

多目的自律移動ノードのための 自動バッテリー交換コンポーネントの提案

正岡汰一^{†1} 山本眞也^{†1}

概要：固定設置されたバッテリー駆動のセンサノードが多数存在する WSN 環境において、センサノードを停止させずにバッテリーの交換を自動で行うことができれば有用である。そこで本研究では、充電済みバッテリーを運搬し寿命が尽きそうなバッテリーと交換を行う自律移動ノードを提案する。

キーワード：バッテリー交換，ドッキング，自律移動ノード

A Battery Replacement Component for A Multi-Purpose Mobile Node

TAICHI MASAOKA^{†1} SHINYA YAMAMOTO^{†1}

1. はじめに

Wireless Sensor Networks(WSN)においてセンサノードはバッテリーで駆動するのが一般的である。既設の工場や倉庫において、WSN を導入する際に、各センサは使い捨てが難しくかつ既設の電源から電力を供給することが困難である場合が予想される。そのとき、各センサはバッテリーから分配された電力によって動作させることになる。また、近年のバッテリーの大容量化にともない、従来、乾電池で動作していた家電がバッテリー駆動へと転換されることも予想される。このように固定設置されたバッテリーから分配された電力によって駆動するセンサノードや家電が多数存在する環境において、バッテリーからセンサノードや家電への電力供給を途切れさせることなくバッテリーの交換を自動で行うことができれば有用である。また、これまでに様々な目的を持ったアプリケーションがホームサーバで複数同時に稼働する環境において、それらのアプリケーションが要求する複数のタスクを集約し、一度の巡回で解決する多目的自律移動ノードとその巡回アルゴリズムが提案されている[1]。そこで本研究では、その多目的自律移動ノードに安価で容易に増設可能な充電済みバッテリーを運搬し寿命が尽きそうな使用中のバッテリーと自動で交換するコンポーネントとバッテリー交換までのアルゴリズムを提案する。提案コンポーネントは、自律移動ノードに増設する**バッテリー交換器**、センサノードや家電へと電力を供給する**バッテリーステーション**、予備バッテリーの充電を行うことのできるノードの待機基地となる**ベースステーション**からなる。提案コンポーネントを用いたバッテリー交換は、以下の通りを行う。バッ

テリステーションからベースステーションへとバッテリー交換依頼が届いたら、バッテリーステーションへの走行経路を決定し、バッテリー交換器を備えた自律移動ノード（以後、**バッテリー交換ノード**と呼ぶ）はベースステーションからバッテリーステーションの近くまで充電済みバッテリーを運搬する。バッテリー交換ノードの移動経路は、文献[1]の手法を用いて生成する。このとき、バッテリー交換はタスクのひとつとして扱い、別のタスクを同時に実行することができるものとする。バッテリーステーションの近くまで移動したバッテリー交換ノードは、バッテリーを交換するためにバッテリーステーション正面中央まで位置調整を行う。そして、バッテリー交換ノードはバッテリーステーションとドッキングし、バッテリーの交換を行う。バッテリーの交換が完了したらドッキングを解除し、他のタスクがある場合にはそれらを実行しつつ、ベースステーションまで帰還し、使用済みバッテリーをベースステーションのバッテリー充電器へ収納し、動作を完了する。提案手法では、この一連の動作を専用のノードやロボットを用意することなく、安価な機材によって構築されたコンポーネントを従来の多目的自律移動ノードに増設することで実現する。

2. 関連技術

2.1 移動センサノードのためのボロノイ図による巡回経路生成アルゴリズムの提案

文献[1]では、ホームサーバに複数のユビキタスアプリケーションが存在するスマートオフィスなどの環境下において、それぞれのタスクをとりまとめ、1 台の多目的移動ノードでタスク解決を図るためのシステムと一度の巡回です

^{†1} 山陽小野田市立山口東京理科大学
Sanyo-Onoda City University.

すべてのタスクを解決するための効率的な経路を生成する経路探索アルゴリズムを提案している。提案している手法では、移動ノードが自己位置推定のために生成された環境マップと固定配置された各種センサの配置マップをもとに、ボロノイ図を作成し、重ね合わせることによって、ボロノイ線から移動ノードの移動経路を生成する。

実験では、現実にもったマップを用いて、母点数とそれによるボロノイ点、ボロノイ線の数の変化、それによる巡回経路作成割合を示し、アルゴリズムによって、問題なく移動ノードの巡回可能経路を作成できることを示している。

提案システムでは、センサノードへの走行経路の決定方法として、上記の手法を用いる。

2.2 ロボットの長時間活動を実現するためのバッテリーサポートシステムの開発

文献[2]では、オフィスや大学等の比較的整備された屋内空間の平坦な廊下を想定し、ロボットの長時間活動における電源供給問題の解決策のひとつとして、電力供給をステーションで行うのではなく、作業用のロボットとは別に救援専用ロボットであるバッテリー運搬専用ロボットを用意し、作業ロボットが作業を中断することなく、作業を行っている場所でバッテリーを交換するシステムを提案している。このシステムは、作業ロボットと救援ロボットの2台の独立二輪駆動型のロボットとバッテリーステーション、そしてシステム全体を管理するサーバPCから構成されている。まず、作業ロボットはサーバPCに自機のバッテリー残量や位置を継続的にシステム管理サーバに送信する。それにより、サーバPCは作業ロボットから送られてくるバッテリー状態・位置情報から、救援ロボットに救援要請を送る。そして、救援ロボットは充電した未使用バッテリーを装填し、作業ロボットの位置情報と自機の現在位置から走行経路を導出し、屋内空間に設置したランドマークで自己位置を補正し、作業ロボットの場所まで走行する。さらに、救援ロボットは、ある程度ロボットに近づくと、CCDカメラを用いて作業ロボットの背面に配置されたLEDを撮像することで位置・姿勢制御を行い作業ロボットとドッキングする。作業ロボットと救援ロボットがドッキングすると、それぞれのロボットに搭載されているバッテリー交換専用スロットを用いてバッテリーの交換を行う。その後、作業ロボットはそのまま作業を続け、救援ロボットはバッテリーステーションに戻る。

実験では、ドッキング可能範囲の計測実験結果から比較的広範囲で提案している位置補正手法が利用可能であることを確認している。また、実際に行っているドッキング繰り返し実験から100%の成功率でドッキングの再現性を確認している。さらに、屋内環境におけるシステムの一連の動作について確認実験をすることで、システムの有用性と実用性を示している。

文献[2]で提案された手法では、専用のロボットとシステムによって高度な位置計算を行うことによって自動バッテ

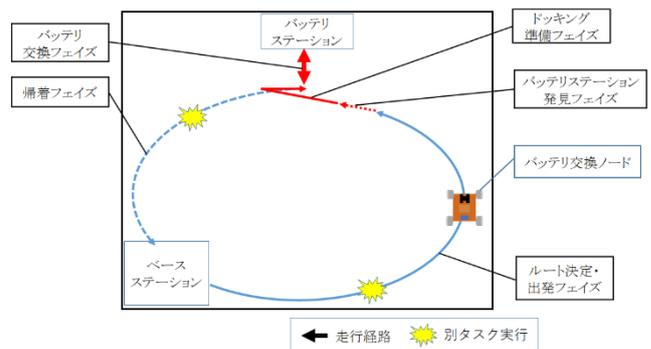


図 1 提案システムの概要

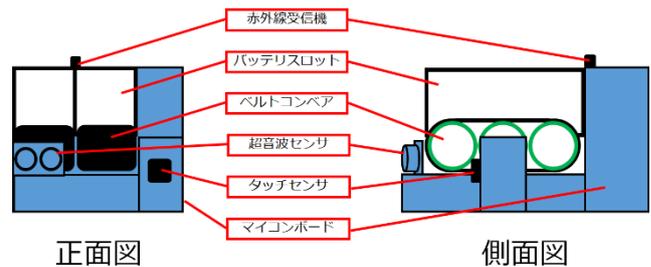


図 2 バッテリー交換コンポーネント

リ交換を達成している。我々の提案手法では、安価な機材で構築されたコンポーネントを従来のWSNに用いる多目的自律移動ノードに増設することで専用のシステムを構築することなく自動バッテリー交換を実現すること、また、多目的自律移動ノードが他のタスクを実行する余力を十分に残すために、CPU、メモリ、バッテリーなどのリソースをできる限り消費しない方法で自動バッテリー交換を実現することを目的とする。

3. 提案手法

固定設置されたバッテリーをそれによって駆動する機器を停止させずに自動で交換することを目的として、WSNで用いられる自律移動ノードに追加するコンポーネントとその動作アルゴリズムを提案する。提案手法は、バッテリー交換ノード、バッテリーステーション、ベースステーションの3つで構成され、(1)ルート決定・出発フェイズ、(2)バッテリーステーション発見フェイズ、(3)ドッキング準備フェイズ、(4)バッテリー交換フェイズ、(5)帰還フェイズの5つのフェイズで実行される。

3.1 バッテリー交換ノード

バッテリー交換ノードは、提案するバッテリー交換コンポーネント(図2)を増設した自律移動ノードであり、ベースステーションからバッテリーステーションへと充電済みバッテリーを運搬し、交換したのち、使用済みバッテリーをベースステーションへと持ち帰る役割を担う。このとき、バッテリー交換コンポーネントを増設した自律移動ノードは、従来のタスクを実行することもでき、従来のタスクを実行中にバッテリーステーションの近くに移動したときに、割り込みタスクとして、バッテリー交換をしたり、文献[1]のように複

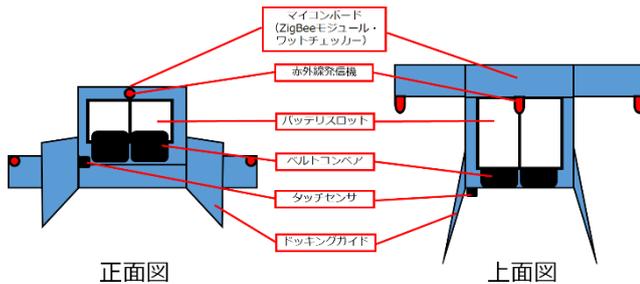


図 3 バッテリストーション

数のタスクを同時に解決するアプリケーションにタスクのひとつとして登録したりすることを想定している。図2に示すとおり、増設するバッテリー交換コンポーネントは、ドッキング位置調整用として、赤外線受信機と超音波センサ、ドッキング判定にタッチセンサ、バッテリー交換時の送出入用にバッテリスロットとベルトコンベア、それら进行操作するマイコンボードからなる。これを自律移動ノードに装着し、マイコンボードへ接続することで、操作可能となる。

3.2 バッテリストーション

バッテリストーションは、バッテリーを用いて機器への給電、バッテリー残量の監視、バッテリー交換依頼の発信、バッテリー交換時の位置調整のためのガイドとしての役割を持つ。図3に示す通り、バッテリーからの給電を担うバッテリスロット、バッテリー交換時の送出入用のベルトコンベア、ドッキング前の位置補正時に自身の位置をバッテリー交換ノードに通知するための赤外線発信機、ドッキングを補助するドッキングガイド、ドッキング判定にタッチセンサを備える。これらは、バッテリー残量を確認するためのワットチェッカーと ZigBee による通信機能をもつマイコンボードによって動作する。なお、バッテリーは接続および切断を容易にするため、コネクタ部分にはマグネットプラグを採用する。また、ドッキングガイドはノードのモータとタイヤの性能および床の状況に応じて装着するものであり、タイヤの空転の心配がない環境では必要としない。バッテリストーションは常に動作している必要はなく、定期的にウェイクアップしてバッテリー残量を監視し、バッテリー残量が残り僅かとなったときにバッテリー交換を依頼し、バッテリー交換ノードのドッキングを補助するときに動作する。

3.3 ベースステーション

ベースステーションは、自律移動ノードの待機場所であり、バッテリストーションと同様の形状からなり、バッテリーの充電器を備える。また、ホームサーバとして常時に起動しており、バッテリストーションからのバッテリー交換依頼を受け取ると、図1に示すとおり、以下のバッテリー交換タスクとなるフェイズ(1)~(5)を実行開始する。

(1) ルート決定・出発フェイズ

ベースステーションは、バッテリストーションから位置情報およびバッテリスロットの空きスロット情報を含むバッテリー交換依頼を受け取るとバッテリストーションへの走

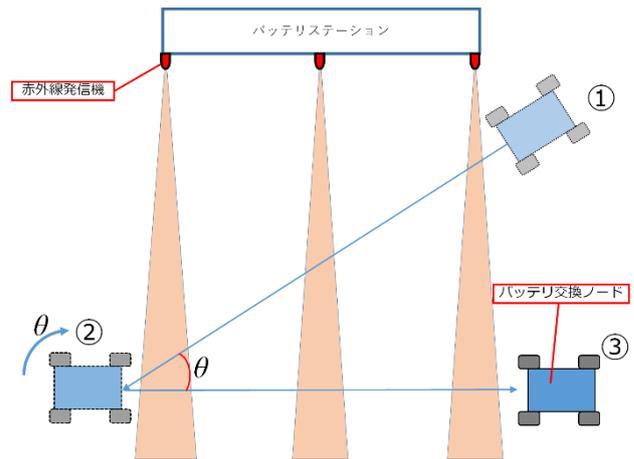


図 4 バッテリストーション発見フェイズ

行経路を文献[1]の手法を用いて決定する。このとき、バッテリー交換タスクは、バッテリストーションにおけるバッテリー交換という単一のタスクであるため、別のタスク実行との並列実行が可能である。ベースステーションは、走行経路を作成するとそれをバッテリー交換ノードへと送信し、バッテリー交換ノードはバッテリストーションから送られた空きスロット情報をもとに充電済みバッテリーを搭載し、タスクの実行を開始する。バッテリー交換ノードが、バッテリストーション近くへと移動すると、バッテリストーション発見フェイズへと移行し、バッテリーの交換タスクを開始する。このとき、バッテリストーション発見フェイズへと移行する距離は、バッテリストーションが発信する赤外線が受信できる距離であることが条件となる。

(2) バッテリストーション発見フェイズ

バッテリー交換ノードは、バッテリストーション近隣へと到達すると、バッテリストーションから送られてきた位置情報をもとにバッテリストーションを発見する作業を実行する(図4)。まず、バッテリストーションから発信される赤外線を受信する動作を開始する(図4①)。このとき、バッテリストーションに設置された3つの赤外線発信機は、それぞれの設置位置が既知であり、それぞれ異なる信号が発信されているものとし、ひとつでも受信できた場合には、残りの2本の赤外線のおおまかな位置関係が推測可能であるとす。これをもとに、バッテリー交換ノードは3本の赤外線をまたぐ直線軌道を行う。これによって、ノードの移動速度、それぞれの赤外線の受信間隔から角度 θ を計算し、旋回を行う(図4②)。ただし、図4のとおり、赤外線は直線ではなく放射状に広がるため、それを考慮し、この動作を繰り返し行い、赤外線とノードの向きが垂直になるようにバッテリー交換ノードの向きを調整する(図4③)。旋回角度が十分に小さくなったら、ドッキング準備フェイズへと移行する。

(3) ドッキング準備フェイズ

バッテリー交換ノードは、バッテリストーションへドッキ

ングを行うために、バッテリーステーション正面中央に位置調整を行う動作を開始する。

アルゴリズムは以下の通りである。

- Step1.** まず、バッテリーステーション発見フェイズによってバッテリー交換ノードがバッテリーステーションから発射される赤外線と垂直方向を向いている状態から n 秒間前進する。いずれの赤外線も受信できなかった場合には、 $2n$ 秒間後進する。さらに赤外線を受信できなかった場合には $4n$ 秒間前進する。このように2倍ずつ走行距離を伸ばしながら前進と後進を繰り返すことによって徐々に探索領域を広げながら赤外線を発見する。
- Step2.** 赤外線を受信したとき、それが、バッテリーステーションの右側に設置された赤外線発信器の信号だった場合には、バッテリーステーションの左側へ向って m 秒間進む。左側に設置された赤外線発信器の信号だった場合には、右側へ向って m 秒間進む。このとき、 $m < n$ とする。
- Step3.** バッテリーステーション正面中央に設置された赤外線発信器の信号を受信できるまで Step2 を繰り返す。いずれの赤外線も受信できなくなった場合には Step1 へと戻る。バッテリーステーションの赤外線発信機が設置された間隔とバッテリー交換ノードの走行速度が既知であれば、発信器間の距離と移動速度から m を算出し設定することにより、Step2 の繰り返しを省略できる。
- Step4.** バッテリーステーション正面中央の赤外線発信器の信号を受信した場合には、バッテリーステーション方向へと90度旋回し、ドッキング準備を完了する。

(4) バッテリー交換フェイズ

バッテリー交換ノードは、バッテリー交換を行うために、バッテリーステーションとドッキングを行う。バッテリー交換ノードはドッキングが完了するまで直進する。バッテリー交換ノードおよびバッテリーステーションのタッチセンサがともにONになったとき、ドッキング完了となる。ドッキングが完了したら、まずバッテリー交換ノードのバッテリー送出入用ベルトコンベアを稼働させ、バッテリーをバッテリーステーションへ送り出す。バッテリーステーションはバッテリーが接続され通電されたらバッテリー送出入用ベルトコンベアを稼働させ、使用済みバッテリーをバッテリー交換ノードへ送り出す。これによりバッテリーの交換が終了したら、後進してドッキングを解除し、帰還フェイズへと移行する。

(5) 帰還フェイズ

バッテリー交換ノードは、使用済みバッテリーをベースステーションへと運搬し、ベースステーションのバッテリー充電器へ収納し、動作を完了する。この帰還経路中にも別のタスク実行が可能である。

4. 評価実験

提案するシステムの有用性と再現性を確認するため、バ

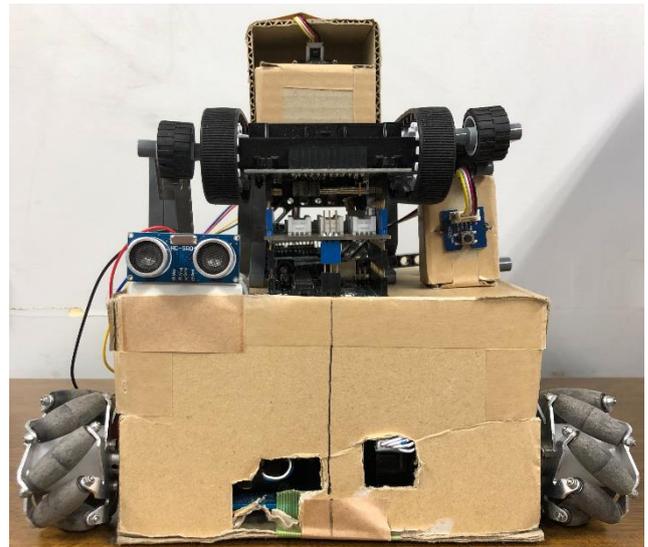


図 5 バッテリー交換ノード

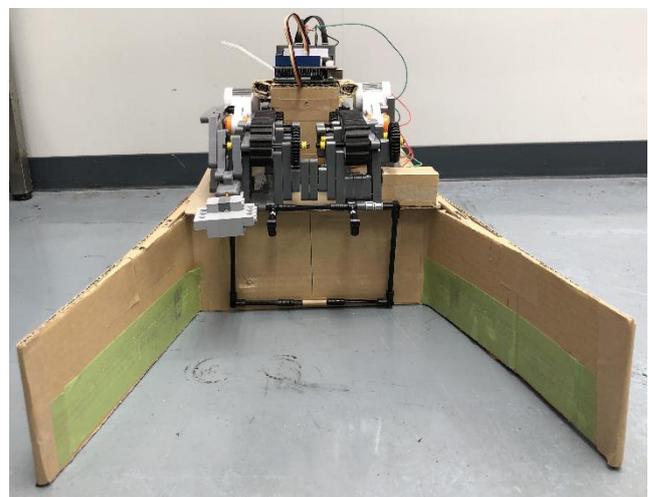


図 6 バッテリーステーション

ッテリー交換モジュールを備えたバッテリー交換ノードおよびバッテリーステーションを試作し、バッテリーステーション発見フェイズ、ドッキング準備フェイズ、バッテリー交換フェイズの一連の流れについて、バッテリー交換ノードのドッキングまでの位置調整精度およびバッテリーステーションへのドッキング成功率について実験を行った。

試作したバッテリー交換ノードおよびバッテリーステーションを図5, 6に示す。また、バッテリー交換ノードのスペックを表1に示す。今回の実験では、床が凹凸のあるリノリウムでありタイヤの空転が見られたため、ドッキングガイドを装着した。また、位置調整精度およびドッキング精度のみを計測することを目的としてバッテリー交換ノードの旋回動作を簡略化するため、バッテリー交換ノードにはArduino互換ボードで動作する無限軌道ロボットを用いた。また、バッテリー交換のためのベルトコンベア機構には、Arduinoで動作するロボットモジュール Zumo および LEGO Mindstorm を用いた。

実験環境は、バッテリーステーションから縦1m、横2mの空間に、0.5m間隔に10ヶ所の初期位置を設定する。これ

表 1 試作バッテリー交換ノードの仕様

	使用機器
バッテリー交換ノード	RB-Nex-32 4WD 60mm Mecanum ホイール Arduino ロボットキット
	Zumo
	Arduino Uno R3
	Grove Base Shield v2.0
	Grove - 赤外線受信器
	Grove - ボタン
	超音波センサ
バッテリーステーション	Arduino Uno R3
	Grove Base Shield v2.0
	Grove - 赤外線発信器
	教育用 LEGO Mindstorm NXT
	タッチセンサ
	インタラクティブサーボモータ

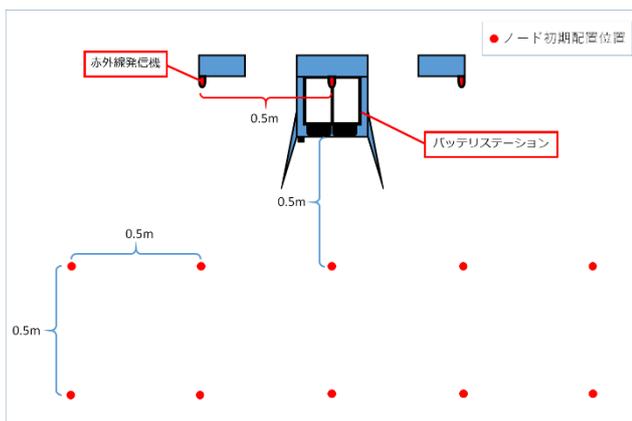


図 7 実験環境

らの位置から、バッテリー交換の運搬を開始し、ドッキングしたのち、バッテリーを交換、離脱までの精度を計測する。このとき、ドッキングに失敗した場合は、ドッキング位置調整失敗、タッチセンサの未検出、バッテリーの送出入失敗で分類し、ドッキング位置調整失敗の場合にはバッテリー交換ノードの位置からドッキング位置までの距離を誤差として計測した。実験では、それぞれの初期位置から 10 回ずつ試行した。その結果、全ての位置においてバッテリー交換に成功し、再現率 100%となった。これにより、提案するバッテリー交換モジュールとバッテリー交換アルゴリズムの有用性を示すことができた。

5. まとめ

工場や倉庫における固定設置されたバッテリーから分配された電力によって駆動するセンサノードや家電が多数存在する WSN 環境において、センサノードや家電を停止させずにバッテリーの交換を自動で行うことができれば有用で

ある。そこで本研究では、多目的自律移動ノードに安価で容易に増設可能な充電済みバッテリーを運搬し、使用中のバッテリーと電力供給を途切れさせることなく自動で交換するコンポーネントとバッテリー交換までのアルゴリズムを提案した。提案手法では、専用のノードやロボットを用意することなく、安価な機材によって構築されたコンポーネントを従来の多目的自律移動ノードに増設することで実現することが可能である。提案手法では、バッテリーステーションからベースステーションへとバッテリー交換依頼が届いたら、バッテリーステーションへの走行経路を決定し、ベースステーションからバッテリー交換器を備えた自律移動ノードによって、ベースステーションまで充電済みバッテリーを運搬し、バッテリー交換を行う。実験では、提案するシステムの有用性と再現性を確認するため、バッテリー交換モジュールを備えたバッテリー交換ノードおよびバッテリーステーションを試作し、バッテリーステーション発見フェイズ、ドッキング準備フェイズ、バッテリー交換フェイズの一連の流れについて、位置調整精度およびドッキング成功率について実験を行った。実験の結果、10 か所の初期位置からバッテリー交換までの一連の動作について、バッテリー交換を失敗なく行うことができた。提案するシステムの有用性と再現性を示すことができた。

今後の課題として、バッテリー交換ノードのバッテリーロットを複数に増やし、一度の巡回で複数のバッテリーステーションでのバッテリー交換を可能にする。

参考文献

- [1] 山本真也, 勝間亮. 移動センサノードのためのボロノイ図による巡回経路生成アルゴリズムの提案. 第 25 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ(DPSWS2017), マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文, pp.9-15, (October 2017).
- [2] 斎藤康夫, 浅井孝平, 崔龍雲, 伊与田健敏, 渡辺一弘, 久保田謙. ロボットの長時間活動を実現するためのバッテリーサポートシステムの開発. 電学論 C, 128 巻 10 号, 2008 号.