

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04568

研究課題名（和文）サーバ・クライアント構造によらない分散型リソース配分制御システムの研究

研究課題名（英文）Research on distributed resource allocation control system without server-client structure

研究代表者

佐伯 孝尚（Saiki, Takanao）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：10415903

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：サーバ・クライアント構造によることなく、系全体のリソース制約を充足する新しい分散制御システムの有効性を、深宇宙探査機のヒータ制御システムを想定した分散型小型ヒータモジュールを試作・動作させることによって実証した。分散制御では、各個体が自由に制御を行うため、全体のリソースの管理は困難である。そこで、消費電力の許容上限と現在の消費電力との差分を、各個体に同報する機能を追加し、分散制御でありながら系全体のリソース制約を満足させることに成功した。本研究により分散システムの実用性を向上させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

独立分散制御においては、系全体の制約を満たすためには、一般的に個体間で共有する情報量を大きくする必要があり、個体間通信等が実用化の際に課題となっていた。本研究は、それを解決する方法を示したものであり、分散システムの実用性を向上させるものである。また、本研究で試作したヒータ制御ユニットは、高い冗長性と独立性を併せ持つシステムであり、実際の宇宙機に搭載することで、ヒータ制御システムのロバスト性の向上や製造コストの削減に貢献可能である。本研究成果はリソース制約のある大規模系に適用可能であり、大規模システムの設計・製造の革新的な構造改革を促すものである。

研究成果の概要（英文）：The effectiveness of a new distributed control system that satisfies the resource constraint of the entire system without using a server-client structure was demonstrated by prototyping and operating distributed small heater modules, which are assumed to be a heater control system for a deep space probe. In distributed control, it is difficult to manage the overall resources. To solve this problem, we added a function to broadcast the difference between the allowable upper limit and the current power consumption to each module and succeeded in building a distributed system that satisfies the overall resource constraint. This research has improved the practicality of distributed systems.

研究分野：航空宇宙

キーワード：独立分散制御 航空宇宙システム

1. 研究開始当初の背景

限られた共通の資源を使用する、複数の構成要素からなる系では、各要素が自由に制御を行い、資源が不足することが問題となる。そのため、資源の不足を避けるために、各要素への資源の分配を管理すること(リソース管理)が重要である。機体内の複数の点をヒータで温度調整する宇宙機もこのような系の一例である。特に深宇宙探査機においては、高いエネルギーの軌道に投入するため、探査機自身の極端な軽量化が求められるとともに、太陽距離の大きな領域も飛行するため、電力リソースは不足しがちであるため、その有効利用は大きな課題となっている。

宇宙機のヒータ ON/OFF 制御においては、設定スレッシュホールド温度を下回るとヒータ抵抗に通電されるという、単純な ON/OFF 制御が長い間採用されてきた。この方式では、多くのヒータが同時に ON となることもあれば、その逆もあり、全ヒータの消費電力には脈動が生じることとなる。そのため、宇宙機の発生電力は大きな余裕を見込む必要があり、有効利用できる電力が現状してしまうという問題があった。小惑星探査機「はやぶさ」では、このヒータ消費電力を時間とワット数で量子化させて、集中制御装置である HCE(Heater Control Equipment)が、これらを一定時間ごとにパッキングする方式で、消費電力の平滑化(ピークカット)制御を行なった。この機能は、「はやぶさ」で実証され成功裏に有効性が証明され、「はやぶさ2」をはじめとする後続の探査機等に受け継がれている。一方で、本方式は、HCE が各個体(各ヒータ)を集中的に監視・集中制御するシステムであるため、集中制御個体である HCE の故障に対し脆弱である。更に、消費電力平滑化のためのパッキングには、各ヒータの消費電力、必要デューティ等の事前の設定情報が必要であり、熱制御システムの最終的な構築が、ヒータ位置や消費電力が決定され、熱解析によるデューティ予想がなされた後となり、熱制御システムの構築性・拡張性に難点があるという問題がある。

系のロバスト性を向上させるためには、分散型制御を導入することが有効的であると考えられる。最も単純な方法は、上記のピークカット制御則をそのまま適応することであるが、その場合は、集中型制御と同様に、事前の設定情報および各点の温度情報のある個体に集結させ、その個体が平滑化計算を行い、各個体に制御コマンドを配信するというループを形成することとなる。これは、ある個体がサーバとなったサーバ・クライアント構造を構成することであり、分散型制御を取り入れて、サーバとなれる個体を増やしたのみであり、故障に対するロバスト性を向上することはできても、系の構築性・拡張性については改善されない。また、収集するデータ量が多いため個体間の通信負荷が高い。これらを改善するためには、サーバ・クライアント構造によらない新しい情報構造により、各個体の独立性を向上させる必要があった。電力不足の際に、電力会社が、翌日の使用電力予想情報を発表し、全体の消費電力の抑制を行っていたことを考えると、系の状態を表す少ない情報を共有しさえすれば、各個体間での情報のやりとりを行うことなしに、系全体の消費電力の制御が可能であるはずという着想から本研究の提案に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙機のヒータ制御システムを想定し、サーバ・クライアント構造に依らない、新しい情報構造を持つ分散型制御システムを構築することである。電力会社の電力不足予想情報の提示のアナロジーから、各個体の状態を一箇所に収集するようなサーバ・クライアント構造を持たず、系全体の消費電力に関する情報のみを同報送信する一方向の情報構造を持つ分散制御システムを提案し、その有効性を示す。同法送信とは、各個体に対して同じ内容を一齐送信することであり、本研究では、システム全体での消費電力の規定値からの逸脱量を各個体に同法することで、各ヒータが独立に並列処理を行い、全体の消費電力のピークカットを行うヒータ制御システムを扱う。数値シミュレーションにて本制御方式の有効性を示すと同時に、これらの機能を実装した小型ヒータ制御ユニットを試作・動作試験をすることで、提案した分散制御システムの有効性を実証することを目的とする。

提案する情報構造は、一方向でかつ通信負荷が低いいため、情報伝達のための通信のワイヤレス化を容易とする。同報通信を無線通信化することで、将来の宇宙機のバスシステムの革新的な発展を促すことも本研究の目的の一である。ワイヤレス化は、宇宙機ごとに一品ものとして設計している多数のコネクタや配線ケーブルを省略することができ、宇宙機の開発コスト低減や短期開発に貢献することが期待できる。後述するが、2年目までにワイヤレス通信機能を実装したヒータユニットの試作と動作試験を行い、その実用上の課題を確認した上で、それらを解決する新たな通信方式として、電力線通信(PLC: Power Line Communication)の実用検討を最終年度で実施している。

本研究で試作するヒータユニットは実機への搭載を意識し、小型化等、搭載するための制約を可能な限り取り込み、実用化への課題を抽出しつつ、実験室レベルでの試作段階を完了させることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、まず、ヒータ制御システムに求められる機能の抽出、整理を行った上で、分散型制御アーキテクチャおよび制御ロジックの検討・設計を行った。制御則については、まずは PC 上にフルソフトウェアシミュレーション環境を整備し、シミュレーションによって、制御ロジックの妥当性、性能の確認を行った。その後、ワイヤレス通信機能を実装した小型制御ユニットの試作と、そのソフトウェアの制作を実施した上で、性能の評価と課題の抽出を行なった。最終年度については、昨今の社会状況を考慮し元々予定していた学会参加を取りやめ、2 年目までに抽出されたヒータ基板実機搭載のための課題の対策の検討と、ワイヤレス通信に代わる電力線通信の実用可能性の試験を行なった。

年度ごとの実績概要は以下の通りである。

平成 30 年度

フルソフトシミュレーションでの制御ロジックの有効性の確認と、既存の簡易ヒータユニットに対する基本組み込みソフトウェアの試作・基本動作確認。

令和元年度

実用性を意識した小型ヒータ制御ユニットの試作とソフトウェアの製造。動作試験による制御ロジックの有効性の実証と実用化のための課題の抽出。

令和 2 年度

前年までに抽出された課題の解決方法の検討と回路レベルでの改良検討(基板試作は行っていない)。評価ボードを使用した PLC 通信の適応可能性の確認。

4. 研究成果

(1) 制御ロジック妥当性確認

独立分散制御方式では、各ヒータが(周囲の状況に関係なく)独立に電力使用量の計算を行う。そのため、系全体の消費電力の脈動が発生する。そのため、電力使用量の総和がある制約以内になるような制御ロジックが必要となる。

本研究では、各個体の温度データを共有することなく、系全体の消費電力上限を守るために、各ヒータが自身の保つべき温度からの逸脱量に加え、同報された系全体の消費電力上限からの逸脱量を積算していき、その量があるスレッシュホールドを超えるとヒータを ON するという単純なロジックを採用している。その結果、常に系の消費電力がフィードバック制御されるという効果が現れる。系の電力が不足している場合には、各個体が自身の温度逸脱量が小さいものはヒータの ON を控えるという動作をすることにより、消費電力の制約が満たされる。

平成 30 年度には、フルソフトシミュレータを実装し、この制御ロジックの妥当性を確認した。図 1 は各個体が一定温度を保つという単純なシミュレーションであるが、提案ロジックのおかげで、消費電力の脈動を抑え、消費電力制約を満たす制御を行えることを示している。本ロジックは、各個体に個性を与えることも可能であり、温度逸脱を許容しない個体が系の中に存在しても、他の個体が電力使用を控えることで消費電力制約を満たすことができるため、非常に実用的なものである。

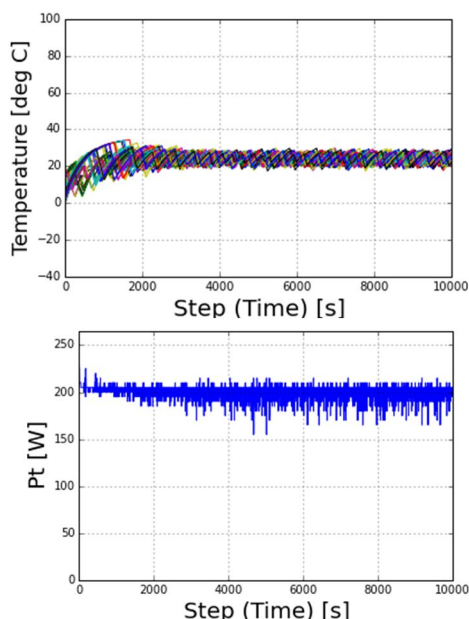


図 1: ヒータ制御シミュレーション結果 (上図: 温度履歴, 下図: 全体消費電力)

(2) ヒータ制御ユニットの試作と動作確認

令和元年度には、本制御ロジックの実用性を示すために、図 2 に示すような小型のヒータ制御ユニットの試作を行った。ユニットは、温度データを収集するためのプロセッサ、温度センサインタフェースおよびヒータの ON/OFF 回路を持つ。同報機能については、図 2 の赤枠で示す無線(Zigbee)通信機能を実装した。一般的な分散制御においては、各個体間の通信が必要となるが、本システムでは、一方向の同報機能を使用し、制御のために温度データの収集は必要でないため、無線通信でしばしば問題になる混線の恐れはない。

同年には本試作ユニットを使用した温度制御試験を実施した。図 3 左に示すように 5 つのユニットを実装し、各ユニットの制御を実施した。電力ピークを満たしつつ、図 3 右に示すように、各ユニットの温度を制御する

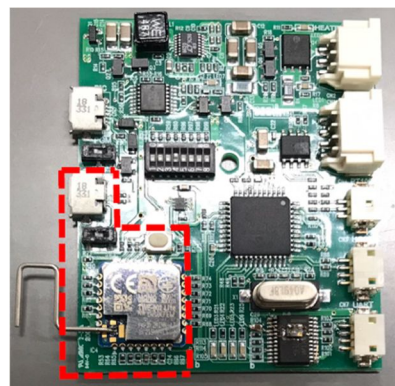


図 2: 試作したヒータ制御ユニット

ことが出来ており、ハードウェアを用いたより高レベルの実証を行うことが出来た。一方で、試験の中でいくつかの課題も見つかった。特に無線通信においては、ユニットの配置によっては回線が不安定になることもあり、実宇宙機への実装のためには、無線ネットワークの頑強化等が必要になると判断した。

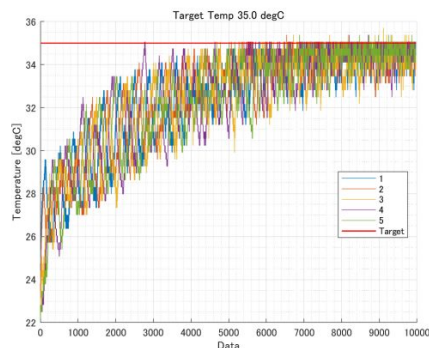
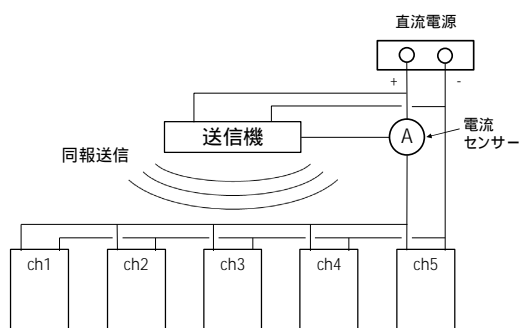


図 3: 試験コンフィグレーション(左)と温度制御の様子(右)

(3) 実用化のための改修と電力線通信の導入の検討

令和 2 年度は、前年度抽出された課題の解決に向けた研究を行なった。特に問題となった無線通信に代わる通信方式として、電力線通信(PLC)の導入を検討した。

PLC は IoT 社会の拡張に向けた有力な通信方式であるとして昨今研究が進められており、また古くから自動車の制御等の分野においても研究がなされてきた通信方式である。宇宙機においても、計装線の削減が見込まれるため実用化が期待される一方で、センサ等へのノイズ源となりうるため敬遠される傾向にある。前述の通り本研究の温度制御は、ユニット間の通信が必要なく狭帯域通信で十分であるため、通信キャリアを適切に選ぶことによってノイズの問題にも対応可能と考え、図 3 左の通信機能を図 4 に示すような電力線通信ボードに置き換えて、簡易的な通信試験を行なった。

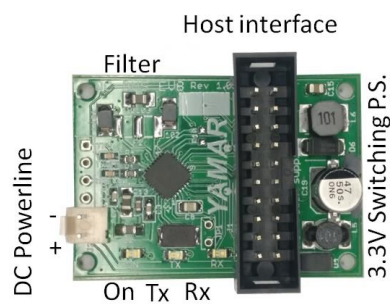


図 4: 電力線通信ボード

結果、同報送信機能が問題なく行えることを確認できた。本研究期間内では、PLC を導入した制御ユニットの試作までは至らなかったが、より頑強な通信機能を持ったヒータ制御システムの実現可能性を示すことが出来た。

電力線通信の導入以外にも、基板サイズの削減や複数 ch 化、宇宙環境対応(シングルイベント対策)等の改修について回路図レベルの検討を完了した。

(4) まとめ

本研究では、宇宙機のヒータ制御システムを題材に、全体リソースを管理可能な分散制御システムの実証を行なった。宇宙機システムにおいては、従来から集中型の管理が行われている。これは、地上でデータを一極管理することと親和性が高く、また、宇宙機そのものも一品ものとして製造されるためである。一方で、昨今小型衛星技術の洗練によって、多くの宇宙機を打ち上げるという世界が実現しつつある。そのためには、従来行っていた一品ものの設計・製造から、必要な部品を組み合わせることで即応的に多種多様な宇宙機を製造するという、設計・製造の革新的な構造改革が必要となる。本研究は、独立性の高い分散型システムを実現し、Plug and Play 的なシステム構築・拡張を可能とするものであり、上記の構造改革に貢献する画期的なものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Kubo Yuki、Umeda Keisuke、Motegi Risa、Saiki Takanao、Kawaguchi Junichiro | 4. 巻 69 |
| 2. 論文標題 Development of General-Purpose IoT Module and Its Application to Broadcast-Type Autonomous Distributed Heater Control System | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 68～71 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/jjsass.69.68 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 川口 淳一郎、濱田 信光、久保 勇貴、佐伯 孝尚、茂木 倫紗 |
| 2. 発表標題 小型衛星向け高容積比推力・高密度コールドガススラスタ と、IoT・無線独立分散ヒータ制御パッチの実用化 |
| 3. 学会等名 第20回宇宙科学シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 川口淳一郎、大木優介、佐伯孝尚、森治 |
| 2. 発表標題 ピーク電力制約を確保する同報送信型分散ヒータ制御システム |
| 3. 学会等名 第19回宇宙科学シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 佐伯孝尚、山田修平、久保勇貴、川口淳一郎 |
| 2. 発表標題 同報送信を用いた分散ヒータ制御システム |
| 3. 学会等名 第21回宇宙科学シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|