



座面への分布的な非対称振動波形が牽引力錯覚に及ぼす効果

福田光輝¹⁾, 青山一真²⁾, 雨宮智浩²⁾, 中村拓人¹⁾, 鳴海拓志¹⁾

Koki FUKUDA, Kazuma AOYAMA, Tomohiro AMEMIYA, Takuto NAKAMURA, Takuji NARUMI

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {kokifukuda, n.takuto, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 バーチャルリアリティ教育研究センター

(〒 113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16, {aoyama, amemiya}@vr.u-tokyo.ac.jp)

概要: 手や指に非対称振動刺激を提示すると牽引力錯覚が生じることが報告されているが、他の部位への非対称振動刺激提示が牽引力錯覚を惹起するかは確認されていない。本研究では、座面に牽引力錯覚を生じさせることで着座移動時の慣性力等を模擬して移動感を提示することを狙い、腰部および臀部への非対称振動刺激により牽引力錯覚が惹起するかを検証した。座面に振動子を複数組み込むことで非対称振動刺激を分布的に提示できる装置を製作し、異なる波形および周波数の条件下で非対称振動刺激を提示する実験を行った結果、腰部および臀部でも牽引力錯覚が惹起することが示された。

キーワード: 非対称振動刺激, 牽引力錯覚, 振動分布, Haptic Interface

1. 序論

1.1 背景

映像観賞やゲーム, VR などにおける臨場感を高めるために、映像から得られる移動感を向上させる研究が取り組まれてきた。ここでの移動感とは、身体が移動している際にさまざまな感覚入力を受けて生じる自己移動感覚のことである。例えば、車や電車に乗っているときに車両が動き出すと、入力された視覚や加速度感覚からの情報が統合されることで移動感が生じる。

移動感を高める手法として、体験者が乗り込んだ椅子の並進や回転の制御をおこなうことで映像提示に合わせた加速度感覚の提示が可能なモーションプラットフォーム [1] や、経皮電気刺激で前庭に働きかけることで映像提示に合わせた加速度感覚の提示が可能な前庭電気刺激 [2] といった研究や開発がされてきた。しかし、こうした既存の移動感提示手法には、価格や安全面、スペース、デバイス装着の必要性といった観点からさまざまな課題が存在している。

そこで本研究では、視覚以外の感覚を活用した従来の移動感提示手法の課題を解決する新たな手法を提案することを狙う。ここで、筆者らは非対称振動刺激によって生じる牽引力錯覚に着目した。非対称振動刺激によって生じる牽引力錯覚とは、皮膚上に行きと帰りの加速度が大きく異なる非対称な振動刺激が提示されると、実際には皮膚上での合成力は 0 であるにもかかわらず特定方向に牽引される力が知覚されるというものである [3]。

一方、これまでに非対称振動刺激による牽引力錯覚を移動感提示のために利用した研究はない。加えて、非対称振動刺激によって生じる牽引力錯覚の特性の大部分は、依然として未知のままである。手部以外へ非対称振動刺激を提示

したときにどういった効果が生じるか明らかになっておらず、非対称振動刺激を与える装置は 1 つのみあるいは 2 つを組み合わせて使用する場合の効果しか検討されていない。

1.2 目的

本研究の目的は、座面に接する臀部および腰部に対して非対称振動刺激を分布的に提示することで牽引力錯覚を生じさせられるのか、生じる場合にはその牽引力錯覚はどのような特性を持つのかを明らかにすることである。そのために、臀部および腰部への非対称振動刺激分布提示によって牽引力錯覚が生起するのか、生起する場合にはどのような力が知覚されるのか、どのような信号波形・周波数を持つ非対称振動刺激が臀部・腰部での牽引力錯覚を知覚しやすいのかを検証するための実験を行い、座面に対して非対称振動刺激を分布的に提示することで生じる牽引力錯覚の特性に迫った。

1.3 関連研究

力覚を提示したい方向に対し、非対称振動 (大きな加速度を短時間で提示し、続けて逆方向に小さな加速度を長時間で提示するという周期運動) を起こすことによって、その物体を把持している人に力覚を提示できるという研究がされている。これは、人間が短時間の大きな加速度を知覚しやすいという知覚の非線形性によるものである。この知覚特性を活用することで、非対称振動刺激を提示して特定方向への牽引力を知覚させることができる [3]。非対称振動刺激を用いることによって、非接地で力覚を提示できる上、作業範囲が限定されない牽引力提示が可能であり、また連続的な力覚の提示も可能であると考えられている。筆者らは、非対称振動刺激を用いることで、これらの特長を活かした移動感提示ができると考えた。

2. 手法と実装

装置の装着の必要がなく、着席するのみで振動刺激を提示できる臀部や背部といった座面に焦点を当て、手法の提案と装置の製作を行った。

2.1 提案手法

非対称振動刺激を発生させる装置として FOSTER 社の 6398971 の振動子を採用した。振動子は軽量かつ小型であるため、複数の振動子をより小さな間隔で配置することができる。基本的な振動生成の流れは、オーディオ信号を再生し、パワーアンプによってその電圧を増幅させ、その電圧を振動子に加えることによって振動させるというものである。その際、再生するオーディオ信号を複数のチャンネルを持つものとする事で、それぞれのチャンネルに繋いだ振動子に異なる信号を与えることができる。

2.2 製作した装置

スポンジをくり抜き 25 個の振動子を埋め込む形で装置を構成した。前節の手法を元にして構成を行い、実際に製作した非対称振動分布刺激提示装置を図 1 に示す。

3. 実験

3.1 実験目的

作成した非対称振動刺激分布提示装置を用いたユーザスタディを通じて、非対称振動刺激分布提示によって生じる牽引力錯覚の下記の 3 つを検証を目的とした。

1. 非対称振動刺激の分布的な提示によって、手部以外でも牽引力錯覚を生起させられるのか
2. どのような信号波形および周波数を用いると牽引力錯覚が知覚されやすいのか
3. 非対称振動刺激の分布的な提示が牽引力錯覚を生起させるとき、どのような力として知覚されるのか

3.2 実験内容

波形や周波数の組み合わせの異なる 6 種類のオーディオ信号を用いて実験を行った。それぞれの信号に対して、正方向への非対称信号、負方向への非対称信号、対称な信号を用意して実験したため、用いた信号は計 18 種類であった。18 種類の振動刺激分布をランダムな順番で、5 秒間ずつ実験参加者に提示した。各振動刺激分布に対して、知覚した牽引力の方向、その自信度、どのような力として認識したかを参加者に口述で回答させた。この操作を、臀部 (お尻)

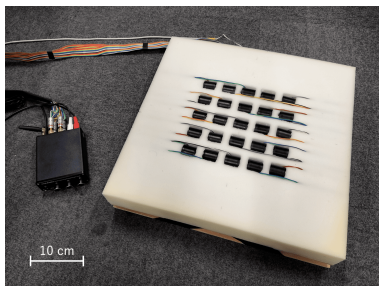


図 1: 製作した非対称振動刺激分布提示装置



(a) 臀部 左右方向

(b) 臀部 前後方向



(c) 腰部 左右方向

(d) 腰部 上下方向

図 2: 提示部位および提示方向における装置設置方法

と腰部 (腰) の 2ヶ所で、それぞれ左右方向とそれと垂直方向の 2 方向に対して行った (図 2)。実験参加者は 10 名 (男性 8 名, 女性 2 名) であった。

3.3 実験信号

3.3.1 正弦波信号

非対称正弦波信号は、先行研究 [4] を参考に作成した、単純な正弦波の一部を振幅軸方向に反転させ、非対称な信号にしたものである。具体的な非対称正弦波信号の生成方法として、正の非対称正弦波信号 (図 3(a)) は、単純な正弦波において負方向に膨らんでいる部分を 1 つおきに振幅軸方向に反転させる。負の非対称正弦波信号 (図 3(b)) は、正の非対称正弦波信号の振幅を反転させたものである。また、本研究では比較のため対称な信号 (図 3(c)) も用意した。

時間 t における各正弦波信号 $x(t)$ を数式として表すと式 1~式 3 のようになる。

正非対称正弦波信号

$$x(t) = \begin{cases} -A \sin 4\pi ft & \text{if } \frac{2n-1}{4f} \leq t < \frac{n}{2f} \ (\forall n \in \mathbb{N}) \\ A \sin 4\pi ft & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

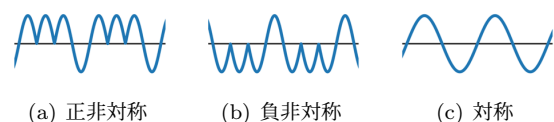
負非対称正弦波信号

$$x(t) = \begin{cases} A \sin 4\pi ft & \text{if } \frac{2n-1}{4f} \leq t < \frac{n}{2f} \ (\forall n \in \mathbb{N}) \\ -A \sin 4\pi ft & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

対称正弦波信号

$$x(t) = A \sin 2\pi ft \quad (3)$$

ただし、式中の f は作成する信号の周波数 [Hz], A は作成する信号の振幅である。



(a) 正非対称

(b) 負非対称

(c) 対称

図 3: 正弦波信号

3.3.2 矩形波信号

非対称矩形波信号は、矩形波のデューティ比を変更することで、振幅軸方向に非対称の信号としたものである。上記で述べた正の非対称正弦波信号について、振幅の正負割合が3:1となっている。矩形波信号でも同じく正負割合を3:1とするために、本実験ではデューティ比を0.75として正の非対称矩形波信号(図4(a))を、デューティ比を0.25として負の非対称矩形波信号(図4(b))を作成した。比較のための対称な信号は、デューティ比0.5の矩形波信号(図4(c))とした。

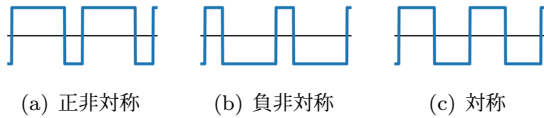


図4: 矩形波信号

3.3.3 鋸形波信号

非対称鋸形波信号は、波形を鋸形波(のこぎり形波)とすることで、時間軸方向に非対称の信号としたものである。正非対称鋸形波信号(図5(a))と負非対称鋸形波信号(図5(b))は、互いに振幅を反転させたものとなっている。比較のための対称な信号は、三角波信号(図5(c))とした。

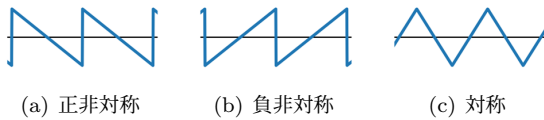


図5: 鋸形波信号

3.4 結果

それぞれの信号における正答率の箱ひげ図を図6に示す。本実験では、各振動刺激に対して回答方向は4通りあるため、ランダムに答えた場合の正答率は1/4、つまりチャンスレベルは0.25である。それぞれの信号の平均正答率について、チャンスレベルに対する二項検定を行った。算出した各信号におけるp値を表1に示す。これより、正弦波

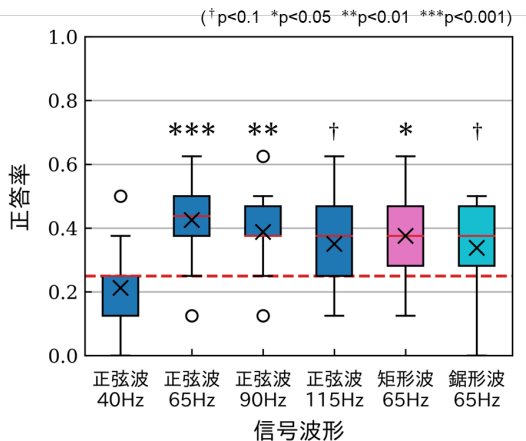


図6: 各信号における正答率

65 Hz, 正弦波 90 Hz および矩形波 65 Hz を用いたとき、正答率はチャンスレベルより有意に大きかった。

次に、効果量として cohen の d を採用し効果量を算出した。基準となる分布は、確率 0.25 の事象を 80 回試行した場合の二項分布とした。これは本実験においてランダムに回答した場合の正答数の分布を意味する。また、これにより算出される効果量は、平均から標準偏差の何倍離れているかを表す。効果量 d は、式 4 から算出する。ただし、 M_{exp} は実験における各信号での正答数、 μ_{bin} は二項分布の平均値、 σ_{bin} は二項分布の標準偏差とする。

$$d = \frac{|M_{exp} - \mu_{bin}|}{\sigma_{bin}} \quad (4)$$

算出した各信号における効果量を表1に、ランダムに回答した場合の正答数を示す二項分布と実験において有意差のあった条件での正答数を図7に示す。これより、正弦波 40 Hz を除く全ての信号で効果量が大きいと言える。

3.5 考察

3.5.1 適切な信号

非対称振動刺激分布を対象者の座面に提示するにあたり、こういった波形および周波数が牽引力錯覚を生起させやすいか検討した。表1において、同一波形(正弦波)の異なる周波数について正答率を比較したところ、65 Hz のときに最も正答率が高くなった。加えて、65 Hz のときに最も正答時の自信度が高いという結果であった。これにより、周波数に関しては 65 Hz のときに牽引力錯覚が最もはっきりと生起すると言える。

同様に、表1より、同一周波数(65 Hz)の異なる波形について正答率を比較したところ、正弦波信号による非対称

表1: 各信号に対する平均正答率、p 値および効果量

	正答率	p-value	cohen's d	
正弦波	40 Hz	0.213	0.519	0.77
	65 Hz	0.425	0.000664 ***	3.61
	90 Hz	0.388	0.00642 **	2.84
	115 Hz	0.350	0.0516 †	2.07
矩形波	65 Hz	0.375	0.0136 *	2.58
鋸形波	65 Hz	0.338	0.0920 †	1.81

(†p < 0.1 *p < 0.05 **p < 0.01 ***p < 0.001)

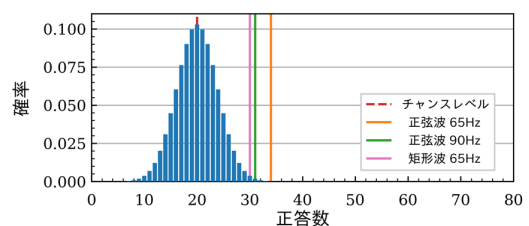


図7: ランダムに回答した場合の正答数を示す二項分布

振動刺激分布を提示したときに最も正答率が高くなった。また正答時の自信度についても、正弦波信号による非対称振動刺激を提示したときに最も自信度が高くなった。これにより、信号波形に関しては、正弦波信号による振動刺激のときに牽引力錯覚が最もはっきりと生起すると言える。

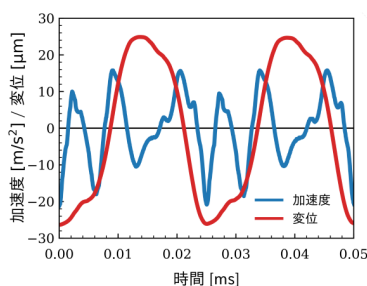
3.5.2 信号と加速度および変位

ここで上記で述べたことについて、入力した信号ではなく、実際に生じた振動から議論する。各信号を振動子に与えたときの、実際に振動子に起こる振動をレーザ変位計を用いて測定した。実験に用いた非対称振動刺激分布提示装置同様、スポンジに埋め込んだ振動子に対して各信号を加え、その際の振動子表面の加速度および変位を測定した(図8)。レーザ変位計は、キーエンス社のLK-G5000を用いた。測定の結果を図9に示す。

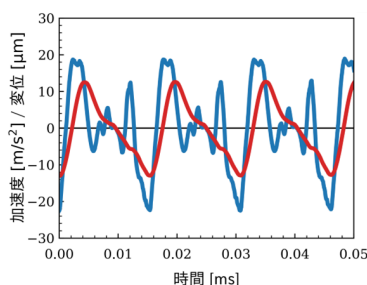
同一波形の異なる周波数において、加速度の最大振幅に大きな変化はないが、変位が最も非対称となる信号(図9(b))が正答率が高いとわかった。また、周波数が小さくなるほど変位の最大振幅が大きくなったが、これと正答率は関係しないことがわかった。つまり、非対称振動刺激において、



図8: レーザ変位計による変位と加速度の測定



(a) 正弦波信号 40Hz (正答率 0.21)



(b) 正弦波信号 65Hz (正答率 0.43)

図9: 各信号における変位と加速度

変位が大きいほど知覚しやすいということは一概には言えない。加えて、同一周波数の異なる波形において、どの波形においても加速度は非対称となっていたが正答率に差異が見られた。

これらより、非対称振動刺激において、加速度の非対称性や変位の大きさよりも、変位の非対称性が牽引力錯覚の知覚のしやすさの要因となっていると考えられる。

3.5.3 知覚の種類

自由口述の結果から、実験参加者は振動刺激分布により、先行研究として手部に提示したときに知覚されることが確認されている皮膚表面の牽引力錯覚の他に、身体牽引力、身体移動感、椅子移動感等を知覚する場合もあることがわかった。

座面への非対称振動刺激分布提示によって、座面に対する牽引力の提示だけでなく、移動感を想起させられる可能性も示唆される。

4. 結論

非対称振動刺激によって手部以外でも牽引力錯覚を生起させられるか、生起する場合にはどのような力が知覚されるのか、どのような信号波形・周波数を持つ非対称振動刺激が座面での牽引力錯覚を生起させやすいかを検証した。具体的には、製作した非対称振動刺激分布提示装置を用いて、臀部および腰部に対し6種類の異なる信号で駆動された非対称振動刺激を分布的に提示する実験を行った。

実験の結果、非対称振動刺激による牽引力錯覚は臀部や腰部でも生起されることがわかった。また、信号が正弦波信号 65 Hz のときに最もはっきりと牽引力錯覚が生じるといえる、移動感を想起させられる可能性も示唆された。

謝辞 本研究は、科研費基盤研究(A)(21H04883)、科研費基盤研究(B)(22H03628)、およびJSTムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2013)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 広瀬通孝, 大塚隆治, 広田光一. モーションベースを利用した前庭感覚表現に関する基礎的研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 16-22, 1996.
- [2] 前田太郎, 安藤英由樹, 渡邊淳司, 杉本麻樹. 前庭感覚電気刺激を用いた感覚の提示. バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No. 2, pp. 82-89, 2007.
- [3] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎. 知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価(「触・力覚情報の処理と呈示」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 11, No. 1, pp. 47-57, 2006.
- [4] Takeshi Tanabe, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata. Properties of proprioceptive sensation with a vibration speaker-type non-grounded haptic interface. In 2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 21-26, 2016.