

[研究助成 (C)]

不確実複雑システムの見通しを向上させる設計モデルの構築

2227003



研究代表者

大阪大学 大学院工学研究科
機械工学専攻 石川・南研究室 博士後期課程

萩 尾 優 吾

[研究の目的]

制御工学の究極の目標は、さまざまなシステムのふるまいを自在に操ることである。システムを操るための手法はさまざまなものが存在するが、制御対象の数理モデルに基づく制御系設計は其中で最も用いられる手法の一つである。モデルベースの制御系設計では、制御対象のダイナミクスを数理モデルとして理解し、そのモデル情報を利用して制御器を設計することで、制御性能を達成することが可能である。

一般に、制御対象のダイナミクスを正確に理解して利用するために、さまざまな制御対象のふるまいを再現する詳細なモデルを構築することになる。しかし、制御系設計において重要なのは、制御対象のダイナミクスの再現ではなく、制御対象の制御なので、必ずしも詳細なモデルが必要でない場合も存在する。例えば、非線形な制御対象の平衡点周りの制御においては、平衡点周りの線形近似モデルで十分に制御でき、詳細な非線形モデルは必要ない。また、制御器設計のコストや計算時間が制約されている場合には、詳細なモデルを用いることができないことが多い。くわえて、詳細なモデルを構築できたとしても、そのモデルを制御系設計に用いることが難しい場合もある。例えば、ニューラルネットワーク (Neural Network: NN) モデルは高い表現能力を持つが、制御に必要な周波数特性や逆モデルの取得が困難である。

以上より、制御系設計においては常に詳細な

モデルが必要ではなく、制御目的や制御仕様に応じてモデル構築を工夫する必要がある。そこで、本研究では、「制御にとって必要十分なモデル構築とは何か」という問いに答えることを目的とする。すなわち、単に制御対象のダイナミクスを再現するのではなく、制御目的や制御仕様といった制御系の設計意図をモデルに反映させて、制御にとって都合の良いモデルを構築する手法を探る。この目的のため、本研究では、まず問題の定式化を行い、制御系設計問題をモデル探索問題に置き換えるという手法を提案する。そして、具体例として、動的量子化器の設計問題や、画像およびグラフ信号処理システムにおける量子化プロセスの設計に取り組み、提案手法の有用性を検証する。

[研究の内容, 成果]

前節で述べた通り、本研究では、制御系設計問題をモデル探索問題として捉え、設計意図をモデルに反映させることを目指す。この背景に基づき、本研究では、制御系設計のためのモデルチューニング手法を、モデルの最適化問題として取り扱う。具体的に本提案手法では、制御器設計の手順を固定し、制御器設計問題をモデル探索問題へと変換する。設計手順を固定することは、制御器を特定のモデルによって特徴付けることを意味する。本論文では、この制御器を特徴付けるモデルを「設計モデル」と定義し、設計仕様を満たす設計モデルを探索することで

制御器を設計する。すなわち、制御器設計問題を設計モデルの探索問題として定式化する。本手法において、制御器の設計手順は数学的に「モデルから制御器への写像」として表現される。この写像が与えられることで、探索対象は制御器空間ではなくモデル空間となり、モデルが決定されると制御器は自動的に設計される。

設計意図を反映したモデルを構築するシステム設計手法の先行研究の一つとして、北森によるPID制御器のモデルマッチング法が存在する。モデルマッチング法では、まず閉ループシステムモデルのパラメータから制御器のパラメータを決定するための変換式を導出する。次に、設計仕様を満たす閉ループシステムの参照モデルを設定し、制御特性を得る。このように、モデルマッチング法は、制御器の設計手順を課すことで、制御器探索問題をモデル探索問題へと変換する。

モデルマッチング法以外にも、制御器の設計手順に基づくモデルチューニング手法を用いた制御系設計に関する研究が存在する。例えば、Shikadaらはポリトープ型の不確かさを持つシステムに対するオブザーバ付きのロバストな状態フィードバック制御器の設計問題を扱い、モデルとその線形変換を最適化することで、従来のノミナルモデルよりも優れた性能を得られることを示した。また、Okajimaはポリトープ型の不確かさを持つシステムに対するモデル誤差抑制補償器の設計において、最尤推定モデルが必ずしもノミナルモデルとして適切ではないことを確認した。さらに、WadaとTsurushimaは、モデル予測制御によるサーボシステム設計において、目標信号への追従を達成するためにモデルへ積分器を追加する手法を提案した。MinamiとKashimaは、非最小位相系に対する量子化器の設計を行い、部分モデルを用いた動的量子化器のフィルタ設計により出力の発散を防ぐことができることを示した。この部分モデルは、制御対象を不安定零点と最小位相系に直列分解したときの最小位相系に当たる

モデルである。さらに、KusuiらはMinamiとKashimaの研究を拡張し、MIMOの非最小位相系に対する動的量子化器設計法を提案した。

これらの研究では、制御対象の特性を忠実に再現するモデルを用いるのではなく、制御器や量子化器の設計に合わせたモデル構築を行っている。本研究はこれらの研究を一般化したアプローチを採用する。このアプローチは、モデルベースではあるものの、従来のように、制御対象のダイナミクスの再現を目指した手法ではない。また、実際のモデルの構築では、データを用いた最適化問題としてモデルを探索するが、従来の直接制御器を決定するデータドリブンな手法とも異なる。したがって、提案手法は従来のモデルベースの手法とも、データから直接制御器を決定する手法とも異なり、モデルベースな手法とデータドリブンな手法の中間に位置する点に特徴がある。

本研究では、これまでの研究をより一般化した問題設定として再定義し、モデルチューニングに基づくシステム設計手法を提案する。本手法では、対象とする制御対象および制御器の設計手順が与えられた場合に、設計意図を反映した設計モデルを探索する問題として定式化する。ここで、設計モデルは必ずしも制御対象のふるまいを忠実に再現する必要はなく、制御系設計に必要な特性を有するモデルとしてチューニングによって得られる。

従来のモデルベース設計では、この問題を解決するため、まずモデルを構築し、その後に制御器を設計するという手順が取られた、モデル自体は、システム設計に必要な情報として既知であり、システム設計において重要なのは制御器設計であった。すなわち、モデルベース設計では、モデルが与えられた後に制御器設計方法を見つけるという手順になる。

一方で、本研究では、モデルチューニングに基づくシステム設計手法を提案する。この提案手法では、制御器の設計手順が与えられ、その上で設計モデルを見つけることを目的としてい

る、ここで注目すべき点は、制御器のパラメータがモデルのチューニングによって変化しなければならないということである。したがって、実際には、制御器設計の手順、すなわちモデルから制御器への写像が与えられている。この提案手法においては、モデルから制御器への写像が与えられるため、探索空間は制御器空間ではなくモデル空間となり、モデルが構築されれば制御器は自動的に設計される。

次に、制御器設計手順を固定する方法について説明する。1つの方法は、基本的な制御システム設計問題の解析結果を用いることである。例えば、制御理論においては、極配置やLQR制御などの解析的に最適な制御器が導出される場合がある。解析的に導出された方程式を設計手順として固定し、その方程式に与えられたモデルをチューニングすることができる。言い換えれば、制御器設計手順を設計者の知識として用い、モデルを探索するアプローチである。

提案されたモデル探索手法に加えて、システムのパラメータを直接探索する方法も存在する。しかし、モデル探索は制御器の構造を知識として利用するため、より効率的に有効な解を見つけることが可能であると考えられる。さらに、直接探索とは異なり、モデル探索はシステムの構造を知識として利用し、制御システムの設計モデルを得るため、システム設計における説明可能性が高いと考えられる。

以上の位置付けに基づき、本研究の一般的な問題の定式化について述べる。ここで、図1に示すように、システム Σ_1 および Σ_2 を考える。

システム Σ_1 は制御対象のシステムであり、システム Σ_2 は制御器や量子化器などの設計対象と

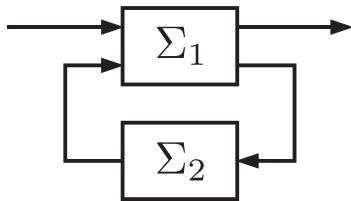


図1 提案手法の問題の定式化における一般的なブロック線図

なるシステムである。その他のパラメータは以下のように定義する。チューニングする設計モデルを P 、モデルからシステムへの写像を $\mathcal{M}: P \mapsto \Sigma_2$ 、データなどのハイパーパラメータを θ 、評価関数を J とする。本研究の提案手法では、システム設計手順 $\mathcal{M}$ を固定し、ある評価指標 J に基づいて設計モデル P を探索し、システム Σ_2 を構築する。まとめると、評価関数 J に基づいてモデル P を調整することで、最適なモデル P^* を取得し、システム Σ_2 を設計することを目的とする。この関係は以下のように表される。

$$P^* = \underset{P}{\operatorname{argmin}} J(\mathcal{M}(P); \Sigma_1, \theta)$$

つぎに、提案手法を具体的な問題に適用した際の問題の定式化について述べる。本研究では4つのシステムに提案手法を適用し、それぞれの場合のブロック線図は図2に示している。

まず制御系設計の例題として、提案手法を連続時間システムのための離散時間量子化器の設計に適用した(図2(a), (b))。ここで、サブシステム Σ_1 は連続時間システム G 、ホルダ H 、およびサンプラから構成され、サブシステム Σ_2 は量子化器 Q である。写像 $\mathcal{M}$ は動的量子化器の設計手順を表し、ゼロ次ホールドおよび離散時間システムの最適動的量子化器の設計式から構成される。提案手法では、設計手順 $\mathcal{M}$ を固定し、連続時間設計モデル P を探索した。図2(a)では、連続時間システム G は線形であり、

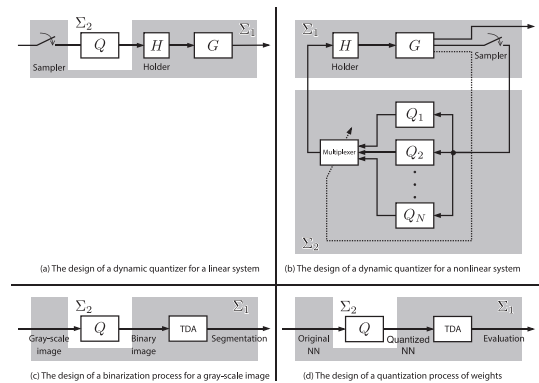


図2 提案手法を適用したそれぞれの具体的な問題のブロック線図

量子化器 Q は線形フィルタを持つ動的量子化器である。図 2(b) では、連続時間システム G は非線形であり、量子化器 Q は切り替え型の動的量子化器であり、線形量子化器 $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ から構成される。各サブ量子化器 $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ に対して、それぞれの設計モデル $P_1, P_2, \dots, P_N$ を求めた。

図 2(c), (d) では、提案手法を TDA (Topological Data Analysis) と量子化処理からなるシステムに適用した。ここで、サブシステム Σ_1 は TDA による処理プロセスであり、サブシステム Σ_2 は量子化プロセスである。本研究では、量子化プロセスの設計手順が固定された条件のもとで、量子化プロセス Σ_2 を設計することを目的とする。図 2(c) では、システム全体はグレースケール画像のセグメンテーションプロセスであり、 Σ_1 は二値画像のセグメンテーションのための TDA 処理プロセス、 Σ_2 はグレースケール画像を二値画像へ変換する二値化プロセス Q である。ここでは、二値化処理の設計手順 $\mathcal{M}$ を固定し、大津法やランダムディザリングなどの二値化アルゴリズム P を求めた。図 2(d) では、システム全体は量子化ニューラルネットワーク (Quantized Neural Network; QNN) の評価プロセスであり、 Σ_1 は QNN の TDA 処理、 Σ_2 はオリジナルの 32-bit の重みを持つ NN の重みを量子化する量子化プロセス Q である。ここでは、NN の重みの量子化プロセスの設計手順 $\mathcal{M}$ を固定し、量子化プロセスに必要な誤差拡散フィルタ P を求めた。

ここでは、図 2(b) の結果について、詳しく述べる。

この具体例では、図 3 のような倒立振子及び振り上げ安定化制御器を含むシステム G に対し、切り替え型の動的量子化器 Q を設計する問題を考える。振り上げ制御器は K_1, K_2 から構成され、それぞれ原点近傍での安定化のための状態フィードバック制御器とエネルギー法による振り上げ制御器である。同様に切り替え型動的量子化器も、サンプラ・ホルダ及びサブ量

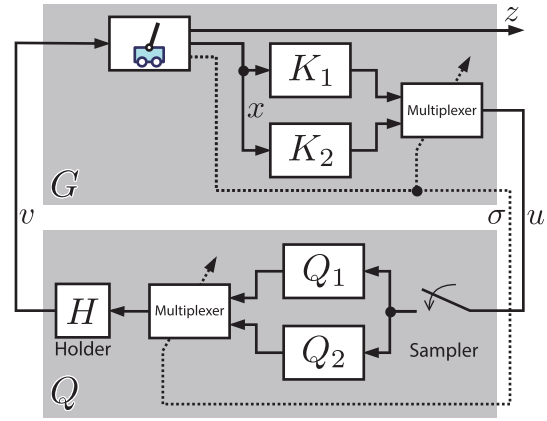


図 3 倒立振子の振り上げ安定化システム

子化器 Q_1, Q_2 から構成される。サブ量子化器 Q_1 は原点近傍で用いるので、与える設計モデルは原点近傍の線形近似モデルに固定し、振り上げフェーズで用いる量子化器 Q_2 の設計モデルを構築することを目指す。実際の設計には、以下の評価関数を最小化する設計モデルを求める。

$$J(Q) = \int_0^T \|z(t) - z_{\text{ref}}(t)\|_2 dt$$

ただし、 $z(t)$ は量子化器を含むシステムの、 $z_{\text{ref}}(t)$ は量子化器を含まない理想システムの出力である。

実際に最適化した設計モデルを用いて量子化器を設計した場合の結果は図 4 の赤線のようになり、理想システムの結果と同様に振り上げ安

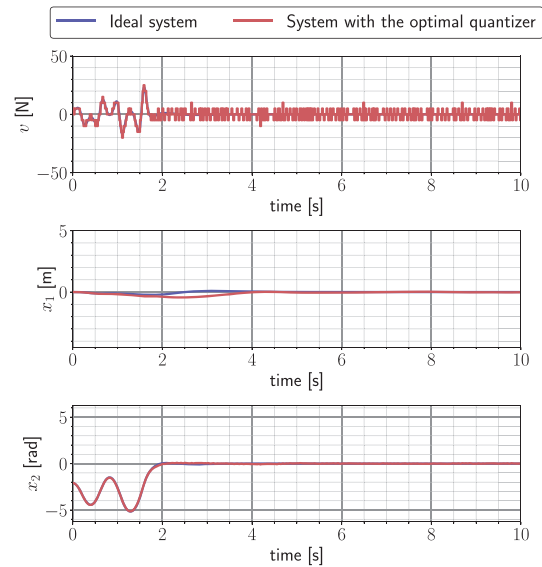


図 4 倒立振子の振り上げ安定化の結果

表 1 直接探索と提案手法の比較

方 法	評価関数の値			
	最小値	最大値	平 均	標準偏差
直接探索	0.318	56.6	9.32	13.3
提案手法	0.212	3.24	1.09	1.26

定化できている。

また、制御器の設計手順 $\mathcal{M}$ を経由して設計する提案手法と直接動的量子化器のパラメータを最適化する直接探索の最適化効率の比較を行うと、表 1 のように、提案手法の方が優れていることがわかった。

[成果の発表、論文など]

学術雑誌掲載論文

萩尾，南，石川：モデル探索アプローチによるサンプル値駆動型動的量子化器の設計，計測自動制御学会論文集，Vol. 59, No. 12, pp. 542-549 (2023)

Y. Ogio, N. Tsubone, Y. Minami, and M. Ishikawa: A TDA-based performance analysis for neural networks with low-bit weights, Artif Life Robotics, Published, (2025)

Y. Ogio, Y. Minami, and M. Ishikawa: A model-tuning approach to switching-type dynamic quantizer design for nonlinear systems: Int. J. Control Autom. Syst. Vol. 23, pp. 714-724 (2025)

国際会議（査読有り）

Y. Ogio, Y. Minami, and M. Ishikawa: A controller design method for continuous-time and discrete-valued systems, SICE Annual Conference (SICE AC 2022), Japan, Sep., (2022)

Y. Ogio, Y. Minami, and M. Ishikawa: Design of switching-type dynamic quantizers for continuous-time nonlinear systems, IFAC World Congress, Japan, Jul., (2023)

Y. Ogio, N. Tsubone, Y. Minami, and M. Ishikawa: A TDA-based performance analysis for quantized neural networks, AROB 29th 2024, Japan, Jan., (2024)

国内会議（査読無し）

萩尾，南，石川：離散値係数制御器の設計のための設計モデル，第 66 回システム制御情報学会研究発表講演会（SCI'22），京都，2022 年 5 月

受賞

第 66 回システム制御情報学会研究発表講演会 SCI 学生発表賞受賞

2024 年度計測自動制御学会関西支部 支部長賞 奨励賞受賞