

頭部での侵入感生起における刺激提示条件の検証

菊子桃太郎^{†1} 橋本直^{†1}

近年、VR の体験を充実させるために、さまざまな触覚提示の手法が提案されている。我々はこれまでの研究で、頭部への物体の侵入感を、ヘッドマッサージャを用いて提示する装置を開発した。この装置を利用した作品において、頭部に植物が根付いていくような感覚を提示できることを確認しているが、その生起メカニズムについては科学的に解明されていない。本研究では、頭部において侵入感が生起する条件について調査するために、刺激の移動距離、移動速度、提示箇所の数について比較する実験を行った結果、刺激の移動距離、提示箇所の数が増加すると、知覚する侵入感が大きくなることが示唆された。

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ (VR) における体験を充実させるために、さまざまな触覚提示の手法が提案されている。触覚提示を行う部位として手や頭部、胴体、脚などがあり、刺激の種類として電気刺激や温度刺激、圧迫刺激などがある[1][2][3][4][5]。

頭部に対する触覚提示を行うコンテンツとして、平野らが制作した「ブレインツリー」がある[6]。ブレインツリーでは人体への植物の寄生をテーマに、植物の根が頭部に侵入する感覚や水やりによって頭部に水が浸透する感覚、植物に養分を吸収される感覚、成長した植物が風にあおられて揺れ動く感覚などの提示を行っている。このうち根については、ヘッドマッサージャによる圧迫刺激を提示することで、頭内に疑似的な触覚像を発生させ、頭部に根が侵入する感覚を表現している。また、ヘッドマッサージャに取り付けられた振動モータを、映像中の風の向きに合わせて振動させることで、仮現運動を利用して頭内の根が動いている様子を表現した。

同作品の体験展示で実施されたアンケート調査では、植物が頭の中に根付いていくような感覚があったかを問う項目において 231 名の体験者のうち約 8 割が高いスコアをつけており、頭部への疑似的な根の侵入が提示可能であることが示唆された。しかし、頭部に対して根のような物体が侵入する感覚 (侵入感) が提示される科学的なメカニズムについてはいまだ不明のままであり、どのような種類の刺激を、どのような時間的・空間的パラメータで提示すれば良いかを調査する必要がある。

ブレインツリーから得た知見より、侵入感の生起に関連する条件として圧迫刺激の移動距離、移動速度、提示箇所の数、振動刺激のパターンなどが考えられる。本研究では、頭部において侵入感が生起する圧迫刺激の時間的・空間的パラメータについて調査するために、ヘッドマッサージャによる圧迫刺激を提示する装置を作成し、刺激の提示箇所の数、距離、移動速度を変化させ、参加者が知覚する侵入感を比較する実験を行った。

2. 関連研究

2.1 未知の感覚の評価手法

侵入感のような実際に体験することが困難な感覚において、その評価手法はメカニズムの考察に大きな影響がある。そこで本研究では侵入感の評価手法として、侵入感のように、体内に疑似的な触覚像を作り出す貫通感の評価手法を参考にした。貫通感の提示には、仮現運動やファントムセンセーションを利用した手法がある。渡邊らは腹と背に装着した振動スピーカを、時間差を設けて駆動させることで、腹部を通過する仮現運動を生起させる手法を提案した[7]。この実験では、全 68 種類の時間差条件を 1 ブロックとし、参加者は 4 種類の振動提示位置に対して、1 ブロックずつ順番に 5 ターン、計 20 ブロックを行い、提示された振動刺激に対する主観的な貫通感強度を回答した。回答の際、貫通感という実際には体験することが困難である感覚については、そのような感覚があるという前提で実験を行った。我々の研究でも同様に、侵入感という未知の感覚については、そのような感覚があるという前提で参加者に回答させた。

2.2 頭部における触覚提示

身体の上皮には、刺激を知覚するさまざまな感覚受容器が存在する[8]。Weinstein は男子の身体各部における圧覚閾について調査を行い、身体の体性感覚を司る感覚受容器について、頭部の圧刺激に対する閾値が身体のすべての部位の中で最も低く、敏感な部位であると述べた[9]。

頭部に対して触覚提示を行う場合、頭皮に対して直接触覚刺激を提示する手法のほかに、頭髪を媒介として間接的に触覚刺激を提示する手法がある。頭髪を利用した触覚提示デバイスに、兼古らが開発した PerMan[10]がある。PerMan は 18 個の振動子を、頭頂部を中心とした同心円状に配置し、ユーザの頭髪を媒体として振動による情報提示を行うことで、障害物の方向と距離の検知を可能にしている。また、本多らが開発した Antenna[11]では、髪の毛や耳たぶ、えり元やそで口などに身に付け、振動と光によって音の特徴をユーザに提示しており、映画における雨のシー

^{†1} 明治大学
Meiji University

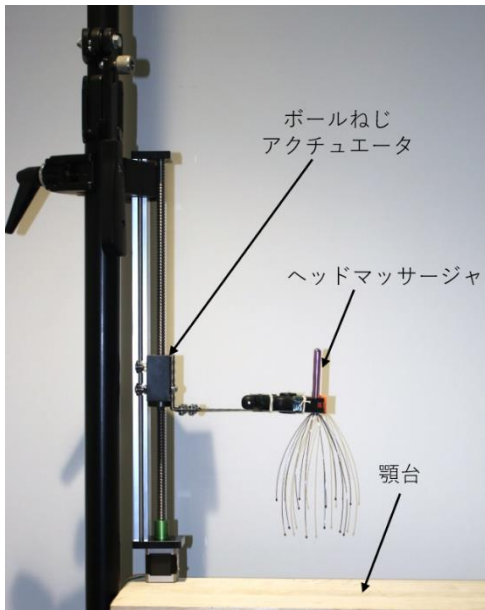


図 1 実験装置

ンで雨の強さを表現したり、ダンスのリズムを提示したりすることが可能である。これらの研究から、頭髪を媒介とした間接的な刺激提示に対して人間は敏感に反応することがわかる。

ブレインツリーでは、ヘッドマッサージャが頭皮に対して圧迫刺激を提示する際に頭髪をかき分けるように動作していた。それによって侵入感が増幅していた可能性があり、頭髪の有無や状態によって、知覚する侵入感の大きさが変化することが考えられる。

3. 実験

本実験では、ヘッドマッサージャによる圧迫刺激の与え方の違いによる侵入感の差異について調査した。

3.1 実験装置

実験装置を図 1 に示す。実験装置はボールねじアクチュエータとヘッドマッサージャから構成される。ボールねじアクチュエータはマイコン制御により、移動速度と移動距離を操作可能であり、これによってヘッドマッサージャの移動距離、移動速度を変化させる。また、ヘッドマッサージャは着脱可能であり、脚の本数が異なるヘッドマッサージャを付け替えることで脚の本数を変更する。

3.2 実験条件

実験条件としてヘッドマッサージャの移動距離、移動速度、脚の本数の 3 条件を設定する。各条件にはそれぞれ 3 パターンのパラメータを設定する。参加者にはいずれか 1 つの条件について 3 パターン全てをランダムな順番で体験させる。

(1) 移動距離の比較

移動距離を 4cm, 8cm, 12cm の 3 パターンに設定した。本条件では移動速度を 2.5cm/s, 脚の本数を 12 本に固定し

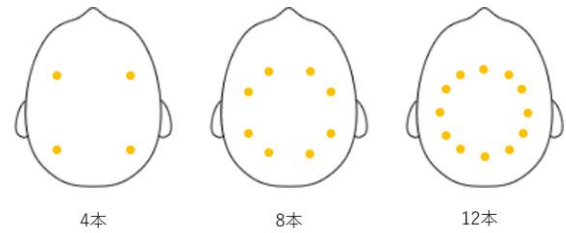


図 2 ヘッドマッサージャの脚の本数に対するおおよその刺激提示箇所

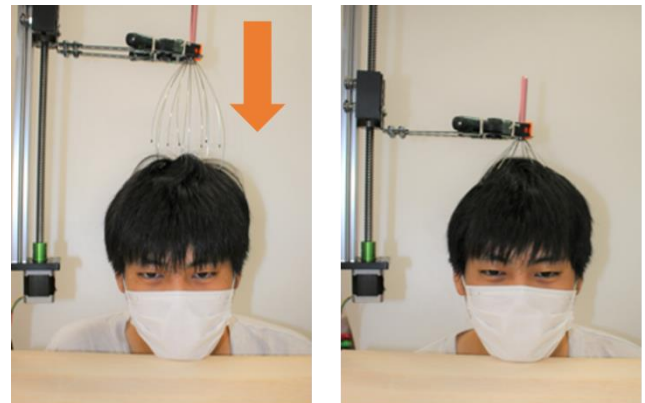


図 3 実験の様子（実際は実験装置を箱で囲う）

て実験を行った。

(2) 移動速度の比較

移動速度を 1.25cm/s, 1.875cm/s, 2.5cm/s の 3 パターンに設定した。本条件では移動距離を 12cm, 脚の本数を 12 本に固定して実験を行った。

(3) 脚の本数の比較

脚の本数を 4 本, 8 本, 12 本の 3 パターンに設定した。本条件では移動距離を 12cm, 移動速度を 2.5cm/s に固定して実験を行った。ヘッドマッサージャの脚の本数に対するおおよその刺激提示箇所を図 2 に示す。

3.3 実験手順

実験の様子を図 3 に示す。参加者には実験装置が見えないよう、実験装置を箱で囲って実験を行った。実験ではまず、参加者に顎台に顎を置くよう指示し、その後ヘッドマッサージャの脚の先端が参加者の頭皮に触れる位置にセットする。この状態から装置を起動し、ボールねじアクチュエータに接続されたヘッドマッサージャを下降させる。ヘッドマッサージャの下降終了後、ヘッドマッサージャを上昇させ、初期状態に戻す。以上を 1 試行とする。1 パターンにつき 5 回の試行を行い、計 15 回の試行を行った。1 回の試行ごとに参加者が体感した侵入感について、アンケートで「1:全く感じない」から「7:非常に強く感じる」までの 7 段階のリッカート尺度で回答させた。参加者は実験前に 3 パ

ターンを1度ずつ体験し、主観的な侵入感の範囲をあらかじめ知ったうえで実験を行った。

3.4 実験参加者

参加者は、19歳から22歳までの大学生で、移動距離、移動速度の各条件が7名（男性5名、女性2名）、脚の本数の条件が8名（男性6名、女性2名）の計22名だった。

4. 実験結果

本実験では、参加者のアンケートから取得した点数を各条件のパターンごとに平均化し、それぞれ比較した。比較の統計学解析にはマン・ホイットニーU検定を用いた。

(1) 移動距離の比較実験

移動距離を変化させた各パターンの侵入感の平均を図4に示す。4cmと8cmのパターン間、4cmと12cmのパターン間、8cmと12cmのパターン間のすべてにおいて有意差が見られた（それぞれ $p=2.28e-09$, $p=7.07e-11$, $p=0.00173$ ）。この結果から、移動距離が大きくなるほど、参加者が知覚する侵入感は大きくなることが示唆された。移動距離を4cmにした際の侵入感の平均と移動距離を8cmおよび12cmにした際の侵入感の平均を比較したp値は0.01未満と小さく、効果量は大きくなっている。また、移動距離を4cmに設定した際に参加者が知覚した侵入感の平均は2.26と小さく、参加者は十分な侵入感を知覚できていなかったことが示唆された。以上のことから、侵入感が生起するための移動距離の最低要件は4cmから8cmの間に存在すると考えられる。

(2) 移動速度の比較実験

移動速度を変化させた各パターンの侵入感の平均を図5に示す。1.25cm/sと1.875cm/sのパターン間、1.25cm/sと2.5cm/sのパターン間、1.875cm/sと2.5cm/sのパターン間すべてにおいて有意差が見られなかった（それぞれ $p=0.86$, $p=0.83$, $p=0.73$ ）。この結果より、1.25cm/sから2.5cm/sの範囲内では、参加者が知覚する侵入感は移動速度の差異によって変化しないことが示唆された。

(3) 脚の本数の比較実験

脚の本数を変化させた各パターンの侵入感の平均を図6に示す。4本と8本のパターン間、4本と12本のパターン間、8本と12本のパターン間のすべてにおいて有意差が見られた（それぞれ $p=8.03e-06$, $p=2.16e-08$, $p=0.013$ ）。この結果より、脚の本数が増加することで、参加者が知覚する侵入感は大きくなることが示唆された。また、脚の本数を4本に設定した際に参加者が知覚した侵入感の平均が2.75と小さいことから、侵入感が生起するための脚の本数の最低要件は4本から8本の間に存在すると考えられる。

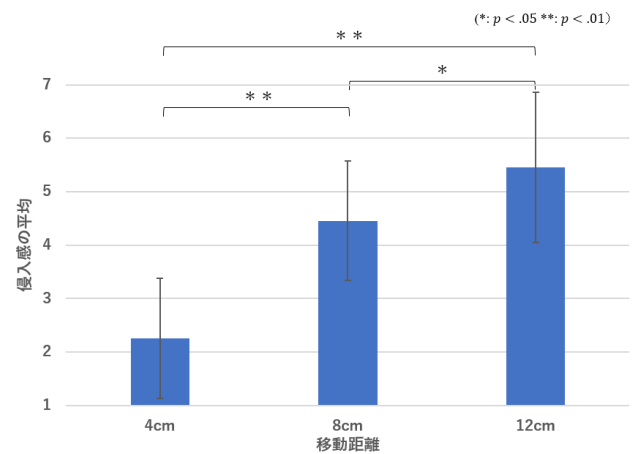


図4 移動距離の比較実験結果

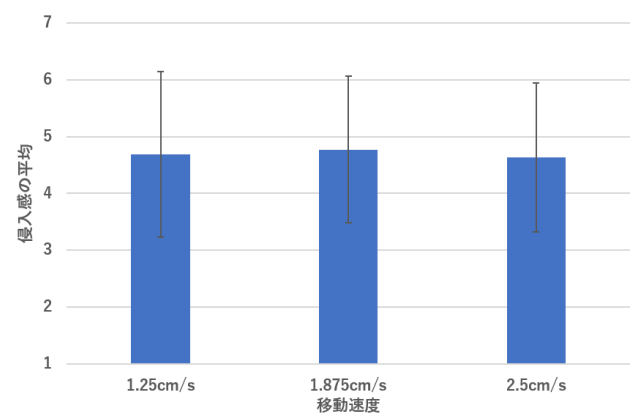


図5 移動速度の比較実験結果

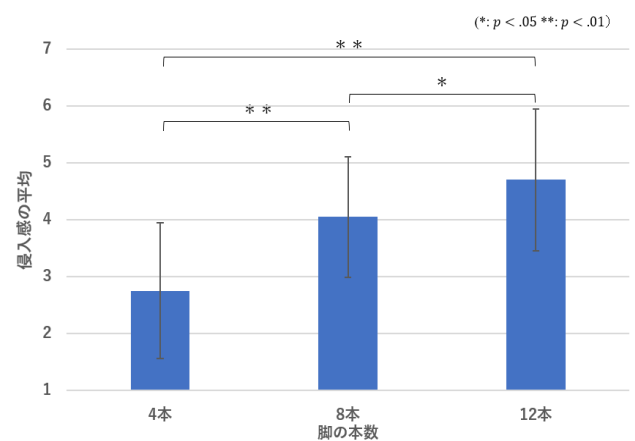


図6 脚の本数の比較実験結果

5. 議論

移動距離および脚の本数を比較する実験において、それぞれ移動距離が長く、脚の本数が多いほど知覚する侵入感も大きくなるという結果となった。しかし、移動速度を比較する実験においては、1.25cm/sから2.5cm/sの範囲内で

は、参加者が知覚する侵入感に差異はないことが示唆された。本実験における移動速度のパターンは、実験装置の機械的限界により、1.25cm/s から 2.5cm/s という狭い範囲に設定されていた。より遅い、もしくはより速い移動速度による刺激提示を行った場合、侵入感が大きく、あるいは小さくなる可能性が考えられる。また、実験終了後に参加者にインタビューを行ったところ、「櫛で髪をとく感覚と似ていて侵入感を感じられなかった」という意見があり、頭部へ圧迫刺激を普段から体験している参加者には効果が見られないことが考えられる。同様の意見がブレインツリーの体験展示の際にも確認されており、頭部刺激への慣れによって、参加者が知覚する侵入感が小さくなる可能性が考えられる。

6. おわりに

本研究では、ヘッドマッサージャによる刺激の移動距離、移動速度、提示箇所数の各パターンを比較する実験を行い、参加者が知覚する侵入感について調査した。その結果、刺激の移動距離、提示箇所数が増加すると、参加者が知覚する侵入感が大きくなることが示唆された。今後の研究では、ヘッドマッサージャに振動モータを取り付けることで、参加者の頭部に対し圧迫刺激に加えて振動刺激を与え、同様の検証を行うとともに、頭髪の長さや髪質の違い、頭部刺激に対する慣れによって、参加者が知覚する侵入感にどのような差異が表れるかについて調査する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20K12127 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J84-D2, No.1, pp.120-128 (2001).
- 2) 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之: 空中超音波フェーズドアレイによる触覚ディスプレイ, 第 13 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3A2-2 (2008).
- 3) 菊池武士, 増田恭伸, 天野健人, 三俣哲, 大堀優: 磁性エラストマーを用いた摩擦制御型ハプティックデバイスの評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 一般社団法人日本機械学会, pp. _2A2-B14_1-_2A2-B14_2 (2013).
- 4) Gi-Hun Yang, Ki-Uk Kyung, M. A. Srinivasan and Dong-Soo Kwon: Quantitative tactile display device with pin-array type tactile feedback and thermal feedback, Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006, pp.3917-3922 (2006).
- 5) 西村崇宏, 唐澤洋之, 瀬尾明彦, 土井幸輝: ヒト手掌部での温度感覚による仮現運動において温度刺激の提示時間と SOA が発生率に及ぼす影響の評価. 日本感性工学会論文誌, 11(3), pp.475-481 (2012).
- 6) 平野裕也, 竹永正輝, 西川尚志, 丸山寛人, 浅野日登美, 椎名星歩, 千葉麻由, 武田雄大, 渡邊真輝, 橋本直: ブレインツリー: 頭部での植物の規制を表現する触覚コンテンツ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.26, No.2, pp.155-158 (2021).

- 7) 渡邊淳司, 福沢恭, 梶本裕之, 安藤英由樹: 腹部を通過する仮現運動を利用した貫通感覚提示, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.10, pp.3542-3545 (2008).
- 8) 岩村吉晃: ヒト触覚受容器の構造と特性, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.5, pp.438-444 (1984).
- 9) Weinstein, S: Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality, In D. R. Kenshalo (Ed.), The skin senses. Springfield, Illinois: Thomas, pp.195-218 (1968).
- 10) 兼古哲也, 棟方渚, 小野哲雄: PerMan: 頭部への刺激を用いた情報提示デバイスのエンタテインメントへの利用, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp.173-178 (2015).
- 11) 本多達也, 馬場哲晃, 岡本誠: Ontenna: 触覚・視覚を利用した聴覚情報伝達装置のデザインと社会実装, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.25, No.4, p.334-345 (2020).