

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：52201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04451

研究課題名（和文）モデルベース制御における可変次数系のスペースタイム離散化手法の開発

研究課題名（英文）On Space-Time Discretization of Systems for Model-Based Control

研究代表者

堀 憲之（Hori, Noriyuki）

小山工業高等専門学校・その他部局等・校長

研究者番号：70312824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：偏微分方程式でモデル化された連続時間システムの厳密離散時間・空間モデル化手法を提案した。従来の方法では離散化されたモデルの精度を上げるために、必要の無い空間や時刻における計算が必要であり、離散モデルの次数が高くなる。提案手法では刻み幅に関係なく、求めたい空間点と時刻だけの演算ですむ。さらに次数変化をモード変化として理解するために超関数の離散時間化という概念を整備した。本研究は固定次数にとらわれないモデルベース制御系設計に関する基礎的枠組みの構築に貢献する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

連続時間関数の離散化をインパルス関数に拡張した先行研究を、記述表現形式に適用して次数変化をインパルスモードの変化と捉えることや不適切な初期値によるインパルス現象の回避などに利用した。また、システムの時間軸と空間軸に関する次数変化を同時に扱う偏微分方程式を考えることで、厳密に時間および空間に関する離散化を行った。拡散方程式を変数分離して厳密離散モデルを得た先行研究の方法を波動方程式に適用し、空間と時間ともに2次の常微分方程式に変換して厳密離散モデルを得た。計算精度を上げるための細かい空間や時間の刻みが必要なくなり、モデルベースの制御系設計と制御の実行が容易になった。

研究成果の概要（英文）：An innovative approach has been proposed for exactly discretizing continuous, in time and space, systems expressed in the descriptor form. Existing methods required models that are formulated at locations neither interested nor necessary but required just for improving accuracy. The proposed method does not require such considerations. The concept of discretization of distributions has also been proposed so that the order change could be interpreted as mode change. The research presented is expected to make a contribution to the formulation of fundamental framework for model-based controller design that is not bound to fixed system orders.

研究分野：デジタル制御システム

キーワード：離散時間化 離散空間化 モデルベース離散時間制御 次数変化 偏微分方程式

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

### 1. 研究開始当初の背景

モデルベース制御システムの設計ではユーザインターフェイスが連続系であっても、本質的には離散系としての演算が基礎となっている。その際システムの次数は通常離散時間化に加えて離散空間化によっても変化するが、その影響はほとんど検討されていない。またそのメカニズムを理解することは連続系の離散化を統一的に眺める視点がなければ困難である。このような背景の中、本研究開始時期には先行研究により以下のような知見が得られていた。

- (1) 状態方程式は次数が決定してから定まる表現法であり、次数が変化すると全く別の式となる。これに対して記述表現形式は状態方程式が扱える指数モードの他に、代数モードと超関数モードを含むことが可能な表現であり、次数変化はインパルスモード数の変化と捉えることが出来る。
- (2) 次数変化を許容する表現として反モニック型の伝達関数や記述表現形式があるが、変化の様子を理解するためには超関数であるインパルスの扱いが重要である。離散時間関数など有限値のみを扱うに関数に対しては本来超関数を導入する必要はないが、連続時間における超関数に収束するという意味で対応する離散時間関数を導入することは有用である。
- (3) 次数変化の影響は、連続時間系ではエネルギー蓄積要素の個数あるいは微分方程式表現の初期値の個数の変化と解釈できる。次数が一定の連続時間系に対して離散時間化を行った結果次数が変化する場合、系の何が変化したことに対応するかを解明することが肝要である。

### 2. 研究の目的

申請時における本研究の目的は「モデルベース制御系設計用プラットフォーム構築のために、モデルの形式、次数、因果律、初期値などに関する一連の未解決問題を新しい視点から整理し、根本的な解決法を提案することにより、次数変更も含めたモデルベース制御系設計法の構築に貢献する」ことである。

### 3. 研究の方法

通常モデルベース設計は連続時間系の枠組みで実施されるが、内部ではオフライン計算を含む離散化手法が使用されている。しかし、制御系など実時間処理が必要な部分はオンライン計算可能な手法により検証したい。特に(1)時間および空間の離散化による次数変化を検討するために、基本的な偏微分方程式で表現されるシステム、および(2)インパルスやその高階微分の離散時間化を主な研究対象として、報告者がこれまでに推進してきた連続時間関数の離散時間化という概念を用いて、連続空間の離散化や時間超関数の離散化という概念に拡張することを試みた。

### 4. 研究成果

これまでのモデルベース・デジタル制御系設計の多くは、次数変化と特性変化の見通しが悪い離散化モデル表現に基礎をおいている。本研究では、連続時間と連続空間に関係付けた離散時間と離散空間の両方を扱う偏微分方程式と超関数の離散時間化に対して基礎的な知見を得たので、以下にその成果を中心にインパクトや今後の課題についてまとめる。

#### (1) 空間の離散化 (C1)

- 動的システムを常微分方程式で表現する際に次数は主に時間に由来して定まり、空間との関係が見えにくい。しかし分布定数系など偏微分方程式でモデル化されるシステムでは空間と時間の両方が前面に現れるため、それらを考慮した次数の概念を扱った。これまでの方法では高い演算精度を得るためにはまず空間分解能を上げるためにグリッドを細かくし、更に離散時間間隔を十分に細かく設定することが一般的である。その結果、演算量が非常に多くなる。しかし、提案した拡散系の変数分離形の方法は空間と時間の両方に関して厳密に離散化を行えるため、精度のためだけに空間分解能を上げることは不要で、必要な点における演算のみで済む。また時間軸に沿った分解能も必要な頻度で計算できるため、合理的な計算量でことが足りる。
- 上の方法は従来法のように精度を上げるためだけに次数を膨大に増やす必要がなくなったが、拡散系に対する方法であったため、これを波動方程式系へ拡張した。しかしこの方法では解は無限級数として表現されるため、計算には打ち切り誤差が生じる可能性がある。また、初期条件も正弦波級数で与えられる必要があった。そのため、ダランベールの解を利用した新方法も開発した。ただし、この方法では空間は一次元の場合に限られるため、この条件を外すことは今後の課題である。

#### (2) 時間超関数の離散時間化 (J2)

- 微分制御装置の初期値はすべて零に設定することが一般的であるが、そのような選び方ではデジタル制御下でインパルス状の応答が生じて想定外の平衡点に状態が飛び、危険が生じる可能性がある。これを回避するためには適切な初期値の選定が必要であるが、インパルスやその微分に対応できる離散値を考えなければ

ならない。そこでインパルスやその  $n$  階微分信号なども含めた一般的な超関数の離散時間化の概念を明確にし、その一手法を提案した。

- これまでは超関数をまず適当な有限連続時間関数で近似したのちに既存の離散時間化手法を適用する方法しか存在しなかったが、直接に適切な離散時間関数に変換する方法を提案した。これにより、自然かつ統一的な形で超関数やその微分などの離散時間化が可能となった。
- (3) 次数変化下におけるシステム特性や構造的変化と制御系設計 (C2) (C3) (C4) (C6)
- 一般に次数変化は状態変数の数の変化や積分器の個数の変化と考えることができるが、次数変化の前後で系の内部でどのような構造変化があるか明確でなかった。システムの次数の低下は指数モードの次元低下であるが、低下した次数は代数方程式となり、状態方程式から外れる。記述表現形式においてはこの低下した次数は代数/インパルスモードへの変化であり、消えたモードの名残としてモデル内に留まる。このように次数変化をモード変化と解釈することで、次数変化を許容するシステムの表示、解析、設計などが可能になる。
  - 特性多項式を用いて、次数が変化する制御対象に対する北森の部分モデルマッチング制御法を検討した。ある次数のシステムに対して一回制御系を設計すれば、次数が下がっても制御系設計を繰り返す必要がなくなった。
  - 記述表現ベースで伝達関数ベースの北森の部分モデルマッチング法を考察し、システムや制御器に次数変化が生じて設計プロセスを繰り返さずに IPD 制御器などを設計することができることを示した。今後は IPD 以外の制御系設計に拡張することが望まれる。
  - 開ループ系においては代入モデルと呼ばれる離散時間モデルを特色付けるパラメータが  $1/2$  の時に解析的には誤差のオーダーが最小であることが知られている。しかし、閉ループ系においては数値計算的には必ずしもこのことが正しくないことを数値例を挙げて示した。
  - 通常のスライスの安定判別法は特性多項式。の次数が一定であることを前提にしているが、次数が増減する場合を考察した。次数が低下する場合と次数が増加する場合、次数変化が安定性に与える影響を考察した。
- (4) 非整数階微分 (C5)
- 整数次数系の離散時間化は比較的によく知られているが、非整数次数の場合は単に計算上の不都合として捉えられているようである。非整数階微分の定義自体も複数あり、実時間演算可能な方法が求められる制御分野では、演算時間と精度に注目した定義が必要である。そこで、従来とは全く異なるアプローチにより、演算精度の向上を試みた。その結果を連続的に分布する次数を持つ系へ拡張することにより、連続的な次数変化を考察することが可能になる予想される。
- (5) 実機へのモデルベース離散時間制御系設計への応用 (J1) (C7)
- 負荷変動による DC-DC コンバータの出力電圧変動を抑制するために、パルス周波数変調やパルス幅変調を用いたモデルベースのデジタル制御系を設計するためにプラント入力マッピング (PIM) 法を適用した。コンバータのモデル化には実機データから色々な次数を試みたが、離散時間化に際しては、伝達関数の分母分子共通因子 (可制御可観測性の喪失) による数値精度の悪化が問題であることを指摘した。積分型プラント入力マッピング法により、低いサンプル周波数でも性能のよいデジタル制御系を設計した。
  - ステッピングモータの回転速度むらを改善するために適応的に変化する可変ゲインを含んだ適応制御をモデルベースで設計した。本研究における知見を各所に用いることで無視したモードが速度むらに与える影響を検証した。

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

- J.1. D. Isobe, N. Hori, S. Kawai, K. Yagi, and T. Nguyen-Van, "Digital Control of a Stepping Motor for Eliminating Rotation Speed Fluctuations Using Adaptive Gains," *Electronics* 2021, 10(11), 1335, MDPI, 2021. 査読有
- J.2. S. Kawai and N. Hori, "Generalized Discretization of Continuous-Time Distributions," *The Journal of Engineering, IET*, Vol. 2020, No. 7, pp. 259-267, 2020. 査読有

### [ 学会発表 ] ( 計 7 件 )

- C.1. T. Suzuki, Y. Tokutomi, N. Hori, T. Nguyen-Van, and S. Kawai, "Two Method to Discretize the Wave Equation in Time and Space Simultaneously," *Proc. IEEE 10th Int. Conf. on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, pp. 148-153, Luxembourg, November 2022. 査読有
- C.2. T. Kubota, N. Hori, S. Kawai, and T. Nguyen-Van, "Discretization Accuracy of Mapping Models in Closed-Loop," *Proc. IEEE 10th Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE 2021)*, pp. 938-942, Kyoto, Japan, October 2021. 査読有
- C.3. T. Kubota, N. Hori, T. Nguyen-Van, and S. Kawai, "Design of a Controller for Plants Undergoing Order Changes," *59th Annual Conference SICE*, pp. 1729-1733, Chiang Mai, Thailand, September 2020. 査読有
- C.4. S. Kawai and N. Hori, "Interpretation of Kitamori's Partial-Model-Matching Method in a Descriptor-Form Expression," *Proc. 2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, pp. 928-932, Montréal, Canada, August 2020. 査読有
- C.5. S. Ebihara and N. Hori, "On Computation of Fractional-Order Differentiations," *The 6th Int. Conf. on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR)*, Xiamen, China, January 2020. (OPEN ACCESS. Published 1 May 2020. Published under license by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 853, 2020) 査読有
- C.6. H. Morita and N. Hori, "Effects of Changes in the Leading Coefficient of Fifth-Order Manabe's Polynomial," *The 2nd Int. Conf. on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA)*, pp. 148-154, Tianjin, China, October 2019. 査読有
- C.7. N. Nishinaga, N. Hori, and X. Ruan, "Design of Dual-Rate PIM-Disturbance Regulators for a DC-DC Switching Converters," *Proc. 3rd Int. Conf. on Automation, Control and Robotics (ICACR)*, T303 (11pages), Beijing, China, August 2019. 査読有

## 6 . 研究組織

- (1)研究分担者 なし
- (2)研究協力者 なし

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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 D. Isobe, N. Hori, S. Kawai, K. Yagi, & T. Nguyen-Van	4. 巻 10
2. 論文標題 Digital Control of a Stepping Motor for Eliminating Rotation Speed Fluctuations Using Adaptive Gains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 1335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics10111335	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 S. Kawai and N. Hori	4. 巻 July
2. 論文標題 Generalized Discretization of Continuous-Time Distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IET, The Journal of Engineering	6. 最初と最後の頁 259-267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/joe.2019.1124	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 T. Suzuki, Y. Tokutomi, N. Hori, T. Nguyen-Van, and S. Kawai
2. 発表標題 Two Methods to Discretize the Wave Equation in Time and Space Simultaneously
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. on Control, Mechatronics and Automation, Luxembourg (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kubota, N. Hori, T. Nguyen-Van, and S. Kawai
2. 発表標題 Discretization Accuracy of Mapping Models in Closed-Loop
3. 学会等名 IEEE Global Conf. on Consumer Electronics, Kyoto, Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Kubota, N. Hori, T. Nguyen-Van, and S. Kawai
2 . 発表標題 Design of a Controller for Plants Undergoing Order Changes
3 . 学会等名 SICE Annual Conference, Chiang Mai, Thailand ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Kawai and N. Hori
2 . 発表標題 Interpretation of Kitamori 's Partial-Model-Matching Method in a Descriptor-Form Expression
3 . 学会等名 IEEE Conference on Control Technology and Applications, Montreal, Canada ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Ebihara and N. Hori
2 . 発表標題 On Computation of Fractional-Order Differentiations
3 . 学会等名 Int. Conf. on Electrical Engineering, Control and Robotics, Xiamen, China ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 H. Morita and N. Hori
2 . 発表標題 Effects of Changes in the Leading Coefficient of Fifth-Order Manabe 's Polynomial
3 . 学会等名 Int. Conf. on Mechatronics, Robotics and Automation, Tianjin, China ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Nishinaga, N. Hori, and X. Ruan
2. 発表標題 Design of Dual-Rate PIM-Disturbance Regulators for a DC-DC Switching Converters
3. 学会等名 Int. Conf. on Automation, Control and Robotics, Beijing, China (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------