

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560449

研究課題名（和文） 制御系の性能改善性を保存したシステム分解法の開発と
そのモデル予測制御への応用研究課題名（英文） System decompositions for the design of constrained control systems
and its application to the model predictive control

研究代表者

児島 晃 (KOJIMA AKIRA)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：80234756

研究成果の概要（和文）：

モデル予測制御法は、システムの制約を考慮することができる有力な制御法の一つであり、メカトロニクス系など広範な対象に適用可能な制御則を導くためには、オンライン制御において必要となる最適化計算の規模を適切に低減化させる必要がある。本研究では、線形システムの入出力応答の関係を低次元の信号空間で適切に特徴づける方法を開発し、低次元の最適化計算に基づくモデル予測制御法を導いた。そして、メカニカル系の実験を通じて、制御法の特徴を検証した。

研究成果の概要（英文）：

Model Predictive Control (MPC) has become a standard control strategy for constrained multivariable systems and, for the application to the broader class of mechatronics systems, fast computation algorithm for the online-optimization of control input has been required.

In this study, a system decomposition method is derived for linear time-invariant systems and it is clarified that the dominant system responses are fairly characterized based on the eigenvalue problem of compact operators. The fundamental result obtained here is employed for the derivation of low-order MPC control law and the feature of the proposed control law is investigated with several design examples.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

1. 研究開始当初の背景

計算機性能、ネットワーク技術の向上により、より高度な制御系の実装が可能になり、メカトロニクスシステム、鉄鋼プロセスなど、速いダイナミクスを有する対象に対しても、計算負荷の高い制御法の適用が可能になりつつある。本研究は、線形システムに新しいシステム分解法を導入することにより、制御の質を任意に調整できるモデル予測制御法を導き、さらには制御系のゲイン構成法をモデル予測制御の視点から与えようとするものである。

モデル予測制御は、入出力の制約、目標値への追従制御を合理的に扱う制御法として発展を遂げ、現在では広いクラスの制御問題に対して、制御系を構成する基本的なアプローチを提供している。モデル予測制御の基本的な部分は、各サンプル時刻で有限時間区間の制御問題を解き、得られた制御信号の初期値だけを印加してゆく部分にある。したがって、応答を予測しながら入力を決定するので、制約を考慮することが可能になるが、一方では負荷の高いオンライン計算が必要になり、対象はダイナミクスの遅いものに限定されていた。

申請者らは、従来の研究において、連続時間系のモデル予測制御問題にひとつの近似解法を導き、1)制約を考慮した近似 LQ 制御則が2次計画問題から求められること、2)制御則が等価な非線形ゲインにより構成され、必要に応じてオンライン計算が回避できること、を明らかにした。しかしながら、これらの準備的な研究においては、制御系の性能改善性を十分に確保したモデル予測制御法の開発は行われなかった。

2. 研究の目的

モデル予測制御に関わるシステムの記述が、有限時間区間の入出力表現と初期状態の影響によって表わされることに着目し、入出力波形の対応を初期状態・外乱の処理能力から分解する方法を開発する。そしてシステム分解の主要な関係を予測モデルに用い、任意の精度に調整可能なモデル予測制御法を開発する。

ここで導かれるシステム分解は、制御系の入出力関係のみならず、初期状態・外乱のモデル予測制御への影響を同時に特徴づける

ものであり、予測モデルと最適化計算から得られる制御信号の質を、制御性能、制約保証の双方から調整することが可能になる。さらに制御方策を、ゲインの自由度に限定した問題も扱えるため、制約を考慮したゲイン調整則など、従来モデル予測制御のアプローチが確立されていなかった制御問題に対しても、広く設計法を導くことが可能になる。解決を試みる課題は以下の3点にまとめられる。

(1) システム分解法の開発とそのモデル予測制御への応用

連続時間・離散時間系の双方に対して適当な評価関数を定め、有限時間区間の入出力関係を解明する。そして、初期状態・外乱を最適に処理する入力波形と出力の関係に加え、相補的な自由度の中で、評価関数の増加が抑制される順に入力波形と出力波形の関係を明らかにする。また、得られた結果から予測モデルの低次元化法を導き、制御の質と最適化計算の規模が調整可能なモデル予測制御法を開発する。

(2) ゲイン調整則の開発

ゲイン調整法は、制御対象の状態に応じて適切な入力を発生させる手法であり、ゲインスケジューリング制御など広い応用範囲を有している。本研究で開発するシステム分解法を用い、逆に入力信号の候補を制御器で発生し得るものに限定することにより、制約を満たすゲイン調整則をモデル予測制御のアプローチから明らかにする。そしてモデル予測制御則を等価な非線形ゲインにより表わす方法を援用し、ゲイン調整則を実装が容易な非線形ゲインにより構成する方法を導く。

また、サーボ系のフィードフォワードゲインなど、一部の補償要素の設計は、制御系の初期値を調整する問題に帰着させることが可能になると考えられる。そこで、H2 予見制御などの基本的な手法を発展させ、応答を改善させる制御系の初期値設定法、さらにはフィードフォワード補償を導く方法を明らかにする。

(3) 制御事例・制御実験による制御法の評価

目的 (1) で開発された制御法は、モデル予測制御に必要な最適化計算の規模を任意に抑制することが可能である。そこで開発した制御法を評価するために、倒立振り子、2 慣性系の実験システムを導入し、過渡応答の改善、制約を満たす制御法の設計上の長短

を評価する。

3. 研究の方法

先に述べた目的(1), (2), (3)に対して, 以下の方法により研究を展開した。

(1) システム分解法の解明とそのモデル予測制御への応用

連続時間・離散時間系の双方に対して, 2次評価関数を定め, 有限時間区間の入出力関係を解明する。システム分解法を開発する場合, 最も重要な点は, 初期状態・外乱を合理的に処理する入力信号を特徴づけ, さらに相補的な自由度の中で, 制約を満たすために発生させる効果的な補償信号を明らかにすることである。そこで, 主要な応答を適当な作用素の固有値問題に帰着させることにより, システム分解法を開発する。

(2) ゲイン調整則の開発

(1)で特徴づけられたシステム分解に基づき, モデル予測制御法の基本的な設計手順を示す。そして, 数値例を用いて, システム分解による近似の程度と制御系の性質の関係を考察する。

また, H2 予見制御に関する基本的な結果を用いることにより, 制御系の初期値設定により応答を改善する方法を明らかにする。これらの結果は, サーボ系において, 目標値の形状に応じてフィードフォワードゲインを調整する方法を与えるものである。

(3) 制御事例・制御実験による制御法の評価

(1), (2) から導かれる制御法は, モデル予測制御則を等価な非線形ゲインで構成することを可能にし, また離散時間系に対しては, サンプル時間のきわめて短い制御対象に対しても任意に最適化計算の規模を調整したモデル予測制御則を構成することができる。これらの特徴を評価するために, 倒立振り子, 2 慣性系の実験システムを導入し, システム分解から得られた予測モデルの質とモデル予測制御系の性能について考察する。

4. 研究成果

制御目的を反映させた評価関数に基づき, 設計上重要な入出力波形の対応を抽出する方法を開発した。これらの基本的な結果は, モデル予測制御に用いられる予測モデルを任意の次元で近似的に構成することを可能にするものであり, モデル予測制御法の計算負荷を低減化させることが可能になる。そして, 制御則を等価な非線形ゲインで構成した場合, 制御系の有する性質を調べ, またフィードフォワードゲインの設計に用いられる広義の H2 予見補償則の構成法を明らかにし

た。

研究目的に定めた課題(1), (2), (3)に対する成果は, 以下のようにまとめられる。

(1) システム分解法の解明とそのモデル予測制御への応用

① 離散時間系の予測モデルに対するシステム分解法の開発

離散時間系の LQ モデル予測制御問題に着目し, オンライン計算で必要となる2次計画問題の次数を任意に低次元化する方法を開発した。これらの結果は, 離散時間系の応答を評価関数への影響が強いものから抽出することにより求めたものであり, 問題の次数と無関係な超越方程式の根から求められることを示した。そして制御系は, 線形制御域では厳密な LQ 制御になり, 非線形制御域の性能を任意に近似できることが確認された。

② 制御対象の内部状態を反映させたシステム分解法の開発

課題(1)①で得た予測モデルの低次元化法を改善し, 制御対象の内部状態の影響を反映させた新たなシステム分解法を導いた。本手法は, 評価関数に最も影響を与える初期状態と制御入力列の対を特徴づけるものであり, LQ 制御など代表的な制御法が生成する制御入力列を自然に含めることができる。そして, 今回導いた状態・入力列の対応からモデル予測制御法が, 効率的に解けることが示された。

(2) ゲイン調整則の開発

① 等価な非線形ゲインの構成とシステム分解法の評価

結果(1)①で導かれた結果に対して, マルチパラメトリック計画法を適用し, モデル予測制御と等価な非線形制御則が, 見通し良く構成できることを明らかにした。また, システム分解の程度により, 非線形制御域の最適性に近似が含まれること, 線形制御域では厳密な最適性が確保されることを確認した。

② 状態設定を考慮した H2 予見補償則の導出

一般の制御系には, 積分器の内部状態など修正可能な部分状態が存在する点に着目し, H2 制御性能を達成する部分状態設定法と補償入力構成法を導いた。これらの成果は, フィードフォワードゲインの一構成法を与え, また成果(1)②を援用することにより, 制約と応答を考慮したひとつの制御法を導くことができる。

(3) 制御事例・制御実験による制御法の評価

① 張力・ループ系の制御

モード遷移をとまなう制御問題が, 有限時間区間制御問題に帰着できる点に着目し, 張力・ループ系(圧延システム)の起動制御法が成果(1)①, (2)①により求められ, 非線形

ゲインで直接構成できることを示した。

② 倒立振子・2慣性系の応答改善

成果(2)②で得られた内部状態の設定法を倒立振子，2慣性系の応答改善制御に適用し，適当なフィードフォワード入力により応答が改善されることを確認した。

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 8 件)

(1) K.Yokokoyama and A.Kojima, H2 performance on multiple preview compensation, 査読有, Proc. of ICROS-SICE International Joint Conference 2009, -, 2009年

(2) 原 尚之, 児島 晃, 離散時間線形系の分解と低次元化モデル予測制御への応用, 査読有, 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 12, pp. 1017-1026, 2008年

(3) N.Hara and A.Kojima, Constrained control based on a decomposition of finite-horizon linear systems, 査読有, Proc. SICE Annual Conference 2008, -, 2008年

(4) N.Hara and A.Kojima, Stabilizing reduced order model predictive control for constrained linear systems, 査読有, Proc. of 17th IFAC World Congress, -, 2008年

(5) A.Kojima and N.Morooka, Start-up control of a hot strip mill tension/looper system: an approach based on model predictive control, 査読有, Proc. of 17th IFAC World Congress, -, 2008年

(6) N.Hara and A.Kojima, An off-line design method of compensation law for constrained linear systems, 査読有, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 18, No. 1, pp. 51-68, 2008年

(7) 原 尚之, 児島 晃, 制御系の制約を考慮した制御器の状態設定, 査読有, 電気学会論文誌 C, Vol. 128-C, No. 1, pp. 70-77, 2008年

(8) N.Hara and A.Kojima, Reduced order model predictive control method based on decomposition of discrete-time linear systems, 査読有, Proc. of 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1269-1274, 2007年

(9) 諸岡伸幸, 児島 晃, パラメトリック最適化を用いた張力・ルーパ系のオフライン設計, 査読有, 鉄と鋼, Vol. 93, No. 8, pp. 525-531, 2007年

[学会発表] (計 13 件)

(1) 望月晋太郎, 児島 晃, 倒立振子の目標値追従制御ー積分器の初期値設定に関する検討ー, 平成 21 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2009年 9 月 4 日, 徳島

(2) 横山一生, 児島 晃, 複数の予見情報を考慮したH2制御と状態設定法の検討, 第10回制御部門大会, 2010年 3 月 17 日, 熊本

(3) 谷山直人, 児島 晃, モード遷移を考慮した離散時間最適レギュレータの構成: アフィン系への拡張と張力・ルーパ系への応用, 第 51 回自動制御連合講演会, 2008年 11 月 22-23 日, 米沢

(4) 原 尚之, 児島 晃, 離散時間線形系の分解に基づいた低次元化モデル予測制御, 第 51 回自動制御連合講演会, 2008年 11 月 22-23 日, 米沢

(5) 児島 晃, 谷山直人, モード遷移を考慮した離散時間最適レギュレータの構成, 37 回制御理論シンポジウム, 2008年 9 月 17-19 日, 霧島

(6) To Hoang Quan, 児島 晃, H2 予見制御則の導出 - 出力フィードバックの場合 -, 平成 20 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2008年 8 月 20-22 日, 函館

(7) 児島 晃, 諸岡伸幸, モード遷移を考慮した離散時間最適レギュレータ: 張力・ルーパ系への適用, 日本鉄鋼協会第 155 回春季講演大会, 2008年 3 月 27 日, 東京

(8) 原 尚之, 児島 晃, 離散時間線形系の分解に基づく安定性を保証した低次元化モデル予測制御則の一構成法, 第 50 回自動制御連合講演会, 2007年 11 月 24 日, 神奈川

(9) 児島 晃, 予見動作とH ∞ 制御, 第 50 回自動制御連合講演会, 2007年 11 月 24 日, 神奈川

(10) N.Hara and A.Kojima, Reduced order model predictive control for discrete-time constrained linear systems, 第 36 回制御理論シンポジウム, 2007年 9 月 7 日, 札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

児島 晃 (KOJIMA AKIRA)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号: 80234756