

Acceleration-Based Bilateral Teleoperation System under Time Delay Based on Modal Space Analysis

September 2013

A thesis submitted in partial fulfilment 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

Suzuki, Atsushi

主 論 文 要 旨

報告番号	甲	第	号	氏 名	鈴木 敦
主論文題目： Acceleration-Based Bilateral Teleoperation System under Time Delay Based on Modal Space Analysis (モード空間の解析に基づく通信遅延によるむだ時間下における加速度制御を用いた双方向遠隔操作)					
(内容の要旨) 近年、触覚伝達を可能にする2台のマスタ、スレーブロボットを用いたバイラテラル(双方向)遠隔操作に注目が集まっている。バイラテラル遠隔操作の危機的な問題の一つに通信遅延により生じるむだ時間の影響によるシステムの性能劣化と不安定化が存在する。このむだ時間によって、バイラテラル遠隔操作の安定性と性能は著しく劣化してしまう。本論文では、通信遅延によるむだ時間下におけるバイラテラル制御系にモード分解(座標分解)を施すことによって、むだ時間下における位置制御と力制御のそれぞれの安定性を解析する。また、解析に基づきむだ時間下においても高い性能と安定性を実現できるバイラテラル制御システムを提案する。 第一章では、本研究の背景及び目的を述べている。 第二章では、本研究で用いるロバスト加速度制御について述べている。 第三章では、通信遅延下における加速度制御に基づくバイラテラル制御について述べている。 第四章では、性能評価指標である再現性と操作性について述べている。 第五章では、従来手法である通信外乱オブザーバについて述べている。 第六章では、従来手法である速度フィードバックによる粘性付加について述べている。 第七章では、提案手法である周波数整形フィルタを用いた周波数領域における粘性の最適設計について述べている。具体的には、速度フィードバックにハイパスフィルタを通すことにより、不安定になりやすい高周波領域にのみ大きな粘性を付加させる。これにより、快適な操作性を維持したまま、環境との接触時における高周波の振動を抑えることができる。 第八章では、触覚コミュニケーションのための新しいバイラテラル制御の構造について述べている。 第九章では、周波数整形フィルタを用いた新しい通信外乱オブザーバによるむだ時間補償について述べている。不安定になりやすい高周波領域にのみ、むだ時間補償を行うことによりマスタ、スレーブの両方から操作が可能なバイラテラル制御系を提案している。 第十章では、通信外乱オブザーバの補償値にスケーリングを施すことによる環境に適応的な性能調整手法について述べている。 第十一章では、環境と接触しないと仮定したスレーブのモデルと実際のスレーブロボットとの速度差フィードバックによる安定化手法について述べている。 第十二章では、結論として本研究の成果を要約している。					

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	SURNAME, First name SUZUKI, Atsushi
<p>Title</p> <p style="text-align: center;">Acceleration-Based Bilateral Teleoperation System under Time Delay Based on Modal Space Analysis</p>		
<p>Abstract</p> <p>Recently, many people pay attention to bilateral teleoperation system. This system consists of two master and slave robot. The operator manipulates the master robot, and the remote slave robot follows the motion of master robot. The slave robot contacts with an environment, and the reaction force is fed back to the master robot. As a result, the operator can feel the reaction force from a remote environment as if he touches it directly by his hand. This dissertation utilizes acceleration-based bilateral control (ABC).</p> <p>However, if there exists time delay on communication line, it seriously deteriorates the performance and stability. Time delay in feedback loop is still one of the critical issues in any control system. As a result, stability analysis gets more important when the system gets destabilized caused by time delay. However, the way to analyze the stability of ABC has not been established. In this control system, force control and position control are worked simultaneously in the acceleration dimension. ABC is realized in two virtual modal spaces. The sum of master force and slave force is controlled to be zero in common modal space to realize the law of action-reaction. The difference between master position and slave position is controlled to be zero in differential modal space for position tracking.</p> <p>This dissertation analyzes the stability of each modal space, that is, common modal space and differential modal space. According to modal decoupling, design of ABC can be treated as a simple position control and force control about one robot separately. This dissertation analyzes the stability of each modal space under time delay. Based on modal space analysis, this dissertation proposes some novel controller designs focused on loop-shaping of each modal space.</p> <p>In Chapter 1, the background and the purpose of this research is described.</p> <p>In Chapter 2, robust acceleration control using disturbance observer is described.</p> <p>In Chapter 3, acceleration-based bilateral control (ABC) under time delay is described.</p> <p>In Chapter 4, the performance indices of ABC: reproducibility and operability are described.</p> <p>In Chapter 5, conventional solution method: Communication Disturbance Observer (CDOB) is described.</p> <p>In Chapter 6, conventional solution method: Damping injection by velocity feedback is described.</p> <p>In Chapter 7, proposed solution method: "Frequency-domain Damping Design" (FDD) for ABC is described. FDD changes the strength of damping injection depending on frequency area in order to high operability and stability. Time delay element delays the phase of any feedback system in proportion to the frequency value. This means that the control system which has time delay element tends to become unstable in high frequency area. From this reason, this dissertation proposes high damping injection only in high frequency area using loop-shaping HPF. The design of loop-shaping HPF is based on robust H-infinity stability condition.</p> <p>In Chapter 8, novel 4ch ABC design for haptic communication under time delay is described.</p> <p>In Chapter 9, new design of CDOB" is described.</p> <p>In Chapter 10, adaptive performance tuning of ABC by using CDOB is described.</p> <p>In Chapter 11, velocity difference damping for ABC is described.</p> <p>Chapter 12 summarizes the results of this study.</p>		