての場所での使用が難しいといった問題がある。

上記を踏まえて本研究では、屋内光を750luxで動作可能なセンサネットワークを構築可能な環境発電モジュールの設計を行う。先行研究[4]で使用されていたソーラLipoバッテリー充電器では太陽光パネルから発電された電力をそのまま使用していたが1000lux以下になるとバッテリーを充電するには不十分な電圧値になってしまうため動作しなくなるのではないかと考えた。そこで太陽光パネルによって発電された電力の電圧値を昇圧し、微弱な電圧値であってもバッテリーを安定して充電を行うことが可能であるe-peasと呼ばれるモジュールを使用することで解決することが可能ではないかと考えた。センサネットワー

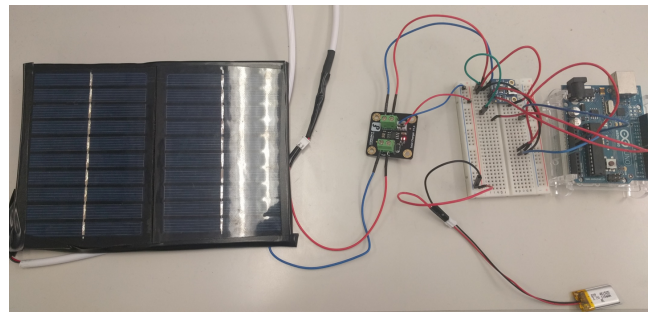


図1 環境発電モジュール

クが構築可能なセンサノードとしてCYBT-213043-MESH EZ-BT™ Module Mesh Evaluation Kitを検討し、システムの構築を行った。

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発電、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 環境発電

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、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が開発したソーラ電源管理モジュール「TWE-EH SOLAR」*1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[5], [6]。

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」*2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。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ヶ月のところを、環境発電による補助電源により5年に伸ば

*1 <https://mono-wireless.com/jp/products/TWE-EH-SOLAR/index.html>

*2 <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/08/15.html>

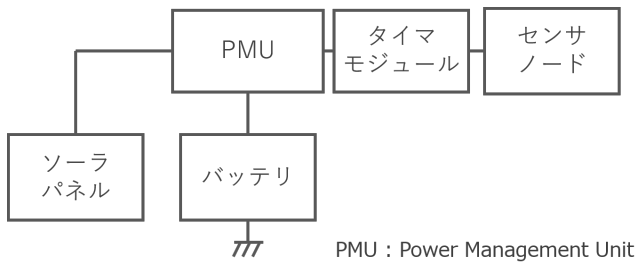


図 2 システム概要図

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。そこで三崎らは、センサネットワークを構築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 に示す環境モジュールでは、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、接続した Lipo バッテリに給電し、タイマモジュールによって一定間隔でマイコンボードを間欠動作させることができる。これにより、一時的に充電を行えない環境であっても一定間隔で安定した間欠動作が可能である。しかし、この環境発電モジュールでは 1000lux 以上の環境でしか動作できず、屋内光ではその環境が限定されてしまうため、目的を達成できず、我々が新たに開発する必要がある。

2.2 メッシュネットワーク

メッシュネットワークは、IEEE 802.11[7]、IEEE 82.15[8]などのいくつかの Wireless Sensor Network(以下、WSN とする) 標準によって WSN で広く使われている。IEEE 802.14 は、低消費電力、低データレート、低コストであり、これらに基づいて Zigbee や 6LoWPAN などの通信規格が開発されている。

屋内で WSN を構築する場合、通信規格として ANT や EnOcean を使用することが適しているが既存の IoT デバイスの通信ではあまり使用されておらず、低コスト、低消費電力でスマートフォンなどのデバイスに標準装備されている Bluetooth Low Energy(以下、BLE とする) を使用していることが多い。そのため先行研究 [9] では BLE メッシュネットワーク使用し、様々な方法でフラッドングによる通信遅延時間の評価を行った。しかし、バックオフが Round Trip Time に大きな影響を与え、ネットワークの処理能力と堅牢性を低下させてしまうことが分かっている。

3. 環境発電駆動センサネットワークシステム

本研究の目的は、センサネットワークを構築できるセン

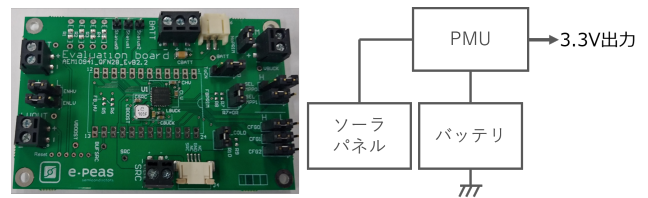


図 3 e-peas

サノードを 1000lux 以下の光量であっても動作可能な環境発電によって一定間隔で動作させることである。システムの概要を図 2 に示す。

太陽光パネルから発電された電力を Power Management Unit (以下、PMU) に送り、バッテリーに充電を行う。PMU からタイマモジュールに常に電力を送り、指定された時間分、センサノードへの給電を停止した後、センサノードからの信号を受信するまで給電を行う。これにより、バッテリーに充電を行いながら、センサネットワークを構築可能なセンサノードを動作できるシステムを構築できると考えた。

このシステムの構築のため PMU として e-peas、タイマモジュールとして低消費電力タイマモジュール、センサノードとして CYBT-213043-MESH EZ-BT™ を使用する。e-peas 本体とシステム概要図を図 3 に、低消費電力タイマモジュールとセンサノードを図 4 に示す。e-peas では太陽光パネルから発電された電力の電圧を昇圧し、バッテリーに充電可能な電圧にすることによって光量が低い環境であっても継続して充電を行うことが可能である。低消費電力タイマモジュールは入力された抵抗によって間欠動作間隔の設定を行うことが可能であり、信号をこのモジュールに送ることによりセンサノードへの給電を停止することが可能である。

センサノードは、CYBT-213043-MESH EZ-BT™ 使用する。このセンサノードは、プロビジョニング、サーバ、クライアント、コントローラの 4 つで構成されており、プロビジョニングではネットワークに追加できるノードを定義し、サーバではクライアントが読み取りまたは制御できる要素の状態を公開し、クライアントはサーバの状態を要求および変更するメッセージのセットを定義する。センサノードごとに取得したデータを転送、動作期間を短くすることによる低消費電力化、低消費電力化状態での受信待機を行える機能、さらに BLE 搭載のメッシュネットワークに非対応のデバイスとの通信を行えるシステムを構築する。CYBT-213043-MESH EZ-BT™ は 3.3V で動作可能であり、e-peas から出力される電圧で動作可能であるため、低消費電力タイマモジュールと組み合わせ、環境変化に頑健な環境発電駆動センサネットワークシステムの開発が可能である。

4. まとめと今後の展望

本研究では、環境変化によって発電量が変化したとし

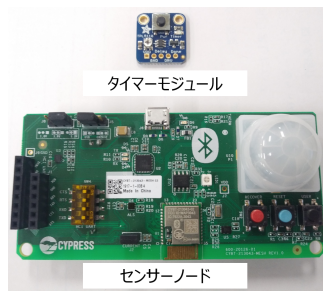


図 4 使用したモジュール

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った。e-peas は、先行研究 [4] で使用されていたソーラ Lipo バッテリー充電器と比較して光量が低い環境での動作を確認した。しかし、e-peas で太陽光パネルから発電された電圧を昇圧しているため充電量は少なく、充電を行いながら動作させるためには間欠動作間隔を長くする必要があると考えられる。今後、開発した環境発電モジュールとマイコンノード (CYBT-213043-MESH EZ-BT) を接続し、どれくらいの時間間隔での間欠動作が可能かを調査していく。

福島ら [7] は、センサネットワーク内深層学習 MicroDeep を提案し、畳込みニューラルネットワークを網内実行するためのプロトコル設計を行っている。今後、MicroDeep のプロトコルを、本稿で提案する間欠動作メッシュネットワークで動作するよう実装し評価を行う予定である。

謝辞

本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」により得られたものです。

参考文献

- [1] 安本慶一, 山口弘純: モバイル時代のサービスを支える技術: 5. 多数のデータストリームを実時間で融合・編纂し活用するための次世代「情報流」技術-情報流キュレーション基盤実現に向けた課題抽出と取り組み-, 情報処理, Vol. 55, No. 11, pp. 1281-1287 (2014).
- [2] Nakamura, Y., Mizumoto, T., Suwa, H., Arakawa, Y., Yamaguchi, H. and Yasumoto, K.: Design and Evaluation of In-Situ Resource Provisioning Method for Regional IoT Services, *2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, IEEE, pp. 1-2 (2018).
- [3] Nakamura, Y., Mizumoto, T., Suwa, H., Arakawa, Y., Yamaguchi, H. and Yasumoto, K.: In-Situ Resource Provisioning with Adaptive Scale-out for Regional IoT Services, *2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)*, pp. 203-213 (online), DOI: 10.1109/SEC.2018.00022 (2018).
- [4] 三崎慎也, 諏訪博彦, 荒川豊, 安本慶一: 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, 情報処理学会研究報告, 2018-MBL-89, No. 14, pp. 1-6 (2018).
- [5] 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).
- [6] 柏本幸俊, 秦恭史, 中川愛梨, 諏訪博彦, 藤本まなど, 荒川豊, 繁住健哉, 小宮邦裕, 小西健太, 安本慶一: エナジー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).
- [7] Fukushima, Y., Miura, D., Hamatani, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: MicroDeep: In-network Deep Learning by Micro-Sensor Coordination for Pervasive Computing, *2018 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, IEEE, pp. 163-170 (2018).
- [8] Committee, I. L. M. S. et al.: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, *IEEE Std*, Vol. 802 (2007).
- [9] Sopicha, S., Yugo, N., Hirohiko, S., Yutaka, A. and Keiichi, Y.: Feasibility Study on Distributed Sensor Processing in BLE Mesh Network, IPSJ Technical Report, 2018-MBL-89, No. 15, pp. 1-6 (2018).