



Title	Model-tuning Approach to Quantized System Design
Author(s)	荻尾, 優吾
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/101640
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (荻 尾 優 吾)	
論文題名	Model-tuning Approach to Quantized System Design (モデル探索アプローチによる量子化システム設計)
<p>論文内容の要旨</p> <p>The ultimate goal in the field of control engineering is to be able to manipulate the behavior of various systems freely. There are many methods for manipulating the behavior of a plant and controlling a system. One of the most sophisticated methods is the control system design based on the mathematical model of the plant. It is possible to achieve control performance by understanding the dynamics of a target plant. An accurate understanding of dynamics generally requires detailed models that reproduce various plant phenomena. However, there are cases where a detailed model is not required in control system design. For example, in the case of control around an equilibrium point for a nonlinear plant, a linear approximated model around the equilibrium point is sufficient, and a detailed nonlinear model is not necessary. In another case, detailed models cannot be used when the cost of controller design or computation time is constrained. In addition, even if a detailed model can be constructed, it may be difficult to use the detailed model in control system design. For example, Neural Network (NN) models are expected to be detailed models, but there is no design theory for NN models in conventional linear control theory.</p> <p>As described above, a detailed model is not always necessary in control system design; it is necessary to change models according to the design intent of the control system, such as control objectives and design specifications. To reflect the design intent in the models, I attribute the control system design problem to the model search problem. Motivated by the above background, this thesis focuses on the model-tuning approach for control system design as an optimization problem of models. In this thesis, I address several specific problems: problem formulation, application to the design of a dynamic quantizer in a control system, and application to the design of a quantization process in image and graph signal processing system.</p> <p>In Chapter 2, I formulate the problem of model-tuning approach for control system design. The proposed method first fixes the controller design procedure. Fixing the design procedure means characterizing the controller by a particular model. In this thesis, the model characterizing the controller is called the "Design model," and I search for the design model to satisfy the design specifications. In other words, the controller design problem is attributed to the design model search problem. The design procedure of the controller mathematically corresponds to the mapping from models to controllers. Since the mapping is given in the proposed method, the search space is the model space, not the controller space, and the controller is automatically designed once the model is constructed.</p> <p>In Chapter 3 and Chapter 4, I formulate the design problem of a dynamic quantizer based on our proposed method. Specifically, I deal with a sampled-data dynamic quantizer for a linear continuous-time system in Chapter 3 and a nonlinear continuous-time system in Chapter 4. The validity of our proposed method is demonstrated through the numerical examples and the comparison with the method that directly searches for the parameters of the dynamic quantizer.</p> <p>In Chapter 5 and Chapter 6, I extend the problem setting to design of a system using Topological Data Analysis (TDA). In Chapter 5, I design a binarization process of images in a system, which segments gray-scale images using TDA for binary images. In Chapter 6, I design a quantization process of weights of NNs in a system, which evaluates the performance of Quantized Neural Network (QNN). In both chapters, I demonstrate the effectiveness of the proposed method through numerical experiments.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (荻 尾 優 吾)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	准教授	南 裕樹
	副 査	教授	大須賀 公一
	副 査	教授	佐藤 訓志
	副 査	教授	石川 将人

論文審査の結果の要旨

制御系設計においては、制御対象のモデルを構築し、そのモデル情報を活用して制御器を設計するというモデルベースアプローチが一般的である。しかし、実際のシステムでは、詳細なモデルが構築できない場合や、たとえ詳細なモデルが得られても制御系設計に十分に活用できない場合などがある。本論文では、「制御系設計に必要なモデルとは何か」という根本的な問いに取り組むことを目的とし、制御器をある設計モデルのパラメータで特徴づけることで、制御器の設計問題を設計モデルの探索問題に再定式化するというモデル探索アプローチを提案している。そして、具体的に、離散値信号で駆動される量子化システムの設計問題に適用することで、提案アプローチの有用性を検証している。

第1章では、制御系設計におけるモデル探索アプローチの必要性について述べ、本論文の概要を説明している。

第2章では、制御系設計におけるモデル探索アプローチとその従来アプローチとの関連について説明している。提案手法は、制御器の設計手順と設計モデルを与えることで、制御器を設計モデルのパラメータで特徴づける。その上で、設計モデルのパラメータを設計仕様を満足するように探索するというものである。

第3章では、連続時間システムに対するサンプル値動的量子化器の設計問題を対象としている。まず、離散時間動的量子化器、サンプラ、そしてホールダで構成されるサンプル値駆動型動的量子化器の設計問題を定式化している。そして、その問題の解を得るために、動的量子化器の構成要素である線形フィルタを連続時間の設計モデルのパラメータで特徴づけ、離散化と量子化による性能劣化を最小化するモデルを求めている。また、数値例を通して、モデル探索アプローチを用いることで、効率的に優良解が得られることを確認している。

第4章では、連続時間非線形システムに対して、複数の動的量子化器を切り替えるスイッチング型動的量子化器を設計する問題を対象としている。各動的量子化器内の線形フィルタを連続時間の設計モデルで特徴づけることで、スイッチング型動的量子化器の設計問題を複数の連続時間設計モデルの探索問題に帰着させている。そして、この手法の有用性を台車型倒立振子の振り上げ安定化制御を題材とした数値例を通して、検証している。

第5章では、位相的データ解析を用いた濃淡画像のセグメンテーションプロセスを対象とし、濃淡画像を2値画像に変換する量子化器の設計に取り組んでいる。そして、量子化アルゴリズムをモデル探索アプローチの設計モデルと捉え、ランダムディザ法を選択することにより、セグメンテーションの精度が向上することを確認している。

第6章では、位相的データ解析を用いたニューラルネットワークの性能評価プロセスを対象としている。そして、学習済みのニューラルネットワークの推論精度をできるだけ劣化させないように、ニューラルネットワークの結合重み係数を量子化する問題に注目している。量子化アルゴリズムをモデル探索アプローチの設計モデルと捉え、探索の候補となる2種類の量子化アルゴリズムの性能を数値例を通して検証している。

第7章では、結論として論文の総括と将来展望を述べている。

以上のように、本論文では、制御系設計問題を設計モデルの探索問題に再定式化する手法を提案し、量子化システムの設計問題を通してその有用性を検証している。また、本手法は、時間信号の量子化に留まらず、画像信号やグラフ信号の量子化にも適用可能であることを示し、その適用範囲の広さを明確にしている。これは、当該分野において学術的に高い意義を持つものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。