

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32612
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560280
 研究課題名（和文） 非線形インピーダンスモデルによるフォースフィードバックコミュニケーションの実現
 研究課題名（英文） Realization of Force Feedback Communication by Nonlinear Impedance Model
 研究代表者
 村上 俊之（MURAKAMI Toshiyuki）
 慶應義塾大学・理工学部・教授
 研究者番号：00255598

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、人と機械システムの協調制御を検討するにあたり、人と機械システムの相互作用力に着目し、その相互作用力に基づいた制御手法を提案している。また、二輪駆動型の電動車椅子およびスレーブに不安定機構を有する移動マニピュレータを導入したマスタ・スレーブシステムにおいて、提案手法を適用することでシステムの安定性と協調制御における操作性を同時に向上できることを実機実験により確認している。

研究成果の概要（英文）：

This report describes a strategy of cooperative control based on interactive force between a mechanical system and human being for human-machine system. In this report, two kinds of experimental system are taken up to confirm the validity of the proposed method. One is two-wheel wheelchair system. The other is master-slave system including passive mechanism in slave side.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科学研究費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ステアバイワイア ハプティックペダル フォースフィードバック 反力推定オブザーバ 外乱オブザーバ 操作支援制御 電気自動車 非線形インピーダンス

1. 研究開始当初の背景

高齢化が益々進む現代社会において、人の動作を支援できるシステムの実現が強く望まれている。この要望は、平均寿命が伸びつつも、健康寿命の伸びが十分でないことが背景となっており、虚弱高齢者（加齢とともに身体機能が低下している高齢者）における健康維持をも達成しうる福祉機器システムの

実現が重要な課題となっていることを意味している。そこで、本研究課題では相互作用力を用いることによって、人と機械システムの協調制御を安全かつ効果的に実現できる制御アルゴリズム、すなわちフォースフィードバックコミュニケーションについて取り上げ、電動車椅子や遠隔操作システム等の実機実験を通じた検証を行っている。

2. 研究の目的

本研究課題では、人と機械システムの適切な協調を実現するための制御アルゴリズムの構築を、非線形インピーダンス制御器の導入と同時に、フォースフィードバックコミュニケーション（操作性向上のための力情報フィードバック）を考慮することにより行った。また、実機実験として、2輪駆動型の電動車椅子やマスタ・スレーブ遠隔操作システムを取り上げ、提案制御アルゴリズムによってシステムの操作性向上が実現できること、すなわち、人と機械システムの適切な協調制御が行えることを確認した。

3. 研究の方法

本研究課題では、非線形インピーダンス制御に基づいたフォースフィードバックコミュニケーションアルゴリズムを実現するにあたり、具体的な応用機器として次を前提とした。

1. 電気自動車におけるステアバイワイヤシステム
2. キャスタを有さない2輪駆動型電動車椅子の姿勢安定化制御
3. スレーブ側に不安定機構を含むマスタ・スレーブ遠隔操作システム

1および3については、対象となるシステムの操作性向上を目指した制御系設計、2に関しては安全性（安定性）の向上を主とした制御系設計となる。本報告書では、2と3について取り上げその概略を示す。



図1 キャスタレス2輪駆動電動車椅子

2については、2輪駆動型の電動車椅子での段差乗り越え動作に焦点をあて、その制御系設計と安定性の評価を行った。提案するアルゴリズムでは、人の動作による車軸への干渉トルクと段差乗り越え時に環境から受ける反作用トルクの推定を行い、そのトルク推定値がリパルスコンプライアンス制御器を介してフィードバックされている。ここで、リパルスコンプライアンス制御器では環境の状態推定に応じてゲイン調整がリアル

タイムで行われており、いわゆる非線形インピーダンスに該当する制御器となる。これにより、通常的車椅子走行だけでなく、段差乗り越え動作を安定に行うことが可能となる。

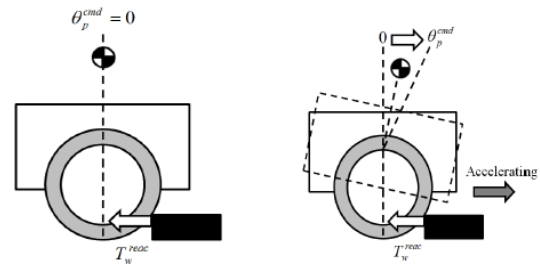


図2 安定制御のみ（左）、安定制御+リパルスコンプライアンス制御器（右）

図1に本研究課題で用いた実機システムを示す。また、図2にリパルスコンプライアンス制御の段差乗り越え時の効果を示している。同図にあるように、従来の安定化制御のみの手法では、段差乗り越え時に安定化制御が優先されてしまい、段差乗り越えの加速が得られず、乗り越えのための無理な動作を誘発してしまい、結果として段差乗り越え動作が不安定なものになってしまう。一方で、提案手法ではリパルス制御器の効果により段差乗り越えのための適切な加速が得られ、段差乗り越え動作が滑らかに実現できる。

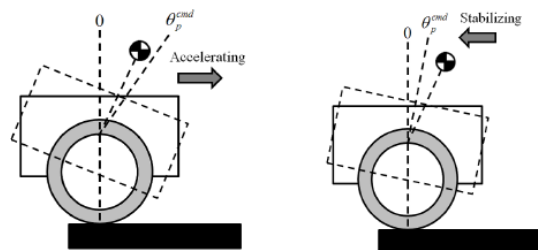


図3 安定制御のみ（左）、安定制御+リパルスコンプライアンス制御器（右）

図2に加え、図3に段差乗り越え後の制御動作を示す。提案手法では、段差乗り越え時とは異なり、段差乗り越え後の動作が可変ゲインを有するリパルス制御器の効果で減速動作となり安定したものとなる。一方で、従来の手法では、段差乗り越え時の加速がそのまま段差乗り越え後も維持されてしまうため、段差乗り越え後の動作が不安定なものとなりやすくなってしまふ。

次に、3について述べる。3ではマスタ・スレーブ遠隔操作システムにおいて、スレーブに不安定機構（受動機構）を含むシステムにおいて、非線形インピーダンス制御器を導入することで、操作性の向上と操作領域の拡張を同時に実現できるものとしている。

図4に本研究課題で用いた実機システムを示す。また、図5, 6に作業領域拡張のための各動作モードを示す。

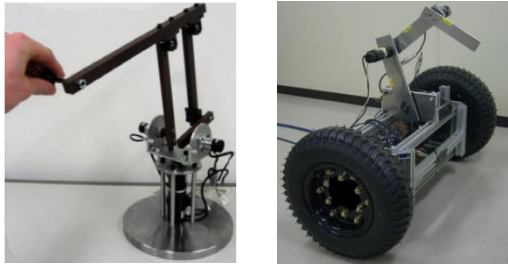


図4 マスタ (左)・スレーブ (右) 遠隔操作システム

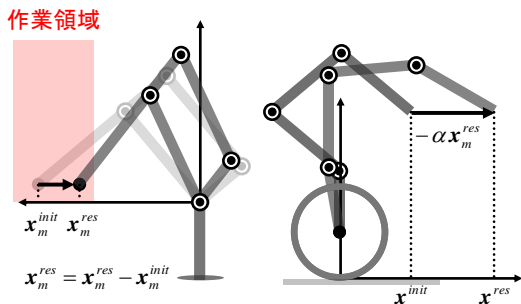


図5 作業モード時のマスタ・スレーブ対応

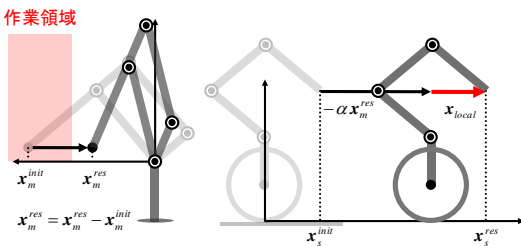


図6 移動モード時のマスタ・スレーブ対応

図5に示すように、マスタ・スレーブ作業モードでは、マスタ操作をそのままスレーブ操作に対応させるため、従来の4ch型のパラレル制御を適用している。但し、マスタ、スレーブマニピュレータの動作範囲が異なるため、スケールゲイン α を導入することで、マスタ動作を α 倍した動作指令をスレーブ側に与えている。また、力制御の構成としては、マスタ側の力応答を力指令値、スレーブ側の力応答をフィードバック量とし、その偏差が非線形インピーダンス制御器を介して、位置・速度・加速度指令に変換され、マスタ側からスレーブ側への動作指令として与えられている。すなわち、位置制御器に基づいた力制御器の構成となっている。一方、図6に示す移動モードでは、スレーブ側の広範な動作領域を確保するため、移動距離を拡張するための付加的な指令が与えられる制御構造となっている。この付加的な指令の決め方は任意となるが、所望とするスレーブ作業に

応じた指令生成が必要となる。ここで、作業モードから移動モードへの切り替えは、見かけ上、力フィードバックにおけるインピーダンス制御器の可変ゲイン構造と等価となり、非線形インピーダンス制御によるフォースフィードバックコミュニケーションの実現に相当することになる。この非線形インピーダンスに基づいたフォースフィードバックコミュニケーションにより、作業領域の拡張が滑らかに実現できており、システムの操作性向上が達成できている。

4. 研究成果

ここでは、3で述べた研究の方法に基づいて行われた実験結果を示しつつ、研究成果の概要について述べる。

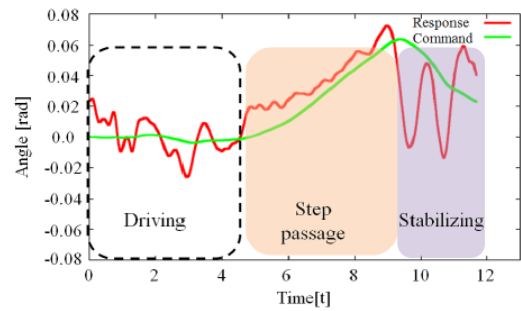


図7 電動車椅子の姿勢応答 (リパルシブ制御器)

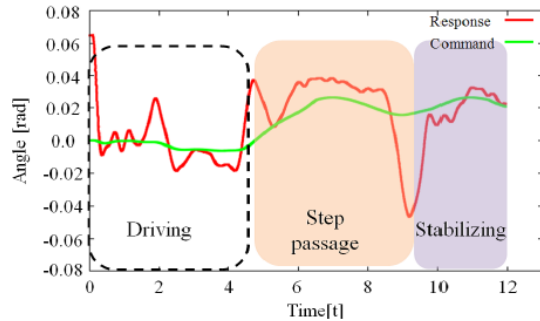


図8 電動車椅子の姿勢応答 (可変ゲイン型リパルシブ制御器)

まずは、2輪駆動型電動車椅子での段差乗り越え動作の実験結果について示す。特に、段差乗り越え動作の安定性を評価するために行った実験に焦点をあて、その結果についての検証を示す。図7, 8にその実験において得られた電動車椅子の姿勢応答結果を示す。図7は従来のリパルシブコンプライアンス制御器のみ、図8は可変ゲイン型のリパルシブ制御器、いわゆる非線形インピーダンス制御器を用いた場合の結果である。図7より、従来手法である固定ゲイン型リパルシブコンプライアンス制御器では、段差乗り越え後の6秒近辺から姿勢応答が次第に大きくなり、9秒以降における乗り越え後の動作も振

動的となっている。一方、図8に示す可変リパルシブコンプライアンス制御器を用いた提案手法では、6秒～9秒にかけての段差乗り越え時の姿勢が安定しており、また段差乗り越え動作後においても9秒時の減速特性により、振動的な応答とはなっていない。

上記に示す実験結果より、提案する非線形インピーダンス制御により2軸駆動型電動車椅子の姿勢安定化制御が効率よく実現できていることがわかる。提案アルゴリズムでは、人から車椅子への干渉力ならびに環境から車椅子への干渉力の推定値がリパルシブコンプライアンス制御器を通してフィードバックされており、いわゆるフォースフィードバックコミュニケーションに基づいて人との協調動作および環境からの影響を安定化するアルゴリズムとなっている。

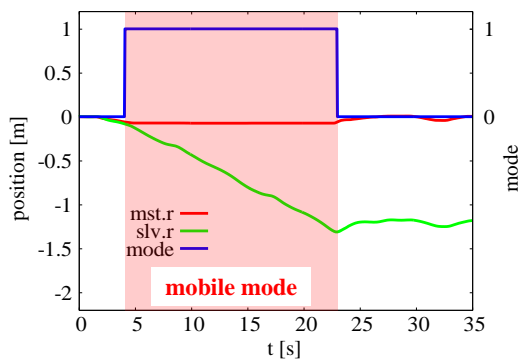


図9 モード変換の実験結果

次にスレーブに不安定機構（受動機構）を含むマスタ・スレーブ遠隔操作システムにおける実験結果を示す。まず、作業モードおよび移動モード間のモード変換に対する実験結果を図9に示す。3で述べたように、モード変換はマスタの動作領域によって決まっており、その指令値生成は非線形インピーダンス制御器に基づいている。図9に示すように、実験では作業モード→移動モード→作業モードのモード変換が行われているが、スレーブの動作応答からそのモード変換が安定に行われていることがわかる。

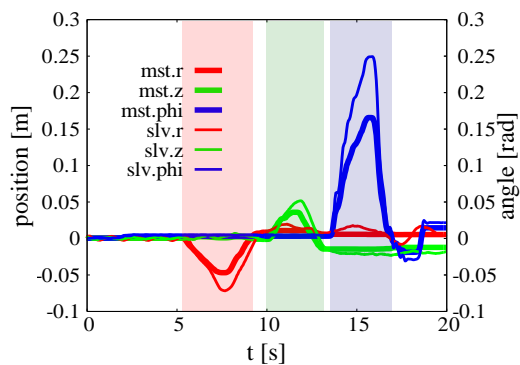


図10 作業モードでの動作応答

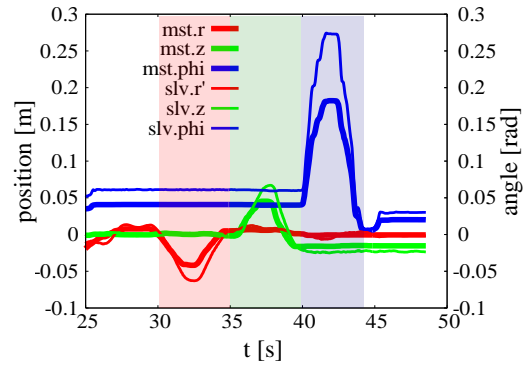


図11 移動モード後の作業モードの応答

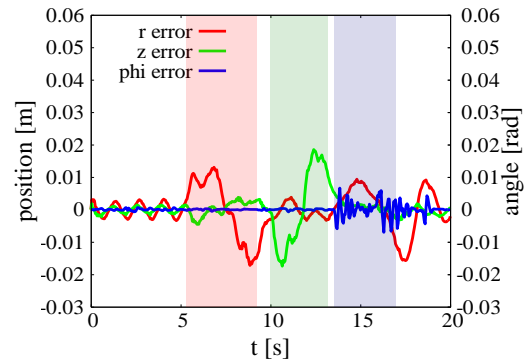


図12 初期状態（移動前）での作業モード時の動作応答

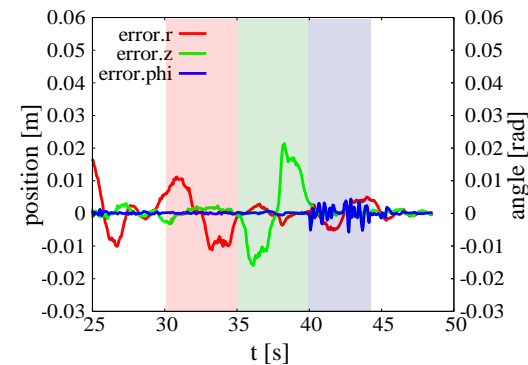


図13 移動モード後の作業モード時の動作応答

図10, 11に初期状態および移動モード終了後の作業モードでの動作応答を示す。図11に示されているように、移動モードにおいて並進動作を行ったうえで、スケール比 α によって決まる作業を行っているため、並進 r 、上下 z 、旋回 ϕ のマスタ・スレーブ応答は並進移動ならびにスケール α に応じた応答差となっている。これらの結果より、移動モードが行われた場合でも、作業モードでの滑らかな動作応答が得られていることがわかる。また、作業モード時の位置応答の偏差の実験結果を図12, 13に示す。両実験結果より、移動モードが含まれるかどうかは関係なく、位置偏差が低く抑えられていることが

わかる。ここで、各位置応答に振動的な応答が含まれているが、これは受動機構による振動応答になる。しかしながら、スレーブ側には受動機構を安定化するための制御器が構成されており、受動機構の安定性は十分に保たれていると言える。

以上より、マスタ・スレーブ遠隔操作システムにおいて、非線形インピーダンス制御器に基づき作業領域の拡張（作業モードと移動モードの滑らかなモード変換）が実現できていることがわかる。ここで、マスタ・スレーブの零力応答も実現できており、非線形インピーダンス制御器におけるフォースフィードバックコミュニケーションが有用に達成できていると言える。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

1. Ryosuke Horie and Toshiyuki Murakami, "Transparency Analysis of A Force Sensorless Master-Slave Control by Force Feedback Based Virtual Impedance Controller with Time Delay", Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I, 2012, pp681-694 (査読有)
2. Nobuhiro Iwase, Ryosuke Horie and Toshiyuki Murakami, "A Novel Approach to Master and Slave Control by Force Feedback Based Virtual Impedance Controller", Journal of Control Engineering and Applied Informatics, No. 13, 2011, pp9-13 (査読有)

〔学会発表〕（計7件）

1. Kiyotoshi Komuta and Toshiyuki Murakami, "An Approach to Expansion of Workspace Motion in Master-Slave Control System", IECON2012, 2012年10月25日～2012年10月28日, Montréal, Canada
2. Ryosuke HORIE and Toshiyuki Murakami, "An Analysis of a Novel Master-Slave Control and its Application to MDOF Motion Systems", 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011年11月10日, オーストラリア
3. Ken'ichiro Murai and Toshiyuki Murakami, "Pushing Operation in Variable Compliance Control According to Estimated Road

Friction", 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011年11月10日, オーストラリア

4. 奥山勇治・村上俊之, "電気自動車における車間距離制御のためのモデル予測制御に基づいた運転支援", 平成23年電気学会産業応用部門大会, 2011年9月8日, 沖縄
5. Yoshihide Igari and Toshiyuki Murakami, "Driving Support Control by Force Feedback Communication for Steer - By - Wire System", Yoshihide Igari and Toshiyuki Murakami, 4th Asia International Symposium on Mechatronics, December 17, 2010 National University of Singapore
6. Jerome Carlier and Toshiyuki Murakami, "Virtual Force Field Based Force - Feedback of Road Condition for Driving Assistant Design in Electric Vehicle", 4th Asia International Symposium on Mechatronics, December 15, 2010 National University of Singapore
7. Yuki Katayama and Toshiyuki Murakami, "A Caution Cognition for Driving Control in Steer - by - Wire Based Tractor - Trailer Vehicle System", 4th Asia International Symposium on Mechatronics, December 15, 2010, National University of Singapore

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fha.sd.keio.ac.jp/jp/shuron/shuron.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

村上 俊之 (TOSHIYUKI MURAKAMI)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：00255598

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし