

[研究助成 (A)]

バーチャルリアリティ空間における脅威刺激認知の
脳波による定量評価

2221009



研究代表者

国立研究開発法人
産業技術総合研究所

主任研究員

金 山 範 明

[研究の目的]

近年バーチャルリアリティ（以下 VR）技術が進展し、我々は実空間ではできない様々な体験をすることができるようになった。しかしながらその体験は、時には危険なこともある。例えば VR 上でギロチンを体験すると実際に体が麻痺する報告などがあり、やみくもに VR 体験を行うことで人体に悪影響が出る可能性が否めない。人間にとって、VR という新しい技術を適切な形で活用していくためには、VR 上での体験が実身体にどの程度の影響を与えるかの基礎的なデータが必要である。これを、脳波を用いて明らかにすることで、主観報告だけではなく、脳生理反応からその影響を客観的に示すことができる技術を開発する。これにより、VR 技術の適切な活動についてのガイドラインを作る一助としたい。

上記の目的を達成するためには、VR 空間上に提示された身体（アバター）に何らかの刺激を与え、その刺激が生体反応においてどのように評価されているかを計測する必要がある。頭皮上脳波には、侵害刺激に対して反応する脳波成分があることが分かっており、刺激が生体にとってどれほど脅威かを定量的に図ることができる。本研究課題では脳波成分の大きさが、VR 空間上の侵害刺激の視覚的な提示によってどのように調節を受けるのかを明らかにすることを目的とした。しかし VR 映像を閲覧する場合、VR 映像の解像度は現実空間とは大きく異なり、

その質が VR シーンへの十分な没入を妨げている可能性がある。本検討では、VR 環境における疑似痛覚を検討するのに、どの程度の解像度が必要かという技術的課題をクリアしたうえで、侵害刺激が惹起する脳波成分の計測を行い、主観的な侵害度合いを定量的に明らかにする。

[研究の内容、成果]

1) VR 刺激を利用した脳波計測

VR シーン中に呈示される刺激に対する脳反応を計測する試みはさまざま行われている。申請者の先行研究においては、ヘッドマウントディスプレイ（Head-Mounted Display; HMD）を装着し、VR 空間に自身の身体を提示した場合、その身体モデルに対しての接触を示す視覚的情報と、実際の自分の身体に対する接触である体性感覚的情報が時空間的に一致していると高い身体所有感・臨場感を感じることが明らかにされた（Kanayama et al., 2021）。しかしながら、HMD の解像度は実空間に比べて低く、疑似痛覚を感じるレベルに十分かは不明である。本研究では、目的の実験に入る前に、十分な没入感を担保する解像度を明らかにするため、また解像度を変更した際に実空間と脳活動が大きく異ならないか確認するための検証実験を行い、「VR 上の手のモデルに対する身体所有感が VR 解像度により変化するのか」（研究 1）、「その際の脳情報処理は解像度によって変わるか」（研究 2）という点について検証を

行った。

2) 【研究 1】VR 刺激の解像度が身体所有感に与える影響

VR 刺激呈示を行う HMD の解像度は、公表されているものといないものがある上、レンズ形状等複雑な要因で変化するため、正確な数値については明らかではないが、先行研究 (Kanayama et al., 2021) で使用したものが約 10 PPD、当時のコンシューマモデルとしてポピュラーな Meta Quest2 で約 20 PPD と、ヒトの肉眼に対して非常に低い。先行研究 (Kanayama et al., 2021) で得られた実環境と VR 環境における脳情報処理および主観的体験の違いは解像度に起因する可能性がある。これに対して本研究では中心視野 (27x27 degree) に限定して人の肉眼で実環境を見る際と同等の PPD を提示可能な Varjo XR3 を用いて、ヒトの多感覚情報処理に影響する主観的な体験に関する評価が解像度に依存してどの程度変化するのか検討した。

方法 21 名の参加者を募集し、女性 9 名、男性 12 名 (平均年齢 25.43 歳、標準偏差 4.50) が参加した。参加者は全員、眼鏡またはコンタクトレンズによる視力矯正後、または矯正なしに正常視力を有し、右利きで、神経学的または精神医学的疾患の既往歴はなかった。本実験は、倫理審査番号「人 2023-0877」の計画に基づいて実施され、すべての参加者は自らの意思で実験参加に同意し、同意書に署名した。

実験参加者が実験中に閲覧した VR 空間内のシーンは、低解像度の VR 空間 (約 30 PPD 程度)、高解像度の VR 空間 (約 70 PPD 程度)、パススルーによる実空間のビデオ映像の 3 種類であった (図 1)。それぞれのシーンにおける実験を、1 セッションずつ行った。各セッションでは、視覚刺激と触覚刺激の空間的位置が一致するブロックと不一致になるブロックが交互に 2 回ずつ提示された。これらの順序はカウン

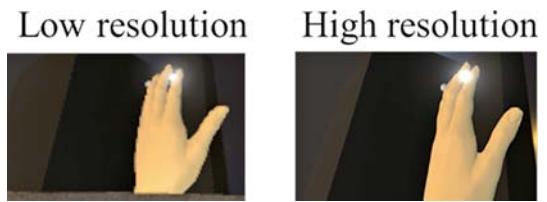


図 1 実験で使用した映像の解像度の異なり

ターバランスが取られていた。各ブロックは 60 試行で構成され、各試行は 50 ミリ秒の刺激提示期間、550 ミリ秒の反応受付期間、および 1600~2000 ミリ秒の試行間隔で構成されていた。参加者は、提示された振動による触覚刺激が人差し指に感じられたか薬指に感じられたかを、ボタンを押して示すように教示された。この間、目の前のタスクとは無関係であり触覚に基づいてのみ押すボタンを判断するように伝えられたうえで、人差し指と薬指の先端背面に取り付けられた点滅する LED (VR の場合それに似せた球体) の発光を見ているように指示された。

実験参加者は、各ブロックの終了後、ラバーハンド錯覚に関する主観的な感覚を口頭で報告した。実験参加者は、錯覚体験の強さを 1 から 100 の尺度で評価した。1 は錯覚が全くないこと、100 は最も強い錯覚があることを示すこととした。質問項目は 5 つでそれぞれ、項目 1「ラバーハンドがまるで自分の手のように感じた」、項目 2「LED の光が自分の手の位置で光っているように感じた」、項目 3「振動がラバーハンドの位置で起こっているように感じた」項目 4「自分の手がラバーハンドの位置にあるように感じた」項目 5「自分の手がゴムっぽくなったように感じた」であった。項目 1-4 で、どの程度 VR 上の偽の手を自分の手だと思ったかに関する評価を行い、項目 5 は統制としてのダミー項目として用いた。

結果 統計的検定として、ウィルコクソンの符号順位検定を採用し、p 値は FDR 法を用いて補正した。身体所有感に関わる項目 1 と 4 では、すべての VR シーンにおいて、一致した視触覚

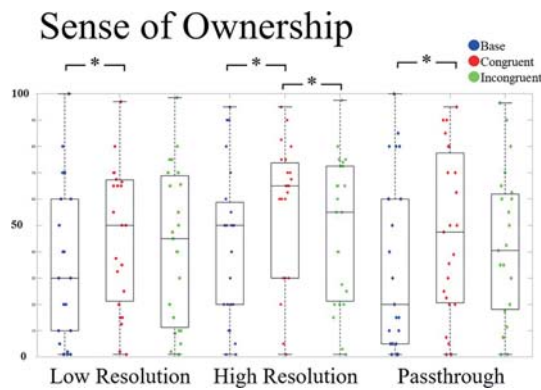


図2 項目1の質問に対する条件ごとの評価値

刺激後に刺激前に比べて身体所有感に関する錯覚の強度が有意に増加した ($p < .05$; 図2)。項目5では、VRシーン閲覧条件において、有意な実験刺激による効果が見られなかったため、項目1と4にみられた効果が要求特性によるものではないことが示唆された。不一致な視触覚刺激条件では、いずれのシーンにおいても実験刺激による有意な身体所有感の変化は観察されなかった。

考察 本検討の結果、解像度が低い条件であっても、解像度の高い条件と同様に、視触覚刺激の空間的に一致した刺激の呈示をアバターの手と自身の手に呈示することで、あたかもVR上のアバターの手を自分の手であると感じさせる効果が表れることが明らかになった。

3) 【研究2】VR解像度が頭皮上脳波に与える影響

研究1で明らかになった解像度による主観的な感覚の異なりに対し、その際の脳反応がどのように異なるかを明らかにするため、研究1の実験セッティングにおいて頭皮上脳波を計測した。既に同様のセッティングで頭皮上脳波を計測した先行研究の知見と比較し、解像度により脳情報処理の異なりが現れるかどうか確認した。

方法 32名の参加者を募集し、男女16名ずつ(平均年齢25.03歳、標準偏差4.10)が参加し

た。参加者は全員、眼鏡またはコンタクトレンズによる正常視力または矯正視力を有し、右利きで、神経疾患または精神疾患の既往歴はなかった。本実験は、倫理審査番号「人2023-0877」の計画に基づいて実施され、すべての参加者は自らの意思で実験参加に同意し、同意書に署名した。

実験セッティングについては研究1と同様で、課題中に、頭皮上脳波を取得した。基準電極はCzに、接地電極はFpzに配置した。サンプリングレートは1000 Hz、記録波形はハードウェアフィルタでフィルタリングされ、低周波カットオフは0.016 Hz、時定数は10秒であった。各電極のインピーダンスは少なくとも20 k Ω 未満、典型的には10 k Ω 未満に維持した。

頭皮上脳波解析 EEGLAB v14_1_1b31, 32, Matlab R2018a (Math-Works, Natick, MA, USA) を使用し、記録された波形に、1 Hzのデジタルハイパスフィルタ、50 Hzと100 Hzでクリーンラインプラグインが使用された。次に、データはセグメントに分けられた。セグメントのゼロ時点は、視覚触覚刺激の開始(0 ms)と定義され、セグメントの範囲は刺激の開始に対して-600~1200ミリ秒であった。独立成分分析(Independent Component Analysis; ICA)により、各参加者63個の独立成分(IC)が取得された。これらのICに対してダイポール推定が行われた。得られたすべてのICのうち、ダイポール推定時の残差分散が15%以下であるICのみ選択し、k平均法を用いてクラスタリングした。各ICの波形の周波数ごとのパワー値は、刺激後-100~800 msおよび3~60 Hzで、Morlet Waveletを用いて計算され、時間周波数マップを可視化した。刺激前50~300 msのパワー値をベースラインとして計算し、刺激後データをデシベルに変換するために使用した。前頭葉クラスタと頭頂葉クラスタの2つのクラスタについて、一致/不一致条件間のERSPの差をクラスタ補正を使用したモン

テカルロパーミュテーション法にて統計検定を行った。

結果 一致条件と不一致条件の間には、頭頂葉クラスタにおけるガンマ/シータ帯域のパワーにおいて統計的に有意な差が認められた（図3）。特に、先行研究（kanayama et al., 2007; 2021）では 200～400 ms の間に認められたガンマ帯域のパワー差は、VR シーン閲覧条件では時間的に遅れて認められた。

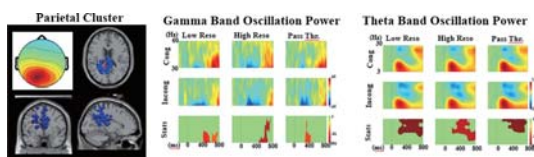


図3 感覚間統合を起こし、VR 上の自己身体モデルへの投影を引き起こすと考えられる頭皮上脳波成分

考察 VR シーンにおいて自分の身体がそこにあると感じる没入感に関連する情報処理を反映すると考えられる脳波成分の計測を試みたところ、先行研究と同様の反応が少し時間的に遅れて出現することがわかった。またこの成分については、解像度を変化させても大きな変化はみられず、映像の解像度に依存しない可能性が高いことが明らかになった。これらの知見から、侵害刺激を用いた実験も、一般に利用されている特別な高解像度出力を持たないコンシューマモデルを用いて検討しても問題ないことが示唆された。

4) VR 環境における疑似侵害刺激が惹起する脳波成分の検討

研究1 および研究2 によって確認した解像度の影響はほとんどないものと考えられることから、特殊な装置ではなく一般によく出回っている機器で、疑似侵害刺激の影響を検討しても、解像度によって臨場感が損なわれたために得られた結果が評価できない可能性は非常に低いことがわかった。よってここではちょうど一般に販売され普及し始めている Meta Quest 3 を対象の HMD (25PPD) とした。

方法 25 名の参加者を募集し、女性 10 名、男性 15 名（平均年齢 25.04 歳、標準偏差 6.17）が参加した。参加者は全員、眼鏡またはコンタクトレンズによる視力矯正後、または正常視力を有し、右利きで、神経学的または精神医学的疾患の既往歴はなかった。本実験は、倫理審査番号「ヒ 2023-529」の計画に基づいて実施され、すべての参加者は自らの意思で実験参加に同意し、同意書に署名した。

実験は研究2 と同等で、LED の明滅の代わりに注射器のオブジェクトの針部分が、VR シーン中の自身の手にあたるハンドモデルにささる映像に代わったのみであった。視覚刺激と触覚刺激の空間的位置が一致するブロックと不一致になるブロック、また注射器が動かず振動だけ起こる触覚のみ条件、注射器が動くが振動が来ない視覚のみ条件の4条件が、ランダムに提示され、提示順はカウンターバランスが取られていた。参加者は、提示された振動による触覚刺激が人差し指に感じられたか薬指に感じられたかを、ボタンを押して示すように教示された。視覚のみ条件では、動いた注射針をボタン押しで回答した。

実験参加者は、各ブロックの終了後、ラバーハンド錯覚（RHI）に関する主観的な感覚を口頭で報告した。実験参加者は、錯覚体験の強さを1 から 100 の尺度で評価した。質問項目は5 つでそれぞれ、項目1「ラバーハンドがまるで自分の手のように感じた」、項目2「注射針がラバーハンドに刺さるとき痛いように感じた」、項目3「注射針がラバーハンドに刺さるとき不快だった」、項目4「自分の手がラバーハンドの位置にあるように感じた」、項目5「自分の手がゴムっぽくなったように感じた」であった。項目1で、どの程度 VR 上の偽の手を自分の手だと思ったかに関する評価を行い、項目2-3で疑似痛み感覚が起こるかを検討した。

また同時に脳波計測を行った、測定条件、解析は研究2 と同様であった。

結果 研究1と同様の統計検定を用い、各項目の条件差を確認した。結果項目1では、刺激前に比べ視触覚刺激の空間的位置が一致している条件でのみ、錯覚強度が刺激後に高まった ($p < .01$)。このことは、侵害刺激を想起させる映像においても、視触覚刺激の空間的一致による統合処理が、自分がVRの中におり、VRの中のハンドモデルが自分の手のように感じるという没入感を惹起することがわかった。項目2および3については、一致条件と不一致条件の差が統計的に有意となり、一致条件においてより侵害感覚を疑似的に感じる事が明らかになった ($p < .01$)。また頭皮上脳波においては、直接的に体性感覚野に対応するクラスタが得られなかったが、頭頂連合野クラスタにおいて、条件の差が有意に見られ、一致条件で最も反応が大きくなった (図4)。

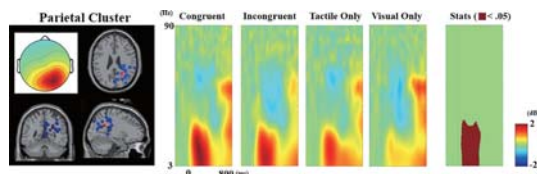


図4 最も疑似痛覚の高かった一致条件でもっとも高まる感覚関連脳波成分

考察 項目1におけるVR上のハンドモデル「がまるで自分の手のように感じた」という錯覚が、先行研究や研究1と同様に、空間的一致条件で見られたことは、侵害刺激の臨場感が高まっていることを示している。平均値はちょうど研究1の低解像度条件と同等であり、身体所有感に関する錯覚が再現された。さらに侵害刺激感覚についての項目2も空間的に一致していることで高まることがわかった。これは、VR上の自身のアバターを傷つける体験をする場合、感覚位置情報が適切であるほど、その強度が高まる可能性を示唆している。一方で不快感を洗わず項目3の数値は同様に、一致条件で高まる

ものの、100点中平均で16.5点と非常に低く、ゼロ点も半数近くいたことを考えると、問題にならないレベルといえそうだ。頭皮上脳波計測においても、そもそも侵害刺激に対応すると考えられる部位に信号源を持つ反応は観測されず、その解釈を担うと考えられる部位で条件差が見られたことも直ちに危険の及ばない範囲での臨場感にとどまっている可能性を示唆している。

結論 VR上での侵害刺激の臨場感を挙げることで、痛みの疑似的な感覚を強めることができる可能性が示されたが、不快感は低く、健康を害さない適切な範囲での刺激にとどめることが十分にできることが示唆された。

[成果の発表, 論文など]

- N. Kanayama, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara Previous virtual reality experiences impact cortical oscillations during rubber hand illusion in virtual reality environment. 21st World Congress of Psychophysiology, 2023. 6. 26 Geneva.
- N. Kanayama, M. Miyakoshi, M. Machizawa (2023). Evaluation of neural response recorded using scalp EEG in virtual reality environment. 2023 APSIPA ASC (IEEE Xplore)
- N. Kanayama, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara Impact of visual resolution in VR scene on the sense of body ownership. 27th Association for the Scientific Study of Consciousness 2024, 2024. 7. 2 Tokyo.
- 金山範明・守下奈那・祖父江祐太・原正之 VR 経験がVR空間上の身体認知に及ぼす影響. 日本心理学会第88回大会, 2024. 9. 6 (熊本城ホール)
- N. Kanayama, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara EEG responses to visuo-tactile stimulation around body in high-resolution VR scene. Neuroscience 2024. 10. 6 Chicago, USA
- N. Kanayama, A. Imai, T. Tsuchimochi, N. Morishita, Y. Sobue, M. Hara Neural Correlates Correlations of Vicarious Pain Induced by Nociceptive Stimulation Presented on Virtual Avatar. 28th Association for the Scientific Study of Consciousness 2025, 2025. 7. 6 Crete, Greece