

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04216

研究課題名（和文）陰的非線形システムに対するモデル予測制御系設計の研究

研究課題名（英文）Study of Model Predictive Control for Implicit Nonlinear Systems

研究代表者

橋本 智昭（Hashimoto, Tomoaki）

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90515115

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：陰的非線形システムモデルで記述される制御対象に対する系統的な制御系設計手法は、これまでに確立されていなかった。本研究では、モデル予測制御と呼ばれる最適フィードバック制御手法に基づいて、陰的システムモデルで記述される幅広いシステムクラスに対する系統的な制御系設計手法が構築された。さらに、本研究で考案された新しい制御系設計手法が、Brayton-Moser方程式で記述される電気ネットワーク回路の制御系設計問題に適用され、数値シミュレーションによりその有効性が確認された。また、陰的非線形システムモデルに対して、状態推定手法とモデル予測制御手法を併用した制御系設計法が構築された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陰的システムは陽的システムを包括するように一般化されているので、陰的システムに対する制御理論を構築する方が、陽的システムに比べてより学術的価値が高いといえる。しかしながら、これまでの制御理論研究の大部分が陽的システムを対象としており、陰的システムに対する研究は全体の1割に満たない状況である。本研究では、一般化された陰的システムに対する制御系設計手法が新たに確立されており、独創的で汎用性のある意義深い研究成果が得られていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：So far, no systematic control design methods have been proposed for implicit nonlinear systems. In this study, based on model predictive control which is a kind of optimal feedback control method, a systematic control design method was established for a wide class of systems described by implicit nonlinear systems. Furthermore, the proposed method was applied to the control problem of electrical network circuits described by Brayton-Moser equation. Consequently, the effectiveness of the proposed method was verified by numerical simulations.

研究分野：工学

キーワード：制御工学 システム工学

1. 研究開始当初の背景

研究分野に関わりなく研究の方向性として2つのベクトルが考えられる。1つは個別性への執着であり、もう1つは普遍性の追求である。前者は個別に特化した問題に取り組む研究であるのに対して、後者は問題を一般化することで、そこでの成果が幅広い応用性を持つことを目的としている。双方の方向性が相互作用することで全体としての進展が期待できるが、本提案研究課題は、後者の立場であり、一般方法論の研究に属している。

制御系設計論の研究において、制御対象の数理モデルがどのようなクラスのシステムモデルに属しているかを考えることは、問題設定において重要である。一般的に、システムモデルは、陽的モデルと陰的モデルの2種類に分類することができる。図1で示されている陽的線形モデルと陰的線形モデルを比較すると、係数行列  $E$  が正則であるならば、その逆行列を両辺の左から掛けることにより、陰的モデルは陽的モデルに帰着できることがわかる。つまり、陰的モデルは陽的モデルを包括する一般化されたシステムクラスに属しているといえる。

陽的モデルでは、動的要素(微分要素)のみ考慮されるが、陰的モデルでは動的要素に加えて、静的な拘束条件も同時に考慮できるという利点がある。別の言い方をすれば、陽的モデル表現では微分方程式しか扱えないが、陰的モデル表現では、微分方程式だけでなく微分代数方程式も扱えるといった特徴がある。したがって、陰的モデル表現に対して制御系設計理論を構築する方が、陽的モデル表現に対する制御系設計理論を考案するより、学術的価値が高いといえる。これまでの制御系設計理論の研究の大部分が陽的モデルを対象としており、陰的モデルに対する制御系設計理論の研究は全体の1割に満たない状況である。

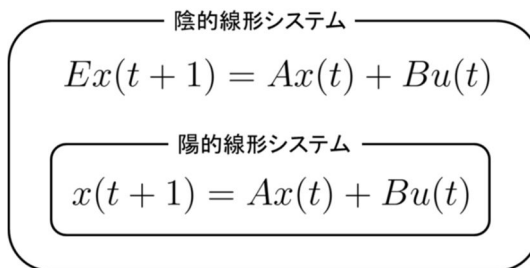


図1

上記研究背景のもと、陰的システムモデルに対する制御系設計理論の研究背景について述べる。1990年代に陰的線形システムに対する研究が注目を浴び、その制御系設計手法は既に確立されている。2000年以降は、図2で示される陰的非線形システムに対する制御系設計論の研究が行われている。これまでに、 $H_\infty$ 制御と呼ばれる外乱に対するロバスト性を考慮した制御手法に基づいた設計手法が考案されている。しかしながら、陰的非線形システムの係数行列  $E$  が状態変数  $x(t)$  に依存する場合、より一般化された陰的非線形システム表現(図2参照)となるが、そのようなシステムクラスに対する制御系設計手法は過去に考案されていない。つまり、図2の黒色部分に属するような一般化陰的非線形システムに対しては、過去に提案された制御系設計手法を適用することはできない。

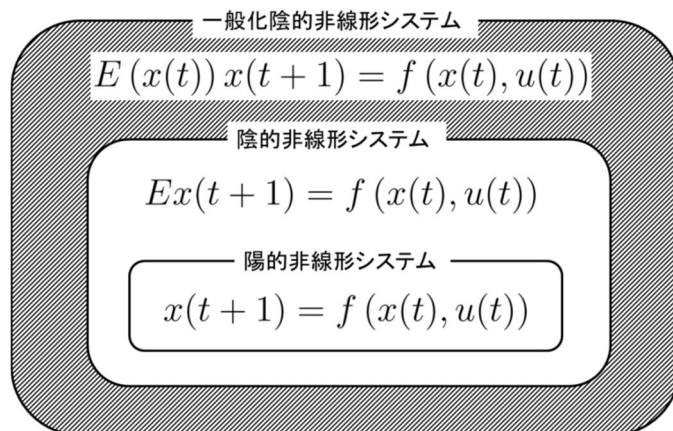


図2

## 2. 研究の目的

本研究課題における核心となる研究目的は、これまでに考えられていた陰的非線形システムより、幅広いシステムモデルを記述する一般化陰的非線形システムに対して、制御系設計手法を新たに考案することである。

システムの状態や入出力に関する制約条件を考慮した制御系設計手法として、モデル予測制御と呼ばれる制御手法が近年注目されている。モデル予測制御とは有限評価区間の最適制御問題を時間が進むごとに評価区間を移動させながら継続的にその最適化問題を解くことによって、最適フィードバック制御を実現する手法である。最適制御問題が解析的に解けなくても、数値解法により制御入力を決定することができれば、実応用が可能となる。近年、コンピュータの性能が飛躍的に向上し、最適化問題の高速数値解法アルゴリズムが発展しているため、制御工学分野では、モデル予測制御手法の有用性が高く評価されている。

本研究の目的は、図2で示されるような一般化陰的非線形システムモデルで記述される制御対象に対してモデル予測制御系設計手法を構築することである。

## 3. 研究の方法

以下で示す研究課題が番号順に段階を踏んで取り組まれている。

一般化陰的非線形システムに対する最適条件の導出

陽的システムに対する最適条件はオイラー・ラグランジュ方程式と呼ばれ、よく知られている。陰的モデルに対する変分法を考案し、従来の最適条件を包括する、一般化オイラー・ラグランジュ方程式を導出する。

システム方程式及び最適条件の解の存在性と可解性の確認

陰関数定理を用いて、システム方程式及び最適条件の解の存在性と可解性を特徴づける条件を導出する。

一般化陰的非線形モデル予測制御系の安定性解析

陰的リアプノフ関数を用いて、モデル予測制御による陰的非線形システムの閉ループ系の安定性を保証するための条件を導出する。

導出された一般化最適条件の高速数値解法アルゴリズムの構築

導出された一般化オイラー・ラグランジュ方程式の高速数値解法を構築する。縮小写像法と呼ばれるアルゴリズムをベースにして数値解法を構築する。

電気ネットワーク回路への実応用展開

新規構築されたモデル予測制御手法を陰的システムに適用する。具体的には、Brayton-Moser方程式で記述される電気ネットワーク回路システムを応用例として、当該手法を適用しその有効性を確認する。

## 4. 研究成果

本課題では、研究成果の普遍性を追求し、一般化された制御理論の問題に取り組み、得られた結果が幅広い応用性を持つことを目的としている。一般化された制御システムモデルに対して、新しい制御系設計手法を確立することによって、その方法論を社会の様々な分野へ応用することが可能であるため、さまざまな学術分野への波及効果が期待できる。

本研究では、図 2 に示されているように、従来の陰的非線形システムを包括するような一般化された陰的非線形システムモデルに対して、状態制約や最適性を考慮できるという特徴があるモデル予測制御手法に基づく系統的な制御系設計手法が構築された。モデル予測制御は最適フィードバック制御に属しており、陽的非線形システムの最適制御問題における最適条件はオイラー・ラグランジュ方程式としてよく知られており、その数値解法アルゴリズムが既に確立されている。本研究では、一般化された陰的非線形システムの最適制御問題における最適条件を変分原理に基づいて解析することによって、一般化されたオイラー・ラグランジュ方程式が導出されている。さらに、一般化オイラー・ラグランジュ方程式の可解条件が陰関数定理を用いて明らかにされている。また、一般化オイラー・ラグランジュ方程式の解析解の導出が困難な場合に対して有用となる高速数値解法アルゴリズムが構築されている。

上記で述べた研究成果により確立された一般化陰的非線形モデル予測制御に基づく制御系設計手法の有効性を確認するために、Brayton-Moser 方程式で記述される電気ネットワーク回路システムに対して当該手法を適用して、制御系の性能を検証した。一般化陰的非線形システムに属する Brayton-Moser 方程式に対して、当該手法を適用することにより制御目標が達成されることが、数値シミュレーションにより確認された。

上記の研究成果では、システムの状態がすべて観測可能であるという仮定のもとで、制御系設計法の有効性が検証されていた。モデル予測制御手法は、システムの状態がすべて観測可能でないと直接適用できないことが知られている。そのため、システムの状態がすべて観測できない場合、つまり、システムの状態が部分的にしか観測できない場合は、観測できない状態を推定する必要がある。本研究では、一般化陰的非線形システムに対する Unscented Kalman Filter に基づく状態推定手法が考案され、モデル予測制御手法と併用する制御系設計法の枠組みが新たに構築された。これにより、システムの状態が部分的にしか観測できない場合でも、当該研究で考案された陰的非線形モデル予測制御手法の適用が可能となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tomoaki HASHIMOTO	4. 巻 5
2. 論文標題 Stability Analysis for Discretized Brayton-Moser Equations with Implicit Model Predictive Control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 pp. 1772-1780
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hiroto YOSHIOKA, Tomoaki HASHIMOTO	4. 巻 11
2. 論文標題 Model Predictive Control with Numerical Solution based on Contraction Mapping Method for Stabilization of Vehicle Nonlinear Dynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication	6. 最初と最後の頁 pp. 3786-3790
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takashi SHIMIZU, Tomoaki HASHIMOTO	4. 巻 Vol. 12, No. 7
2. 論文標題 Model Predictive Control with Unscented Kalman Filter for Nonlinear Implicit Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Mathematical and Computational Sciences	6. 最初と最後の頁 pp. 147-151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5281/zenodo.1340585	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takashi SHIMIZU, Tomoaki HASHIMOTO	4. 巻 12
2. 論文標題 State Estimation based on Unscented Kalman Filter for Burgers' Equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 pp.1051- 1056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5281/zenodo.2021955	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tomoaki HASHIMOTO
2. 発表標題 Stability of Implicit Model Predictive Control for Discretized Brayton-Moser Equations
3. 学会等名 International Conference on Computer Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoaki Hashimoto
2. 発表標題 Implicit Model Predictive Control for Discretized Brayton-Moser Equations
3. 学会等名 International Conference on Control, Automation, and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroto YOSHIOKA, Tomoaki HASHIMOTO
2. 発表標題 Model Predictive Control based on Contraction Mapping Method for Stabilization of Vehicle Nonlinear Dynamics
3. 学会等名 International Conference on Civil, Mechanical, Production and Industrial Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi SHIMIZU, Tomoaki HASHIMOTO
2. 発表標題 Model Predictive Control with Unscented Kalman Filter for Nonlinear Implicit Systems
3. 学会等名 The 20th International Conference on Mathematics and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------