OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Virtual Dynamics for Systems with Fixed Controllers through Signal Shaping
Author(s)	田中, 健太
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105437
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（田中　健太）	
論文題名	Virtual Dynamics for Systems with Fixed Controllers through Signal Shaping （固定制御器を持つシステムのための信号整形による仮想ダイナミクス）

論文内容の要旨

This dissertation examines control systems in which the controller is fixed. Controllers are frequently fixed in practical contexts, including certified and safety-critical systems where stability and performance must be maintained, or when humans act as controllers within the loop. Consequently, this problem setting is of considerable practical relevance.

Motivated by the above, this dissertation investigates an approach that introduces systems designed to shape information, termed *Alterer*s. The series interconnection of an Alterer, the plant, and another Alterer is treated as a new plant, designated as *Virtual Dynamics*. The objective is to enhance overall control system performance by constructing Virtual Dynamics that the fixed controller handles more effectively, utilizing Alterers to obscure problematic plant characteristics. This dissertation addresses three central questions: (i) which types of dynamics are more effectively managed by the fixed controller, (ii) which Virtual Dynamics arise from specific Alterers, and (iii) whether control performance is improved through Virtual Dynamics.

Chapter 3 positions dynamic quantizers for discrete-valued input control as Alterers that conceal the nonlinear characteristics of discrete-valued input constraints. The Virtual Dynamics design problem is formulated as minimizing deviation from an ideal continuous-valued system, subject to implementability constraints including stability, gain, and order. An open-source Python library, NQLib, has been developed to integrate the design and evaluation of dynamic quantizers. NQLib is used to demonstrate a procedure for designing Virtual Dynamics and to validate its effectiveness.

Chapter 4 introduces an Alterer that presents the agent with altered states of the plant, aiming to improve learning efficiency and final performance. The Virtual Dynamics design problem is formulated as finding an Alterer that minimizes the time required to achieve a target score. Numerical experiments on inverted-pendulum stabilization tasks demonstrate that prediction-type Alterers accelerate learning and improve final control performance. Additionally, experiments on second-order linear systems indicate that replacing an unstable zero with a stable zero through prediction enhances learning efficiency. These findings suggest that minimum-phase characteristics provide useful design guidelines.

Chapter 5 introduces an Alterer that alters and presents visual information in human-machine systems, aiming to improve operability. The Virtual Dynamics design problem is formulated as the problem of finding an Alterer that maximizes task performance. A simulator, The Inverted Pendulum Game, is developed, enabling information presentation via Alterers for human stabilization tasks. Experiments with 32 subjects compare a mode in which the Alterer presents a prediction of the inverted pendulum state 0.6 seconds ahead with a mode presenting the actual state. Results indicate that the median score in the future-prediction mode exceeds that in the real-presentation mode by more than a factor of two for all subjects, with reductions in both input and angle costs. To further understand the impact of this operability improvement, an analysis is conducted using a linearized model of The Inverted Pendulum Game and a human. This analysis demonstrates that prediction-based Alterers can eliminate the need for velocity and angular velocity information for system stabilization, providing guidance for Alterer design.

In summary, this dissertation presents a cross-domain framework for Alterer-based Virtual Dynamics design to enhance performance without modifying a fixed controller, validated through case studies in quantized control, reinforcement learning, and human operation.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（ 田中　健太 ）			
	（職）		氏　名
論文審査担当者	主 査	教授	石川　将人
	副 査	教授	井野　秀一
	副 査	教授	東森　充

論文審査の結果の要旨

本論文では、あらかじめ固定された制御器を持つ制御システムに対して、プラントの入出力信号を整形する情報改変器（Alterer）を導入し、それによって仮想ダイナミクス(Virtual Dynamics)を構成するという考え方を論じている。このアプローチのねらいは、情報改変器を用いて望ましくないプラント特性を隠し、仮想ダイナミクスが固定制御器にとって制御しやすいものにすることで、制御性能を向上させるということにある。全体として、本論文では(1) 固定制御器にとって制御しやすいシステムとはなにか、(2) 情報改変器からどのような仮想ダイナミクスが構成されるか、(3) 仮想ダイナミクスを通じて制御性能が向上するか、という問いに取り組んでいる。

本論文は 6 章からなる。第 1 章で序論、第 2 章で仮想ダイナミクス設計問題の概要について述べたのちに、第 3 章では、離散値入力制御のための動的量子化器設計問題をこの枠組みで考察している。本章では、情報改変器は離散値入力制約の非線形特性を隠すものとして位置づけられ、仮想ダイナミクス設計は安定性・ゲイン・次数といった実装制約のもとで、理想的な連続値システムとのずれを最小化する問題として定式化される。設計と評価を統合するために、申請者はオープンソース Python ライブラリ「NQLib」を開発しており、本章ではこれを用いた仮想ダイナミクスの設計手順の実装と有効性の検証について述べられている。

第 4 章では、学習エージェントによる制御問題において、プラントの状態を改変してエージェントに提示することによる学習効率と制御性能の向上について考察している。本章における仮想ダイナミクス設計は、目標スコア達成に必要な時間を最小化する情報改変器の探索として定式化される。倒立振子の安定化問題を対象とした数値実験を用いて、予測型改変器が学習を加速し最終制御性能を向上させることを示している。さらに、2 次線形システムを用いた数値実験を用いて、予測を通じて不安定な零点を安定な零点に置き換えることが学習効率を高めることを示している。これらの知見は、仮想ダイナミクスの設計指針として最小位相特性が重要であることを示唆するものである。

第 5 章では、人間機械系における操作性向上を目的として、人間に提示する視覚情報を変更する情報改変器の導入を提案している。本章における仮想ダイナミクス設計は、タスク性能を最大化する情報改変器探索問題として定式化される。申請者は、提案法により改変した視覚情報を提示できる「倒立振子ゲーム」を開発し、32 名の被験者を用いた実験を行った。倒立振子の状態を 0.6 秒先までの未来予測を提示するモードと、実状態を提示するモードを比較した結果、全被験者において未来予測モードのスコアが向上することが示された。さらに、操縦者の特性を線形モデルで表現した理論的解析を行い、未来予測によって速度・角速度情報を用いずに制御できることを示している。

第 6 章では結言を述べている。

以上のように、本論文は固定制御器のもとで、情報改変器に基づいて制御性能を向上させる仮想ダイナミクス設計のための枠組みを提示し、量子化制御・強化学習・人間機械系における事例研究を通じて検証したものであり、学術的意義が高い。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。