



足裏連続刺激による踵からつま先までの荷重移動再現

Reproduction of load transfer from heel to toe by continuous foot stimulation

山本拓実¹⁾, 井上淳¹⁾

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, 24kmk36@ms.dendai.ac.jp)

概要: VR 技術は発展し、安価かつ手軽に没入型体験が可能となった。しかし、視覚と聴覚への刺激中心で、感覚の再現は困難である。特に人の特徴的な移動方法である二足歩行感覚の再現は難しい反面、没入感の向上に最適である。そのため、足裏への触覚刺激を活用し歩行感覚を生起させる研究が盛んに行われている。しかし既存の研究では、装置が大型であり、利用環境に制約が多い。そこで本研究では、VR と併用可能な小型の触覚刺激提示システムを開発し、足裏の荷重移動を振動で再現し歩行感覚の提示を目指す。

キーワード: 荷重移動再現, 周波数, 足裏感覚, 触覚再現

1. 緒言

技術の進展に伴い VR に対応した製品やサービスが急速に拡大し、今後も世界的に市場規模や出荷台数の増加が予測されている。しかし、現在の VR は主に視覚と聴覚への刺激に依存しているため、移動や歩行など身体全体で感じるような運動感覚の再現は困難である。こうした制約により、体験の没入感には限界がある。一方、最先端の映画鑑賞技術である 4DX は、視覚・聴覚だけでなく、嗅覚や触覚への刺激も組み合わせることで、五感の情報量を増やし、高い没入感を実現している。しかし、4DX では刺激を提示するための専用設備が必要であり、体験可能な環境が限られる点や、コストの高さが課題となっている。そこで本研究では、VR 空間において、よりリアルで臨場感のある体験を提供するために、特に触覚に着目した。身体感覚の触覚の中でも、人の移動方法である二足歩行感覚の再現により、VR 体験における没入感が向上すると考えた。

これまでに、視覚と聴覚の刺激と同期した触覚刺激を用いて、歩行感覚の再現を提示する手法がいくつか提示されている。着座姿勢のユーザーに対して足裏を垂直に押し上げ、力覚を提示して前歩きや後ろ歩きの感覚を提示する手法⁽¹⁾や、スポンジに振動モータを埋め込み足裏が接地する素材を検討し、異なるテクスチャの再現を行う手法⁽²⁾が提案された。他にも地面のテクスチャ再現にはトレッドミル上を歩行させ、踏み出した足が接地する箇所を押し上げることで凹凸を表現する手法⁽³⁾が提案された。これらの研究では、地面からの反力を再現するような触覚刺激や足裏が触れる材質の変化により歩行感覚や地面テクスチャを生起させている。しかし、押し上げ機構では装置の大型化が避けられない、地面環境ごとに素材を変更が必要不

可欠である。また、トレッドミル上の歩行では、専用の機器が必要であり装置も大型であるため、利用できる環境が限定される。そこで筆者らは VR と併用できる小型な触覚提示システムの開発を進めた。これまで、作成した触覚提示システムを用いて、足裏箇所ごとに異なる振動周波数を与え、振動を感じる範囲や、2 か所刺激を与えた際に間の 1 点にしか刺激を感じない錯覚を起こすファントムセンセーションの発生条件など、歩行感覚再現に必要な足裏の感覚を調査した。

本研究では、足裏箇所ごとに多数モータを配置させ、異なるタイミングで振動を提示し、歩行時の足裏荷重移動の再現することを目的とした。具体的に、これまで調査した振動周波数の刺激範囲やファントムセンセーションの発生条件を元に信号を作成し、足裏に振動の移動を感じさせ、歩行再現に適した触覚刺激の提示を行い、効果を検討した。

2. 実験手法

2.1 触覚刺激提示システム

実際に歩行時に足裏にかかる荷重のタイミングは足裏の部位ごとに異なる。そのため、部位ごとに刺激を提示するため、多くのモータを靴底に配置し、足裏箇所や振動周波数を変更させ触覚刺激を提示する。モータは huyunxin 製のボイスコイルモータ(VCM), Ipx7 を選定した。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、片足 18 個のモータを埋め込める靴を作成した。図 1 に実験用の靴と使用した VCM を示す。



図1 片足の実験用の靴とモータ配置

2.2 歩行時の荷重移動再現に用いる足裏箇所ごとの信号

本実験では、歩行時に足裏を通じて感じられる荷重の移動の再現することを目的として、足裏を踵部・中足部・足趾球部・足趾部の4つの部位に分け、この順番にそれぞれの部位に対して異なるタイミングで振動信号を提示した。具体的には、歩行動作における足裏の接地パターンに基づき、各部位に与える振動の開始時刻と終了時刻をずらすことで、足裏上を荷重が前方へと移動していく感覚を模倣した。さらに、振動の周波数や強度の変化により、荷重移動再現に適した振動が評価した。足裏が地面に接するタイミングの計測から、一般的に立脚期は歩行周期の60%であるため、通常歩行の遊脚期、立脚期を6:4と考えると片足の地面との接地時間は0.7から0.8秒であった。そのため、片足全体の振動時間は0.75秒とした。足裏4か所への刺激のタイミングは、2つの異なるパターンで実施した。1パターン目は、1つ目の部位が終わったら2つ目の部位に刺激を与える逐次切り替えを行う。2パターン目は、1つ目の部位に振動を与えている途中に2つ目の部位に振動を与え、2つの部位に重複して刺激を与えながら切り替えを行う。重複時間は1つ目の部位に与えた時間の半分とした。与える振動の周波数は、足裏箇所ごとに周波数振動の感じ方を調査した結果⁴⁾より、振動を局所的に感じやすい70 Hzと振動を広範囲に感じやすい200 Hzに限定した。振動は振幅と周波数が一定の定常波と足裏においてファントムセンセーションが発生しやすい条件を調査した結果⁵⁾より、振幅の大きさが1/5から1に増加させる増幅波を与えた。また、70 Hzと200 Hzを入れ替えた振動周波数に変化による影響を調べたため、計8条件で触覚刺激を与えた。与えた信号の組み合わせを表1に示す。

Table1 提示した触覚刺激の信号の組み合わせ

	周波数[Hz]	波形	振動タイミング
1	70	定常波	逐次振動
2			重複刺激
3		増幅波	逐次振動
4			重複刺激
5	200	定常波	逐次振動
6			重複刺激
7		増幅波	逐次振動
8			重複刺激

2.3 触覚刺激に伴う視聴覚刺激

視覚、聴覚への刺激はMetaQuest2を用いた。MetaQuest2はMetaが開発したVRヘッドセットである。実験環境は、米国のUnity Technologies社が開発・提供するゲームエン

ジンであるUnityを用いて作成した。作成した視覚環境を図2に示す。図2に示す街中をコントローラのスティック入力で移動させた。また、入力の際に図3に示すアバターを歩行させ、アバターの顔の位置に視点を配置し実験をした。アバターの歩行時、足が地面に接触するタイミングを取得し、触覚刺激提示システムに信号を送信し足裏に触覚刺激を与えた。また、触覚刺激に伴い聴覚刺激も与えた。聴覚刺激は効果音ラボのアスファルト歩行音から、片足一回の接地した音を切り取り、イヤホンを装着させ刺激を与えた。



図2 視覚環境



図3 アバター

3. 実験条件・評価手法

実験条件は3項の触覚刺激の8種類と、4項の視覚聴覚刺激のあり、なしの2種類で、合計16条件で行った。評価項目は振動刺激の触覚的知覚と、視覚聴覚触覚含む没入感評価の大きく2つに分けて評価した。触覚は「振動を感じる」、「左右別の振動を感じる」、「振動が移動している」、「連続した振動である」、「振動が凸凹しているか」の5つであり、全体は「移動感」、「歩行感」、「現実感」、「凹凸感」、「VR酔い」の5つ、計10項目を評価させた。評価は1~9の9段階のリッカート尺度を用いた。詳細を表2に示す。実験は、被験者を着座させ実験靴を履かせて行った。連続して足裏に振動を与えるため、感覚の麻痺を防ぐために4条件ごとに休憩時間を設けた。VRは実験前に、触覚刺激なしで環境を歩行させ、慣れさせてから実験を実施した。被験者は20代健康者男性5名を対象とした。

Table2 リッカート尺度で評価した内容

評価内容	1	9
振動を感じる	感じない	感じる
左右別の振動	感じない	感じる
振動の移動	移動しない	移動している
連続した振動	途切れた	連続した
振動の凸凹	滑らか	凸凹
移動感	感じない	感じる
歩行感	感じない	感じる
現実感	非現実的	現実的
凹凸感	平面	凹凸
VR酔い	酔いがない	酔いがある

4. 結果

4.1 視聴覚刺激なしにおける触覚刺激評価

図4から図8に触覚に対する評価の結果を示す。被験者A-Eの結果を評価内容ごとにまとめた。振動の感じる度合

いは、70 Hz かつ増幅波において下がり、200 Hz の振動で高い数値を示した。左右の足裏の感覚は感じる人が多いものの、振動による差はない。振動の移動は 200 Hz の触覚刺激ですべて 7 以上と高い数値を示した。振動の連続感 は最大評価である 9 の評価はあるものの 1 の途切れた振動の評価がない。振動の凸凹では増幅波かつ重複させた刺激において、過半数が半分の数値である 5 以下の「滑らか」の評価をした。

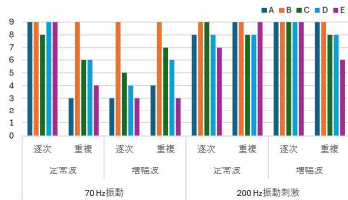


図 4 触覚刺激のみにおける振動の感じ方

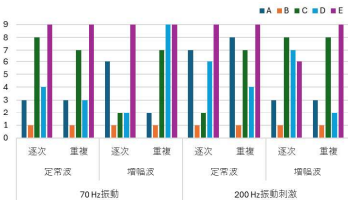


図 5 触覚刺激のみにおける左右感覚の差

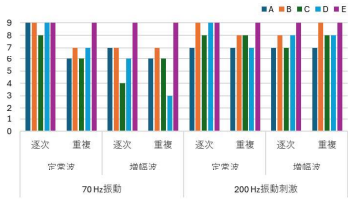


図 6 触覚刺激における振動の移動



図 7 触覚刺激における振動の連続感



図 8 触覚刺激における振動の凸凹

4.2 視聴触覚の 3 感覚における評価

図 9 から図 13 に VR 装着時の触覚に対する評価を示す。VR を装着し、視覚と聴覚刺激を与えた際、一人の被験者において、32 条件の中で 5 試行目に酔いを感じ実験継続が困難となったため、残り 4 名の被験者 A～D のデータ

を分析対象とした。

振動の感じ方のリッカート尺度結果は、70 Hz かつ増幅波において振動を感じる度合いが低下し、200 Hz の振動で値が上がった。左右の足裏の感覚は 200 Hz の振動において半数が左右差を感じ、増幅波かつ重複した刺激に左右差の値が評価値の半分の 5 以下に収まった。振動の移動は 70 Hz の増幅波かつ重複した刺激以外では過半数が 5 以上の値を示した。振動の連続感 は 70 Hz の定常波の条件を除いた重複刺激において、過半数以上が逐次刺激より評価値が向上した。振動の凸凹では 70 Hz の増幅波かつ重複させた刺激において、過半数が半分の数値である「滑らか」の 5 以下の評価を示した

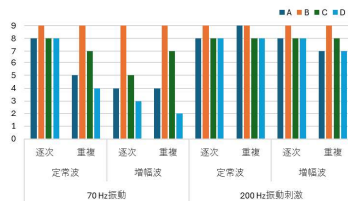


図 9 視聴触覚刺激における振動の感じ方

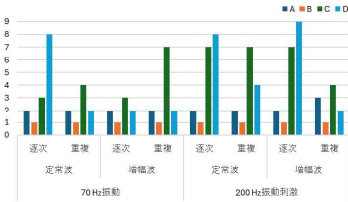


図 10 視聴触覚刺激における左右感覚の差

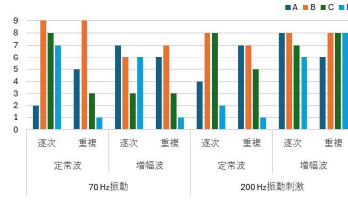


図 11 視聴触覚刺激における振動の移動

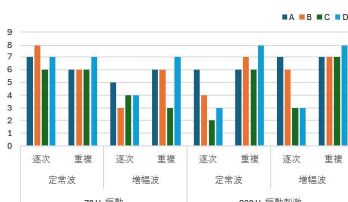


図 12 視聴触覚刺激における振動の連続感



図 13 視聴触覚刺激における振動の凸凹

図 14 から図 17 に全体に対する評価を示す。移動感、歩

行感，現実感の評価では VR の装着，視覚聴覚刺激の追加により評価値の向上が見られた．凹凸感の評価では，視覚聴覚刺激のありなしの差が見られず，図 8 と図 13 にある振動のみの凸凹の評価とは結果が異なった．VR 酔いの評価では，評価ができなくなった一名を除いた被験者では評価に変化がなく，VR 酔いが見られなかった．

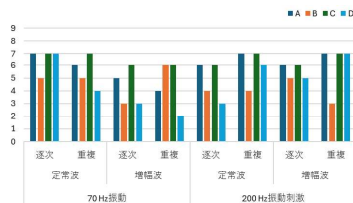


図 14 視聴触覚刺激における移動感の評価

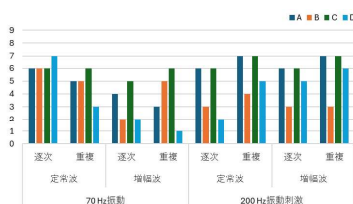


図 15 視聴触覚刺激における歩行感の評価

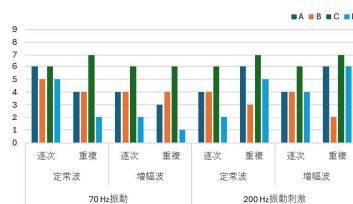


図 16 視聴触覚刺激における現実感の評価

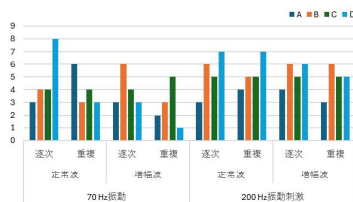


図 17 視聴触覚刺激における凹凸感の評価

5. 考察

図 4 より視覚聴覚刺激の有り無しを問わず，70 Hz の逐次振動と 200 Hz の振動において，足裏の振動が感じやすいことが示された．また，図 8 の触覚刺激における振動の移動の評価でも，これらの条件でリッカート尺度の評価値が 7 以上であり振動の移動を感じた．よって振動の移動の感知は振動の強さを感じる度合いに左右される可能性がある．また，200 Hz の触覚刺激に比べ 70 Hz の触覚刺激より移動を感じやすい結果は，200 Hz の方が足裏感覚受容範囲の結果において広範囲に振動を感じる結果が得られていた．そのため，点で振動を感じず広い範囲で振動を感じ，広い振動の塊が移動した感覚を得たため，移動感が強くなったと考えられる．図 7 と図 12 の連続感の評価では，触覚刺激のみでは 70 Hz の増幅波と 200 Hz の定常波かつ逐

次振動，視覚聴覚刺激有では 70 Hz の増幅波の逐次振動，200 Hz の定常波の逐次振動では重複刺激に比べ，低い評価値が多い．重複刺激は逐次刺激とは異なり，足裏の刺激箇所が変わる際に 2 か所刺激している時間があるため，切り替わる時間がなく連続し移動している感覚を提示できる可能性が示唆された．振動の左右差では，視覚聴覚刺激の有り無しで結果に変化は見られなかった．被験者 B ではすべての結果で左右差を感じにくく，被験者 A では視覚聴覚刺激を加えることにより左右差を感じにくくなっていた．これは情報量が増えたため，足裏の感覚が鈍くなったと考えられる．また，200 Hz 以上の刺激で左右差が増えていたため，振動の感じる度合いに伴い左右の足裏の振動の感じ方も変化すると考えられる．

3 つの刺激を与えた全体に対する評価では，移動感，歩行感，現実感の評価が，視覚と聴覚刺激の追加により向上した．情報量が増え臨場感や没入感が増えたためである．特に，視覚環境で街中を再現したため移動した際に，建物が近づく感覚や，アバターの追加により臨場感が向上した．

6. 結言

足裏に小型のモータを片足 18 個配置し振動を踵からつま先にかけて触覚刺激を提示し，歩行時の足裏の荷重移動の再現を試みた．

結果，振動の感じやすさに伴い振動の移動した感覚や左右の足裏の感じ方も変化する可能性が示唆された．また，連続感の評価において重複振動の提示により，途切れた振動ではなく，連続して移動感を提示できた．そのため，200 Hz かつ重複振動で連続した振動の提示，70 Hz かつ逐次振動で途切れた振動の提示が可能である可能性が示された．

本研究では足裏を 4 区画に分けて評価を実施した．実際の荷重は踵から中足部を通り，小指球，母指球，指へと移動し，地面との接触箇所が発生する振動も異なる．そのため，足裏の分解数を増やしてより詳細な荷重移動の再現を試みる．また，本実験は被験者が 5 人であるため，被験者を増やしより詳細な傾向を導き出す．

参考文献

- [1] 大谷拓也，高西淳夫：足底力覚提示による運動認識に対する検討，第 24 回バーチャルリアリティ学会論文集，-2B-02-，2019
- [2] 魚田真之介 他：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ョン 2024，pp. 770-772，2024.
- [3] 杉原敏昭 他：凹凸を再現可能な歩行感覚提示装置 GSS，pp. 837-846，2000.
- [4] 野口雄弘，山本拓実，井上淳：振動周波数の変動による足裏の感覚受容範囲の変化，-1D2-12-，2024.
- [5] 野口雄弘，山本拓実，井上淳：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，-1D2-11-，2024.