



各種の周波数域受動性を持つ VC の触感提示

Haptic Display of Virtual Coupling with Various Passivity Distribution for Frequency

池田智泰¹⁾, 川井昌之¹⁾, 橋詰直樹¹⁾, 黒田智也¹⁾

Tomoyasu IKEDA, Masayuki KAWAI, Naoki HASHIZUME, and Tomoya KURODA

1) 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1, jm190297@u-fukui.ac.jp)

概要: 本研究では, バーチャルリアリティの力覚提示で使用するバーチャルカップリング (VC) について, 非整数階微分項のパラメータから算出される周波数域での受動性に着目し, 様々な周波数域で望みの受動性を実現する VC の設計手法を用い, 様々な VC を設計する. そしてその VC がどのような触感を提示するかを調べ, 考察する. また, その様々な VC を用いて, 触感も容易に体感し, 比較できる「VC の見本」を構築する.

キーワード: 提示, 感覚・知覚, 触覚, 力覚・体性感覚

1. はじめに

バーチャルリアリティに用いられる多くの力覚提示装置は, 質量の小さい可動部を持ち, 位置や速度を計測して力を提示するインピーダンス提示が用いられている. 一般的にインピーダンス型の力覚提示システムでは, 仮想物体表面に仮想的なばね+ダンパを用いたバーチャルカップリング(VC)を設置する. 本研究では, この VC に非整数階微分を利用した受動性の周波数分布設計を用いて, 様々な硬さの触感を表現する「VC 見本」の構築を目指す. 今まで筆者らは, 一般的な仮想ダンパに代わり非整数階微分項を適用した VC について考察し, 非整数階微分項を用いることで安定に提示できるばね係数を増大させることが可能であることを示し [1], さらに複数の非整数階微分項のパラメータを調整することで, 様々な周波数域で指定の受動性を実現する VC の設計手法を提案してきた[2]. 一方, 人が物体の硬さを知覚する場合, 物体の剛性だけでなく, 質量や粘性からも影響を受けることが報告されており[3], 非整数階微分項を用いた VC においてもタッピング動作の実験を行い, 硬さ知覚と非整数階微分項 VC の関係を評価し [4], 使用する非整数階微分項により様々な触感の感觸が得られることが分かってきた. さらに, 非整数階微分項の組み合わせと人が感じる触感の関係を明確にするため, 非整数階微分項のパラメータから算出される周波数域での受動性に着目し, 硬さ感覚の質の違いと周波数域受動性の関係を考察するための「VC 見本」の構築を目指している. この VC 見本では, 様々な周波数域の受動性を持つ VC の触感を体感できるとともに, ユーザーがその VC を容易に使用できるように, デジタル系での実装時の係数が提示され

るようになっている. 今まで, この VC 見本の取り組みとして, ある特定の周波数域にのみ受動性のピークを持つ VC の見本を構築し [5], 受動性のピークの周波数を変えることで, 弾力性のあるボールやねっとりした水あめのような感覚などの幅広い感觸を実現できることが示した. しかしながら, 周波数域での受動性設計は, ある特定の領域にピークを持たせるだけでなく, 様々な分布を設計することができ, その分布がどのように感觸に影響するかを知ることの意義は大きいと考えられる.

そこで, 本研究では, 周波数域での様々な受動性の分布による感觸の違いを体感できる VR 見本の構築を行う.

2. 研究背景と研究目的

2.1 非整数階微分項 VC と複数の非整数階微分項のパラメータ最適化

本研究では, インピーダンス提示において一般的に用いられる仮想ダンパに代わり非整数階微分項を用いた式 (1)に示される VC を今まで考察してきた[1]. ここで, $f_a[N]$ は力覚提示装置が提示する反力, $K[N/m]$ は仮想ばね係数, $x[m]$ は指先位置である. また, $d^\alpha x/dt^\alpha$ は非整数階微分, B_α は非整数階微分項の係数, α は微分階数を表す.

$$f_a = Kx + B_\alpha \frac{d^\alpha x}{dt^\alpha} \quad (1)$$

また, 本研究では, システムへ実装するにあたり, FIR 型近似での離散値系への近似を行う. この時, 以下のよう表される.

$$f_a[i] = Kx[i] + \frac{B_\alpha}{T^\alpha} \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^m \Gamma(\alpha + 1)}{\Gamma(m + 1) \Gamma(\alpha - m + 1)} x[i - m] \quad (2)$$

ここで, n は近似項数, T はサンプリング間隔である. このように, ダンパに代わり非整数階微分項を用いるこ

とで、ばね係数を増大させることができたものの、その大きさは限られていた。そのため、次式に示されるように複数の非整数階微分項を足し合わせた VC を考察した [2]。

$$f_a = Kx + B_a \left(A_1 \frac{d^{\alpha_1} x}{dt^{\alpha_1}} + A_2 \frac{d^{\alpha_2} x}{dt^{\alpha_2}} + \dots + A_d \frac{d^{\alpha_d} x}{dt^{\alpha_d}} \right) \quad (3)$$

ここで、 $A_d (d=1,2,\dots,c)$ はそれぞれの非整数階微分項の係数、 $\alpha_d (d=1,2,\dots,c)$ は階数、 d は線形結合する非整数階微分項の項数である。今まで、筆者らはこれらのパラメータに最適化を行うことで、望みの受動性を実現する手法を提案してきた。実際に、この手法で設計された VC の受動性の周波数特性を図 1 に示す。図中、縦軸が受動性の指標 $f(\omega)$ であり、低い値ほど受動性が確保されていることを示す。横軸は周波数 f [Hz] であり、青破線は一般的なダンパの受動性、赤実線は最適化手法を用いた VC である。

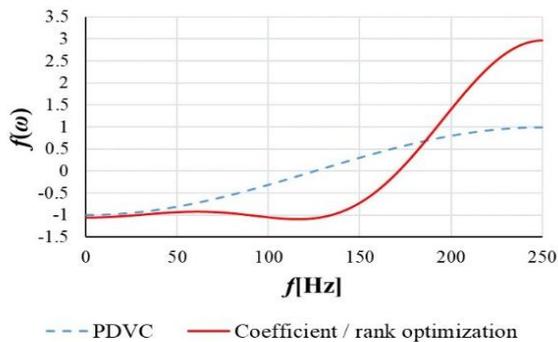


図 1 最適化された VC の受動性

図 1 に示されるように、低周波～中間周波域まで一定の受動性を持つ VC が設計できたことがわかる。実際に、PDVC(純粋なばね+ダンパの組み合わせ)と比較して、安定なばね係数のさらなる増加が確認された [2]。

2.2 指定した周波数に受動性のピークを持つ VC 見本

本最適化手法を用いることによって、指定した周波数域に望みの受動性を持つ微分項を設計することができる。これを利用して、ある周波数域に受動性のピークを持つ微分項を含む VC の見本を構築してきた [5]。図 2 に、使用した VC の微分項の受動性分布を示す。また、図 2 において黄実線は低周波数域(L 周波数域)、緑角点線は低周波数域と中間周波数域の間(LM 周波数域)、赤破線は中間周波数域(M 周波数域)、青一点鎖線は中間周波数域と高周波数域(MH 周波数域)、紺丸点線は高周波数域(H 周波数域)の受動性を持つ VC である。今までの実験では、最も低い周波数帯に受動性のピークを持つ L(黄色実線)の微分項を含んだ場合に、弾力性のあるボールや風船のような触感を感じ、最も高い周波数帯に受動性のピークを持つ H(青色点線)の微分項を含む場合に、グミや低反発材のような粘性的な要素の強い感触を得るようになる

ことが分かった。また、受動性ピークの周波数をずらしていくことによって、この感触を連続的に変化させることも可能であることが分かった。

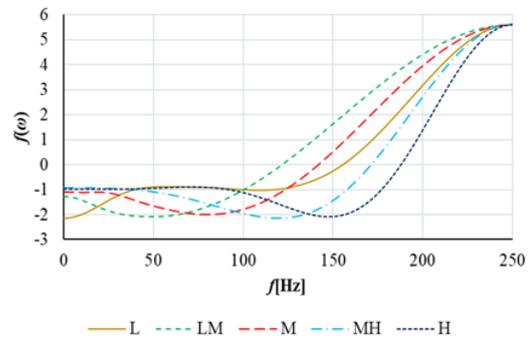


図 2 指定した周波数にピークを持つ 5 種類の微分項の受動性

そこで、縦軸に「硬い～柔らかいという硬さの指標」、横軸に「受動性ピーク周波数」をおいたマップを構成し、被験者がタッチした箇所の硬さと受動性ピーク周波数の VC を体感できる VC 見本を構築した。ただし、受動性のピーク周波数に着目した見本の場合、両端にある L と H の比較は比較的わかりやすく感じられ、その感触から連想される物体も抽出も容易だったのに対し、その中間部分の周波数にピークを持つ VC は、やや感触があいまいで、その感触で連想される物体も被験者によりややばらつきが生じる。また、周波数域での受動性の分布の形状は、まだ様々なものが考えられるため、より触感の異なると思われる別の形状の分布を持つ VC 見本の構築を試みる。

3. 指定した周波数以下に受動性を持つ VC 見本

3.1 実験に用いる力覚提示装置

本研究では、インピーダンス提示型の力覚提示装置として、市販の Geomagic Touch X を用いる。なお、仮想床をたたく上下方向の 1 自由度運動を対象とするため、2 自由度は固定して使用した。また、力覚提示用のオープンソース制御プラットフォームである Open Haptics に設計した VC を組み込んだ。

3.2 本発表での周波数域受動性設計

周波数域での受動性は、提示においてその周波数帯の運動の抑制を意味すると考えられる。前節で示した「指定した周波数に受動性のピークを持つ VC」を考察すると、低周波ピーク(L)を用いた場合、低周波の運動が抑制され、中間～高周波帯の運動が残ることとなる。これは、連想物体が弾力性のあるボールや風船が抽出されたことと一致する。また、高周波ピーク(H)を用いた場合、高周波の運動が抑制され、低周波～中間周波帯の運動が残ることとなり、連想物体が低反発材に近い物体が抽出されたことと一致する。一方で中間周波数ピーク(M)では、

中間周波の運動が抑制され、低周波と高周波が残ることとなり、やや連想物体のイメージが難しくなっていると考えられる。そこで、受動性のピークを設計するのではなく、低周波数帯からある周波数帯まで受動性を維持するような微分項の生み合わせで見本を構築することで、より見本内での比較が行いやすくすることを検討した。今回用いた微分項の受動性の分布を図3に示す。

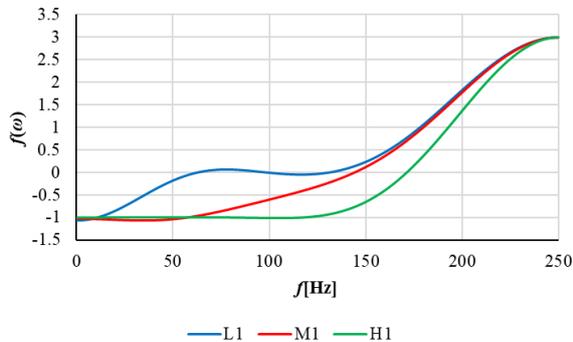


図3 指定した周波数以下に受動性を持つ
微分項の受動性分布

図中、縦軸は微分項全体の受動性 $f(\omega)$ であり、横軸は周波数 f [Hz]である。また、図3において青実線は低周波数域(L1)、赤実線は低周波数域から中間周波数域(M1)にかけて、緑実線は低周波数域から高周波数域(H1)にかけて受動性を持つVCである。

この分布を持つ微分項を含むVCでは、図2のピークを持つVCと同様に低周波では弾力性のある風船などの感触になり、高周波まで受動性を持たせると低反発材のような感触になる。ただし、高周波まで受動性を持たせた場合は図2の場合よりも、より反発する感覚が少なくなり、より低反発材の感触のイメージが強くなる。また、中間周波数帯の感触は、低周波～高周波の間の感触となることが明確に感じられる。そこで、この分布を基にVC見本を構築した。

3.3 指定した周波数以下で受動性を持つ「VC見本」

前節での結果をもとに、VC見本を構築する。VC見本は、様々な製品の表面の色を選択する際によく用いられる、視覚における「色見本」を参考に、力触覚において仮想物体表面の感触を選択するためのVCの見本である。本研究ではある周波数域以下で受動性をもつ5種類の非整数階微分項の設計を行い、それをを用いたVCを使用する。図4に「VC見本」の描画面面を示す。また図4の赤球体は力覚提示装置の指先であり、その部分が仮想床に触れることで指先に力が伝わるものである。また本研究のVC見本は奥行き方向に硬さ、横方向に指定した周波数の指標となっている。被験者は、この「VC見本」の各箇所の床をタップすると、その感触を体感できる環境となっており、またその場合のVCに用いる係数が表示されるようになっている。



図4 本発表での「VC見本」

4. 粘り気のあるVC

4.1 中間周波数帯の受動性を除去したVC

別の観点からの、VC見本として、粘り気を感じることが出来るVCの見本を構築する。また、この時の微分項の受動性の分布を図5に示す。

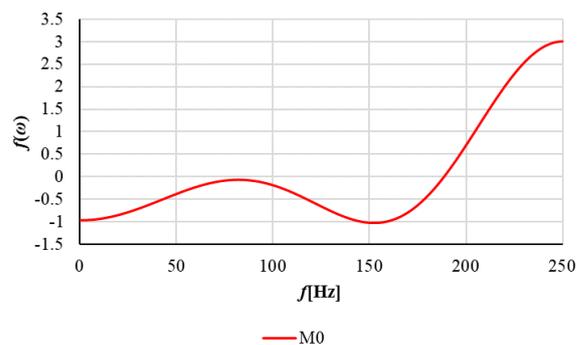


図5 中間周波数帯の受動性を除去したVC

図中、この分布を持つ微分項を含むVCでは、前章までの弾力性のあるボールや風船、低反発材とは異なる、吸い付くような感覚を得ることができた。この分布は低周波の運動と高周波の運動が抑制され、中間周波の運動が残ったためと考えられる。しかし、原因の詳細の調査は今後の課題とする。

5. おわりに

本研究では、周波数域での受動性に着目し、様々な周波数域で指定した受動性を実現するVCの設計手法を用いて、硬さの質の違いと周波数域受動性の関係を考察した。また、硬さの強度が似た各周波数域のVCのタッピング動作によって、各周波数域のVCの「硬さの質」の違いがどのように変化していくのかを調査した。この実験によって、受動性のピークがL周波数になるにつれてばねのような硬さ感覚の影響が大きい物体を表現することができ、H周波数域になるにつれて、粘性の強い流体や衝撃を吸収するような物体の表現ができることが分かった。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 19K04292 の助成を受けたものです.

6. 参考文献

- [1] 小島, 川井, "力覚提示における FIR 型非整数階微分パルシャルカップリングの設計手法", JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 3P2-E08, 2014.
- [2] 山岸, 川井, 杉本, "複数の非整数階微分を用いた VC の係数/階数同時最適化", JSME ロボティクス・メカトロニクス

講演会 2016, 1A120a2.

- [3] 東, 岡本, 永野, 山田, "硬さとは何か?減衰固有振動の等硬さ知覚曲面からの理解", 第 14 回計測自動制御学会 SI 講演会, 3K1-5, 2014.
- [4] 川井, 南, 山岸, "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", 日本 VR 学会, No.22, 2017.
- [5] 池田, 川井, "周波数受動性設計を用いた VC の見本構築", JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, , 2019.