

**Estimation and Compensation of  
High-Order Disturbance for  
Motion Control Systems**

March 2017

**NAGATSU, Yuki**

## 主 論 文 要 旨

報告番号	甲	第	号	氏 名	長 津 裕 己
主 論 文 題 目： Estimation and Compensation of High-Order Disturbance for Motion Control Systems (モーシヨンコントロールシステムのための高次外乱推定と補償)					
(内容の要旨) 近年、先進諸国では少子高齢化が進行しつつあり、ロボットによる人間の行為の代替技術が求められている。特に人間の運動情報の保存および再現を高精度に実現するためには、精密な軌道追従および接触力再現を行うためのモーシヨンコントロールが必要になる。モーシヨンコントロールにおいて、未知の外乱およびセンサ雑音の影響の補償に関してはこれまでに多くの研究がなされてきている。しかしながら、高速かつ高精度な動作の実現にあたっては、外乱の持つダイナミクスをより積極的に考慮しなければならない。そこで本研究は、この問題を解決するために、モーシヨンコントロールシステムのための高次外乱推定と補償法を確立することを目的としている。 第1章では、本研究の背景および目的について、関連研究を交えて説明した。 第2章では、外乱推定における雑音の影響を明確化するために、確率的な振る舞いを考慮した高次外乱モデルの定義を示した。また、最高次数にプロセス雑音を含めた外乱モデルを構築することで、最適フィルタとして知られるカルマンフィルタに基づいた外乱観測器が構成可能になることを明らかにし、その設計法を示した。さらに力制御系に対して、提案する高次外乱推定器を適用し、その性能の検証を行った。 第3章では、環境との接触を行う力制御系に対して、環境の剛性や粘性の変動を考慮したカルマンフィルタに基づく高次環境外乱補償法を提案した。提案する制御系により、力制御の理想的な特性を維持しつつ、安定な接触動作が可能になることを示した。 第4章では、人間の動作情報の取得に必要となる位置・力ハイブリッド制御系において、それぞれの制御性能を向上するための非干渉化手法を提案した。特にロボットの作業空間における加速度制御をハイブリッド制御系へ拡張することで、ハイブリッド制御系特有の外乱を補償することが可能であることを示し、性能向上が実現可能であることを確認した。 第5章では、ロボットによる人間の動作再現における対象環境の変化に対する適応手法について検証した。まず、動作再現制御の目標追従特性を定式化し、再現精度の解析・評価法を示した。さらに、環境の変化を動作再現における環境外乱として定義して、動作再現補償器を構成することで、従来手法では困難であった動作の高精度な再現ならびに環境変動への柔軟な適応の同時実現が可能になることを示した。 第6章では、保存された人間の動作情報の汎用性を拡張するための方法について示した。前章までの手法を統合し、これらを動作保存・再現制御へ適用することで環境変動やセンサ雑音の影響に対して柔軟かつロバストに適応できることを示した。 第7章では、本研究の成果を要約し、展望とともに結論を述べた。					
以上					

## SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	SURNAME, Given name NAGATSU, Yuki
Title <b>Estimation and Compensation of High-Order Disturbance          for Motion Control Systems</b>		
Abstract <p>Recently, aging of the population and declining birthrates have progressed in some developed countries. In such a society, motion control technologies for robots as a substitution of human workers will become important. Especially, a precise trajectory/force control for contact motions is required to preserve and reproduce the human motions. There are a lot of researches that deal with compensation of unknown disturbance and sensor noise. However, motion control systems should have ability to consider higher-order dynamics of disturbances. The purpose of this dissertation is to establish strategies for the estimation and compensation of high-order disturbance in motion control systems for solving the problems described above.</p> <p>Chapter 1 introduced the background and objective of this dissertation.</p> <p>In chapter 2, models of the high-order disturbances with considering stochastic behavior in actuators and environments were defined to clarify effects of noises in the estimation. In addition, this chapter showed that a high-order disturbance observer based on Kalman filter which is known as an optimal filter becomes easy to design by including a process noise in highest order of the time derivative of the disturbance as a model. Additionally, the proposed observers were applied to force control systems and the performance was investigated.</p> <p>Chapter 3 showed that the force control systems by considering the similarity between a two-mass resonant system and a force control system with a contact environment. Additionally, high-order compensation of an environmental disturbance was attained by considering the variation of stiffness and viscosity. The proposed method achieved the simultaneous attainment of maintaining an ideal characteristic of force control and stable contact motions.</p> <p>Chapter 4 showed that a decoupling control of a hybrid position/force control for precise attainment of control performance. Furthermore, a method for suppressing a particular disturbance in hybrid controller was proposed by extending an acceleration controller with respect to the work space of a robot to a hybrid position/force control. The performance enhancement of the proposal was confirmed.</p> <p>Chapter 5 showed that an adaptation method for environmental variation between the motion extraction phase and motion reproduction phase. By formulating the characteristics of tracking performance with respect to the motion reproduction control, the analysis and performance evaluation methods were shown. Furthermore, by regarding the environmental variation as the environmental disturbance in the motion reproduction, motion reproduction compensators were proposed to suppress the environmental disturbance. The proposed method achieved the simultaneous attainment of the precise motion reproduction and flexible adaptation to environmental variation which were difficult for the conventional method.</p> <p>Chapter 6 described the proposed method for extending the general versatility of the saved human motion information. By integrating and applying the methods shown in the former chapters to a motion reproduction system, the flexible and robust motion reproduction was attained against the environmental variations and effect of noises.</p> <p>Finally, this dissertation was concluded in chapter 7.</p>		