

偏加速度振動を用いた疑似力覚提示の機序解明および最適化

Optimization of illusory force sensation induced by asymmetric vibration

2181010



研究代表者

電気通信大学大学院
情報理工学研究所

教授

梶本 裕之

共同研究者

首都大学東京
システムデザイン研究科

助教

ヤエム ヴィボル

[研究の目的]

遠隔操縦等の場面において、機械に加わる力を操縦者に伝えることは操縦性や安全性の面で重要である。しかし一般に力の提示には大掛かりな装置が必要となる。近年の研究で振動子に非対称な波形（偏加速度振動）を与えると、把持した指に擬似的な力覚（以降疑似力覚とよぶ）を生じる現象が報告され、力覚提示の簡便な手法として注目されている。しかしその機序については未解明で、波形の最適化も行われていなかった。

本研究は本現象の最適化を主たる目的としている。これによって、遠隔操縦の補助はもとより、バーチャルリアリティ空間におけるユーザの各指への物体接触感の提示や、携帯機器に内蔵した「手をひく感覚」による歩行ナビゲーションが可能となる。

[研究の内容, 成果]

研究開始前の段階の我々の疑似力覚提示装置を図1に示す。DCモータに40 Hz程度の周期の鋸波を印加すると、一つの回転方向には素早く、逆の回転方向にはゆっくりと回転する状況を作ることが出来る。この時人は明瞭な疑似力覚（トルク感）を一方向に感じる。

従来の疑似力覚の研究が振動子を「把持」することが前提であったのに対して、指一本でも

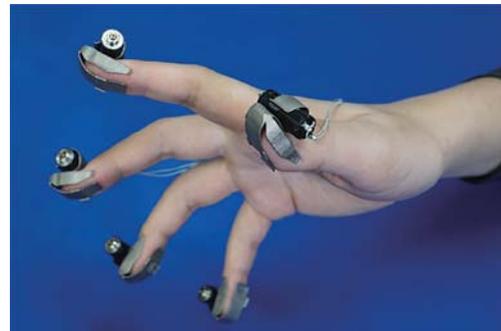


図1 指先に装着する回転型振動子

感じられる錯覚であるため、バーチャルリアリティ等の幅広い応用が期待できる。この時点で、本手法で30 g程度の力覚を生じることが明らかとなっていた。

まず最適な波形および周波数の選定を行った。提示刺激としては往復で加速度の異なる非対称振動を5種類、3つの周波数（15, 30, 60 Hz）ごとに計15種類用意した。波形の選定は予備実験より、往復で加速度の異なる複数周囲の非対称振動としてまず鋸波を選択し、先行研究の波形生成のルールに則り鋸波、正弦波、三角波、矩形波をそれぞれ2周期において半周期分の振幅を反転させた波形を波形合成ソフトにより作成した。上記の手法を用いて生成された波形は正方向と負方向への入力時間比が3:1となるため、以降明確に区別するためそれぞれ3:1鋸波、3:1、正弦波、3:1三角波、3:1矩形波、またこれらを総称して3:1波形と呼称する。

被験者は右手の人差し指にデバイスを装着し、

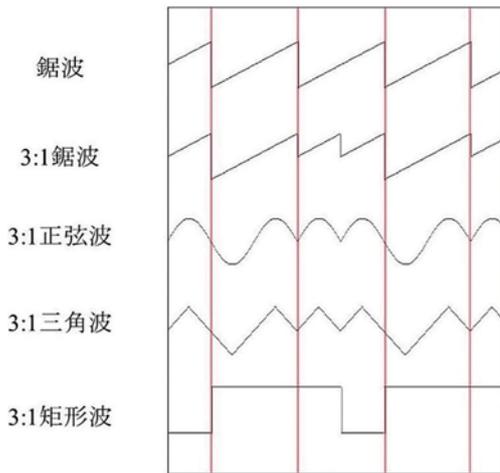


図2 使用した波形

手首が机に接する状態で楽な姿勢で実験を行った。このとき人差し指は机に接しないように、実験中可能な限り動かさずに姿勢を維持するよう指示した。

はじめに、被験者はランダムに提示された刺激に対し、感じる擬似力覚が振動に対して最も明瞭に感じられる点にアンプのボリュームを調整し、その後感じた擬似力覚の振動に対する明瞭さを7段階リッカートスケールでタブレットに回答した。

各波形の被験者の回答を箱ひげ図にまとめたものを図3に示す。図の縦軸は被験者の7段階リッカートスケールでの回答を表し、数値が大きいほどよりクリアに力覚を感じたことを示す。横軸は各波形の条件、すなわち波形と周波数を表す。また各ボックスの上辺、内部の線、底辺はそれぞれ第三四分位数、中央値、第一四分位数を表す。実験結果より、これまでに擬似力覚

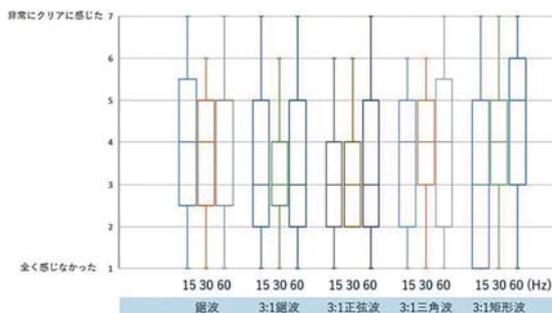


図3 実験結果

の提示を行う際に使用していた低い周波数 (15 Hz) の鋸波に加え、高い周波数 (60 Hz) の 3:1 矩形波においてユーザが力覚を比較的クリアに感じていることが分かった。

しかし本実験では各 3:1 波形の生成の際、全てを同じルールに則って生成を行っていたが、矩形波は 2 周期において半周期分の振幅を反転させた場合、2 周期の間に振幅が 0 となる点がある。他の振動信号が 4 点であるところ 2 点しか存在せず、実質的な周期が 2 倍となる波形に含まれる高周波成分が少なくなる。これがこのため 3:1 矩形波における適した周波数が高くなった原因と考えられ、振動刺激も実質的に周波数が半分となってしまっていたと考えられる。すなわち、実験結果における 60 Hz の矩形波における結果は、実際には 30 Hz の矩形波によるものであると考えられ、この結果はこれまでに行った実験の結果と相反するものではないといえる。

ここまでの実験で、矩形波と鋸波が擬似力覚を生起する候補であることが明らかとなった。しかしここまでの大きな問題として、オーディオアンプを用いて実験を行っており、オーディオアンプの入力波形と出力波形が同じ形をしている保証がないという点が挙げられた。特にオーディオアンプは数十 Hz 以下の信号をカットするフィルタが設けられており、今回ターゲットとする振動提示には本来向いていない。この問題は従来の同様の手法による擬似力覚提示の研究で常に付いて回る問題でも合った。このため DC モータ用の波形生成アナログアンプを新たに作成して使用した (図4)。

以上の準備をふまえ、これまでの実験で特に強い擬似力覚を生起した鋸波と矩形波を基本波形とし、これらを正負にふったもの、および同様の波形にオフセット電圧を加えて電圧を常に正に保ったものを用意した (図5)。オフセット電圧を加えた波形を準備した理由は、DC モータを用いているためにモータの回転が正負反転する際にノイズを生じやすいと考え、モー



図4 波形生成用アンプ

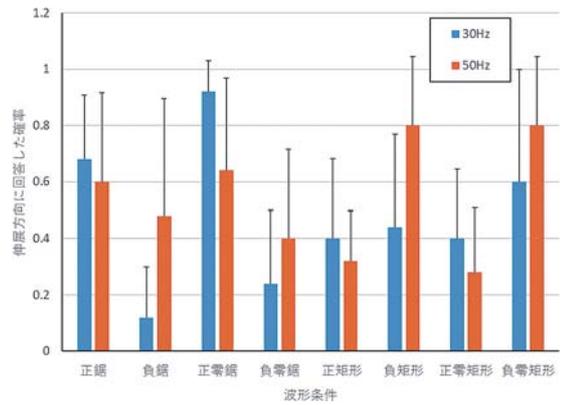


図6 伸張方向に回答した割合

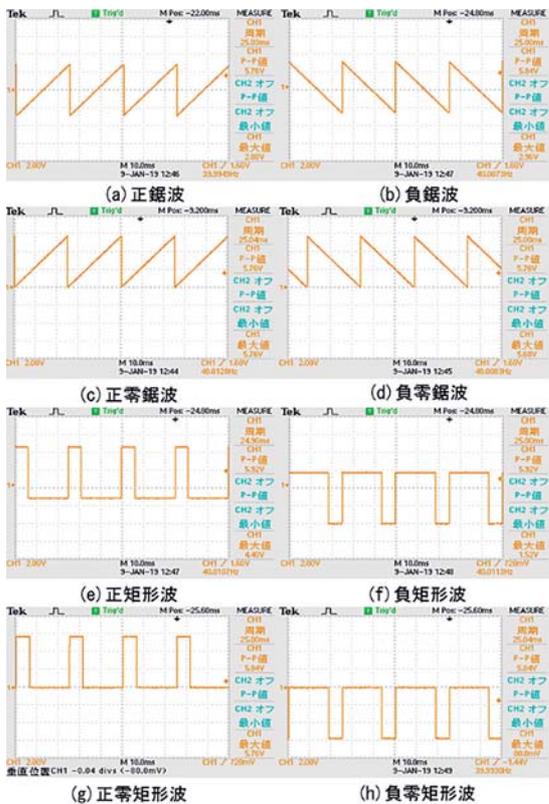


図5 使用した波形

タの回転方向を一定に保つための工夫として考えたものである。

波形は8種類、周波数は30 Hzと50 Hzとし、合計16種類の組み合わせに対して被験者に疑似力覚の強さと方向を回答させた。ここでいう方向とは、指の伸張方向と屈曲方向の二種類を意味し、特に伸張方向に感じられるならばバーチャルリアリティ環境における「把持」等の作業時の力覚提示に好適である。

図6に、入力波形の種類、周波数ごとの伸張

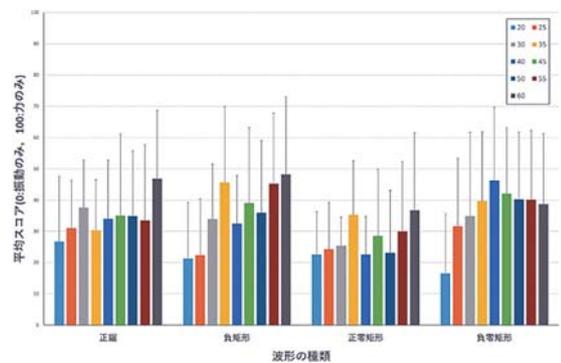


図7 力の明瞭さの周波数依存性

方向と被験者に回答された割合のグラフを示す。正鋸波、正零鋸波、負矩形波、負零矩形波の4つは伸張方向に力覚を感じる傾向にあることが分かる。従来の知見とは異なり、矩形波に関しては短いパルスの立ち上がりが疑似力覚の方向知覚に関与せず、むしろ立ち下がりが関与していることを示唆している。

得られた4つの波形に対して、より詳細な最適値を得るため、20 Hzから60 Hzまで、5 Hz刻みの波形を用意した。ここでは疑似力覚の強さではなく「明瞭さ」を回答させるために、付随して生じる振動知覚との比較においてどれだけ明瞭に疑似力覚を知覚したか回答させた(0:振動のみ, 100:力のみ)

この結果を図7に示す。グラフより、ほぼ多くの周波数にて平均スコアが最も高いのは負矩形波の60 Hzであることが分かる。特に安定して疑似力覚を回答したのは負の矩形波の場合であったが、負の矩形波は60 Hzで最大値を

とっており本実験条件の限界である 60 Hz より大きい周波数の場合に最適値がある可能性がある。

そこでこの負の矩形波に関してのみ、40 Hz から 100 Hz までの周波数で再実験を行った。その結果を図 8 に示す。平均スコアは 60 Hz までは上昇しているが、それ以上では下降していくことが分かる。以上の結果より、本研究では 60 Hz の負矩形波をモータへの入力波形として採用した。

続けて、本手法による擬似力覚提示が力の感覚の提示として十分なリアリティを持っているかどうか確認する実験を行った。実験中被験者に提示される映像を図 9 に示す。提示される映像は約 2 秒かけて、スポンジに指で触れ、離すという内容である。映像はスポンジに指が十分に沈み込むところまでの映像に、それを逆再生したものを結合しているため、2 つの映像の再生時間は等しく、違和感なくループ再生することができる。

力覚提示は映像の指の沈み込み度合い（映像

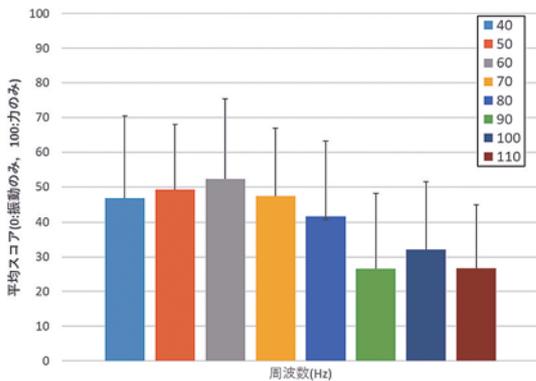


図 8 負矩形波における力の明瞭さ



図 9 被験者に提示される映像

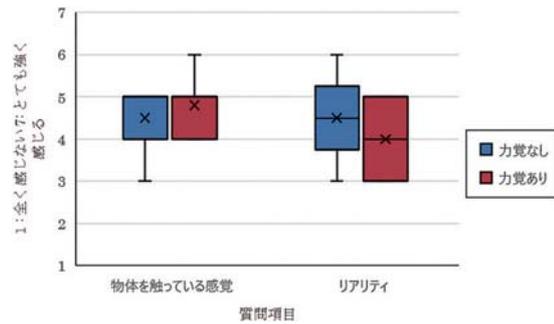


図 10 実験結果

の再生時間)に合わせて力覚の大きさ(入力波形の振幅)を大きくしていく。疑似力覚のみの効果を検証する目的で、被験者に提示する振動刺激には疑似力覚を生起させる振動(負矩形波, 60 Hz をモータに入力)と、疑似力覚を生起させない単純な振動(三角波, 60 Hz をモータに入力)の 2 条件とした。被験者には「ものを実際に触っている感じがするかどうか」「刺激によって体験全体のリアリティは向上したかどうか」を回答させた。

図 10 に 10 名の被験者による実験結果を示す。縦軸はリッカートスケールの点数、横軸は質問ごとに振動刺激 2 条件を示している。グラフの太線は中央値を、x 印は平均値を示している。Wilcoxon の符号付順位検定によって各グループと基準刺激(4)の間の有意差を確認したところ、質問「物体に触っている感覚は向上したか?」について、疑似力覚ありのグループのみ有意差が確認された($p < 0.05$)。ただし疑似力覚ありと無しの間での有意差は確認されなかった。

[今後の研究の方向, 課題]

以上の結果から、振動子(ここでは DC モータ)を用いた疑似力覚提示において、60 Hz の矩形波が最も効率よく鮮明な力覚を生起出来ることがわかった。一方でバーチャルリアリティ応用を念頭に置いた「疑似力覚によるリアリティの向上」に関しては大きな効果は得られないことがわかった。

これは本手法による擬似力覚提示では振動による皮膚感覚が明瞭で、そもそも物体を触るというリアリティが高くなかったことが一つ原因としてあげられる。しかし単独の指への装着で明瞭な力の方向の提示が可能であることから、作業指示等の応用用途はあるものと考えている。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Vibol Yem, Hiroyuki Kajimoto: A Fingertip Glove with Motor Rotational Acceleration Enables Stiffness Perception When Grasping a Virtual

Object, HCII 2018, Springer pp. 463-475, 2018.

- [2] Vibol Yem, Yasushi Ikei, Hiroyuki Kajimoto : Shape and Stiffness Sensation Feedback with Electro-tactile and Pseudo-Force Presentation When Grasping a Virtual Object, AsiaHaptics2018, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 535, Springer, Singapore, 2018.
- [3] Takahiro Shitara, Vibol Yem, Hiroyuki Kajimoto : Reconsideration of Ouija Board Motion in Terms of Haptic Illusions (IV) : Effect of Haptic Cue and Another Player, ACM SIGGRAPH Poster, 2019 (accepted)