



# 時系列で振動刺激を与えた時のファントムセンセーション発生条件

Conditions for sensory funneling generation when vibrational stimuli are applied in a time series

野口雄弘<sup>1)</sup>, 山本拓実<sup>1)</sup>, 井上淳<sup>1)</sup>

Takahiro NOGUCHI, Takumi YAMAMOTO, and Jun INOUE

1) 東京電機大学大学院 工学研究科 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5, 23kmk19@ms.dendai.ac.jp)

**概要:** VR 空間での没入感を向上させるため, ユーザの足裏に振動刺激を与えて歩行時の足裏の重心移動の再現することを目的とした. 再現を行う方法としてファントムセンセーション(PS)に注目した. PS を用いると振動刺激を与える場所を変えずに振動源の位置を錯覚させられる. 与える振動には強さや大きさ, 周波数, 変化の割合など多くのパラメタが存在する. 足裏に周波数, 単位時間当たりの刺激の強さ, 刺激時間が異なる振動刺激を与え PS の発生有無の確認, 刺激位置の移動感を再現した. その結果, 足裏において, PS を用いて振動源を移動していると錯覚する条件に, 周波数と刺激時間が影響すると示された.

**キーワード:** 感覚漏斗現象, 周波数, 錯覚, 足裏

## 1. はじめに

テクノロジーの発達によりメタバースは近年注目を浴びている. 世界のメタバース市場は 2022 年に 655.1 億ドルだったが 2030 年には 9,365.7 億ドルまで拡大すると予想されている[1]. 計算機による仮想空間と現実の世界ではユーザが感じられる情報量に差が生じる. 仮想空間における再現度を上げ, 情報量をより多くすると現実世界に近づき, 没入感が向上する. ヒトが世界を認識する主な方法として五感や前庭覚, 平衡感覚などが挙げられる. その中で五感に注目した. 4DX, MX4D は視覚と聴覚, 触覚, 嗅覚を再現したコンテンツとして確立されている. しかし, 4DX, MX4D の触覚表現は再現したい触覚の種類数だけ機器と消耗品が必要である. 例えば, 雨の映像に対して観客に液体を浴びせ再現を行っている. そのため触覚情報を増加させた場合, 没入感の向上には多大なコストがかかり現実的ではない. また, 触覚表現を実用化した製品は少ない. この要因の 1 つは, 触覚の感覚受容器の解明が進んでいない点が挙げられる[2]. そこで私たちはヒトと物体の接触面で発生する振動に注目し, この振動を再現できれば触覚の再現が可能であると考えた.

次に再現をする動作について述べる. ヒトの特徴の 1 つに二足歩行が挙げられる. この二足歩行時に靴と接触する足裏の感覚を再現によりメタバース空間での没入感が向上すると考えた. そのため, 私たちは足裏に振動刺激を与え, 足裏の触覚再現に着目した.

先行研究として 2 つ挙げる. 魚田らの研究では, 振動モータ, 圧力センサを用いて砂浜歩行感覚を再現した[3]. この研究では足裏で踏む素材の組み合わせにより砂浜歩行感覚の再現を行っている. また, 黄の研究では, Oculus Rift Consumer version1 を用いて視覚情報を提示し, スリッパ型デバイスで足裏に振動刺激を与え触覚情報を提示した. スリッパ型デバイスにより, 足裏の仮想地面を提示の可能性が示された[4]. そこから, 私たちは歩行感の再現を行うため, 歩行時の足裏重心移動の触覚情報を提示する.

振動発生装置を足裏に複数配置し, ユーザに刺激を与え, 振動源の連続的な移動感の再現を目指した. 振動刺激装置は小型のボイスコイルモータを用いた. 円形のため直接刺激を行えない箇所が発生する. 直接刺激ができない箇所に疑似的に刺激を与える方法としてファントムセンセーション(PS)を利用した. PS は, 皮膚上の 2 点の振動を与えるると 2 点を結ぶ直線状に 1 つの振動感覚が生じる錯覚現象である[5].

また, 私たちのこれまでの研究で刺激時間と周波数を変更した刺激を与えた時, 刺激時間を長くすると低周波で移動を感じられる可能性が示唆された. そこで, 本研究で足裏 2 カ所に同時に刺激を与え周波数, 単位時間当たりのパワー値の変化量, 刺激時間を変え PS 発生の有無とその際の条件, 感じた振動の強さ, 振動源の移動感の検討を行った.

2. 手法

ボイスコイルモータから同時に2カ所刺激を行う。その時に位置1と位置2の部分に刺激を与え実験を行った。

与えた信号は2組ある。1組目は刺激時間を一定にして単位時間当たりのパワー値を変化させたA信号とパワー値の変化を行わないB信号、2組目は単位時間当たりの強さの変化を一定にし、刺激時間を変えさせたC信号とパワー値の変化を行わないD信号である。それぞれの信号を図1、図2に示す。図中に示す緑が基準信号、青が評価信号である。この基準信号はパワー値に変化がない100Hzである。この基準信号を被験者に与えた時、被験者が感じた強さを5と伝え評価を行わせ、麻痺の有無を確認するため、試験信号を与えた後、基準信号と同じ振動を与えパワー値を評価させ、試行前後で感覚の変化の有無を確認した。

また、連続して足裏に刺激を与えると麻痺が発生する可能性がある。被験者の麻痺状態を確認するため、各試行の始めと終わりに基準となる信号を与え被験者が感じた強さの変化の有無を評価した。

次に振動刺激装置から与えた信号の詳細について述べる。時間一定の信号について述べる。試験信号として被験者に対し3秒間刺激を与えた。パワー値の増加割合を変えるため、パワー値の最大値を4通り設け、実験した。パワー値の最大値は、1, 4/5, 3/7, 1/3とした。

次に傾き一定の信号について述べる。傾きを一定にして刺激時間と最大値を変更した5通りの信号で実験を行った。同じ傾きの1秒, 3秒, 5秒, 7秒, 9秒の信号を作成した。そのため、最終的な信号の強さは9秒の信号に対して1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1となる。これにより刺激時間、与えた刺激の大きさが及ぼす影響を明らかにする。

被験者に靴下をはいた状態で靴型デバイスを履かせ刺激を与えた。

刺激を与えた周波数は 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500 Hz の14通りを行い、周波数による影響を調査した。表1に与えた信号を示す。

信号	時間[s]	傾き	周波数[Hz]
A, B	一定(3s)	1/3, 3/7, 4/5, 1	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70,
C, D	1, 3, 5, 7, 9	一定	80, 90, 100, 200, 300, 400, 500

3. 実験内容

各条件, 20代健康男性被験者5名に対し実験を行った。被験者を着座させ振動刺激装置を埋め込んだ靴型デバイスで左足の足裏に対し、図2に示す位置1と位置2の2カ所を同時に刺激した。刺激箇所は2カ所であるため、刺激箇所をA信号とB信号、C信号と信号Dで入れ替え、各試行2回ずつ実験を行った。

振動の強さは、9段階で評価を行わせた。始めに基準となる刺激を与え、その時の強さを5とした。その後、異なる刺激を与えそれに対し1~9で回答させた。振動源の個数は、足裏に感じた振動の個数を整数で回答させた。移動方向は、振動源の移動を感じなかった場合は移動なし、振動源の移動を感じた場合はつま先側を上とし、移動方向を上, 右上, 右, 右下, 下, 左下, 左, 左上の8方向で回答させた。振動源の場所は、図3に示す足の形の図に対し振動源の場所を記入させた。

刺激を与えた箇所は左足の母指球付近である。図4に振動刺激装置を設置した位置1と位置2を示す。



図3 移動方向評価例 図4 靴型デバイスと振動刺激位置

4. 結果

4.1 刺激時間一定条件下

刺激の時間を一定にし、パワー値の最大値を変えるものについての結果を述べる。刺激時間一定条件下で、全ての被験者で振動源が1か所であった。刺激箇所は2点であるからPSは発生していた。また、振動源が移動している感覚は現れなかった。次に、図5に周波数と試験信号のパワー値の強さごとに被験者が感じた刺激の強さを示す。時間が一定の場合、赤点線を引いた箇所から強さの感じ方に差があると示された。また、パワー値が異なる信号を被験者に与えても被験者が感じる強さに信号のパワー値の大きさは関係ないと示された。

次に図6に別の被験者の周波数ごとの強さを最大値毎に示す。被験者Bも時間が一定の場合、周波数が感じた強

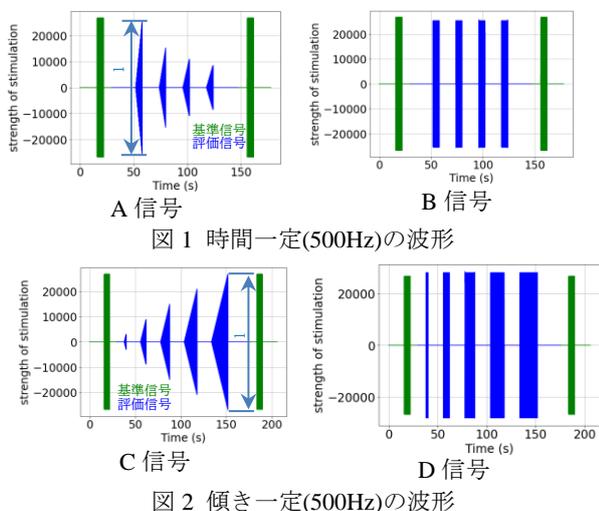


図1 時間一定(500Hz)の波形

図2 傾き一定(500Hz)の波形

さに影響する。また、最終的なパワー値の大きさの関係は弱い。一方、被験者 A と比較し、強さの感じ方に差がある赤点線の周波数が異なる。したがって複数の被験者で周波数における強さの感じ方に差があると示された。

以上より、周波数が感じる強さに与える影響は被験者に依存しないが、パワー値の感じ方は被験者により異なると示された。

時間一定の条件下で振動の刺激を与えるとき、各試行の始めに基準となる刺激を与えた。基準となる刺激の強さに変化のない 100 Hz における被験者が感じた刺激を 5 と評価した時に、被験者に与えた刺激が時間変化する 100 Hz の刺激を 4 と評価していた。そこから、被験者に与える刺激が次第に大きくなる場合、最終的な刺激が同じでも小さく評価すると示された。

また、各試行の最後に麻痺を確認するため、被験者には条件を教えず基準と同じ振動を各試行の最後に与え評価を行わせた。被験者 A の結果を図 7 に示す。10 Hz の試行時のみ 4 と評価したが、それ以外の試行では基準刺激と同じ 5 と評価している為、麻痺は発生していない。

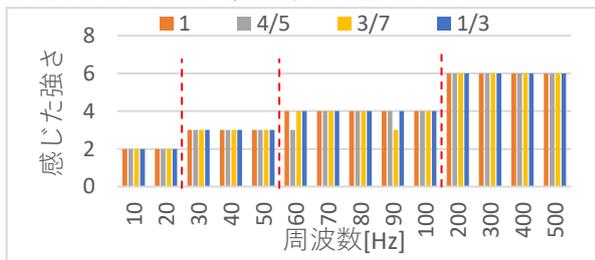


図 5 被験者 A の時間を一定にした条件の感じた強さ

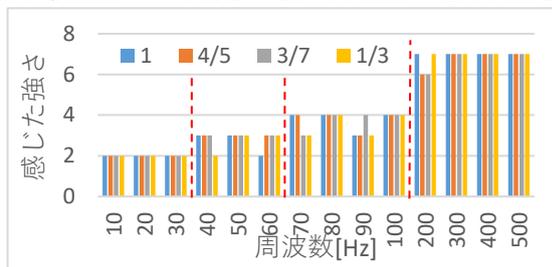


図 6 被験者 B の時間を一定にした条件の感じた強さ

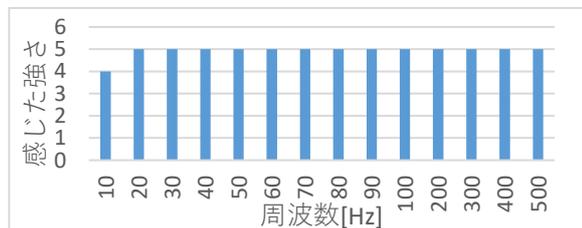


図 7 被験者 A の基準振動の感じ方

4.2 傾き一定条件下

次に傾き一定の条件について述べる。靴型デバイスの位置 1 に刺激の強さが変化する刺激を、靴型デバイスの位置 2 に刺激の強さが一定の信号を与えた。まず感じた力の強さについて述べる。2 点の振動を与えた時、周波数、与えた強さの条件ごとに振動源を 1 つに感じた被験者数を表 2 に示す。

5 人の被験者はすべての条件において PS が発生したが、

1 人の被験者は条件により PS を感じない条件があった。200Hz 以上の場合、全ての試行で PS が発生していなかった。200 Hz 以上は被験者により感じ方に差があると考えられる。歩行時に発生する周波数は 100Hz 以下の信号を含んでいる。そのため歩行時の感覚再現において PS を用いて移動感の表現は可能である。

PS により移動感が発生した人数を表 3 に示す。本結果より 100±10 Hz と 10Hz, 30Hz で PS による移動感覚が発生しやすいと示された。さらに、刺激時間、最大値を増加させた場合のパワー値の最大値が 1 であるから、刺激時間と最大時間がそれより小さいパワー値の最大値が 1/5, 1/3 の方が幅広い周波数で振動源の移動感を感じられた。

また、時間一定の条件において、最大値が異なる場合でも移動感は発生しなかった。そのため、刺激時間の変化により PS を用いた移動が行えると示唆された。

次に 5 人の被験者に対し靴型デバイスの位置 1 と位置 2 の刺激位置を入れ替えた時の結果を表 4 に示す。位置 1 に刺激の強さが一定の信号を、位置 2 に刺激の強さが変化する信号を与えた。刺激位置を変更した場合でも、表 4 の赤字で示した最大値が 1 の時の 20 Hz, 50 Hz, 80 Hz, 200Hz, 最大値が 1/3 の時の 80 Hz, 200Hz, 最大値が 1/5 の時の 200 Hz の条件で 4 人の被験者で移動感を感じた。これらの条件が移動感を感じやすいと示された。

表 2 条件毎に移動感があった被験者数

周波数[Hz]	パワーの最大値				
	1/9	1/7	1/5	1/3	1
10	5	5	5	5	5
20	5	5	5	5	5
30	5	5	5	5	5
40	5	5	5	5	5
50	4	5	5	4	4
60	5	5	5	5	5
70	4	4	4	4	4
80	5	5	5	5	5
90	5	5	5	5	5
100	5	5	5	5	5
200	4	4	4	4	4
300	4	4	4	4	4
400	4	4	4	4	4
500	4	4	4	4	4

表 3 各条件における PS の移動感を得た被験者数

周波数[Hz]	パワーの最大値				
	1/9	1/7	1/5	1/3	1
10	0	3	4	4	3
20	0	2	3	3	3
30	0	3	3	4	1
40	0	1	3	3	2
50	0	2	2	2	0
60	1	0	3	2	2
70	0	3	3	2	1
80	0	2	3	4	1
90	0	0	5	3	4
100	0	2	3	4	3
200	1	1	3	2	1
300	0	1	1	1	2
400	1	1	1	1	1
500	0	3	3	2	3

表 4 各条件における PS の移動感を得た被験者数

周波数 [Hz]	パワーの最大値				
	1/9	1/7	1/5	1/3	1
10	0	1	1	1	2
20	1	3	2	3	4
30	0	2	3	2	3
40	0	1	2	3	2
50	0	1	2	2	4
60	0	1	2	1	3
70	0	2	3	2	2
80	0	2	3	4	4
90	0	1	3	3	2
100	0	2	3	3	3
200	0	2	4	4	4
300	1	2	3	3	2
400	1	2	2	2	3
500	0	2	2	2	2

## 5. 考察

### 5.1 刺激時間一定条件下

図 7 より試験信号を与えた前後で被験者の基準信号の評価値がほとんど同じであったため、被験者が行った評価は適切なものであると考える。

被験者に与えた刺激箇所は 2 点に対し、被験者は刺激を 1 点と感じたため、PS は発生していたと考えられる。また、振動源が移動している感覚は現れなかったため、3 秒刺激を与えた際、パワーの最大値は PS に影響しないと示唆された。また、図 5 より周波数が感じた強さに影響すると判明した。したがって周波数が小さいほど強さは弱く、周波数が大きいほど強さを強く感じると示された。

### 5.2 傾き一定条件下

全被験者で移動を感じた周波数 90 Hz、強さ 1/5 の場合を述べる。移動方向が下に感じる被験者と左に感じる被験者がいた。被験者により、移動感が異なる原因として被験者の足裏の皮の厚さの違いが挙げられる。被験者の足の皮が厚い場合、実際の振動源の配置に近い左に移動を感じやすい。一方、足の皮が薄い場合、土踏まずにも振動が伝わり横だけでなく下に感じやすくなると考える。

また、図 8 と図 9 を比較すると刺激位置が同じ場合でも信号を入れ替えると周波数と信号の最大パワー値が同じでも移動感の感じ方に差があると示された。同じ刺激箇所でも移動感を感じる周波数やパワー値が異なると言える。これより振動源の移動を感じやすい周波数は刺激箇所で異なると示された。

## 6. むすび

そのため、私たちは物体と接触したときの振動の再現によって触覚を再現し、没入感の向上を目指した。連続的な刺激の移動を再現するため PS に注目した。本研究では振

動刺激装置を用いて足裏に PS の発生の有無とその際の条件、振動源の移動感の検討を行った。時間を 3 秒に固定した場合、PS は発生したが、振動源の移動感はないと示された。また、感じた力の大きさは周波数に依存すると示された。

次に傾きを一定にし、最大値と時間を変化させた場合を示す。ほぼすべての被験者において周波数に寄らず PS が発生した。移動に関しては、刺激のパワー値が弱すぎる、もしくは強すぎると移動感を感じにくいと示唆された。また、移動感も周波数にも依存し、100Hz 以下であると発生しやすいと示された。さらに、刺激箇所を変えずに信号のみを入れ替えた場合、信号入れ替え前後で移動感に差があった。これより刺激箇所により振動源の移動を感じやすい周波数が異なると示された。

今後は母指球以外の箇所に対して PS の検証を行い場所による感覚の差を明らかにする。

## 7. 謝辞

この研究は、JSPS 科研費若手研究者奨励金 (20K20269) の一部支援を受け、東京電機大学科学技術研究東京電機大学総合研究所からも部分的な支援を受けた。

## 参考文献

- [1] 総務省 データ流通・活用の新たな潮流  
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/html/nd131210.html>
- [2] 総務省, "五感情報通信技術に関する調査研究会報告書"
- [3] 魚田真之介、北畠千瑛、佐々木涼太郎、韓旭、串山久美子, "砂浜歩行感覚再現のための足裏触覚提示デバイスの提案", 情報処理学会インタラクシオン 2024, pp.770-pp.772
- [4] 黄訓達, "仮想現実に向けた足底部の触覚刺激による地面テクスチャ再現手法の提案", 2017 年度関西大学総合情報学部, 卒業論文(2018).
- [5] G, von Békésy; Neural Funnelling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea, Jour. Acoust. Soc. Amer., vol. 31, no. 9, pp.1236-1249, 1959.