



# 振動周波数の変動による足裏の感覚受容範囲の変化

Variation in the range of vibrations felt in the sole of the foot  
due to variations in the frequency of vibrations

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 工学系研究科 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5 番, 24kkm36@ms.dendai.ac.jp)

**概要**: 技術の発展により視聴覚のみならず触覚や嗅覚も再現する 4DX 映画が実用化され注目されている。しかし、費用面から鑑賞を控える人が少なくないため、VR を活用し自宅でも気軽に没入感の高い鑑賞システムの必要性があると考えた。そこで、本研究では足裏触覚に注目し、足裏に小型のモータを多数配置し振動を変化させることで地面環境ごとの歩行感覚の提示を目指した。本稿では、歩行感覚を提示するシステムの開発と、感覚再現に寄与する振動を意図した箇所を与えるために足裏の振動刺激による感覚受容範囲の変化を確認した。結果、足裏の箇所や振動周波数を変化させることで、振動受容範囲の変化を確認した。そのため、足裏の箇所ごとに異なる振動を与えると、提示する感覚受容範囲を変化させられる可能性が示唆された。

**キーワード**: 感覚受容範囲, 周波数, 足裏感覚, 触覚再現

## 1. 緒言

最先端の体験型映画館として五感を刺激する 4DX シアターが普及している。しかし、興味を持っている層の一部は費用の面から鑑賞を控えている。また、バーチャルリアリティ(VR)技術の普及により、VR に対応するサービス製品が増加している。今後も世界的に VR 製品、サービスの市場規模や出荷台数の拡大が見込まれる。最先端の技術を活用し普及している点から、この 2 つの分野を組み合わせた研究が注目されている。

VR 空間内で移動する感覚をより現実に近いようにするため、視覚だけではなく足裏の触覚や力覚に作用し移動感覚を提示する機器の研究開発が行われている。ユーザーに VR 空間の地面と同期した足裏刺激を提示する方法として、視覚情報と同期した振動刺激を足裏に与え、4 つの異なる環境下での歩行を提示する手法<sup>(1)</sup>が提案された。この他に歩行感覚の精度を向上させるため足裏の振動刺激と並して反射的に行動を誘発する箇所に電気刺激を与える手法<sup>(2)</sup>や、人間の体全体を動かし歩行感覚を提示するモーションベースを用いる手法<sup>(3)</sup>が提案された。また、足踏みにより歩行感覚を感じる小型デバイスの手法<sup>(4)</sup>も提案された。

このように、VR の視覚情報と同期した振動刺激の提示により、歩行感覚を与えている研究が多くされている。しかし、視覚情報と振動刺激を同時に与えても振動を感じにくい、地面の違いを判別する精度が低いなどの課題

がある。さらに、電気刺激を与えることで歩行感覚の向上は見込まれたが、装置が大型となる点が課題である。

そこで、本研究では足裏に小型のモータを多数配置し、振動を変化させて地面環境ごとの歩行感覚の提示を可能とするシステムの製作を行う。そのため、振動刺激提示システムの開発した。また、足裏の部位ごとに適切な振動を作成し提示できるように特定の周波数振動を与え、振動刺激による足裏の感覚受容範囲を確認した。

## 2. 振動刺激提示システム

モータを足裏に配置し、周波数や強弱が異なる振動を与え歩行時の足裏感覚を再現する。歩行時に足裏にかかる振動は足裏の箇所により異なる。多くのモータを足裏に配置する必要があるため、直径 10 cm 以下の小型なモータにした。さらに、実際の足裏の振動のように一定の周波数ではない振動を与えることが可能であるモータに着目し、huyunxin 製のボイスコイルモータ(VCM)を選定した。VCM の特性として、コイルや磁石の小型化によりモータ全体の小型化が可能である。さらに、磁場を利用して振動を生み出すため高速振動も可能である。選定した VCM は小型であり、実際に計測した足裏の振動の周波数帯域を再生可能である。足裏の同じ位置に振動を与え評価を行うため、モータの径の穴を開け、埋め込める実験用靴を作成した。図 1 に実験用の靴と使用した VCM を示す。

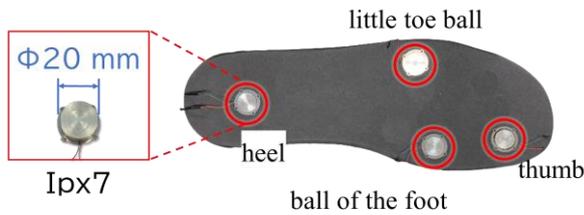


図1 実験用の靴とモーター

3. 足裏の感覚受容範囲の変化

3.1 振動周波数の変動による感覚受容範囲の変化

足裏の箇所は図1に示すように踵、母指球、小指球、親指の4か所である。振動は実際に計測した足裏振動を元に50 Hz から 500 Hz の間から選定した。足裏に特定の周波数の振動を与え、振動の感じ方をまとめた。図2に与えた振動波形の一例を示す。基準として100 Hz の振動を与えた後、特定の周波数振動を与え100 Hz の振動と比較させ評価した。50, 60, 70, 80, 90, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 Hz の13通りの周波数の振動を与え評価した。振動時間は全て5秒とし、1条件1試行で行った。連続した振動の提示による足裏の感覚麻痺の防止と、基準となる100 Hz 振動と比較し評価しやすくする点から振動と振動の間に5秒間の休憩を設けた。評価方法は0から8までの9段階でリッカート尺度を用いた。0を「振動を感じない」、1が「局所的に振動を感じる」、8が「広く振動を感じる」とし、基準を4とした。評価時に使用したアンケート方法を図3に示す。被験者は20代成人男性10人とした。実験は着座姿勢で、耳栓を着用し実施した。評価は全ての被験者において左足で実施した。

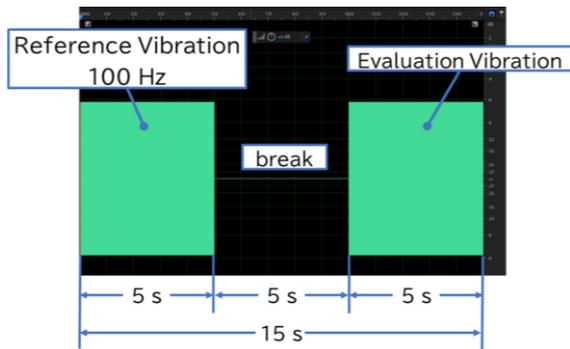


図2 2種類の振動比較で用いた振動波形の一例



図3 使用したリッカート尺度

3.2 連続振動による感覚受容範囲の変化

振動を与えた足裏の箇所は3.2と同様の4か所とした。基準の100 Hz の振動を与えた後、評価を行わせる同じ振動を5回与え、最後に100 Hz の周波数振動を与えた。評価させた振動は50, 70, 100, 150, 200, 500 Hz の6通りである。1条件1試行で行った。振動時間は全て5秒とし、振動間に5秒の休憩を設けた。与えた振動の一例を図4に

示す。評価方法は3.2と同様であり、リッカート尺度を用いた。被験者は20代成人男性10人とした。実験は着座姿勢で、耳栓を着用し実施した。足は左足のみ評価した。

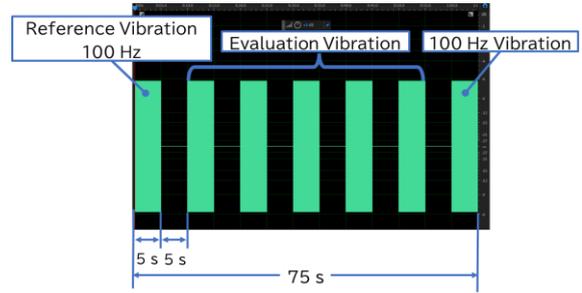


図4 連続振動の実験で用いた振動波形の一例

4. 結果

4.1 振動周波数の変動による感覚受容範囲の変化

図5から図8に足裏部位ごとの結果を示す。特定の周波数振動を与えた際に広く振動を感じる人と局所的に振動を感じた人数を示す。正の数が広く振動を感じる人であり、負の数が局所的に振動を感じる人である。評価は全ての被験者において左足で実施した。基準と比較し、振動範囲が同じ人数は図に示していないため、周波数ごとに人数が異なる。

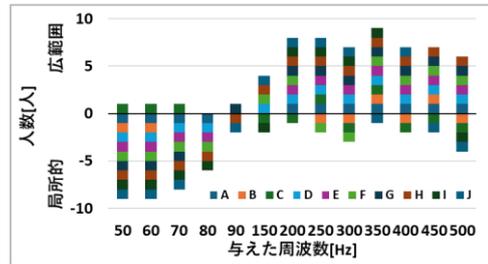


図5 周波数振動ごとの振動の感じ方の人数(踵)

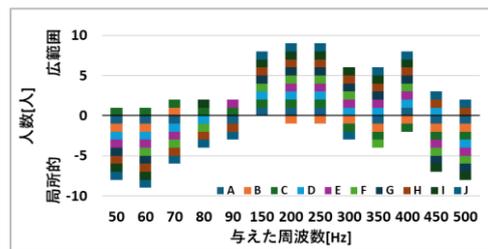


図6 周波数振動ごとの振動の感じ方の人数(母指球)

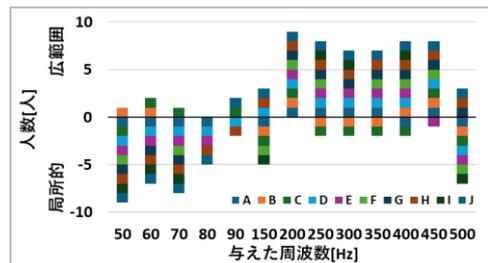


図7 周波数振動ごとの振動の感じ方の人数(小指球)

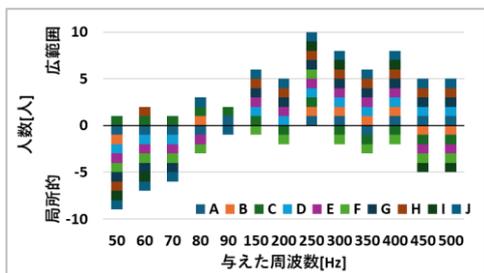


図 8 周波数振動ごとの振動の感じ方の人数(親指)

全ての位置において 50 Hz から 70 Hz は局所的に振動を感じ、200 Hz から 400 Hz は振動を広く感じる人が多い。90 Hz ではどの位置においても人数が 3 人以内に収まっている。踵位置では、50 Hz から 90 Hz の振動を局所的に感じ、150 Hz から 500 Hz の振動を広く感じる人が多い。それに対し、小指球では 500 Hz、母指球と親指では 400 Hz と 500 Hz で局所的に振動を感じている人が多い。

4.2 連続振動による感覚受容範囲の変化

図 9 から 12 に足裏部位ごとの結果を示す。最後の 100 Hz を除いた試験振動を連続して与えた際に局所的に振動を感じる人と広く振動を感じる人の人数を示す。縦軸は人数を示し、正の数が広く振動を感じる人、負の数が局所的に振動を感じる人である。横軸は与えた周波数を示し、5 回提示した中で始めの一回目のみ周波数を表記している。基準と比較し、振動範囲が同じ人数は図に示していないため、周波数ごとに人数が異なる。

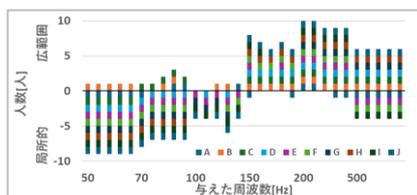


図 9 連続振動の提示によるの感じ方の人数(踵)

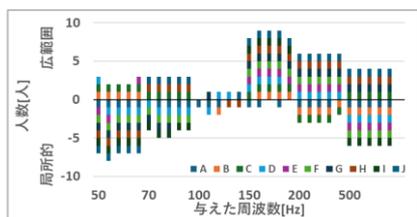


図 10 連続振動の提示によるの感じ方の人数(踵)

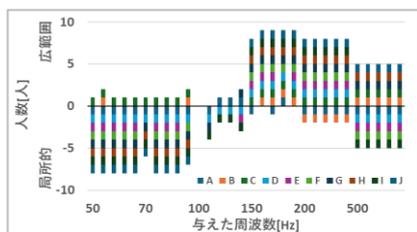


図 11 連続振動の提示によるの感じ方の人数(踵)

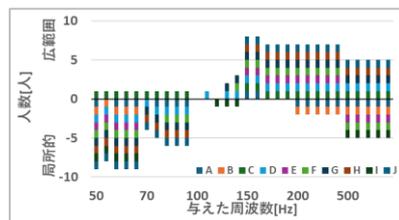


図 12 連続振動の提示によるの感じ方の人数(踵)

全ての位置において、50 Hz と 70 Hz で局所的に振動を感じ、150 Hz と 200 Hz で広く振動を感じていた。50 Hz において最も局所的に振動を感じているが、最も広く感じる振動周波数は足裏の部位ごとによって異なる。500 Hz において振動を感じない被験者がいた。踵以外の 3 か所で 100 Hz を連続で与えた際は、結果にばらつきがあったが、踵では局所的に感じる人数が多くみられた。

図 13 から図 16 に特定の周波数振動の後に与えた 100 Hz 振動の感じ方を人数で示す。正の数が広く振動を感じる人であり、負の数が局所的に振動を感じる人である。基準と比較し、振動範囲が同じ人数は図に示していないため、周波数ごとに人数が異なる。

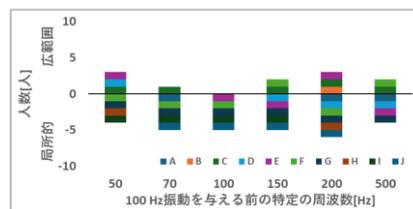


図 13 100 Hz の振動の感じ方の人数(踵)

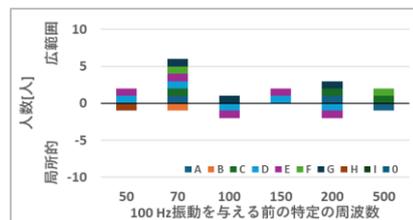


図 14 100 Hz の振動の感じ方の人数(踵)

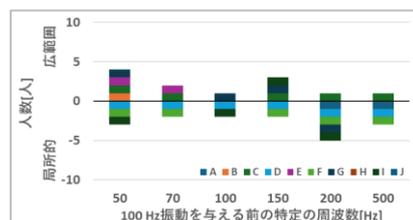


図 15 100 Hz の振動の感じ方の人数(踵)

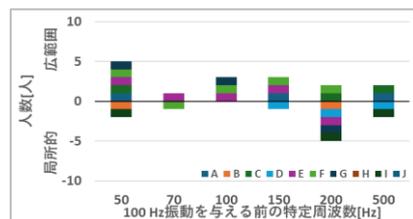


図 16 100 Hz の振動の感じ方の人数(踵)

連続して特定の周波数振動を与えた後の 100 Hz 振動では、母指球において 70 Hz、小指球で 50 Hz、親指で 50 Hz の振動を連続して与えた後に広く振動を感じる被験者が多い。親指、小指球では 200 Hz を連続して振動させた後の 100 Hz 振動は局所的に振動を感じる人数が多い。

## 5. 考察

振動周波数の変動による感覚受容範囲の変化において、70 Hz 以下は局所的に振動を感じ、200 Hz から 400 Hz までは広く振動を感じる可能性が示唆された。使用したモータの特性により 130 Hz 付近の出力が大きくなるため、モータの振動の大きさに依存しないと示された。低い周波数ほど振動間隔が大きく振動を局所的に感じ、大きい周波数ほど振動回数が増えるため細かい振動が広がるように感じたと考えられる。80 Hz の振動は踵と小指球において、局所的に感じる被験者と基準と同値に感じる被験者のみであるため、基準と比べ微小に振動範囲が狭くなった。90 Hz はどの位置においても被験者数の半数以上が基準と同値を示している点から 100 Hz と差を感じにくい。450 Hz は踵、小指球において広く振動を感じ、500 Hz は踵において広く振動を感じているが、母指球、小指球では局所的に感じ、親指では人数が半数で分かれている。足裏の箇所や被験者ごとに足裏の厚みや姿勢が異なるため、450 Hz 以上の細かい振動において評価にばらつきがみられたと考えられる。着座姿勢において足裏にかかる荷重や足裏の形、歩行時の足裏重心移動の流れは被験者により異なる。また、足裏の触覚の識別も被験者ごとに異なるため、450 Hz 以上は評価が分かれた。しかし、踵は皮の厚さや硬さがあり、荷重が最もかかりやすい箇所であるため、個人差が小さくなった。

連続振動による感覚受容範囲の変化では、50 Hz と 70 Hz で局所的に振動を感じ、150 Hz と 200 Hz において広く振動を感じている。そのため、振動周波数の変動による感覚受容範囲の結果を合わせ、50 Hz と 70 Hz では局所的に振動を感じやすく、200 Hz では広く振動を感じやすい傾向があると言える。踵と小指球と親指の 50 Hz は 8 人以上が局所的に振動を感じた。踵の 200 Hz と母指球の 150 Hz、小指球の 150 Hz と 200 Hz において広く振動を感じ続けている。5 回連続して振動を与え続けたことで人数の半数以上が足裏 4 か所において、振動の感じ方に偏った結果になっていないため、連続して足裏に振動させたことによる足裏感覚の麻痺は考えられにくい。100 Hz は踵において局所的に振動を感じる割合が大きい。蹴りだしを行う親指や母指球では、日常生活やスポーツ経験から足裏の感覚が異なり感じ方にばらつきがみられた。しかし、踵では足裏で最も硬い箇所である点や立位姿勢において荷重が最もかかりやすい点から足裏の感覚が鈍く局所的に振動を感じたと考えられる。

連続して特定の周波数振動を与えた後の 100 Hz の評価では、母指球では 70 Hz、小指球と親指では 50 Hz の振動

を与えた後だと広く振動を感じている。踵、小指球、親指の 3 個所では 200 Hz の振動を与えた後に局所的に振動を感じる傾向がある。局所的に感じる振動や広く感じる振動を与えた後では、評価する際に直前に与えていた振動と比較し感じていた振動範囲と異なる方に評価が偏ると考えられる。また、基準から 5 回振動を与えているため、基準と正確に比較することができなかったと考えられる。踵では 6 回目の 100 Hz の振動は全て局所的に感じる被験者の割合が多い。5 回振動させたときも局所的に感じたことから、100 Hz の振動を連続して与えると局所的に感じやすい可能性が示唆された。

## 6. 結言

足裏に小型のモータを多数配置し振動を変化させることで地面環境ごとの歩行感覚の提示を行うため、振動刺激提示システムの開発と足裏の振動刺激による感覚受容範囲を確認した。

振動刺激提示システムを用いて足裏の踵、母指球、小指球、親指の 4 か所に特定の周波数振動を与え、基準とした 100 Hz 振動と比較し、振動を感じる範囲を評価した。結果、70 Hz 以下は 4 か所において局所的に振動を感じ、200 Hz から 400 Hz の間において広く振動を感じる可能性が示唆された。連続して足裏に振動刺激を与えた場合では、5 秒間の休憩を設けることで足裏の感覚の麻痺を防ぎ、振動の感じ方が変化しなかった。また、連続して振動を与えた場合では 150 Hz 以上の振動は広く振動を感じる傾向にあった。足裏の振動の感じ方は、着座姿勢における足裏の荷重や足裏の皮の厚さなどから個人差があると示された。これらから、足裏の部位ごとに与える振動の周波数変化により異なる地面環境ごとの歩行重心や歩行感覚を提示できる可能性が示された。

本研究では基準振動をすべて 100 Hz で行ったので、今後は基準となる振動を変えて振動の感じ方の変化を確認する。左足のみで 10 人対象であるため、右足や人数の増加など実験条件を増やしより情報を集め、傾向を導き出し感覚再現に応用する。

## 参考文献

- [1] 黄訓達：仮想現実感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。
- [2] 小山大嘉, 雨宮智浩: 前庭電気刺激を用いた着座姿勢における疑似歩行感覚の生起, 第 27 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, p. -3D5-2, 2022.
- [3] 中村駿也, 河合隆史: モーションベースを用いた仮想空間における歩行体験の評価, TVRSJ Vol.27 No.3, p. 274, 2022.
- [4] 針山拓人, 大倉典子: 足踏みによる歩行感覚体幹デバイスの開発(第 3 部)—足圧の測定—, 第 51 回自動制御連合講演会, pp. 694-699, 2008.