

Control of Generalized Physical Systems for Real-World Haptics

September 2014

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy in Engineering



Keio University

Graduate School of Science and Technology
School of Integrated Design Engineering

Morimitsu, Hidetaka

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 第 号	氏 名	森 光 英 貴
主 論 文 題 目 : Control of Generalized Physical Systems for Real-World Haptics (実世界ハプティクスのための一般化物理システムの制御)			
<p>(内容の要旨)</p> <p>近年、音声や映像といった聴覚および視覚情報に続き、人間の持つ触覚を取り扱う実世界ハプティクスと呼ばれる学問分野が発展を見せている。本分野ではマスタ・スレーブ間で双方向に制御を行うバイラテラル制御が基盤技術として扱われており、特にモータを用いた力触覚伝送に関して広く研究が行われている。一方で触覚においては温熱覚も重要な要素であり、これまで熱デバイスを用いた温熱覚呈示について研究例が報告されている。しかしながら触覚呈示分野では各構成要素が殆ど独立に研究されており、触覚伝送に関する統一的な解釈は未だ生み出されていないと言える。</p> <p>本研究の目的は、力触覚や温熱覚を環境との相互作用におけるエネルギー交換現象として一般化させ、触覚伝送制御に関する統一的な枠組を構築することにある。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景および目的について関連研究を交えて概説している。</p> <p>第 2 章では、触覚伝送の鍵技術となる一般化デバイスの横断変数変化率制御について述べている。通過変数に関して外乱オブザーバを導入することで、物理系の種類に関わらず横断変数変化率がロバストに制御されることを実験により確認している。</p> <p>第 3 章では、前章において構築したシステムを複数用意し、遠隔地間の触覚伝送制御を行うための統一的なシステム枠組を提案している。横断変数変化率の参照値を 4ch 通信の構造に基づき算出することで、触覚エネルギーの高精度な伝送が可能になる。性能に関しては一般化介在インピーダンスやボンドグラフ、極配置による解析を行っており、また力触覚および温熱覚伝送実験により解析の妥当性を検証している。</p> <p>第 4 章では、触覚伝送において課題となる通信遅れに着目し、制御系の性能劣化を回復させるための補償器を提案している。補償器は触覚の伝達特性に基づき設計されており、動作状況に合わせた適応アルゴリズムを構成することで性能回復を実現している。手法の有効性はシミュレーションおよび通信実験によって検証を行っている。</p> <p>第 5 章では、触覚通信においてデバイスの応答性が異なる場合を取り扱う。デバイス帯域の差に起因する触覚伝送性能の劣化を補償するため、本研究ではシステムのモード解析に基づき補償器を設計する。提案法により横断変数および通過変数の同時制御に関する干渉を低減させることが可能となり、またその効果に関して力触覚および温熱覚の伝送実験により確認を行っている。</p> <p>第 6 章では、温熱覚呈示システムにおけるセンサ熱容量を削減し全体の応答性を向上させるため、システムに流入する熱量のオブザーバ構築に関して述べている。オブザーバは熱システムを分布定数系と捉えた上で構成しており、その有効性について温熱覚通信および力触覚と温熱覚の異感覚情報通信の実験により検証を行っている。</p> <p>第 7 章では、本研究の成果を要約し展望と共に結論を述べる。</p> <p style="text-align: right;">以上</p>			

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	First name Surname Hidetaka Morimitsu
Title <div style="text-align: center; font-weight: bold;">Control of Generalized Physical Systems for Real-World Haptics</div>		
Abstract <p>Recently, the academic field called “real-world haptics” has been developing. The research field aims to establish the methodologies to handle the tactile sensation of human following to the audio and visual information. The bilateral control consisting of master and slave systems is treated as the fundamental technology in real-world haptics, and especially the remote communication of kinesthetic sensation using electrical motors has widely been researched up to now. On the other hand, the thermal sensation is also the one of the important elements for haptic sensation, and the researches on rendering the sensation using the thermal actuators have been reported. However, these elements are researched almost independently and the framework for the haptic communication has not been produced yet.</p> <p>This research aims to establish the unified control framework of haptic transmission system, regarding the haptic sensations such as kinesthetic and thermal sensations as the phenomena of stimulation by the physical interaction involving the exchange of physical power.</p> <p>Chapter 1 explains the background and objectives of the research, with the introduction of previous researches related to this dissertation.</p> <p>In Chapter 2, the unified control device is treated, and the robust control of across variable flow (AVF) is proposed as the key technology for the haptic communication. Regardless of the kinds of physical systems, the robustness is improved by implementing the observer for disturbance through variables. The validity of the proposal is verified by experiments using motor and Peltier device.</p> <p>Chapter 3 describes the generalized control framework of haptic communication, and AVF-based 4ch bilateral control is constructed. The proposed system enables the reproduction of haptic power interaction with high performance, and the system is analyzed using generalized intermediate impedances, power flow represented by bond graph and pole movements of control system. The experiments using mechanical and thermal systems show the reasonability of the analyses, and the validity of the proposal is confirmed.</p> <p>In Chapter 4, communication delays between the haptic systems are focused. For addressing the problem of performance degradation caused by the delays, the compensation filter for haptic communication is proposed. The compensator is designed on the basis of hybrid parameters of bilateral control system, and the algorithm for adapting to the status of operation is constructed. Simulations and communication experiments show the effectiveness of the compensator.</p> <p>Chapter 5 handles the haptic communication between systems with different control performances. In order to compensate for the performance degradation due to the difference of bandwidths, the compensator based on the analyses on the modal space is proposed. The compensator reduces the interference between the controls of across and through variables, and its effectiveness is confirmed by experiments of mechanical and thermal communications.</p> <p>In Chapter 6, observer of heat inflow for thermal haptic display is proposed. By omitting the heat flow sensor, thermal capacitance of system that induces the response lags is reduced. For constructing the estimation observer, the distributed parameter model of the system is made. The validity of the proposal on the bandwidth enhancement of the thermal system is confirmed by thermal bilateral control and mixed rendering of mechanical and thermal sensation.</p> <p>Lastly, this dissertation is concluded with the prospects in Chapter 7.</p>		