

令和元年5月22日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06411

研究課題名(和文) 次世代ビルエネルギー管理のための物理融合型分散最適化手法と制御シミュレータ開発

研究課題名(英文) Physics-integrated Distributed Optimization towards Next-generation BEMS and Development of BEMS Simulator

研究代表者

畑中 健志 (Hatanaka, Takeshi)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：10452012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：分散最適化アルゴリズムを動的システムとみなす視点を提案し、既存のアルゴリズムがいずれも受動性と呼ばれるクラスに属するシステムの結合であることを示した。また、受動性を用いることでアルゴリズムの高速化や外乱・通信遅れに対するロバスト化を実現できることを示した。さらに、ビルの熱ダイナミクスが有する受動性を明らかにし、物理世界と最適化アルゴリズムを結合したサイバーフィジカルシステムが受動システム同士のフィードバック結合として設計できることを示した。実際のビルを模したシミュレータを構築し、これに実時間制御機能を付加することでエネルギー管理アルゴリズムの実装を可能にし、提案アルゴリズムの有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超スマート社会の実現に向けて、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合したサイバーフィジカルシステムが核心をなす技術と目されている。しかしながら、これをどのような動機で、いかなるアーキテクチャで構築するかについて、理論的に明示した研究は必ずしも多くない。本研究の成果はビルエネルギー管理を対象に、システム制御の観点からこれを明らかにするもので、学術的にはもちろんのこと、社会的な要求にも資するものである。また、ここではフィジカルからサイバーへのパスは人間に係る不確かさによって動機付けられており、Cyber-Physical & Human System(CPHS)の端緒ともなっている。

研究成果の概要(英文)：We present a perspective that distributed optimization algorithms are regarded as dynamical systems, and such algorithms are shown to be interconnections of passive systems. Based on passivity theory, the algorithms are accelerated and robustified against disturbances and communication delays. We then design a cyber-physical system interconnecting building thermal dynamics and the optimization algorithms as a feedback interconnection of passive systems. Accordingly, we prove stability and asymptotic optimality with adaptation to environmental changes for the overall cyber-physical system. We also build a building energy management simulator capable of real-time feedback by combining a building energy simulator, EnergyPlus, and MATLAB/Simulink through middleware called MLE+. The present cyber-physical system is then demonstrated on the simulator.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：ビルエネルギー管理 分散最適化 受動性 実時間シミュレータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1-1. 経済合理性と環境への適合を両立するエネルギーの安定供給は国家レベルでの再重要課題であった。経産省の長期需給見通し(2015)では、そのための重要施策の一つとして、省エネの徹底が挙げられており、特に業務部門においては、BEMS(Building Energy Management System)の導入が有望なソリューションの一つとされていた。

1-2. 海外では、モデル予測制御を中心とするソリューションを元に、システム制御の観点からBEMSを構築し、検証を行う研究が活発に行われ始めていたが、国内からの貢献は非常に限定的であった。

1-3. モデル予測制御は有望なオンライン最適化手法ではあるものの、安定性や最適性に関する厳密な保証を欠くという欠点があり、また通常は計測できない状態変数の利用や人間の活動に起因する計測が難しい外乱要因のモデルを要求するなど、実用に向けては多くの課題があった。

1-4. 過去の研究においては、構築した制御アルゴリズムは設計用モデルを用いた簡易シミュレーションか実物のビルに直接適用することによって検証を行っていた。しかしながら、前者は十分な検証がなされず、後者はその環境を構築するまでに多大な労力が必要となり、これが本研究を進める上で大きな障害となっていた。

### 2. 研究の目的

2-1. 項目 1-3. で述べた問題点、つまり計測することも事前にモデル化することも難しい要素へのアプローチとして、物理世界からのフィードバック情報を元にサイバー世界でそれらの要素を推定し、さらに推定結果を最適化アルゴリズムに反映させた上で結果を物理世界に返す物理融合型の最適化手法を構築することを目的とした。申請当時は声高に叫ばれてはいなかったが、現在ではこのシステム構成をサイバーフィジカルシステムと呼び、Society 5.0 の根幹を成す技術と目されている。

2-2. 複数ビルの統合エネルギー管理を考える場合には、ビルの構造やその中の人間の活動を集めた上で集中的に推定や最適化を施すのは難しい。そこで、これらの処理を各ビルに分散化させる物理融合型分散最適化アルゴリズムの構築を目的とした。

2-3. 項目 1-4. で述べた問題点、つまりアルゴリズムの検証の難しさを緩和するため、本格的なビルエネルギー管理シミュレータにリアルタイム最適化・制御機能を付加した制御シミュレータを構築すること、また上記のアルゴリズムの検証を行うことを目的の一つに据えた。

### 3. 研究の方法

3-1. 項目 2-1. の達成に向けて問題となるのはサイバー世界の最適化アルゴリズムと動的システムで表現される物理世界をどう統合的に解析・設計するかという論点である。そこで、本目的の達成に向けた準備として、最適化アルゴリズムにリバースエンジニアリングの視点を適用し、最適解の求解プロセスを動的システムとみなす。まずは制約条件のない問題から出発し、等式制約、不等式制約をもつ問題へと一般化を図る。

3-2. 項目 2-2. の達成に向けて、複数のコンポーネントが局所的な目的関数と制約条件のみを用いて状態を更新することで全体最適解を求解するアルゴリズムを、やはり動的システムとみなして解析、設計を行う。

3-3. 項目 3-1. および 3-2. により、サイバー世界と物理世界の相互結合を動的システム同士の結合というシステム制御が最も得意とする枠組で解析・設計できる。この視点に基づいて、物理世界を融合した最適化アルゴリズムを構築し、全体の安定性や最適性を理論的に保証する。さらに、統合エネルギー管理における分散アルゴリズムに対しても同様の性質を保証する。

3-4. ビルエネルギー管理シミュレータ EnergyPlus 上に東京工業大学の 3 つの実際のビル(南 5 号館、西 8 号館、環境エネルギーイノベーション棟)を模したシミュレータを構築する。また、Building Resistance-Capacitance Modeling (BRCM) Matlab Toolbox を用いて、アルゴリズム設計用の簡易モデルの構築を自動化する。さらに、EnergyPlus と制御系設計用の CAD である MATLAB/Simulink をリアルタイムで連携させるミドルウェアを用いて実時間制御ビルエネルギー管理シミュレータを構築する。

### 4. 研究成果

4-1. 制約のない凸計画問題に対する勾配法の求解プロセスを動的システムとして記述し、それが受動的なシステムの相互結合システムであることを明らかにし、最適解への収束が受動システムの理論によって証明できることを示した。

4-2. 上記の成果を制約のある凸計画問題に拡張し、主双対勾配法の求解プロセスがやはり受動システム同士の相互結合システムであることを明らかにし、最適解への収束が受動システムの理論によって証明できることを示した。

4-3. 項目 4-2.をもとに、合意勾配法と呼ばれる分散最適化アルゴリズムが受動システム同士の相互結合であることを発見し、最適解への収束が受動システムの理論によって証明できることを示した。さらに、要素ごとの情報交換に通信遅れが存在する場合を考え、スキュアリング変換と呼ばれる受動システム理論に基づく設計法を適用することで、通信遅れの存在下においても安定性と最適解への収束が実現できることを明らかにした。これらの成果は当該分野の最難関論文誌である IEEE Transactions on Automatic Control に採択された。

4-4. 合意勾配法に限らず、主双対勾配法に基づく分散最適化アルゴリズムのほとんど全てが受動システムの結合という構造を有していることを示した。また、受動システムの設計自由度を利用し、アルゴリズムの高速化、外乱へのロバスト化が実現できることを例証した。さらに、この設計自由度を用いることで、分散最適化アルゴリズムの多くが要求する評価関数への仮定を大きく緩和できることを示した。

4-5. 上記の最適化ダイナミクスを結合するビルの熱ダイナミクスが受動的であることを示した。また、各部屋の温度計測値から計測不可能な人の活動に係る外乱をリアルタイムで推定するために、設定温度への室温の追従を果たす PI 制御に外乱オブザーバを併用したローカル制御系を構築し、その閉ループ系がやはり設定温度から外乱推定値まで受動システムであることを示した。

4-6. 最適化ダイナミクスと 4-5.の物理ダイナミクスの相互結合が受動システム同士のフィードバック結合である事実を元に、全体システムの安定性、室温の最適温度への収束を理論的に示した。また、提案アルゴリズムは構造的に時々刻々と変化する計測不可能外乱を反映した最適解への追従という環境適応性を実現することを示した。

4-7. 項目 4-6.を複数ビルの統合エネルギー管理の問題に拡張し、分散最適化アルゴリズムを用いても同様の性質が保証されることを示した。以上の成果は当該分野の最重要国際会議である IEEE Conference on Decision and Control に採択された。

4-8. 項目 3-4.に記載したシミュレータを構築し、上記のエネルギー管理アルゴリズムをシミュレータ上に実装し、その有効性を示した。さらに、アルゴリズム中のパラメータが古典的なループ整形の手法を元に系統的に設計できることを示し、性能の向上を確認した。なお、当初は EnergyPlus と MATLAB/Simulink を連携させるミドルウェアとして BCVTB と呼ばれるものを想定したが、研究途上で MLE+ と呼ばれるより可用性の高いミドルウェアが公開されたため、これを使うこととした。

4-9. BRCM toolbox が出力する簡易モデルの精度が太陽光の影響を加味した際に大きく劣化することを明らかにし、関連パラメータの再同定法を機械学習の手法に基づいて提案し、それが正しく機能することを確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

[1] T. Hatanaka, N. Chopra, T. Ishizaki and N. Li, Passivity-Based Distributed Optimization with Communication Delays Using PI Consensus Algorithm, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有り, Vol. 63, No. 12, pp. 4421-4428, 2018 (DOI:10.1109/TAC.2018.2823264)

[2] H. Dan, T. Hatanaka and H. Shim, A Modularized Design for Output Synchronization of LTI Dynamical Networks with Communication Delays, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有り, Vol. 11, No. 6, pp. 495-501, 2018 (DOI: 10.9746/jcmsi.11.495)

[3] 船田陸, 山下駿野, 畑中健志, 藤田政之, 受動性に基づく分散協調型 3 次元視覚人間位置推定アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, 査読有り, Vol. 54, No. 6, pp. 547-556, 2018 (DOI: 10.9746/sicetr.54.547)

〔学会発表〕(計 15 件)

[1] T. Hatanaka, Remodeling of RC Circuit Building Thermodynamics Model with Solar

Radiation Based on A Regularization-like Technique, Asian Control Conference, 2019年6月10日, Fukuoka, Japan

[2] K. Yoshida, Community Energy Management Reflecting Consumers' Preferences: Preference-Independent Control System Design, 2019 European Control Conference, 2019年6月27日, Naples, Italy

[3] 山下 駿野, 受動性に基づく主双対ダイナミクスの一般化と非狭義凸目的関数に対する収束性解析, 第6回制御部門マルチシンポジウム, 2019年3月9日, 熊本

[4] 吉田 圭佑, 人間の意思決定をループに含む制御系設計, 第61回自動制御連合講演会, 2018年11月17日, 愛知

[5] H. Dan, A parallel feedforward compensator approach to output synchronization for a network with non-passive dynamics and communication delay, Proc. of SICE Annual Conference 2018, 2018年9月13日, Nara, Japan

[6] H.-S. Ahn, A Distributed Singular Perturbation Algorithm in A Non-cooperative Game under Limited Control Authority, 7th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, 2018年8月27日, Groningen, Netherlands

[7] 山下 駿野, 受動性とループ整形に基づく分散最適化アルゴリズムの高速化と視覚人間位置推定問題への適用, 第5回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2018年3月9日

[8] 檀 隼人, 非受動的な要素を含むネットワークシステムの分散出力同期制御, 第5回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2018年3月9日

[9] T. Hatanaka, Passivity-based Control and Optimization for Networked Robotics and Beyond, Kimura-Award Commemorative Lecture, SICE International Symposium on Control Systems 2018, 2018年3月9日, 東京 (招待講演)

[10] T. Hatanaka, Physics-Integrated Hierarchical/Distributed HVAC Optimization for Multiple Buildings with Robustness against Time Delays, 56th IEEE Conference on Decision and Control, 2017年12月15日, Melbourne, Australia

[11] 田原 正崇, ビル空調制御・最適化シミュレータの構築と物理融合型最適エネルギー管理アルゴリズムの検証, 第60回自動制御連合講演会, 東京, 2017年11月11日

[12] T. Hatanaka, A Passivity-Based Perspective for Distributed Optimization and Integration of Communication Delays, 2017 SICE Annual Conference, 2017年9月21日, Kanazawa

[13] T. Hatanaka, An Integrated Design of Optimization and Physical Dynamics for Energy Efficient Buildings: A Passivity Approach, 1st IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2017年8月27日, Hawaii, US

[14] 田原 正崇, ビル空調システムの詳細モデル, 動的モデルおよび実時間制御・最適化シミュレータの構築, SICE 第4回 制御部門マルチシンポジウム, 岡山, 2016年3月8日, PS-32, 2017

[15] R. Funada, Distributed Visual 3-D Localization of A Human Using Pedestrian Detection Algorithm: A Passivity-Based Approach, 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NecSys), 2016年9月8日, Tokyo, Japan

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：  
ローマ字氏名：  
所属研究機関名：  
部局名：  
職名：  
研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：ナ リ  
ローマ字氏名：Na Li

研究協力者氏名：ニッキー チョップラ  
ローマ字氏名：Nikhil Chopra

研究協力者氏名：向井 正和  
ローマ字氏名：Mukai Masakazu

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。