

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00266

研究課題名(和文) 力覚提示のバーチャルカップリングへの非整数階微分の応用

研究課題名(英文) Application of a fractional derivative for a virtual coupling in haptic interface

研究代表者

川井 昌之 (Kawai, Masayuki)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：00334805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人工現実感(バーチャルリアリティ：VR)で使用される力覚提示において、干渉力の計算に用いるバーチャルカップリング(VC)に、一般的なダンパに代わり非整数階微分項を利用する手法の提案とその効果の検証に関するものである。本研究では、様々な非整数階微分項の実装手法の特徴を受動性の観点から考察し、適切な非整数階微分項を用いることによって、安定に提示できるばね係数の向上を図れることを示した。また、被験者がタッピング動作を行う際に、より仮想物体を硬く感じることができる非整数階微分項の条件を示した。

研究成果の概要(英文)：This research proposed and discussed a method using a virtual coupling (VC) with fractional derivatives for a haptic interface in a virtual reality system. In this method, the VC uses fractional derivatives instead of a virtual damper that is generally used in a VC. This research derived property of passivity for various approximation methods of a fractional derivative first, then showed that the VC with fractional derivatives can stably display a virtual environment with harder stiffness. It also showed the conditions of a fractional derivative for operators to feel harder surface in a tapping task.

研究分野：ロボット工学

キーワード：バーチャルリアリティ 力触覚提示 非整数階微分 バーチャルカップリング

1. 研究開始当初の背景

人工現実感(バーチャルリアリティ:VR)で用いる力覚提示装置は、計算機内で作られた仮想物体の重さや感触などを人間の力触覚に提示する技術であり、操作者がより直感的に仮想空間を感じるための装置である。この中でインピーダンス型力覚提示では、実空間と仮想空間の間に仮想的なばねとダンパを設置して反力を計算するバーチャルカップリング(VC)を用いるのが一般的である。このVCは、連続値系である実空間とデジタル値系である仮想空間との間のずれを吸収し、より安定な提示を実現するために用いられるが、仮想空間をより忠実に実空間に提示するためには高い仮想ばね係数が必要となる。しかしながら、仮想空間をシミュレートするデジタル値系のサンプリング間隔が長い場合などには、VCの仮想ばね係数を小さくせざるを得ず、柔らかい表面を持つ仮想物体しか提示できない問題が生じる。

一方、近年、0.5階微分や1.5階微分などの非整数階微分の工学的な応用が行われてきている。そこで本研究では、一般に用いられている仮想ばねとダンパによるVCに代わり、ダンパを非整数階微分項に置き換えたVCを考察し、より硬い表面を持つ仮想物体を提示することが可能となるかどうかの検証を行った。

2. 研究の目的

本研究は、VRで用いる力覚提示において、仮想ダンパに代わり非整数階微分項を用いたVCの効果を検証することが目的であり、以下の項目を検討した。

(1) 非整数階微分は、数学上の定義は確立されているものの、離散値系システムへの実装手法には、様々なものが存在する。そこで、VCに非整数階微分項の一つ用いる場合に、各種の実装方法と、使用する階数やパラメータの組み合わせによる効果の違いを抽出し、より高いばね係数が設定できる組み合わせを決定する。

(2) さらに高いばね係数の設定を実現するために、複数の非整数階微分項を用いる方法を検討し、使用する階数やパラメータの組み合わせを決定する手法を提案して、その効果を確認する。

(3) 人が感じる硬さは、ばね係数の大きさだけに依存するものではなく、設定する非整数階微分項の影響も受ける。本研究では、人が仮想物体を軽くたたく動作(タッピング動作)に着目し、タッピング動作時に人が硬く感じる非整数階微分項の階数と各種パラメータの組み合わせを考察する。

3. 研究の方法

(1) 非整数階微分の実装方法には、過去の入

力情報のみを用いて出力を計算する非再帰型(デジタルフィルタとしてはFIR型)と、今までの出力も使用する再帰型(同IIR型)に分類される。本研究では、FIR型としてGrünwald-Letnikov法を用いた近似手法を、IIR型としてEuler法、Al-Alaoui法、Tustin法の3種の近似手法を対象とした。これらの方法に対して、様々な階数、近似計算時の近似項数を使用して受動性の解析を行い、発生する周波数に対する受動性の特徴を抽出する。さらに、より広い周波数帯で受動的となる階数と近似項数の組み合わせを決定し、それらを用いて実際に実験を行う。実験は、力覚提示装置に重りを設置し、静止した床に自由落下させる実験を行い、拳動が安定となる最大のばね係数を計測する。また、被験者が静止した床をたたく同様の実験も行い、安定に提示できる最大のばね係数を計測することで、一般的に用いられる仮想ダンパを用いたVCとの比較を行う。

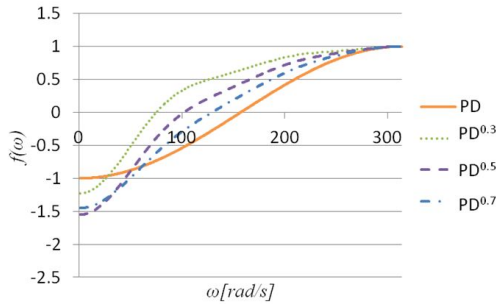
(2) 上記で得られた高いばね係数を設定できる階数と近似項数の組み合わせの結果から、実装及びパラメータの調整が比較的容易なFIR型の近似手法に着目し、複数の非整数階微分項を併用した場合の手法について考察する。複数の非整数階微分項を用いる場合には、使用する階数やパラメータの組み合わせを別途決定する必要があるが、本研究では各周波数帯での目標とする受動性の数値を使用した評価関数を用い、最急降下法により評価関数を最適化する階数と近似項数を決定する手法を提案する。また、この場合の実験を上記と同じ方法で行い、その効果について検証する。

(3) 一般のダンパを用いたVCでは、人が感じる硬さは、ばね係数の大きさだけでなくダンパの係数の大きさにも依存することが知られている。そこで本研究では、上記の結果から得られた高いばね係数を設定できる複数の組み合わせを用いて、人がタッピング動作を行った際に、硬く感じる組み合わせを抽出し、非整数階微分項の影響を検証する。実験では、被験者がタッピング動作を行う際に、階数と近似項数の異なる5個程度の組み合わせのVCを試行し、硬く感じた順に順位付けを行う実験を行うことにより、人が硬く感じる組み合わせの特徴を検証する。

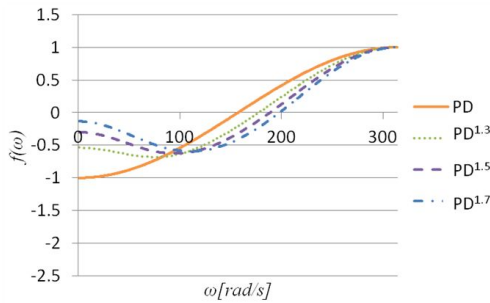
4. 研究成果

(1) FIR型、IIR型の各手法に対して、様々な階数と近似項数を用いた場合の受動性の解析を行った。図1にFIR型で近似項数を最小とした場合の受動性の解析結果例を示す。図1(a)は階数が0~1階の場合、(b)が1~2階の場合、PD*は*階の非整数階の結果を示し、PDが一般的なダンパの場合である。また、図中、横軸が発生周波数、縦軸が解析結果の受動性を示す指標であり、この指標が小さい

値ほど受動性が高く、システムとしては安定になりやすい性質となる。



(a) 階数が 0~1 階の場合



(b) 階数が 1~2 階の場合

図 1 FIR 型の受動性解析の例

図からわかるように、0~1 階の場合には低周波数域でより受動的となるのに対し、中間周波数帯で一般的な PD より受動性は悪化する。一方、1~2 階の場合には、中間周波数帯で受動的となるのに対し、低周波数帯では受動性が悪化する。なお、これらの結果を表としてまとめたものが表 1 になる。

表 1 非整数階微分項を一項だけ用いた場合の階数と近似項数の受動性の傾向

		階数	
		0~1	1~2
近似項数	少	↓	→
	多	→	↑

↑ : 低周波数帯受動性向上
 ↑ : 中間周波数帯受動性向上

なお、表に示す特徴は、FIR 型、IIR 型に関わらず共通の特徴である。表に示されるように、中間周波数帯の受動性を向上させるためには、階数を 1 階以上に設定することが有効である。ただし、低周波数帯の受動性の傾向は、0~1 階と 1~2 階の階数で分かれることが分かった。0~1 階の階数を用いる場合には近似項数を大きくすることで低周波数帯の受動性が向上し、逆に 1~2 階の階数を用いる場合には近似項数を少なくすることが有効となることが分かった。

これらの結果を踏まえつつ、いくつかの近似手法、階数、近似項数を用いて、安定に提示できる最大のばね係数の計測実験を行った。図 2 に近似項数を最小として 1.5 階の階

数を用いた場合の実験結果を示す。なお、1.5 階は、低周波数帯での受動性を維持しつつ中間周波数帯の受動性を向上させる組み合わせである。

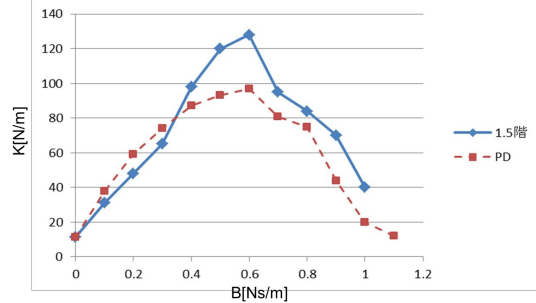


図 2 最大ばね係数計測の実験結果例

図中、青実線が 1.5 階微分を用いた場合の結果、赤破線が一般的なダンパを用いた VC の結果であり、縦軸が安定に提示できるばね係数計測値、横軸がダンパもしくは非整数階微分項の係数である。図からわかるように、非整数階微分項を適切な係数とともに用いることによって、一般的な VC では設定不可能な高いばね係数の設定が可能となることがわかる。

(2) 適切な階数、近似項数、係数を選ぶことによって、一般的な VC よりも高いばね係数を選ぶことができるようになったものの、その効果は限定的である。これは、非整数階微分項を一項だけ用いた場合には、図 1 に示されるように低周波数帯から中間周波数帯まで一様に受動性をあげる設定が難しいためと考えられる。そこで、仮想ばねとともに複数の非整数階微分項を重ね合わせた VC を設計することで、受動性が向上しない周波数帯をお互いに補完する手法を提案した。この場合、複数の非整数階微分項にどのような階数と係数で重ね合わせるかを決定する必要があるため、その最適化手法の検討も行った。最適化手法としては、各周波数で目標とする受動性を予め決定し、それを用いた評価関数を設定し、最急降下法により最適化を行った。階数と係数を最適化した場合の受動性の結果例を図 3 に示す。

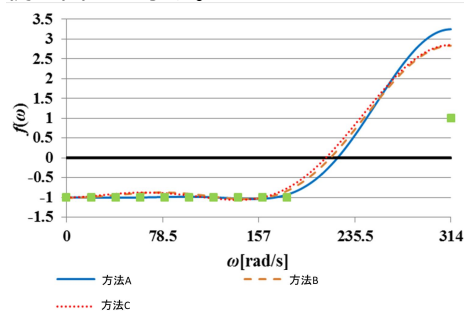


図 3 複数の非整数階微分項を用いた VC で階数と係数を最適化した場合の受動性

図中、緑点が各周波数で目標とした受動性であり、条件の異なる 3 種類の最適化した結果

の例を示している。図1と比べ、どの方法でも低～中間周波数帯まではほぼ一定値に受動性を維持しているVCが設計されていることがわかる。また、この結果から得られたVCを用いた実験結果を図4に示す。

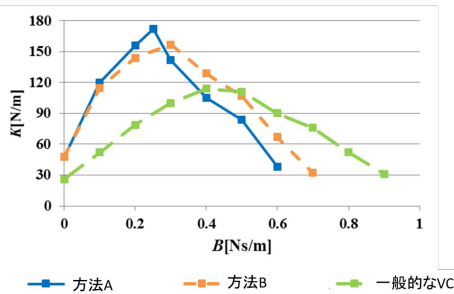
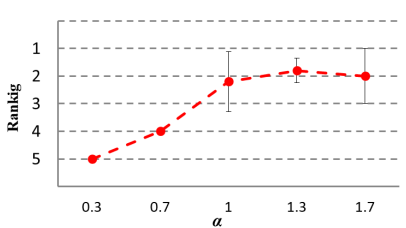


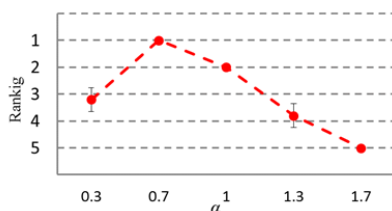
図4 複数の非整数階微分項 VC の受動性

図には、図3における方法Aと方法B、および一般的なダンパを用いたVCの結果が示されている。図からわかるように、一般的なVCよりも高いばね係数が設定できるとともに、図2に示された非整数階微分項を一項のみ使用した場合よりも、高いばね係数の設定が可能となっていることがわかる。

(3) 上述の結果より、非整数階微分項を用いることでより高いばね係数を設定可能であることが示されたが、人が感じる硬さの感覚は、ばね係数のみの影響を受けるのではなく、微分項の影響を受ける。そこで、今までの結果から高いばね係数を設定可能な階数、係数、近似項数の組み合わせを複数用いて、実際に被験者が硬く感じる組み合わせを選ぶ実験を行い、非整数階微分項の硬さ感覚に与える影響を調査した。実験では、被験者が静止した床を軽くたたく動作を行い、複数の組み合わせの中で硬く感じた順に順位をつける順位法により調査した。図5(a)に近似項数が少ない場合、(b)に近似項数が多い場合の結果を示す。図中、横軸が比較した階数、縦軸が硬く感じた平均順位と標準偏差である。



(a) 近似項数が少ない場合



(b) 近似項数が多い場合

図5 タッピング動作で硬く感じる階数

近似項数が少ない場合、一般のダンパを用いたVCよりも1.3～1.7階程度の高い階数を用いた方が硬く感じ、近似項数が多い場合には、1階よりも少ない0.7階程度の階数が硬く感じることが分かった。

表2に、本研究期間中に得られた結果を簡潔にまとめる。

表2 階数と近似項数の特徴

		階数	
		0～1	1～2
近似項数	少		高いばね係数の設定 タッピングで硬く感じる
	多	タッピングで硬く感じる	

非整数階微分項を含むVCを用いる場合、近似項数の少ない1～1.7階程度の階数を用いることで、より安定に提示できるばね係数を大きくすることができることが分かった。これは、実空間と仮想空間が比較的ゆっくり動くような静的な環境の場合には、実空間と仮想空間をより一致させることが可能となることを示す。一方、タッピング動作のように動的な動きに対して人が硬く感じるのは、近似項数の多い1階以下、もしくは近似項数の少ない1階以上の階数を用いることが望ましいことが分かった。しかしながら、この2つの硬さは異なる感触の硬さであり、これらと比較する定性・定量的な結果を得ることがこれからの課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計16件)

Masayuki Kawai, Takuya Yamagishi and Shouta Minami, Optimal passivity design of a virtual coupling Including FIR-type fractional derivatives for a haptic interface、IJCAET&ISAMPE,2017

川井 昌之、南 翔太、山岸 卓矢、FIR型非整数階微分VCのタッピングにおける硬さ感覚の実験的評価、第22回日本VR学会大会、2017

山岸 卓矢、川井 昌之、杉本祐樹、南 翔太、VCで利用する非整数階微分項の各種IIR型近似の比較、第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2016

川井昌之、杉本祐樹、山岸 卓矢、FIR型非整数階微分を用いたバーチャルカップリングの階数最適化、第20回日本VR学会大会、2015

6. 研究組織

(1)研究代表者

川井 昌之 (KAWAI, Masayuki)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：00334805