

令和元年6月13日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06144

研究課題名(和文) モデルベース制御のためのデスクリプタ系離散時間化手法の研究

研究課題名(英文) Time Discretization of Descriptor Systems for Model-Based Controller Design

研究代表者

堀 憲之 (Hori, Noriyuki)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：70312824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：連続時間システムを計算するために必要な離散時間化は従来その次数が固定されていたが、デスクリプタ形式内部のモード変化と解釈することで次数変化を扱えるようにした。これにより、モデルベースのデジタル制御系の設計を見通し良く行う枠組みの構築が期待できる。また、これまでは十分に一般的でない離散時間化の定義を曖昧にインパルス信号に適用していたが、厳格な定義を提案することで、例えばこれまで未解決であったデスクリプタ形式の不適切な初期値設定によるインパルス発生問題を解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超関数の離散時間化の定義を定め、それを元にデスクリプタ系の一般的離散時間モデルを開発したことにより、これまで未解決であった初期値の選択方法などの諸問題を根本的に解決した。更に、次数の本質や定義に関する根源的な検討を行うことで、デスクリプタ形式の特徴である静的/微分モードを含んだ離散時間制御系を統一的な視点から構築できるようになった。これにより、モデルベースの制御系設計手法が更に社会に浸透することに貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The system order has normally been assumed to be constant in discretizing a continuous-time descriptor system for numerical computations. Through this research, such a change can be viewed as a change in the internal modes of a descriptor system. From this perspective, it will be easier to carry out model-based digital controller designs that allow order changes. The concept of signal normalization has also been generalized to include such functions as the impulse, which then lead to a formula to calculate appropriate initial values to solve a long-standing issue of impulsive responses caused by inappropriate setting of the initial condition in descriptor systems.

研究分野：デジタル制御システム

キーワード：デスクリプタ形式 離散時間化 初期値設定 次数変化 離散空間化 モデルベース離散時間制御系

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

1. 研究開始当初の背景

モデルベース制御系設計に必要な離散時間化は通常最も簡便な手法で行われ、デジタル制御系の実行にも使用されて来たが、演算速度の向上に頼り、根本手法の改善は予想外に進んでいなかった。しかし、制御手法が高度化・複雑化するに伴い、適した手法で離散時間化を行う要求が高まることは必至である。そのような背景の中、研究開始時期に注目した点は以下である。

- (1) 離散時間アルゴリズムが元の連続時間システムの性質を適切に保存するという保証はない。例えば、一般の離散時間化手法を非線形系に適用すると、いくらサンプリング周期を細かくしてもカオスが発生したり、サンプリング周期の微小変動により収束領域が変化して、同じ初期値から全く異なる平衡点に収束したりすることがある。
- (2) 離散時間化による特性変化はモデルの次数変化と複合化すると非常に見通しが悪い。多くの簡易モデル化の研究があるが、連続時間の物理法則からモデルを導出し、状態方程式に落とし込んでから次数低減化を行うことが一般的である。この際、離散時間化は計算機内でバックグラウンド的に処理されており、次数決定と離散時間化の複合化が見えていない。
- (3) 離散時間モデルとは何かという明確な定義が無いままにモデル化手法が検討され、離散時間モデルが適正であるかどうかの判断ができない。一般的に想定されている定義は厳密離散時間モデルのみに当てはまるが、それ以外に広く知られている多くのモデルには適用できない。伝達関数や状態方程式で表されたシステムに対しては各種の提案があるが、デスクリプタ形式のモデルに対してはまだほとんど未開発であった。

2. 研究の目的

従来のモデルベース設計手法ではシステムの次数を変更するたびに設計を繰り返す必要があるため、本研究では異なる次数を表現できるデスクリプタ形式の汎用的離散時間化手法を開発することが目的である。これにより次数変化を見越したデジタル制御系設計手法の枠組みの確立に貢献することが見込まれる。

3. 研究の方法

これまでに関数を元に提案してきた離散時間化の定義やそれに伴う定理を、超関数に適用できるように拡張し、次数を固定しないデスクリプタ形式の離散時間モデル化手法の開発を目指した。これにより動的モードに加えて静的/インパルスモードに対しても離散時間化を明確に定義でき、次数の違いをシームレスに扱うことが可能となる。また、連続時間システムの次数変化がオンライン離散時間モデルの特性に及ぼす影響を調べ、詳細モデルや簡易モデルに対して同じ形式で扱える離散時間化手法へと発展させる基礎研究を実施した。これらの成果をもとに、複数の次数を考慮した効率的なモデルベースのデジタル制御系設計手法を構築するための基盤技術の確立が期待できる。具体的には以下の方針に沿って研究を進めた。

- (1) デスクリプタ形式の静的/微分モードを次数変化の痕跡と解釈する新しい離散時間化の定義を考案し、それにもとづいた具体的な離散時間モデル化手法を開発した。そのためにインパルスなどの超関数の離散時間化を明確にした。
- (2) 指数モードには、それまでに提案していた固定次数の伝達関数や状態方程式系の厳密離散時間化法や代入モデルなどを利用した。静的/微分モードの離散時間化(代入モデル)との組み合わせも考慮した。
- (3) 上記二つの組み合わせにより、次数変更の前後におけるデジタル制御系を見通し良く比較検討できるような枠組みを提案し、設計作業の効率化に貢献することを目指した。

4. 研究成果

既存のモデルベース・デジタル制御系設計は、次数変化と特性変化に関して見通しの良くない離散時間モデル化手法に基づいている。本研究は、閉ループ制御の視点を持って次数変化にも対応できる汎用的な離散時間化問題を検討した。連続時間系の次数と異なる離散時間モデルを統一的に自由に作成できるような枠組みの構築に資することを目的として、基礎的な手法の蓄積を図った。以下にその成果やインパクトなどをまとめる。

(1) 離散時間化・初期値設定

- 連続時間信号の離散時間化に関する定義を拡張して微分信号の離散時間化を提案し、連続時間のデスクリプタ系に対して代入モデルと呼ばれる離散時間系を提案した。これにより、連続時間でコンシステントな初期条件を離散時間でもコンシステントな初期値に変換する方法を明らかにし、デスクリプタ系にインパルスが発生する問題を解決した。これまではインパルス除去制御を行うことで対処していたが、そのような不便さが無くなった。
- 超関数に対して離散時間化の定義を提案し、それに基づく有用な定理を導出した。これによりインパルスやその微分信号の離散時間化が明確に扱えるようになった。一時刻における値を用いた定義から複数の時刻における値を用いるものへ拡張することによって、これまでよりも柔軟に対処することが可能になった。このような信号を扱うデスクリプタ系に適用し、任意（コンシステントとインコンシステントの両方）の初期値に対しても適切なデスクリプタ系の一般的離散時間モデルを初めて開発した。その成果はインパクトファクター6.126(2017/2018)の雑誌に掲載された。
- 広く実装されている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、状態が想定外の平衡点に遷移し得るため、危険が生じる可能性があることを示した。またこの問題を回避する適切な初期値の選定法も示した。

(2) 次数変化

- 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てしまう。デスクリプタ表示においてはこの低下した次数は代数/インパルスモードに変化したものと考えることができ、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と考えられる。これまでに微分/積分器の直列結合として内部表現を行ったが、並列やその他の構造を考慮する考えである。

(3) 離散空間化

- 分布定数系は偏微分方程式でモデル化されるが、演算精度を保つためには空間分解能を上げる必要があるために細かくグリッドが取られ、離散時間間隔は更に細かくするため、演算量が非常に多い。変数分離形の場合に提案する方法は空間と時間の両方に関して厳密な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、合理的な計算量でよい。

(4) 非整数階次数

- 1次と2次の制御対象に対して、0.5階微分演算を用いたPID制御系の特性をステップ応答の解析解を求めて検証した。1階微分と0.5階微分を比較した結果、非整数階微分演算器への入力途絶えても長期に渡ってその出力が出続けることがシミュレーションにより判明し、非整数階微分演算のグローバル性（非局所性）を確認した。整数階微分制御では零点なくしてはオーバーシュートが発生しなくても、非整数階微分制御では発生することも判明した。これらの計算を離散時間で実行するための基礎情報を得ることができ、今後の展望が開けた。

(5) モデルベースの離散時間制御系

- アナログ制御系を離散時間化してデジタル制御系に変換する方法は、伝達関数モデルで開発され、プラント入力マッピング法と呼ばれている。これはいかなるNon-pathologicalなサンプリング周期に対しても安定性を保証する方法である。それを状態方程式で定式化することは多入出力系への拡張なども含めて、モデルベース設計化のために望まれていた。状態方程式では極はある行列の固有値として表記できるが、零点は複雑であった。しかし零点がある行列の固有値として表現できるような変換を考案して、これにより状態方程式ベースのプラント入力マッピング法が可能となった。

(6) DC-DCコンバータのモデルベース離散時間制御系設計

- 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法を適用した。コンバータのモデル化の際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、伝達関数で言うところの分母分子の共通因子（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できることを実験で示した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. S. Kawai and N. Hori, “General Mapping Discrete-Time Models of a Descriptor System with an Arbitrary Initial Condition,” Vol. 87, pp. 428-431, Automatica, 2018. [https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.09.005] 査読有
2. S. Kawai and N. Hori, “Mapping Discrete-Time Models for Descriptor-Systems with Consistent Initial Conditions,” Trans. of the Can. Soc. Mech. Eng., Vol. 40, No. 1, pp. 59-77, 2016. 査読有

〔学会発表〕(計 8 件)

1. S. Kawai and N. Hori, “On the Choice of a Proper Initial Condition for Derivative Controllers,” Proc. IEEE 44th Annual Conf. of the Industrial Electronics Society (IECON), 2018.
2. K. Yagi and N. Hori, “Plant-Input-Mapping Discretization in State-Space Form,” Proc. IEEE 19th Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT), 2018.
3. S. Kawai and N. Hori, “Exact Temporal/Spatial Discretization of a Parabolic Partial-Differential-Equation,” Int. Conf. on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), 2017.
4. L. Nakahara and N. Hori, “Effect of Hyper-Damped Poles on the Step-Response of a Second-Order System under Proportional-Half-Derivative Feedback,” Int. Conf. on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), 2017.
5. N. Nishinaga and N. Hori, “PIM Discretization of Analog PWM Control for DC-DC Switching Converters,” Int. Conf. on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA), 2017.
6. S. Kawai and N. Hori, “A New Interpretation of Order-Changes in Terms of Mode-Shifts in a Descriptor System,” IASTED Modeling, Identification and Control (MIC), 2017, [DOI: 10.2316/P.2017.848-022]
7. R. Higashiya and N. Hori, “Model Orders and Numerical Issues in LLC Resonant DC-DC Converters,” IASTED Modeling, Identification and Control (MIC), 2017. [DOI: 10.2316/P.2017.848-017]
8. Y. Isobe, N. Hori, and K. Someya, “Digital Regulation of an LLC Resonant Converter Undergoing Dynamic Load Transients - Model-Based PIM Design and Simulation,” SICE Annual Conference, 2016.

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。