

複数台の移動ロボットのバッテリー残量を考慮した総電力削減手法

寒竹俊之^{†1} 中野美由紀^{†2} 菅谷みどり^{†1}

概要: 近年、災害や飲食業などの現場で、複数台ロボットサービスの活用が検討されているが、その省電力化については、十分議論が行われていない。ロボットは同型の場合でも、サービスやハードウェアにより消費電力の個体差が大きい。その個体差によっては運用したシステム全体の総電力が増加することから、まとめて管理し、適切に運用すれば総電力をより削減することが可能である。本研究では、複数台ロボットの省電力化手法を提案する。具体的には、個体毎のバッテリー消費の差異を個体差とし、その値を基に電力予測式を構築し、式により算出された予測値をもとにロボットの動作を入れ替えることで全体の電力を削減する。提案手法をもとにシミュレータを開発し、複数のパラメータセットで確認したところ、動作させるロボット台数の増加につれ、全体の電力の削減量も増加することを確認した。

キーワード: ロボット, ログデータ, タスク分散処理

Total power reduction method considering remaining battery capacity of multiple mobile robots

KANTAKE TOSHIYUKI^{†1} NAKANO MIYUKI^{†2} SUGAYA MIDORI^{†1}

Abstract: In recent years, utilization of multiple robot services has been considered in the field of disaster, food and drinking industry, etc. There is not enough discussion about power saving, even in the case of the same type Robot individual difference in power consumption is large. The total electric power of the whole system operated will increase depending on the individual difference, so it is possible to reduce the total electric power by managing it collectively and operating properly. In this research, specifically, we propose a power conservation method of robot. In concrete terms, it is assumed that individual differences in individual battery consumption differences are individual differences, a power prediction formula is constructed based on the individual difference, and based on the predicted value calculated by the equation reduce the total electric power by swapping the motion of robot. Based on the proposed method, we developed a simulator and confirmed it with multiple parameter sets, and confirmed that as the number of robots to be operated increases, the total amount of power reduction also increases.

Keywords : Robot, Logdata, Task distributed processing

1. はじめに

近年、ロボットの活躍の場が、製造業からサービス業へと広がりつつあり、より身近なものとなってきている[1, 2]。自動的に室内を巡回して掃除をする掃除ロボット、公共施設などで人間の代わりに巡回警備の手助けを行う警備ロボット、宅配などのサービス[3]、原子力発電所などでの作業ロボットなどがあげられる。日本では高齢化が進み、将来労働者が不足すると予想されており、介護や福祉、危険な場所など様々な分野で人の代替となるサービスロボットの市場は今後拡大すると予想されている[1]。

サービスロボットが広域で継続的にサービスを行うには、作業効率が求められる場合、複数台で行うことが合理的である。特に自律動作によりサービスを提供する場合には、掃除ロボットや、宅配ロボット[3]に見られるようにバッテリー動作が前提となる。バッテリー動作を行う自律ロボットを分散配置して、並列動作を行う場合、物理的な配置や、

配置先の要求によりロボットの稼働状況は異なることが予測される。また、ロボット自体も、新しい機種の途中追加や、ハードウェアやソフトウェアの更新を行うなかで個体差が大きくなる。こうした状況では、単純に仕事の配分を公平にするだけでは、全体の電力効率が落ちることが予測される。我々は、複数台のロボットを利用するサービス提供者が、電力効率を把握し、管理することで、複数台ロボットの電力効率を上げ、消費電力を削減することができるのではないかと考えた。

電力削減に関する研究は、動作電圧・周波数の制御を行う DVFS(Dynamic Voltage and Frequency Scaling)[4]や、軽量化や回路の効率化、半導体を使って電力を制御する PWM(Pulse Width Modulation)など様々行われている。これらの削減手法は、主にハードウェアに実装されることが効果的であることから、個々のロボットの消費電力の削減には効果的であると考えられるが、管理目的で利用すること

^{†1} 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology

^{†2} 産業技術大学院大学
Advanced Institute of Industrial Technology

は困難である。そこで、ソフトウェア側からの時間特性に着目したタスクスケジューリング手法などの省電力手法も数多くなされている[5, 6]が、出荷後のロボットの動作特性に合わせて電力量を削減する手法については、まだ十分に議論されていない[7]。

この課題に対して本研究では、複数台のロボットの電力消費傾向を把握し、その傾向をもとに最適化を動的に行うことで総電力を削減する手法を提案することを目的とした。実現のために、ハードウェアの消費特性と、稼働状況の差異を反映した予測モデルを構築し、そのモデルをもとに、複数台ロボットの総電力を予測した。また、予測モデル上に不効率なロボットの個体を検出した場合、仕事の割り振りの変更により、総電力を削減するものとした。評価では、上記の予測から割り当ての変更までをシミュレータとして実装し、提案アルゴリズムがある場合、全体の総消費電力の削減値を削減することを確認した。具体的にはロボットの台数が2倍になると、消費電力の削減量が2倍に増え、提案手法の有効性が示された。また、実際のロボットから取得した値においても、1%の誤差で同様の結果が得られることを明らかにした。本論文では、式の構築および、交換法の設計、シミュレータへの実装と評価した結果について述べる。

本論文の構成は、第2章で関連研究とその課題、第3章で提案、第4章でシミュレータでの評価、第5章でより詳細に個体差を把握するための実験と評価、第6章でまとめを行う。

2. 関連研究

電力削減に関する技術は、動的電圧・周波数制御(DVFS: Dynamic Voltage and Frequency Scaling)アルゴリズムというプロセッサの供給電圧および動作周波数を適切に制御する手法が多くのプロセッサなどに適用されている[4]。また、電力ロスが少ないPWM(Pulse Width Modulation)制御なども電力削減手法として挙げられる。これらは、マイコン、CPUなどの制御に用いることで最大の削減効果を得ることが出来る方式である。これらの手法は、複数台のロボットなどにも応用可能であり、電力削減の効果が期待できる。一方、現場において様々なロボットが利用されるようなケースにおいて、統一的な電力削減手法を提供するものではない。

また、TK-SLP(Super Low Power Embedded Software Platform)の組込み機器向けの消費電力モニタリング機能などを備えた省電力システム開発プラットフォームでは、プラットフォームの機能の1つである消費電力モニタリング機能を用いて個別の組み込みシステムの電力量をモニタリングし、システムの管理機能に自動送信する仕組みが提供されている[8]。本仕組みは、監視制御はできるものの具体的な削減方式は開発者の実装に委ねられており、本仕組み

自体が電力量を削減するものではない。

データセンタなどにおける複数台の計算機を対象とした電力削減研究では[5]、空調に使用され冷却された空気を再度サーバの冷却に用いることや、計算機のタスク配置を変換することにより、約26%の電力削減を実現したことが報告されている。タスク配置の変換などは、複数台ロボットサービスにおける総電力削減へ応用可能と考えられるが、サーバールームなどの固定した空間を前提とした冷却方法などの手法の適用は困難である。

仲川らは[6]、クラウドによって複数のロボットの管理をし、効率的に連携させながら動作をさせることによってサービス継続を行う手法を提案した。インターネットを利用したクラウドサービスにより、ロボットへの作業指持者であるユーザーが複数のロボットを遠隔地から利用可能とすると同時に、タスク分散処理によるケアロボットのサービスの具体的な管理方法の提案とそのプロトタイプを用いた検証を行っている[6]。提案方式は、バッテリー残量が多い個体により仕事させ、残量の少ない個体の充電できる時間を確保する方式であり、サービス全体で使用する総電力の最適化を考慮しているわけではない。そのため、ロボットの充電に必要な電力供給がなくなってしまった場合にはサービスの継続時間が増加するのかは未知数である。

3. 提案

3.1 本研究の目的

先に述べたように、従来の研究では、複数台ロボットを対象とした総電力削減手法は十分議論されていない。そこで本研究では、複数のロボットの総電力の削減手法を提案する。我々は、複数台ロボットを動作させる予備実験を通じて[7]、ロボット使用場所や提供するサービス状況により、ロボットが消費する電力に差がつくことを明らかにしてきた。こうした差は、実装されているハードウェアにおける電力消費特性と、移動やアクチュエーションなどの操作をどの程度行うかといった、実際の現場での稼働の程度により左右される。具体的にはアクチュエーションを行うモータ稼働と、マイコンなどのモジュールが利用する電力量は、基礎的なハードウェアの容量により規定され、時間あたりの消費量として把握できる。一方、稼働状況の程度などを示す動作傾向は、ロボットの動作のログを解析することで把握できる。

我々は、本認識をもとにロボットの稼働状況のログから、上記2つの消費傾向をモデル化し、それをもとに個々のロボットの消費電力予測式を構築した。また、予測式により得られた予測値に基づき、稼働状況にあたる定数を変更する最適配置の組み合わせを行うことで、動作時の稼働状況に応じた電力削減を最小にする配置を実現するものとした。

3.2 提案手法

本研究では、目的を実現するために、具体的に次の(1)(2)の

提案を行う。

(1) 消費電力予測式の構築:

総電力消費を抑えるようにロボットのタスクを再分配する為には、精確な電力消費予測をする必要がある。そのため、個々のロボットの電力消費傾向を把握し、予測をするための式を構築する。本研究ではロボットを実際に動作させて得たログデータを解析し、個々のロボットの動作当たりの消費電力を取得し、稼働状況を把握することが可能な予測式を構築する。

(2) 予測式をもとにした最適配置の計算:

(1)で得られた予測式を元に、総電力が最小となる組み合わせを求める方法を考案した。具体的には、移動量を示す定数が大きく、かつ動作当たりの電力消費傾向が大きい個体と、その逆に、定数が小さく、かつ動作当たりの電力消費傾向が小さい個体の稼働量を入れ替える。これにより、全体として電力消費量を削減できると考えられる。

(1)の予測については、ロボットの動作と消費電力を関連づけることで、動作における消費電力予測を行う。本研究でロボット毎の消費電力の変化について考えたのは以下の二つである。本研究では、(1)(2)のアルゴリズムを設計、実装し、実際の削減効果をシミュレータにより検証する。

3.3 消費電力予測

予測式の構築にあたり、先に述べたように、ロボットの電力消費傾向をもとに考慮した、ハードウェアの電力消費傾向と、稼働量を区別して式に反映できるようにする。

まず、ハードウェアにおいて、電力を消費する対象として、次の A, B を考慮した。

- A. モータの回転: モータの回転にかかる消費電力は、移動量に比例するものとして近似できる。また、停止から移動に移行する際には、一般的にモータでは、定格電流の数倍のピーク電流が流れることが知られている。
- B. モータの停止: 逆起電力により、出力電圧が上昇し、その結果電流も上昇する傾向がある。こうした特性は、回路設計において、影響を最小とする仕組みが取り込まれているケースが多いが、電流に多少なりとも影響がある場合も多い。そこで、本研究では、A の影響を分離して観測できるようにするものとした。

以上より、本研究の予測式では、A は速度を変化させることによって距離当たりの消費電力に変化が生じるのかを確認し、生じるのであれば、速度毎かつ個体毎に予測式の距離当たりの消費電力に相当する変数を区別することで対応する。

B は 1 回当たりの停止状態からの動作による消費電力を求め、予測式に対応する変数を用意することで対応する。さらに、1 回当たりの停止状態からの動作による消費電力に個体差が存在し速度毎に変化が生じているのであれば、

距離当たりの消費電力と同様に変数を速度毎かつ個体毎に区別することで対応する。特に B については、予測式に基づいた、個体の特性把握を行うことが出来れば、その特性の差を考慮した再配分の効果が得られると考えられる。具体的には、ハードウェアの電力消費傾向と、稼働量の値に基づき、最も消費電力が小さくなるように、個体と動作の組み合わせを入れ替えていくことにより総電力を削減する。本研究では、予測式における仮説の検証を目的とし、実際にロボットから取得した値により、個体差が生じることを検証する。また、予測式に基づいて検証するために、本研究ではシミュレータを開発し、その検証を行う。

総電力の削減最小となる個体と動作の組み合わせを求めることによって、より総電力の削減量を増加させる。

3.3.1 消費電力予測式

先に述べたように、ハードウェアでの消費傾向と、稼働を分けた入力を求めることができるように、電力予測式を構築した。まず、単純化のためにロボット 1 台の動作（アクチュエーション）が移動のみとした場合を考慮すると、あるロボットの消費電力(MC_x)[%]は、下記の予測式(1)により表すことができる。

$$MC_x = CPD_x^V \times D_y + CPS_x^V \times S_y \cdots (1)$$

予測式(1)は、ある個体 x における、ある速度(V)[cm/s]の移動動作による消費電力を 1 単位(ここでは 1cm 当たり)の消費電力(CPD_x^V)[%]とし、この値と稼働量である動作 y の累計移動距離(D_y)[cm]の積として求め、消費電力としたものである。停止状態からの動作による消費電力を一回当たりの停止からの動作による消費電力(CPS_x^V)[%]とある動作内の停止回数(S_y)の積として求めている。ハードウェアの傾向と、稼働量に応じた予測値を、移動と、停止からの動作の二つの数値の加算値とすることで、トータルの消費電力量を求めることができると考えた。

次に、総電力(MC_{all})[%]は予測式(2)を用いて消費電力を予測する。

$$MC_{all} = \sum_{i=1}^x MC_i \cdots (2)$$

予測式(2)はある個体 (i) の消費電力 (MC_i) の総量を求めることで総電力を予測する。

3.3.2 アルゴリズムの設計

電力削減にあたっては、提案手法(3.2)に示した、総電力が最小となる組み合わせを求める。本手法の有効性は予測値を用いて検証する。検証にあたっては、シミュレータにアルゴリズムを設計、実装し、予測式で得られた値を入力として用いる方法で行う。予測値を求めるには、消費電力予測(3.3)の消費電力予測式(3.3.1)の式を用いる。個体毎の消費電力を求めるには式(1)を用いて求め、総電力を求めるためには式(2)を用いて求める。総電力の計算については個体毎の消費電力の傾向を示すデータに対して、動作内容を示すデータを割り当て、式(1)の計算を全ての個体で行い、

式(2)によって総電力を求めることで再現する．そのため、個体毎の消費電力を求める式(1)において、個体毎の消費電力の傾向を示すデータとして用いる変数と、動作内容を示すデータとして用いる変数の2つに分ける必要がある．本研究では、式(1)における CPD_x^V と CPS_x^V の2つを消費電力の傾向を示すデータとし、動作内容を示すデータとしては D_y と S_y の2つとした．

本研究における個体と動作の入れ替えというものは、式(1)において消費電力の傾向を示す変数である CPD_x^V と CPS_x^V に対して、動作内容を示す変数 D_y と S_y を別の値と入れ替えることを示す．また、個体と動作の組み合わせは同様に式(1)において消費電力の傾向を示す変数である CPD_x^V と CPS_x^V に対しての動作内容を示す変数 D_y と S_y の組み合わせのことである．

まずは、提案で削減可能な総電力を検証するために、個体と動作の組み合わせが最悪となった場合も検証することとした．よって、総電力が最小となる個体と動作の組み合わせを求め、総電力が最大となる個体と動作の組み合わせを求め、総電力の最大値を求める．

また、個体と動作の組み合わせが最悪の場合ではない場合を検証するため、最初に設定された個体と動作の入れ替えを行う前の総電力を基準値とした．基準値に対しての最小値の差分、最大値に対しての最小値の差分の2つを検証することによって、本研究の手法が有効かどうかを検証する．図1は上記のアルゴリズムをシミュレータのブロック図として示した内容である．

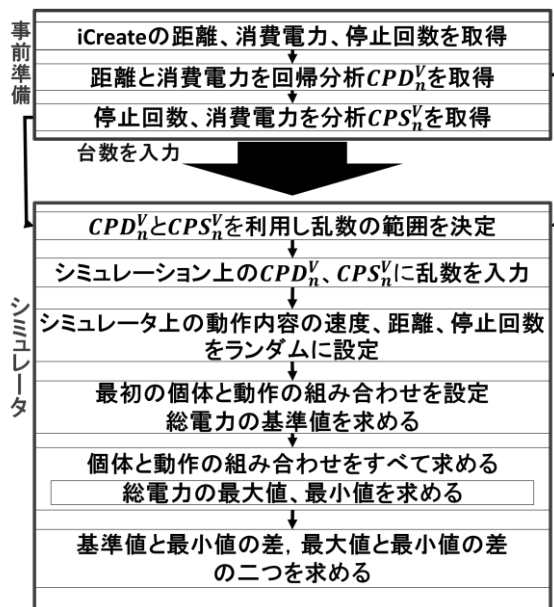


図1 シミュレータのシステム概要図

Figure 1 System Schematic of Simulator

3.3.3 電力削減アルゴリズム

次に、電力削減アルゴリズムについて述べる．式(1)で個体差を表現している変数である CPD_x^V と CPS_x^V のシミュレータ内の値をそれぞれ $SimCPD_x^V$ と $SimCPS_x^V$ とする．シミュレ

ータ内での個体 x の速度 V での 1cm 当たりの消費電力を $SimCPD_x^V$ とし、シミュレータ内での個体 x の速度 V での 1cm 当たりの消費電力を $SimCPS_x^V$ とする．次に動作内容を表現する変数である D_y と S_y のシミュレータ内の値をそれぞれ $WD_y^{WV_y}$ 、 $WS_y^{WV_y}$ とする．動作番号 y の時の速度を WV_y と

し、動作番号 y の速度 WV_y での移動距離を $WD_y^{WV_y}$ とする．

同様に、動作番号 y の速度 WV_y での移動距離を $WS_y^{WV_y}$ とする．シミュレータ上での個体 x の消費電力 MC_x はランダムに設定された(式(3), 式(4))ある個体 x の $SimCPD_x^V$ と $SimCPS_x^V$ に対して、ある動作 y の $WD_y^{WV_y}$ 、 $WS_y^{WV_y}$ の値を用いて式(1)

の計算をすることで求める．全ての個体に動作を割り当て、(1)の計算を全ての個体で行い、 MC_x を個体数分求め、全て加算し MC_{all} を計算している．動作の入れ替えは個体 x に対して割り当てる動作 y を入れ替え、(1)の計算をすることにより、シミュレータ上で再現する．全ての個体 x に対して全ての動作 y を組み合わせ、 MC_{all} が最小となる値を $MC_{all}Min$ とし、最大となる値を $MC_{all}Max$ とする．個体と動作を入れ替えていない状態を初期状態とし、 $MC_{all}Start$ とした．それぞれ変数の意味は表1に記載する．

表1 変数の説明

Table 1 Variable of Description

CPD_x^V	個体 x の速度 V での 1cm 当たりの消費電力
CPS_x^V	個体 x の速度 V での 1 回当たりの停止からの動作による消費電力
$SimCPD_x^V$	シミュレータ上での個体 x の速度 V での 1cm 当たりの消費電力
$SimCPS_x^V$	シミュレータ上での個体 x の速度 V での 1 回当たりの停止からの動作による消費電力
WV_y	仕事ナンバー y での速度
$WD_y^{WV_y}$	仕事ナンバー y の速度 WV_y での距離
$WS_y^{WV_y}$	仕事ナンバー y の速度 WV_y での停止回数
MC_x	ある個体 x の消費電力
MC_{all}	全個体の消費電力の合計
$MC_{all}Start$	入れ替えていない状態の個体と動作の組み合わせの MC_{all}
$MC_{all}Max$	総電力が最大となる組み合わせの MC_{all}
$MC_{all}Min$	総電力が最小となる組み合わせの MC_{all}

速度 V 時でのすべての個体の 1cm 当たりの消費電力の平均を CPD_{ave}^V とし標準偏差を $CPD_{sta-dev}^V$ 、同様にある速度 V 時でのすべての個体の 1 回当たりの停止状態からの動作による消費電力の平均を CPS_{ave}^V とし、標準偏差を $CPS_{sta-dev}^V$ とする．次に $SimCPD_x^V$ の設定に利用するランダムな数値を変数 CPD_{random} とし、 $SimCPS_x^V$ の設定に利用するランダムな

数値を CPS_{random} とする。SimCPD $_x^V$ とSimCPS $_x^V$ は以下の式で求めている。

$$SimCPD_x^V = CPD_{ave}^V + CPD_{random}(-CPD_{sta-dev}^V \leq CPD_{random} \leq CPD_{sta-dev}^V) \cdots (3)$$

$$SimCPS_x^V = CPS_{ave}^V + CPS_{random}(-CPS_{sta-dev}^V \leq CPS_{random} \leq CPS_{sta-dev}^V) \cdots (4)$$

シミュレータ上で個体差を再現するためには、個体 n の速度 V での 1cm 当たりの消費電力である CPD_x^V と、個体 n の速度 V での 1 回当たりの停止状態からの動作による消費電力である CPS_x^V のシミュレータ上の値であるSimCPD $_x^V$ とSimCPS $_x^V$ の二つの変数にランダムな値を入力する必要がある。最初に今までの実験で取得した実機のデータを解析し求めた CPD_x^V と CPS_x^V の数値を利用し、範囲を定めることとした。本研究では、それぞれの平均値に範囲を限定したランダムな値を加算することで個体差のばらつきを再現した(式(3)と式(4)を参照)。製作したアルゴリズムを利用したシミュレータを用いて行うときは、シミュレータ上の動作の値の変数である WV_y と $WD_y^{WV_y}$ と $WS_y^{WV_y}$ の3つの値に関して、速度 WV_y は実験にて検証した7つの値のみとしている。実験で検証を行った速度の値は5cm/s, 7.5cm/s, 10cm/s, 12.5cm/s, 15cm/s, 17.5cm/s, 20cm/sの7つの内1つをランダムに選択し設定する。次に距離 $WD_y^{WV_y}$ と停止回数 $WS_y^{WV_y}$ だが、この値に関しても5m移動して800回衝突などの実際のデータには程遠い値を設定されないようにする必要がある。そのため、ユーザーが設定できる基準値を設定し、その値にさらにある程度操作できるランダムな数値を足すことによって動作を再現する。

4. 評価実験

4.1 目的

先のアルゴリズムを設計、実装したシミュレータを用いて、以下の検証を行う。

1. 個体毎の消費電力の差を考慮し動作を入れ替えることで総電力の削減が可能か
2. 同時に扱う個体の台数が増加した時の削減量の数値を比較により、複数台のロボットを扱うサービスに適しているか
3. 総電力が最小となる場合の個体と動作の組み合わせの個体毎の消費電力と総電力が最大となる場合の個体と動作の組み合わせの個体毎の消費電力の比較

4.2 評価方法

個体数の検証は5台から1台ずつ増加させていき11台まで行う。検証する速度 WV_n はシミュレータが設定できる

5cm/s, 7.5cm/s, 10cm/s, 12.5cm/s, 15cm/s, 17.5cm/s, 20cm/sの7つを個体毎にランダムに設定する。また、シミュレータ内の移動距離にあたる $WD_y^{WV_y}$ には基準値を5,000cmとし、その値に0cm~5000cmの範囲のランダムな値を加算することによって、5,000cm~10,000cmの範囲の値を個体毎にランダムに設定している。シミュレータ内の停止回数にあたる $WS_y^{WV_y}$ は $WD_y^{WV_y}$ と同様に基準値を300とし、0~500の範囲のランダムな値を加算することによって300~800の範囲の値を個体毎にランダムに設定している。設定した個体数の台数毎に、上記の内容の範囲で値を設定したシミュレーションを各100回行って検証する。また、総電力が最小となる場合の個体と動作の組み合わせの個体毎の消費電力と総電力が最大となる場合の個体と動作の組み合わせの個体毎の消費電力の比較を行うために WV_y と $WD_y^{WV_y}$ と $WS_y^{WV_y}$ の範囲は変化させずに、個体数を10台に固定したうえで500回行う。

4.2.1 評価結果

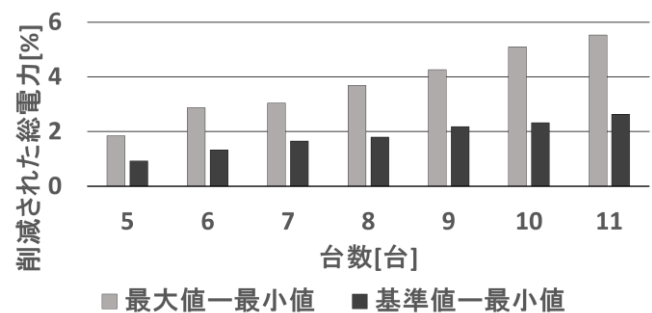


図2 シミュレーション結果

Figure 2 Result of Simulation

結果を図2に示した。縦軸が削減された総電力であり、横軸が個体の台数である。最大削減可能総電力は総電力の最大値と最小値の差分であり、個体毎の消費電力の変化を考慮していなかった場合で個体と動作の組み合わせが最悪の時にどのくらい削減可能かを示している。削減された総電力は最初の組み合わせの総電力である基準値と最小値の差異を示している。両方の値も、台数が5台の時と比べて11台の時は2倍以上削減された総電力が上昇しており、この結果から、提案手法である個体差を考慮し動作を入れ替える手法では台数が増加するにつれて総電力がより削減できることが確認できた。

また、最大値の時の組み合わせの個体の消費電力と最小値の時の組み合わせの個体の消費電力の標準偏差と平均を示したものが図3と図4である。

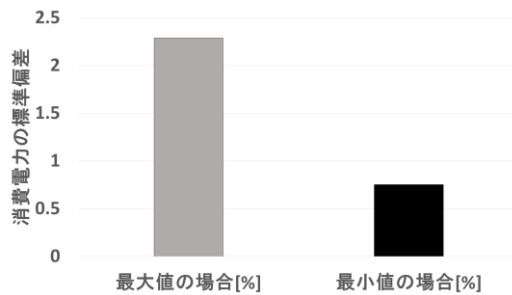


図3 個体毎の消費電力の標準偏差

Figure 3 Standard Deviation of Power Consumption of Individuals

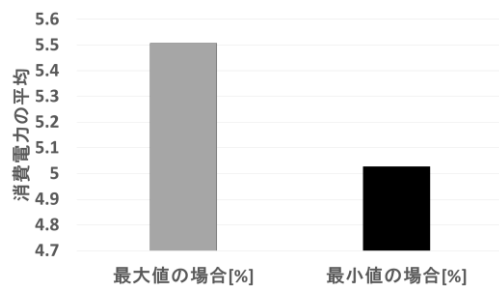


図4 個体毎の消費電力の平均

Figure 4 Average Power Consumption for each Individual

図3は縦軸は個体毎の消費電力の標準偏差を示し、図4の縦軸は個体毎の消費電力の平均を示す。図3、4について見ると、総電力が最大となる時の消費電力の標準偏差に比べ、最小となる時の消費電力の標準偏差は半分以上値が小さいことから、総電力が最小の時の個体毎の消費電力はばらつきが少ない傾向があることが確認できた。逆に、総電力が最大値の時の個体毎の消費電力はばらつきが多い傾向があることが確認できた。また、図4の個体毎の消費電力の平均では、最大値の時の個体毎の消費電力の平均に比べ8.7%最小値の個体毎の消費電力の平均が少ないことが確認できた。

4.3 考察

4.2節により本研究の提案手法では、個体数が増加するにつれて総電力の削減量が増加することが確認できた。また、総電力が最小となる個体と動作の組み合わせの個体毎の消費電力はばらつきが少ない傾向が把握できたことから、総電力を削減する手法として個体毎の消費電力を同値に近づけることにより総電力が削減できる可能性があると考えられる。更に、総電力が最小となる時の個体毎の消費電力の平均は総電力が最大となる時の個体毎の消費電力の平均に比べて数値が低い。このことから個体毎の消費電力の差を考慮して個体毎のすべての消費電力を低下させることで総電力の削減は可能だとも考えられる。また、総電力の削減量が個体数を増やしていくとともに上昇していることについては、結果的に動作させている個体の消費電力を低

下させていることから、個体が増えれば増えるほど低下させることができる消費電力が増えるためだと考えられる。

5. 実験

5.1 目的

3章にて示した予測式はハードウェアの消費電力傾向と稼動状態について、移動と停止からの動作による消費電力を足し合わせた式とした。しかし、実際のロボットの消費電力傾向が、この方法で正確に予測することができるのか実機を用いた検証が必要である。

そこで本研究では、実機を用いた検証を行う。具体的には、速度変化による消費電力の変化と距離あたりの消費電力と1回あたりの停止状態からの動作による消費電力の2つの値を実際の動作から検証する。比較として速度の変化による消費電力の変化の有無、距離あたりの消費電力を確認するものとした。実機にはiRobot社が開発したiRobot Create1を用いる。消費電力の変化はCOIL[9]というライブラリ内の関数を用いて取得したバッテリー残量[%]から推測して求めた。

5.1.1 実験内容

実験の目的より、実際の動作での距離あたりの消費電力と1回あたりの停止状態からの動作による消費電力の個体差の程度の把握と、個体差自体を取得する。加えて、速度を変化させることによって上記の2つの値に変化が生じるのかも検証し、値の変化の程度を把握する。ここで動作A、Bのそれぞれの定義を行う。

動作:A

- (A-1)数秒ログを取らず20mm/sで直線動作
- (A-2)設定された速度で直線動作
- (A-3)壁に衝突したときに回避行動をする
- (A-4)A-2、A-3の動作を移動距離のデータが50m以上となるまで行う
- (A-5)A-4の動作中リアルタイムでログを取得

動作:B

- (B-1)数秒ログを取らず20mm/sで直線動作
 - (B-2)設定された速度で直線動作をしつつ意図的に停止回数を増加させるために30秒に1回1秒停止させる
 - (B-3)壁に衝突したときに回避行動をする
 - (B-4)B-2、B-3の動作を移動距離のデータが50m以上となるまで行う
 - (B-5)B-4の動作中リアルタイムでログを取得
- また、衝突時に50m進む前に動作を停止してしまう場合が存在したが、その時のログデータは使用しない

5.1.2 消費電力の算出方法

実機を用いて、そこから消費電力の情報を定期的にログに記録させ、記録された値をもとに、消費電力を算出するものとした。消費電力は、ログに記載された消費電力と、移動距離の2変数で回帰分析を行い、回帰係数を距離当た

りの消費電力とした。次に、動作Aに比した動作Bの消費電力の上昇量を動作Bのログの停止回数と動作Aのログの停止回数の差で割ることで1回当たりの停止状態からの動作による消費電力とした。この2つの値を個体毎、速度ごとにまとめ評価する。

5.2 評価結果

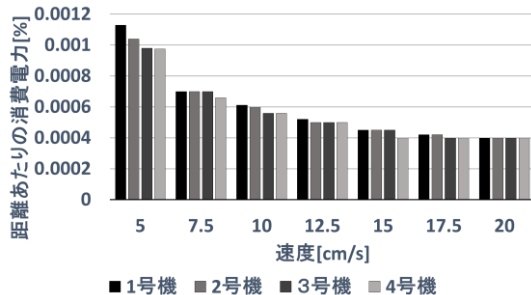


図5 速度の変化による距離(1cm)当たりの消費電力[%]の個体差

Figure 5 Individual Difference of Power Consumption[%] per Distance (1cm) due to Speed Change

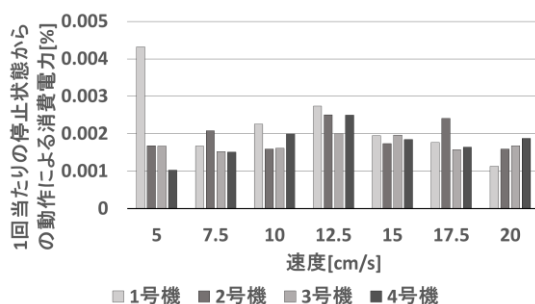


図6 1回あたりの停止状態からの動作による消費電力[%]の個体差

Figure 6 Individual Difference of Power Consumption[%] by Operation from Stopped State per One Time

図5に距離あたりの消費電力を示した。図6は停止状態からの動作による消費電力を示しており、図5のグラフの値は1cmを一定速度で移動する時の消費電力を示している。また、図6の値は1回あたりの停止状態からの動作による消費電力を示す。それぞれのグラフより距離当たりの消費電力、1回あたりの停止状態からの動作による消費電力ともに速度毎、個体ごとに変化があることが確認できた。図5において、速度の上昇につれて消費電力が低下していく形で変化が確認できた。また、各速度の個体毎の消費電力を比較すると、同速度にもかかわらず消費電力が一定ではなく、値に差が生じている。この差は高速になるにつれて小さくなっている。図6においての消費電力は図5のように速度に反比例するような変化は生じていないものの、一定の消費電力となっているわけではなく、速度に応じて増減していることが確認できた。各速度の個体毎の消費電力の比較については、図5の個体毎の消費電力の差よりも変化が大きいことが確認できた。これらの結果から現状検

証した距離当たりの消費電力と停止状態からの動作による消費電力の2つ値は速度により変化が生じ、かつ同速度にもかかわらず個体毎に値が増減することが確認できた。このことから消費電力予測式での2つの値にあたる変数は速度毎、個体毎に区別する必要があると考えられる。

また、今研究では検証はしなかったが、図5のグラフより距離あたりの消費電力は使用するロボットの移動速度の上昇につれて低下していることが確認できたため、動作の移動速度を高速にすることで個体毎の消費電力の削減が可能であると考えられる。今回のデータである図6の速度5cm/sの1号機の値が異常に高い。ここで、速度5cm/sでの実験で取得した動作Aと動作Bの停止回数の個体毎の平均をグラフとしたものとその差分をグラフとしたものを以下に示す(図7、図8)。それぞれ、縦軸が停止回数であり、横軸が個体名称である。

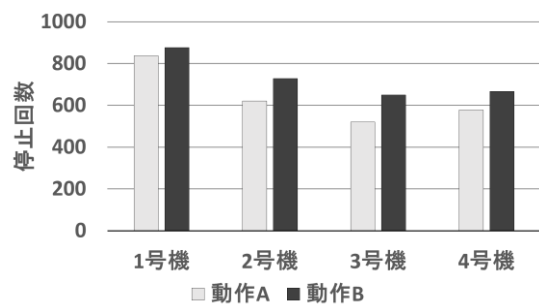


図7 速度5cm/sでの停止回数の平均の比較

Figure 7 Comparison of the Average Number of Stops at a Speed of 5cm/s

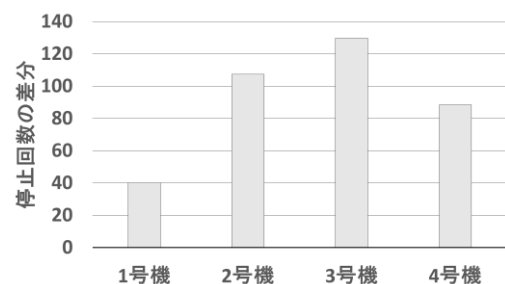


図8 速度5cm/sでの動作Aと動作Bの停止回数の平均の差分

Figure 8 Difference between Average of Stop Times of Operation A and Operation B at Speed 5cm/s

図7に示したとおり、今回の実験では1号機の停止回数が他の個体と比較し、停止回数の平均が200回近く多く、異常な値の原因となっていると考えられる。また、停止回数の差分である図8で確認できた通り、1号機は他の個体よりも差分の数値が半分以上の差があることがわかる。そのため、1回当たりの停止状態からの動作による消費電力の上昇量は動作Aに比した動作Bの消費電力の上昇量を動作Bのログの停止回数と動作Aのログの停止回数の差で割ることで求めていることから、他の個体より消費電力の値

が多くなってしまったと考えられる。

5.3 予測式の精度

今回の実験によって得られたある個体 x で実際に動作させた場合での消費電力のデータ(以下実測値)と予測式で求めた消費電力の値(以下予測値)を比較した(図 10)。予測値は、予測式に同個体 x の CPD_x^V , CPS_x^V と実測値を取得しているデータの停止回数を入力し、 D_y を 5000 に固定して行った。これは、実験において設定した動作は 50m の移動で終了するためである。

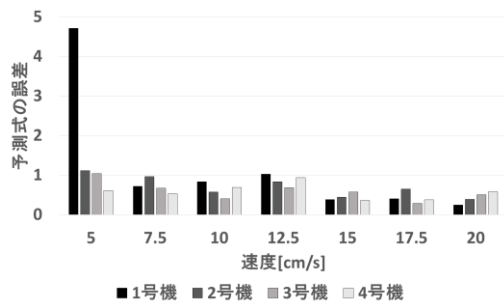


図9 個体毎の実測値と予測値の誤差

Figure 9 Error between measured value and predicted value for each individual

図9より、ほとんどの速度では誤差は1%付近であるが、速度 5cm/s の場合の1号機のみ誤差が5倍に近い。5.3節で述べたように、停止回数が1号機のみ多いことから値がずれているため誤差が大きくなっていると考えられる。そこで、停止回数と誤差の関係を比較した(図 10)。

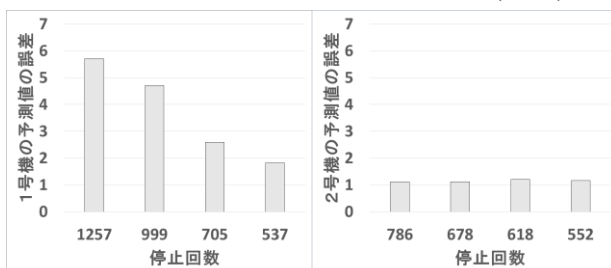


図10 1号機の予測値の誤差(左)と

2号機の予測値の誤差(右)

Figure 10 Error of the predicted value of Unit 1 (left) and Error of predicted value of Unit 2 (right)

2号機と比べて1号機の誤差は停止回数によって大きく上下していることが確認できる。このことから、1号機は CPS_x^V の値が正常に取得できなかったと考えられる。

6. まとめ

研究では、総電力の削減の手法としてロボットの動作に使用する消費電力の差異を考慮して動作を入れ替えるという手法を提案した。しかし、先述した課題が残っておりそれを解決する必要がある。今後は課題を解決しながら、データをリアルタイムにサーバに送信し、サーバでデータを

分析し動的に動作を割り振ることによって総電力の削減を目指すことなどや、iRobot Create1 のみではなく宅配サービスなどで現在注目されている空中を飛行するドローンなどを用いて再度実験を行い、この手法で効果的に削減が可能かなどを検証していきたい。また、現在の提案手法は総電力の削減を目的としているが、稼働時間に影響があった場合にどちらを優先するべきかなども今後は考えたい。

謝辞 本研究を行うにあたり、省電力研究の芝浦工業大学、工学部情報工学科学佐美公良先生、農工大学、工学部、情報工学科並木美太郎先生からアドバイスをいただき感謝いたします。

参考文献

- [1]経済産業省.ロボット新戦略.平成 27 年度版.2015<http://www.meti.go.jp/press/2014/01/20150123004/20150123004b.pdf> (参照 2017-07-25)
- [2]経済産業省.ロボット導入実証事業・事例紹介ハンドブック 2016.平成 28 年度版. 2016. http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/pdf/20160426001_01.pdf (参照 2017-07-25)
- [3]"Amazon がドローン宅配をイギリスで検証開始、13 分で初配送を完了".TechCrunch.<http://jp.techcrunch.com/2016/12/15/20161214amazons-prime-air-delivery-uk/>(参照 2017-07-25)
- [4]高須雅義他.“組込みプロセッサにおける省電力機構の実機評価”,組込みシステムシンポジウム 2012, 2012, p.79-p.86
- [5]菅沼孝二他.“サーバへのタスク配置がデータセンタの総消費電力に与える影響の評価”,信学技報.2014, vol.113, no.472, p.185-190
- [6]仲川幸子他.“クラウドロボティクスにおけるロボットの消費電力を考慮したタスク分散処理”,DICOM2013 シンポジウム.2013.p.3-p.10
- [7]清水航平他.“複数台の分散移動ロボットの動作と電力消費特性に基づく管理手法の提案”,情報処理学会第78回全国大会, 2015.
- [8]坂村健.超低消費電力組込みソフトウェアプラットフォーム:TK-SLP(T-KernelSuper-LowPower)の研究開発.平成 26 年.2014.http://www.soumu.go.jp/main_content/000323271.pdf (参照 2017-07-25)
- [9]iRobot Corporation. iRobot Create OPEN INTERFACE.http://www.irobot.com/filelibrary/create/Create%20Open%20Interface_v2.pdf(参照 2017-07-25)