

京都大学	博士（工 学）	氏名	菅 野 貴 皓
論文題目	受動性に基づく可変スケール型とマルチラテラル型 テレオペレーションシステムの構築と評価		
（論文内容の要旨） 本論文は、マスタ・スレーブ型の遠隔操縦型ロボットのなかでも、可変スケール型テレオペレーションシステムと通信遅延のあるマルチラテラル型テレオペレーションシステムについて、受動性に基づく制御系設計と実システムの構築を行った結果をまとめたものであって、6章からなっている。 第1章は緒言であり、微細作業用テレオペレーションシステムや計算機ネットワークを介したテレオペレーションシステムについての研究背景について述べられている。 第2章では、マスタアームとスレーブアームとの間の動作倍率（スケール比）を操縦者が調整できる可変スケールテレオペレーションシステムのバイラテラル制御手法について議論を行なっている。これまでに提案されていた定数スケールド H_{∞} 制御とゲインスケジューリング制御を用いた手法は、受動的なオペレータと環境に対して理論的にロバスト安定性を保証できるものの十分な制御性能を達成できていなかった。本論文では上記の手法をもとに、実用的な制御性能を得るための具体的なコントローラ設計手法を提案している。具体的には、まず従来の理想的な制御目的を緩和してシステムの位置を原点に引き戻す介在バネ要素を導入し、最適化計算の数値的安定性を向上させている。次に、制御目的に対する重み付けについて、従来は試行錯誤によって決定されていたものを体系的に設計する手順について議論を行い、さらにスケール比に依存する重みを提案している。これらの提案手法の有効性について、シミュレーションにより確認を行っている。さらに、実機において摩擦などの影響で制御性能が低下するという課題に対し、アームの動作を理想的な線形モデルの応答に近づけるような補償器の実装を行い、提案する可変スケールバイラテラル制御が実機においても実用上十分な制御性能を達成していることを確認している。 第3章では、可変スケールテレオペレーションが実際に作業効率の向上に役立つかどうかを検証するためのユーザビリティ評価を行なっている。まず、マイクロスコープのズームレンズをモータ駆動化した視覚システムを製作し、速度のスケール比とズーム倍率を連動させ第2章で構築した操作システムとの統合を行っている。次に、予備実験の結果をもとにユーザインタフェースの設計を行い、本実験を行なって可変スケールテレオペレーションの有効性を検証している。実験結果では、9名の被験者のうち3名についてタスクの所要時間が短縮され作業効率が向上することを確認している。 第4章では、計算機ネットワークを介したバイラテラル制御について議論を行なっている。計算機ネットワークを介した通信には時間遅れが存在するため、バイラテラル制御の安定性や追従性に大きな影響を及ぼす。波変数に基づく制御は、任意長の一定時間遅れに対してシステムの受動性を保証する手法であるが、計算機ネットワークなどの変動時間遅れが存在する環境下では、受動性が保証されずマスタとスレーブの位置がドリフトするという問題が存在する。時間遅れの変動による位置のドリフト			

京都大学	博士（工 学）	氏名	菅 野 貴 皓
は、波変数の積分値を用いたフィードバック補償を導入することで解消することができていたが、波変数の積分演算そのものの数値誤差や初期位置のずれによる位置ドリフトには対応できていなかった。本論文では、積分誤差フィードバックに等価な式変形を施すことによって、マスタとスレーブの絶対位置の誤差をフィードバックする制御則を導出している。さらに、エネルギー収支モニタを導入し位置ドリフト補償や変動時間遅れに対しても受動性を保証している。実際の計算機ネットワークの遅延を再現した環境で実験を行った結果、マスタとスレーブとの間に初期位置のずれが存在する場合でも提案手法によって位置のドリフトが解消されていることを確認している。 第5章では、複数のマスタアームを用いて複数人が協調してロボットの操縦を行えるマルチラテラル・テレオペレーションシステムについて議論を行なっている。本論文では、任意長の一定時間遅れに対して受動性を保証し、かつ任意台数のロボットを接続することのできるマルチラテラル制御則を提案している。第4章で議論を行った波変数に基づく1対1のバイラテラル制御を拡張し、複数の波変数伝送路を節点で結合することにより、複数人の操縦者があたかも分岐した棒を介してロボットを動かしているかのような感覚で協調作業を行うシステムを実現している。また、提案手法が理論的に受動性条件を満たしていることを示している。実験においては、使用したロボットの摩擦の影響で多少の追従誤差が存在するものの、安定性と理論の妥当性が示されている。さらに、本論文では片方のオペレータが作業手順を誤ったり操縦ミスをするなどの、オペレータの操作が競合した場合に対処する制御則を提案している。提案手法は、初心者などの操作の優先度が低い側のマスタアームに対して、力が閾値を超えると柔らかくなるような仮想非線形バネを挟むことで、初心者操作入力を抑制するものである。仮想非線形ばねの種類として、入力飽和型のものと2段階ゲイン型のものを提案している。提案手法の有効性を確認するために、マスタアーム2台と仮想環境からなる実験システムを構築し、経験者と初心者の共同作業を想定した実験を行なっている。実験では、片方のオペレータに対して誤ったタスクを指示することによって、オペレータの操作ミスを人工的に発生させている。実験結果から、提案手法のうち2段階ゲイン型のものを用いることでタスクの成功率が最も高くなることが示されている。 第6章は結言であり、本論文で得られた成果について要約し今後の課題について述べている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、マスタ・スレーブ型遠隔操縦ロボットのうち、可変スケール型テレオペレーションとマルチラテラル型テレオペレーションについて、安定に動作する制御系の設計と使いやすいシステムの構築を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 可変スケール型テレオペレーションにおいて、スケールド H_{∞} 制御とゲインスケジューリング制御を用いて受動的なオペレータと環境に対して安定なコントローラの設計を行なっている。これまで制御系の重みの設定が難しく十分な制御性能のあるコントローラを得ることができていなかったが、介在バネ要素付き制御目的とスケール比依存重みの導入、さらに体系的な重み調整方法を導入することで、制御性能を向上させている。また、実際に動作する1自由度の可変スケールシステムを構築し、摩擦によるロバスト制御器の性能低下を補償する制御を導入することで、実機でも十分な制御性能を達成している。

2. 可変スケールテレオペレーションについて、操作システムと視覚システムからなる統合システムを構築している。さらにスケール比調整インタフェースについて、被験者実験に基づいたインタフェースの改良を行い、改良後の実験システムにおいて可変スケールが有効となることを確認している。

3. 一定時間遅れに対して受動性を保証する波変数に基づくバイラテラル制御において、絶対位置の誤差をフィードバックすることで計算機ネットワークの変動時間遅れ、数値積分の誤差、初期位置のずれといった様々な要因で起こる位置ドリフトを補償する制御則を提案し、さらにエネルギー収支モニタを導入し補償制御や変動時間遅れに対しても受動性を保証している。

4. 計算機ネットワークを介した複数ユーザによる協調作業を実現するため、波変数を拡張し受動性を保証するマルチラテラル制御を提案している。また、オペレータ間に操作入力の優先度を設定するために仮想非線形バネを挟む手法を提案し、被験者実験によって仮想非線形バネの有効性を示している。

本論文は、可変スケール型とマルチラテラル型のテレオペレーションについて、理論的に安定性を保証する制御則を提案するとともに、被験者実験を実際に行なってシステムの有効性を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。