

氏 名	エマヌエル ベンジャミン ヴァンダー ポールテン Emmanuel B. Vander Poorten
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2836 号
学位授与の日付	平 成 19 年 5 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	IMPROVING HAPTIC FIDELITY FOR INTUITIVE MANIPULATION IN SCALED TELEOPERATION AND VIRTUAL ENVIRONMENT (スケールドテレオペレーションと仮想環境における直感的操作のための力覚 提示の忠実度の向上)
論文調査委員	(主 査) 教 授 榎 木 哲 夫 教 授 市 川 朗 准教授 横 小 路 泰 義

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、スケールドテレオペレーションと仮想環境における直感的操作のための力覚提示の忠実度向上に関するものであり、6つの章から構成されている。

第1章は序論であり、研究背景と論文の目的、論文構成と各章の概要について述べている。

第2章では、位置と力のスケール比を固定とした場合でのスケールドテレオペレーションにおける安定性解析とロバスト制御に関する議論を行っている。微細手術などへの応用が考えられるマイクロテレオペレーションを含むスケールドテレオペレーションにおいては、安定性の条件としてシステムを散乱行列で表現したときの構造化特異値を考える必要がある。本論文では、1自由度系であればこの構造化特異値の条件が行列の要素に依存したあるスケール変換を施すことで単純な最大特異値の条件に置き換えられることを示した。これにより安定性の条件の導出を簡単化することができた。

位置と力のスケール比を固定とした場合でのスケールドテレオペレーションにおける理想的なシステムの応答に近い応答を実現する制御則として、これまでに介在インピーダンスを導入した制御則が提案されているが、この制御則を適用したときの系全体の安定性はこれまでは構造化特異値を計算して数値的にチェックするしかなかった。本論文では、先に示した条件を用いることで構造化特異値に関する安定性条件を解析的に示すことができるようになり、制御則の各パラメータの決定を見通しよく行えるようになった。

またこの介在インピーダンスを導入した制御手法を1自由度の実験装置上に実装し、位置のスケール比を10、力のスケール比を100とした場合の実験を行った。その結果、従来手法と比較して介在インピーダンスを導入した手法が理想応答に近いことを実験的にも検証することができた。

第3章は、 H_∞ 制御法と線形行列不等式 (LMI) を使って、スケールドテレオペレーションのためのバイラテラル制御則の設計手法について議論している。第2章で議論した構造化特異値に基づく安定性の条件は、厳密には不確かさとして扱っているオペレータと環境の特性が線形でかつ時不変という前提が必要であった。しかしながら、これらオペレータと環境の特性は実際には受動的という条件は満たすものの非線形でかつ時変である。このような特性の不確かさに対して安定性を保証するには、構造的な不確かさに対応した定数スケール付きの H_∞ ノルムの条件がより適当である。

本論文では、スケールドテレオペレーションにおける安定性の条件としては構造化特異値よりも定数スケール付き H_∞ ノルムの条件がより適当であることをまず明確にし、またこの条件を満たすコントローラの設計に際してはLMI問題に置き換えることで見通しよく解が得られることを示した。コントローラの設計に際しては、スケールドテレオペレーションシステムの制御性能を規定する2種類の方法を提案し、ロバスト制御性能問題として扱うことで、実際にコントローラを導出する手法を定式化した。

構造化された不確かさとして扱うオペレータや環境の特性を単に受動的であるのみとすると、扱うクラスが広すぎるので

設計されたコントローラが保守的になりがちである。そこで本論文では設計されたコントローラが過度に保守的とならないように、オペレータの動特性に関する先見的知識としてオペレータのインピーダンスの最大値を導入する手法を提案した。オペレータの動特性に関する先見的知識を導入することで安定性の条件が緩和されることは以前より知られていたが、本論文ではオペレータと環境を構造化された不確かさとみなして実際にコントローラを設計する手法に初めてこの考え方を導入した。

提案した手法の有効性を検証するために、数値シミュレーションを行ったところ、オペレータの動特性に関する先見的知識を取り入れたほうがコントローラの性能が高くなることが確かめられた。またシステムの制御性能を規定する手法については、介在インピーダンスを導入してより少ない次数で制御性能を規定したものの方がより良い性能を有することが示された。

第4章は、位置と力のスケール比を操縦者が操作中に自由に変更可能とすることで操縦者の直感性を活かし、操作者の微細操作の能力を向上させる手法について議論している。微細手術などのスケールドテレオペレーションでは、状況や好みに応じて操縦者がスケール比を操作中でも自由に変更できるようすることが望ましい。しかし、スケール比を可変とすることでシステムは一種の時変システムとなり、操縦者が任意にかつダイナミックに選んだスケール比においてシステムが理想応答に近い応答を実現しながら安定性を保つコントローラを構成しなければならない。

本論文では、このような可変スケーリングテレオペレーションのための制御系設計のために、前章で示した線形行列不等式を用いる制御系設計手法を基本としながら、可変スケールというパラメータ依存型の線形時変システムを扱うためにゲインスケジューリングの手法を適用することを提案している。本論文では、スケジューリングパラメータに関してシステムがアフィンになることから、可変スケールのシステムがスケジューリングパラメータの端点におけるシステムの線形結合で表わされる (Polytopic表現) ことを示した。これによりコントローラも Polytopic 表現とすることができるので、各端点での LMI 条件を連立させることでコントローラの解を得ることができる。

ただし、複数の端点での LMI 条件を連立させることで得られる制御系が保守的となりがちなので、本論文では制御系設計の重要なプロセスである各変数に対する重みをスケール比依存とすることで制御系の性能を向上させる手法を提案した。ただし、重みもスケジューリングパラメータ依存となるため、その実現 (状態方程式表現) 方法に注意をしないとスケジューリングパラメータに関するシステムのアフィン性が崩れてしまう。本論文では、重みをスケール比依存とした場合でもアフィン性が保たれる手法を提案している。また重みをスケール比依存とした場合の方が一律の重みを用いた場合に比べてより良い性能を有することを数値シミュレーションで確かめ、提案手法の有効性を検証した。

第5章はこれまでのスケールドテレオペレーションとは違って、仮想環境での剛体壁との接触の際に発生する衝撃力を忠実に再現するための新しいハプティックデバイスの機構の提案と実験的検証を行っている。

これまでは計算機内にモデル化された仮想環境との接触の際に発生する力を提示する場合においては、力覚提示用デバイス (ハプティックデバイス) の出力の制限から、剛体壁との接触の際に発生する衝撃力を忠実に再現することが難しかった。むやみに大出力のアクチュエータを用いることは危険であり、またデバイスの慣性が増大して機構透明性も失われてしまうために望ましくない。

本論文では、任意の反発係数の衝突を忠実に模擬するための新しいハプティックデバイスの機構を提案した。提案機構は、フライホイールに必要な運動量をあらかじめ蓄積しておき、仮想壁との接触の瞬間に機械的なクラッチを接続することでフライホイールの運動量を瞬時にユーザの手に伝えるものである。このように提案するデバイスは、通常の接触力を提示する部分と衝撃力を提示する部分との2つからなっており、通常の接触力を提示する部分が把持型と分類されるハプティックデバイスであるのに対し、衝撃力提示部は必要なときのみユーザと接触する遭遇型と分類されるものに相当することを指摘し、既存のデバイスに対しての位置づけを明確にしている。

任意の反発係数の衝突を忠実に模擬するためには、仮想壁に接触した瞬間に正しい量の衝撃力をクラッチを介して伝える必要がある。本論文ではこのために、まず電磁クラッチの接続過程と離脱過程を詳細に解析し、接続に要する時間がほぼ一定で予測可能なことを確かめた。またクラッチの電磁コイルに加える電圧を大きくすることで接続に要する時間を短くする工夫も施した。さらに現在のユーザが操作するデバイスのハンドル部の速度に加えて加速度の情報も用いることで、仮想壁

に衝突する時間を正確に予測する手法を開発し、以上の手法を総合することで正確なタイミングで望みの衝撃力を提示させることができる手法を確立した。

さらには実際に試作した装置を用いて実験を行い、実際の剛体接触の場合と同様の速度パターンを実現できることが示され、提案手法の有効性が確かめられた。試作装置は一自由度系であったが、提案する手法は多自由度の系でも有効である。本論文では、多自由度系での衝撃力提示のための定式化も行った。

最後の第6章は結論であり、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も議論している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、スケールドテレオペレーションと仮想環境における直感的操作のための力覚提示の忠実度向上に関するものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. スケールドテレオペレーションにおける安定性の条件であるシステムの散乱行列表現の構造化特異値の条件を、1自由度系であればあるスケール変換を施すことで単純な最大特異値の条件に置き換えられることを示した。これまでに固定スケール型テレオペレーションにおける理想的な応答に近い応答を実現する制御則は提案されていたが、この制御則を用いたときの系の安定性は数値的にしかチェックできなかった。本論文では、先に示した条件により安定性を解析的に示すことができるようにし、この制御手法の有効性を実験的にも検証した。

2. 構造化特異値の条件ではオペレータと環境の特性を線形時不変と仮定したが、実際にはこれらは非線形かつ時変である。従ってスケールドテレオペレーションにおいてこのような特性の不確かさに対して安定性を保証するには、構造化された定数スケールの H_∞ ノルムの条件がより適当であることを示し、この条件を満たす制御則の設計に際しては、線形行列不等式 (LMI) を用いることで見通しよく制御系が得られる手法を示した。またこのとき設計された制御則が過度に保守的とならないように、オペレータの動特性に関する先見的知識を導入する手法を提案し、その有効性を数値シミュレーションで検証した。

3. 微細手術などのスケールドテレオペレーションでは、操縦者が位置と力のスケール比を操作中に自由に変更できるようにすることで、操作者の直感性を活かした操作能力の向上が期待できる。ここでは先に示した線形行列不等式を用いる制御系設計手法を基本としながら、このような可変スケールという一種の時変システムを扱うためにゲインスケジューリングの手法を適用することを提案した。特に、制御系設計の重要なプロセスである各変数に対する重みをスケール比依存とすることで制御系の性能を向上させる手法を提案し、数値シミュレーションで有効性を検証した。

4. 計算機内にモデル化された仮想環境との接触力を提示する場合には、デバイスの出力の制限から剛体壁との接触の際に発生する衝撃力を忠実に再現することが難しかった。本論文では、任意の反発係数の衝突を忠実に模擬するための新しいハプティックデバイスの機構を提案した。提案機構は、フライホイールに必要な運動量をあらかじめ蓄積しておき、仮想壁との接触の瞬間に機械的なクラッチを接続することでフライホイールの運動量を瞬時にユーザの手に伝えるものであり、実際に装置を試作して提案手法が有効に動作することを実験的に検証した。

以上のように本論文は、当該分野において新規性のある提案とその有効性確認を数値シミュレーションおよび実験で行っており、学術上、実際に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19年4月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。