

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015 ~ 2017

課題番号：15K06144

研究課題名 (和文) 分布定数系の多分解能システム理論の構築 -モデル表現と包括的成本最適制御-

研究課題名 (英文) Variable Resolution Theory for Distributed Systems - Modeling and Total Cost Optimal Control -

研究代表者

平田 健太郎 (Hirata, Kentaro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：00293902

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,800,000 円

研究成果の概要 (和文) : むだ時間系・分布系のモデル表現について基礎検討をおこない、安定性解析 (モノドロミ作用素のスペクトル解析) や制御系設計 (状態予測制御系の拡張) に関する研究をおこなった。多分解能モデル表現に関して、周波数成分の分離による概周期信号予測とアシスト制御への応用に関する研究をおこなった。可変構造モデルの文脈では、可変分解能モデルによる熱システムのモデル予測制御、LPVモデルによる視覚フィードバック制御の研究をおこなった。またMPCの計算量に関して、非線形最適化と並列計算の観点から、検討した。またこれ以外にも、分布系の問題として、熱系・流体系のモデル化、制御にも取り組んだ。

研究成果の概要 (英文) : Based on the investigation of the modeling issue of delay systems and distributed parameter systems, stability analysis (spectrum computation of Monodromy operators) and controller synthesis (extension of finite spectrum assignment) is done. On a multi-resolution viewpoint, power assist control for almost periodic motions using frequency decomposition is studied. Variable structure strategy includes MPC of the heat process with variable resolution model and LPV control for visual feedback systems. Computational complexity of MPC is approached from the aspects of nonlinear optimization and parallel computation. Also some control applications on distributed parameter systems (e.g., thermal and fluid system) are studied.

研究分野：制御工学

キーワード：モデリング 可変 モデル予測制御

1. 研究開始当初の背景

モデル予測制御は1980年代にまず化学プラントに対して導入が始まった。状態や制御入力に対する制約条件を陽に考慮できることから製造現場を中心に検討が進められたが、オンライン計算の負荷が大きいこと、安定性の保証が(数学的に)従来の制御理論と較べて困難なことなどから、当初の適用は限定的であった。しかし90年代以降は、現実的な問題設定が産業界のニーズと適合し、計算機の性能向上も相まって、次第に短いサンプル周期を必要とするメカトロ系などにも導入が進み、一手法としての市民権を得てきた。様々な分野への浸透にあたって再び問題となるのが、計算負荷の高さである。理論的な位置づけとしては、モデル予測制御は(制約付きの)有限ホライズンの最適制御問題であり、計算時点においては開ループ制御である。これを毎サンプル周期において、現在の状態の観測値をアップデートし、再計算することによって、フィードバック化している。したがって高い計算負荷が求められるのは、手法としての本質的な宿命であり、いかにこれを低減するかは、一層の普及を図るにあたっての今日的な課題である。計算アルゴリズムの高速化、オフライン化、問題・解法の分散化など検討は多岐にわたる。

一方、2000年代になって、大規模システムに対する理論的な考察が脚光を浴びるようになった。現実のネットワーク社会の複雑化や、震災以降の分散電源への関心の高まりが背景にあると思われる。そこで注目されているのが、多分解能をもつモデル・システムの理論である。時々々の要求に応じて、内部的な矛盾を生じないように、必要最小限の解像度でシステムの挙動を把握できれば、対象のもつダイナミクスの本質を直感的に抽出できるばかりでなく、解析・設計のための計算コストも大きく削減できる。モデル予測制御をターゲットとした、多分解能システム理論の構築が望まれる、というのが、研究開始当初の時代背景であったといえる。

2. 研究の目的

シミュレーション科学の発達と計算機性能の向上により、モデル予測制御に代表されるオンラインでの数値最適化に基づく制御手法が台頭しつつある。制御対象の非線形性や入出力・状態に対する制約に対応できるなど、従来のオフライン設計思想にはない特徴を持っており、さらなる発展が期待される一方で、大規模系、とくに熱現象や材料力学的変形を扱う分布定数系への適用は計算量の増大により困難である。そこで近年研究の盛んな多分解能システムの観点からこの問題を捉え直し、新たなモデル表現と制御方を確立する。具体的には、申請者らの先行研究で得られた知見に基づいて、スケーラブルで

精度のよいモデル表現を与え、階層的な制御方針に基づく動的な分解能変更によって計算コストも含めた包括的最適制御を実現する。

90年代以降の関数空間を用いたサンプル値制御理論が複数の時間分解能を近似なしに扱う枠組みを提供するものであるとすれば、他方、情報理論との融合等によって時空間分解能と安定性などの制御性能の関係を明らかにしたのが、2000年代に発展してきた量子化制御である。また、MRシステムやグローバル制御に関する一連の研究もシステムと分解能の問題に対する系統的なアプローチを目指したものである。このように多分解能性がこの20年における制御・システム理論の中心的話題のひとつであることは、工学が取り組むべき対象がますます大規模・複雑化しているという事実および問題意識を的確に反映したものと見えよう。同時に、オンライン計算依存度の高い制御方法が注目を集めているのは、前述のとおりである。状態量が空間的に分布した偏微分方程式系の数値解析においては、時空間分解能が精度と計算量に直接影響するため、両者のトレードオフをどうとるかが重要である。製鉄メーカーと共同で取り組んできた熱間圧延時の鋼板冷却プロセスはその典型であり、従来考慮してきた厚さ方向温度分布を幅・長手方向に拡張する方法を検討する途上で、以下の着想を得た。幅方向の温度ムラを水量の勾配によって制御するには幅方向の温度計算が必須である。しかし前段のプロセスで幅方向の温度ムラを抑制することができたならば、後段のプロセス制御においては(平均としての)代表温度だけを計算してもよいはずである。長手方向の温度ムラについても同様のことがいえるので、空間分解能を下げることで計算量の削減が可能となる。一方で計算機のネットワーク化、マルチコア化によって、消費電力やネットワーク通信などのコストを代償に、限られた時間内での計算能力の増大(ターボブースト)は実現可能となっている。そこで、必要最大限の計算能力を予め仕様として定め、これを満たす設備を導入するという旧来の発想からの転換を図り、時空間分解能に依存する制御性能とアクチュエーションに加え計算のそれも含めた包括的なコストとの間の動的なトレードオフを通して全体最適化を達成するというアイデアに至った。具体的に明らかにすべきポイントは以下の2点である。

- 分布系の多分解能制御に適したスケーラブルなモデル表現の検討
- 動的な分解能変更による包括的最適制御の検討

3. 研究の方法

本研究は、多分解能制御に適した分布系のスケーラブルなモデル表現に関する理論的

探求、動的な分解能変更による包括的最適制御の実装・実験的検証の両面からの展開を図った。前者の理論的取り組みは、先行研究であるむだ時間系のモデル表現を発展させる部分を含んでいるので、これまでの協力関係を鑑み博士後期課程学生、共同研究者との結びつきを重視した推進体制をとった。また後者については、理論構築は博士前期課程の学生と行い、現実問題のエッセンスを凝縮した熱分布制御実験環境を構築するにあたっては、民間企業の共同研究者のアドバイスと若手共同研究者の技術協力を受けた。

むだ時間系は搬送型偏微分方程式とFDLTI要素の結合系と見ることができ、この観点から、状態予測制御の非線形系への拡張・適応化に大きく貢献している。したがって、むだ時間系の Monodromy 作用素表現の離散化で得られた知見を偏微分方程式系へと発展させることは自然な発想である。一方、分布系のシステム表現においては、単に空間解像度を上げることで高い周波数解像度を得ようとするのは合理的でなく、むしろ低次の周波数分解モデルが有用であることが知られている。高次多項式ホールドによる近似は、低周波成分（直流成分としてのゼロ次ホールド）に高周波成分（高次多項式）を重畳することで記述能力を遡増させていると考えられるため、まず、このモデル表現の性質・性能について詳細な検討をおこなった。

研究の直接の動機となったのは、熱間圧延プロセスの鋼板冷却制御であるが、そのような商用大規模プロセスを用いて、モデリングの良し悪しや提案手法の実装による検証を行なうことは現実的ではない。そこで分布系のモデリング・制御実験がコンパクトに実施できる温度分布制御実験プラットフォームを作成した。対象はレーザープリンタの定着ユニットを流用したもので、温度分布を持つ金属ローラーがあり、操作端としてヒーター入力、分布方向にセンサ群（熱電対）が配置されている。

モデル予測制御は、制御対象の非線形性や入出力・状態に対する制約に対応できるなどの利点から注目されている。大規模系に対する分散化（計算負荷低減）は重要な課題であり、広範な研究成果がある。MPCの熱間圧延冷却プロセスへの適用を試みている研究もあるが、熱伝導の一方方向性を仮定して問題を部分問題に帰着しており、多次元の熱伝導現象を直接扱ってはいない。これに対して我々は、3次元の温度分布を扱うMPCを考え、空間分解能が制御性能に与える影響を定量的に評価するシミュレーション検討をおこない、新たな表現モデルと組み合わせたこの方法の有効性を検証する。

次に計算コストも含めた評価関数を設定することで、動的な分解能変更によって包括的最適制御を実現するための理論的、実際的な枠組みを構築することを試みる。

4. 研究成果

むだ時間系のモデル表現と偏微分方程式系への拡張に関して、モノドロミ作用素の定義域とスペクトルの関係についての共著論文が国際誌 IEEE TAC に掲載された。また、高次ホールド近似に基づくモノドロミ作用素のスペクトル計算に関する共著論文が国内誌 ISCI 論文誌に掲載された。これらを発展させた作用素状態方程式表現に基づく状態予測制御系のモデリング、有限極配置の拡張、ロバスト性向上についての論文を国際会議 IEEE ICIT2017 にて発表した。現在、学術雑誌投稿論文を準備中である。また同手法を空圧シリンダの応答遅れに適用した事例に関して、国内学会 SICE MSCS2017 にて発表をおこなった。

多分解能モデル表現に関連して、複数の観点を盛り込んだモデル化の例として、過渡成分と周期成分を考慮した概周期信号予測モデルについて、周期動作の最適アシストの文脈から検討した。これに関する国際会議論文を IEEE ICIT2015, IEEE AMC2016 で発表し、投稿論文が国内誌 JSME 論文誌および英文誌 SICE JCMSI 誌に掲載された。また、トルク推定のために時変季節性 AR モデルを利用したアシスト制御系に関する研究を、国内学会 SICE 中国支部学術講演会で発表した。同発表は、第 26 回計測自動制御学会中国支部学術講演会奨励賞を受賞した。関連する研究として、イナーターを用いたフルパッシブな機構で、トルク脈動に起因するエネルギー効率低下を抑制する方法についても、同講演会で発表している。

可変構造モデルに関しては、LPV（線形パラメータ可変）モデルの視覚フィードバック系への応用に関する国際会議論文を ASCC2017 で発表した。また、熱間圧延後の冷却テーブルにおける鋼板の3次元温度分布制御に関して、可変分解能モデルと階層型制御方策によるモデル予測制御の検討をおこない、国際会議 IEEE IECON2016 で発表をおこなった。また、ハミング距離を用いた局所探索により分割アルゴリズムを高速化する方法について検討し、これについても国内学会 MSCS2017 にて発表をおこなった。同発表は 2017 年 SICE 制御部門研究奨励賞を受賞した。さらに LPV モデル表現に基づくモデル予測制御に取り組んでいる British Columbia 大学の Control Engineering Laboratory を訪問し、可変構造モデルによる MPC についての情報収集・意見交換をおこなった。

モデル予測制御の計算量に関する研究としては、介護における抱き起しを念頭に置いた、最適な立ち上がり動作の自動生成についての研究を進めている。これは非線形モデル予測制御に基づく運動制御と関連が深い。これらの一部を国内会議 MSCS2017 で、発展させた内容を国際会議 SII2017 にて発

表した。さらに、分岐予測と投機実行によるモデル予測制御のリアルタイム化に関する研究にも着手し、可到達集合による未来の状態範囲の推定に基づいて必要な並列計算コア数を見積もる枠組みについての結果を国内会議で発表予定である。

また、市販のレーザープリンタを流用した、温度分布制御実験用のプラットフォームを作成、同実験装置を用いた定着プロセスのモデル化と切替オブザーバによる状態推定(むだ時間補償)に関する結果を国際会議 IEEE ISMS2016 で発表した。さらにその内容を発展させたものを国際誌 IJSSST に投稿し、掲載された。ローラー表面の温度分布モデルを用いた局所加熱方式のエネルギー効率の検討をおこない、国内学会 SICE 中国支部学術講演会で発表した。

さらに分布系のモデル化と制御の観点から、チューブポンプによる圧力変動のない流体の搬送について検討し、共著論文を国際会議 IEEE ICIT2016 で発表した。内容を発展させた論文を現在、国内誌に投稿中である。チューブポンプへの応用については FEM 解析を援用したモデル化、ローターFF 制御による圧力変動低減の実験検証も進めている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

Shota Sasaki, Kentaro Hirata, Yoichiro Masui, Masahiro Samei, Akihiro Kawasaki and Yasuharu Kawarasaki, State Estimation of Thermal Systems with Multiple Operation Modes, International Journal of Simulation Systems, Science and Technology, 査読有, Vol. 17, No. 35, 2016, 8 pages (DOI 10.5013/IJSSST.a.17.35.14)

増井詠一郎, 平田健太郎, 萩原朋道, 高次ホールド近似に基づくモノドロミ作用素のスペクトル計算について, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 29, No. 7, 2016, pp. 324-335

畑田和良, 平田健太郎, 佐藤拓磨, 適応フィルタを用いた概周期的な運動に対するパワーアシスト制御法(電動アシスト自転車によるエネルギー効率の検証), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.82, No.833, 15-00233, 2016, (11 pages)

Jung Hoon Kim, Tomomichi Hagiwara and Kentaro Hirata, Spectrum of Monodromy Operator for a Time-Delay System with Application to Stability Analysis, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol. 60, No. 12, 2015, pp. 3385-3390

[学会発表](計16件)

Kazuyoshi Hatada and Kentaro Hirata, Visual Feedback Control of a Pendubot with Varying Moment of Inertia, ASCC 2017, 17-20 Dec. 2017, Gold Coast (Australia)

Kazuma Kobayashi, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura and Kunihisa Okano, Automatic Generation of Optimal Standing up Motion using Nonlinear Receding Horizon Control, 2017 IEEE/SICE SII, 11-14 Dec. 2017, Taipei (Taiwan)

清広直輝, 平田健太郎, 中村幸紀, 岡野訓尚, 適応的 TVSAR による自転車のペダリング推定, 第 26 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2017/11/25, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市)

神寶誠, 平田健太郎, 中村幸紀, 岡野訓尚, イナーターを用いた周期運動系の効率改善の検討, 第 26 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2017/11/25, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市)

Yoichiro Masui, Kentaro Hirata and Tomomichi Hagiwara, Modified State Predictive Control of Continuous-Time Systems with Input Delay, IEEE ICIT2017, 22-25 Mar. 2017, Toronto (Canada)

浅野友也, 平田健太郎, 中村幸紀, 岡野訓尚, 可変分解能モデルを用いた熱延鋼板冷却プロセスの予測制御-局所探索による分割アルゴリズムの高速化, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017/3/7-9, 岡山大学 (岡山県岡山市)

藤永隆孝, 増井詠一郎, 中村幸紀, 平田健太郎, 岡野訓尚, 配管長によるむだ時間を考慮した空気圧シリンダの修正状態予測制御, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017/3/7-9, 岡山大学 (岡山県岡山市)

小林和馬, 平田健太郎, 中村幸紀, 岡野訓尚, 非線形最適制御を用いた立ち上がり動作の設計, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017/3/7-9, 岡山大学 (岡山県岡山市)

守屋紀章, 平田健太郎, 増井詠一郎, 中村幸紀, レーザプリンタ定着プロセスの加熱方式と熱効率に関する制御検討, 第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2016/11/26, 広島大学 (広島県東広島市)

Kentaro Hirata, Daijiro Udagawa, Yoichiro Masui and Yukinori Nakamura, Model Predictive Control of Hot-Rolled Strip Cooling Process using Variable Resolution Model, IEEE IECON2016, 23-26 Oct. 2016, Florence (Italy)
DOI: 10.1109/IECON.2016.7793811

Kazuyoshi Hatada, Kentaro Hirata and Takuma Sato, Energy-Efficient Power Assist Control with Periodic Disturbance Observer and Frequency Estimator, IEEE the 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2016), 22-24 April,

2016, Auckland (New Zealand)

畑田和良, 平田健太郎, 変動周期信号の予測と推定に基づく電動自転車のアシスト法の検討, 電気学会全国大会, 2016/3/16-18, 東北大学 (宮城県仙台市)

Kenichi Katoh, Hideto Senoh and Kentaro Hirata, Ideal operation model and experimental verification for non-pulsating flow tube pumps, IEEE ICIT 2016, 14-17 March 2016, Taipei (Taiwan)

増井詠一郎, 平田健太郎, Lorlynn Asuncion Mateo, 中村幸紀, 状態予測制御系のスペクトルに関する一考察, SICE 制御部門マルチシンポジウム, 2016/3/7-10, 南山大学 (愛知県名古屋市)

Shota Sasaki, Kentaro Hirata, Yoichiro Masui, Masahiro Samei, Akihiro Kawasaki, and Yasuharu Kawarasaki, State Estimation of Thermal Systems with Multiple Operation Modes, IEEE international conference on intelligent systems modeling and simulation (ISMS2016), 5-27 January 2016, Bangkok (Thailand)

佐々木将太, 平田健太郎, LMI を用いた熱システムに対するオブザーバ設計, 第 24 回 SICE 中国支部学術講演会, 2015/11/28, 岡山理科大学 (岡山県岡山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 健太郎 (HIRATA, Kentaro)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 00293902