

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04292

研究課題名（和文）非整数階微分VCによる受動性に着目した物体表面硬さの質の提示手法確立

研究課題名（英文）Development of a haptic interface with a VC containing fractional derivatives to display the quality of a real object's surface based on the passivity

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はVRのインピーダンス提示を用いた力覚提示におけるバーチャルカップリング（VC）の設計手法に関する研究である。一般的にVCに用いられるダンパに代わり、複数の非整数階微分項を含むVCを用いることで、硬いや柔らかいなどの物体表面の硬さだけでなく、反発感などの質的な違いも提示できる実装手法を確立した。特に、実物体の周波数域での受動性分布を計測し、それを実現するようにパラメータを最適化することで、様々な物体の触感を生成するVCを設計した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的なばねとダンパのVCでは、ゴムのような表面の触感しか表現できないが、本研究の成果を用いることにより、今までのVCでは表現できない動粘性流体や低反発材などの触感の提示がVCのみで可能となる。VCで表現するため、過去の位置情報のみから計算ができ、複雑なシミュレーションも必要ないため、容易に安価なシステムでも実現できるようになる。また、受動性の分布と触感の関係もVC見本で示されているため、新たな触感の創出にも利用することができる。

研究成果の概要（英文）：This research studies the design method of virtual coupling (VC) for a haptic interface in virtual reality technology. The research studies a VC containing fractional derivative terms instead of a common damper and shows that the VC can display the qualitative difference such as repulsion, not only the hardness of the object surface. In the research, the passive distribution in the frequency range of a real object is measured, then the parameters in the VC are optimized to realize the measured passivity distribution. Finally, some experimental results showed that the method can display various haptic senses of real objects.

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 バーチャルカップリング 受動性 非整数階微分

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究はバーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) の仮想空間内の仮想物体の表面の触感を人に感じさせる力覚提示技術において、物体表面の硬さ(「硬い」や「柔らかい」)だけでなく、質的な違い(「ぶよぶよしている」「ねっとりしている」など)も容易に提示できる実装手法を提案する研究である。

(2) 力覚提示手法の一つであるインピーダンス提示では、実物体と仮想物体との間に仮想的なインピーダンス (Virtual Coupling: VC) を定義して反力計算を行う手法が用いられるが、ばねとダンパを用いた VC が今まで一般的に用いられてきた。しかし、ばねとダンパのみで構成する VC では、安定性に限界があるとともに、付加される触感もゴムのような感触に限られてきた。

(3) これに対し、ダンパに代わり、複数の非整数階微分(Fractional Derivative: FD)項を用いた VC を提案してきた(図1)。FDは、通常の微分が1階や2階など整数階が用いられるのに対して、1.5階などの非整数階で微分を定義する手法である。これまで、複数のFDを重ね合わせてパラメータを最適化することにより、より安定性を向上させることが可能であることを示してきた。その一方で、複数のFD項を含むVCの実験において、硬さ以外に様々な質の異なる触感が作り出されていることがわかってきていた。

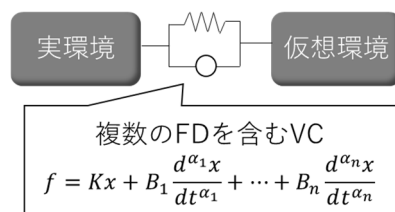


図1 提案手法 (FDを含むVC)

2. 研究の目的

本研究では、この複数のFD項を含むVCの特性とそのVCにより生じる様々な触感の質の違いの関係性を解明するため、周波数域での受動性の分布に着目した設計手法を確立する。受動性は実物体では主に粘性、離散値系では伝達関数の実部から計算でき、連続値系と離散値系の双方で統一した指標として用いることができるため、実物体表面の受動性、FD項を含むVCの受動性、人が感じる触感の3者間の関係性を解明することを目的とする(図2)。

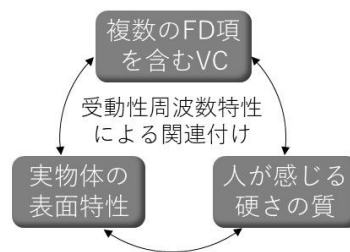


図2 研究目的VC

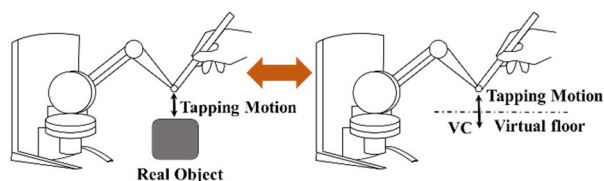
(1) 実物体表面の特性値から、受動性を算出するための手法の確立が必要となる。

(2) 計測された受動性から、FD項を設計する手法を確立する。

(3) 人が感じる触感と受動性の周波数特性の関係を解明する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、力覚提示の中でも、物体を軽くたたく動作(タッピング動作)を対象とし、実物体をたたいた場合(図3(a))の感触と実物体の表面特性の計測結果から設計したVCをたたいた場合(図3(b))の感触について比較考察する。



(a) 実物体のタッピング (b)VCのタッピング

図3 対象とする動作

(2) VCの設計手順としては、平成31

年度に市販の加振器を利用した動粘性計

測システムを構築し、それを用いて実物体表面のばね係数および周波数域での粘性係数の算出を行う。また令和2年度には、計測されたばね係数と粘性係数を基に周波数域での受動性分布を算出するとともに、それを基に複数のFD項を用いたVCの最適化手法を確立する。令和3年度には、実際に様々な実物体に対してVCの設計を行い、実物体の触感とVCによる触感の比較を行うとともに、受動性分布と触感の関係を明らかにする。

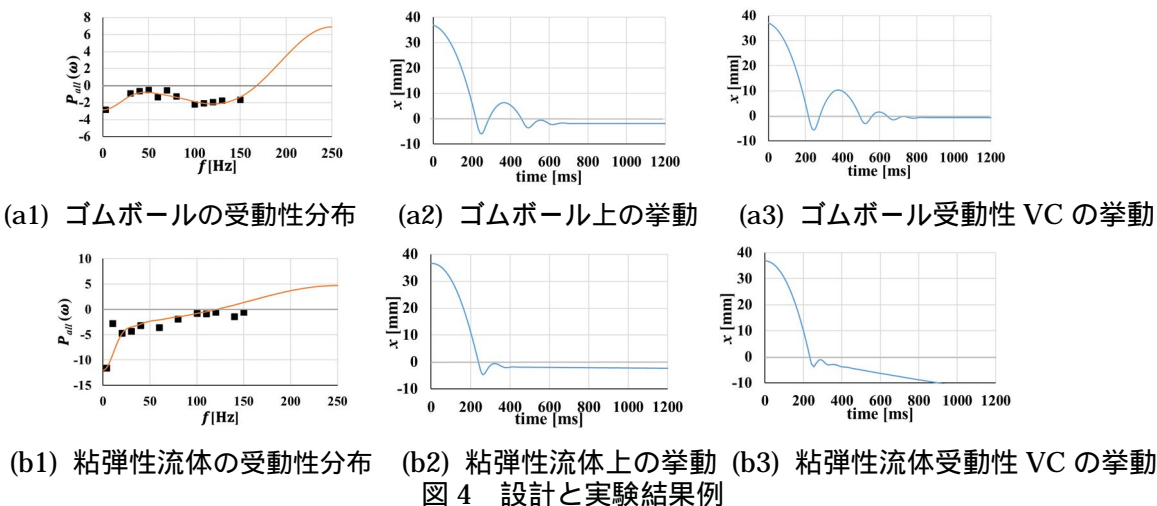
4. 研究成果

(1) 加振器により様々な周波数(2Hz~150Hz)で実物体表面を加振し、その際の加速度と表面圧力の関係から、各周波数での受動性の算出を行った。また、静的なばね係数は、受動性からは算出されないため、ばね係数の計測も同時に行った。

(2) 計測された実物体の受動性とばね係数を基に、それらを離散値系で一致させるVCのパラメータ(FD項の微分階数、係数、近似項数とばね係数)の最適化を部分領域で

の全探索法により行った。特に、この設計において、触感の一致を目指すためには、0Hz 近辺の低周波域の受動性の一致を行うことで、より触感が近くなることを示した。

(3) 設計された VC と実物体の挙動および触感の比較実験を行った。挙動に関する比較実験では、一定の重りを実物体表面に自由落下させた場合と設計した VC 上に自由落下させた場合の挙動を比較し、触感に関しては官能試験を行った。実際に、ゴムボールと粘弾性流体（市販名：スライム）に対する設計及び実験結果の例を図 4 に示す。



図中、(a1)(b1)が実物体表面で計測された受動性と設計された VC の受動性である。図中、横軸が周波数[Hz]、縦軸が受動性指標であり、黒点が実物体から計測された受動性、赤線が実物体の受動性に最適化した VC の受動性分布である。図に示されるように、提案する FD 項を利用した VC では、広範囲の周波数域で受動性を一致させることができるのがわかる。通常のばね + ダンパの VC では、これほどの一致をさせる設計を行うことはできない。(a2)(b2)は実物体上に自由落下させた場合の挙動、(a3)(b3)が設計した VC に自由落下させた場合の挙動である。粘弾性流体では、自由落下後に重りが表面上に静止した後の挙動に若干の違いが生じたものの、おおむね同じような挙動が生じることが確認でき、官能試験においても同様の触感の生成を確認できた。

(4) FD 項を用いた VC では、比較的自由に受動性の分布を実現できるため、様々な受動性分布に対して、どのような触感が生成されるかの関係性をわかりやすく提示するための「VC 見本」の製作を行った。図 5 に VC 見本の例を示す。被験者は、図中の四角い領域の様々な地点を押すことによって、各種の受動性特性を持つ VC を体験できる。この例では、縦軸にばね係数（硬い～柔らかい）が変化し、横軸は低周波域のみに受動性をもつ分布(L)～高周波域まで受動性をもつ分布(H)に連続的に変化する見本である。この場合、柔らかく低周波のみに受動性がある場合は風船のような感触、硬くなれば硬式野球のボールの感触となり、高周波まで受動性がある場合には、柔らかい場合は泥のような感触で、硬くなっていくと低反発材のような感触が確かめられる。また、各点における FD 項のパラメータも表示されるため、受動性の分布と触感、FD 項のパラメータの関係性を確かめることができるシステムを構築した。

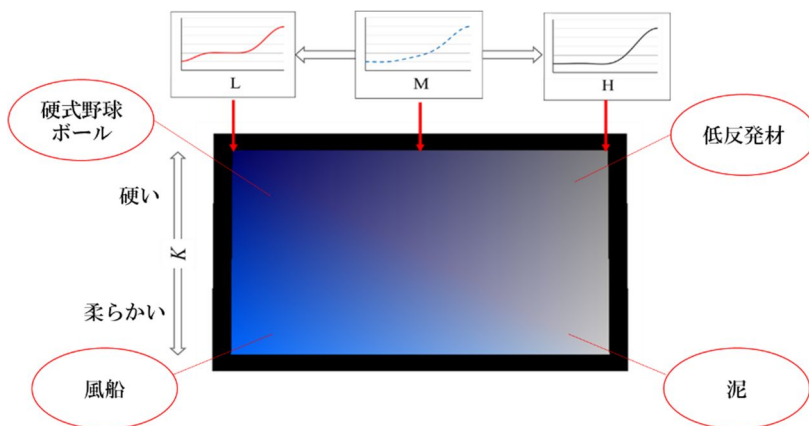


図 5 VC 見本の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 池田 智泰、川井 昌之、黒田 智也	4. 巻 25
2. 論文標題 非整数階微分を用いたVCの周波数域受動性設計とVC見本	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 394 ~ 401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.25.4_394	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 黒田智也、川井昌之、池田智泰、橋詰直樹
2. 発表標題 周波数域受動性設計による粘着剥離感を感じるVCの特性評価
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田智泰、川井昌之、黒田智也、橋詰直樹
2. 発表標題 周波数域受動性とタッピング動作時における触感の関係
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田智泰、川井昌之、村上諒輔、黒田智也
2. 発表標題 周波数域受動性設計による粘着剥離感を感じるVCがクーロン摩擦の提示に与える影響調査
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会第25回ハプティクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川井 昌之, 池田 智泰, 黒田 智也, 村上 諒輔
2. 発表標題 周波数域受動性設計を用いた実物体表面の動特性のVCへの移植に関する考察
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会第26回ハプティクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田智泰、川井昌之、橋詰直樹、鈴木彰馬
2. 発表標題 周波数受動性設計を用いたVCの見本構築
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田智泰、川井昌之、橋詰直樹、黒田智也
2. 発表標題 各種の周波数域受動性を持つVCの触感提示
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川井昌之、池田智泰、橋詰直樹、黒田智也
2. 発表標題 周波数域受動性設計を用いた粘着感を感じるVCの 実験的考察
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 第23回ハプティクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田智泰、川井昌之、橋詰直樹、黒田智也
2. 発表標題 周波数域受動性設計を用いた粘着感を感じるVC
3. 学会等名 SI2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoyasu Ikeda, Masayuki Kawai, Tomoya Kuroda and Naoki Hashizume
2. 発表標題 Virtual Coupling Design To Display Various Haptic Sensation Considering Passivity In Frequency Property
3. 学会等名 2019 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田智也、川井昌之、池田智泰、橋詰直樹
2. 発表標題 周波数域受動性設計による粘着剥離感を感じるVCと粘着テープ剥離実験の関係
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 第24回ハプティクス研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------