

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 3955 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)			
<p>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。</p> <p>第一章では、本研究の背景及び目的を述べている。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>第十章では、通信外乱オブザーバの補償値にスケール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。</p> <p>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。</p> <p>第十二章では、結論として本研究の成果を要約している。</p>			

## 論文審査の要旨

報告番号	甲 第 3955 号	氏 名	鈴木 敦
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 大西 公平
	副査	慶應義塾大学教授	博士(工学) 村上 俊之
		慶應義塾大学教授	工学博士 山中 直明
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 矢向 高弘
<p>学士(工学), 修士(工学) 鈴木 敦 君提出の学位請求論文は「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)と題され, 12 章から構成されている.</p> <p>力触覚を伴う遠隔操作は産業応用のみならず外科手術など人間支援の観点からもその開発が望まれている. しかし, 通信遅延により性能劣化のみならず遠隔操作システム全体が不安定に陥ることもあり, 解決すべき課題が多い. 本論文は通信遅延による性能劣化が操作性と再現性という二つの性能指数で表せることを示し, それに基づく通信外乱オブザーバと整形フィルタの併用による性能改善を提案している.</p> <p>第 1 章と第 2 章では, 研究の背景と目的を述べ, 従来の研究を概説するとともに双方向制御の基本になっている加速度規範双方向制御理論を概説している.</p> <p>第 3 章と第 4 章では, 通信遅延のある双方向制御のモデル化を行うとともに力触覚伝送における定量的な性能指数である操作性と再現性を定義し, その理論的根拠を明らかにしている.</p> <p>第 5 章では, 遅延を等価加速度外乱とみなすことで双方向制御におけるロバスト性の向上が通信遅延補償と等価になることを示し, 通信外乱オブザーバがマスタ・スレーブ間の差モード制御である位置同期制御の安定性改善に効果的であることを明らかにしている. しかし, 同時に作用反作用則を実現する和モード制御においては安定性への寄与が少ないことも指摘している.</p> <p>続く第 6 章と第 7 章では, 和モード制御に等価的な局所粘性付加制御を適用し安定性の確保が可能であることを明らかにすると共に, ジッタのある遅延に対してもH<sup>∞</sup>ノルムによる制御系の設計を通じてロバスト安定性の確保が可能であることを明らかにしている.</p> <p>第 8 章と第 9 章では, 通信外乱オブザーバを改良し, より性能の高い力触覚通信手法を提案している. 通信外乱オブザーバはその上限遮断周波数付近で通信遅れによる不安定性を補償しきれないため, 力触覚伝達性能と遠隔システム安定性の双方を満足する整形フィルタを設計する手法を提示しジッタのある通信エミュレータを用いた実機による実験でその効果を確認している.</p> <p>第 10 章では, 遠隔操作において性能が劣化する再現性について通信外乱オブザーバの補償値にスケーリングを行うことで性能改善がなされることを示している.</p> <p>第 11 章では, 遅延のある双方向制御で自由動作時にマスタ側で観測される不必要な負荷力を低減する手法を提案し, 実験でその効果を確認している.</p> <p>第 12 章は, 本論文の結論である.</p> <p>以上要するに, 本論文では力触覚通信において, 通信遅延により劣化した再現性と操作性を通信外乱オブザーバと整形フィルタを併用して性能の改善を図ったもので, ハプティック通信分野において, 工業上, 工学上寄与するところが少なくない.</p> <p>よって, 本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める.</p>			