



Virtual Reality による心理的影響の客観的計測の試み

A Study on the Objective Evaluation of Psychological Effects of Virtual Reality

川畑駿太郎¹⁾, 平手裕市¹⁾, 中井浩司¹⁾, 松井藤五郎¹⁾, 小嶋和恵²⁾, 毛利空広¹⁾, 和田結佳¹⁾
Shuntaro KAWABATA, Yuichi HIRATE, Koji NAKAI, Tohgoroh MATSUI, Kazue KOJIMA,
Takahiro MOHRI, and Yuika WADA

- 1) 中部大学大学院 生命健康科学研究科 生命医科学専攻 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)
2) 中部大学 生命健康科学部 臨床工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

概要 : 緊張度の異なる 2 種類の VR 映像, 森林浴とジェットコースター乗車を視聴時に発生する生体反応を心拍変動周波数解析, 非侵襲連続推定心拍出量, 脈動率, 血圧, 心拍数, 呼吸数, 経皮的動脈血酸素飽和度などの生理学的指標を用いて比較した. その結果, 交感神経活動の賦活化において有意な差を記録できた. 生理的生体反応を利用した評価法は, VR 映像が及ぼす心理的影響を定量的に計測する手段として期待できる.

キーワード : VR, 生理学的指標, 心拍変動周波数解析, 非侵襲連続推定心拍出量

1. はじめに

近年, 仮想現実(Virtual Reality: VR)は, コンピュータや情報通信の技術の進歩に伴い大きく発展し, 幅広い分野で導入され始めている. 例えば, 教育分野における研究事例では, 没入型仮想現実空間の体験を事前学習に活用した結果, 学習意欲および知識の共有能力を向上させ, 認知負荷の減少に繋がる可能性が示唆されている[1]. また, 建築分野においても, 設計(モデリング), 建設, 都市運営などの視覚化をサポートするための重要なテクノロジーとして, VR 技術の導入が注目されている[2]. この他にも, VR 技術は, 医療や産業, エンターテインメントなどの様々な分野で応用が進んでおり, Meta Quest (Meta 社製) や Vision Pro (Apple 社製) の発売によって人々の日常生活にも浸透している. そのため, 世界の VR ヘッドセットの出荷台数は, 2022 年の 1,253 万台から 2026 年には 2,598 万台まで増加すると予測されている[3]. このように VR 技術は, コンピュータを介して現実味を帯びた三次元空間の構築を可能とし, 幅広い分野で高い需要が確実視されている.

VR は今も尚, 発展途上の技術で将来的に広く普及することは確実であり, 人々が日常生活の中で利用する機会は飛躍的に増加するであろう. そのため, 新たな VR コンテンツを開発するにあたって, 構築する空間の自由度やリアリティなどの技術を追求するだけでなく, 視聴に伴う心身への影響などの健康リスクについても配慮する必要がある. 無視することはできない問題と思われる.

構築された VR 空間が生体にとって違和感のない環境で

あれば, 現実に関わりなく近いリアルな体験を可能とし, 有力な最新技術として活用できる. しかし, その VR 空間の体験による過剰な緊張度や感覚の不一致に起因して不快感が生じた場合, ストレスを誘発し, 心身に不調をきたす. そのため, VR 映像の視聴が心身に及ぼす影響について主観的および客観的に評価する研究が行われている.

主観的評価としては, SSQ (simulator sickness questionnaire)の質問票を用いた方法が広く使われている[4]. しかし, 質問票を用いたアンケート調査は, 実際の体験や行動について振り返ることを要求するものであり, その回答に想起や感情などの様々なバイアスが生じるため, 結果には信頼性の限界がある[5].

一方, 生理学者の Cannon は, ストレスに対して闘争・逃走反応(Fight or Flight response)と呼ばれる交感神経活性の影響によって, 心拍数および心収縮力の増加, 血圧の増加, 呼吸数の増加, 皮膚色の変化など, 生体内外の変調が多岐にわたって現れることを報告しており[6], ストレスの客観的評価として, 心拍数や心拍変動, 呼吸数, 皮膚電気活動などの生理学的指標を活用する事例が見られる[7-9].

これらの背景から, VR 映像の視聴が心身へ及ぼす影響を, 多種多様な生理学的指標を組み合わせて多角的に評価することは, 構築された空間に対する体験者の適応状態を詳細に判定する手段として期待される.

本研究では, 自律神経活動および呼吸循環動態の指標を用いて VR 映像の視聴覚刺激が心身へ及ぼす影響を評価し, 検討する.

2. 実験方法

2.1 対象

中部大学に所属する若年健康男性 13 名を対象に実験を行った。

本研究は中部大学倫理審査委員会での審査と承認を得て行った(承認番号: 20210006, 承認年月日: 2021 年 4 月 30 日, 承認期間: 2021 年 4 月 30 日–2024 年 3 月 31 日, 承認番号: 20240007, 承認年月日: 2024 年 4 月 30 日, 承認期間: 2024 年 4 月 30 日–2028 年 3 月 31 日)。

2.2 実験概要

予想される緊張度の異なるリラックス VR 映像視聴時(Relax VR 群)とストレス VR 映像視聴時(Stress VR 群)の 2 群で, 自律神経活動および呼吸循環動態を比較する。

ベッドサイドモニタ BSM-6701(日本光電工業株式会社製)に被験者属性(生年月日, 身長, 体重, 性別)を入力し, 心電図パッド電極, my Beat®心拍センサ(UNION TOOL 株式会社製), esCCO 専用パルスオキシメータプローブ, 非観血血圧測定用カフを装着した。

心電図パッド電極は, 体動による基線の動揺(ドリフト)や筋電図の混入を防ぐために NASA 誘導を選定し, 胸骨上縁に陰極, 胸骨下縁に陽極, 左前腋窩線上で最下肋骨上にアース電極を装着した。my Beat®心拍センサは心尖部上で第 4 肋間と第 5 肋間に, esCCO 専用パルスオキシメータプローブは示指に, 非観血血圧測定用カフは上腕に装着した。その後, 以下①–⑤の手順で計測を行った。

- ① ヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted Display: HMD)を装着
- ② 安静座位状態で 5 分間
- ③ リラックス VR 映像を 5 分間視聴 (Relax VR 群)
- ④ 安静座位状態で 5 分間
- ⑤ ストレス VR 映像を 5 分間視聴 (Stress VR 群)

2.3 VR コンテンツ

2.3.1 使用機材

VR 映像を視聴するための HMD には, Meta Quest 2(Meta 社製)を選定した。仕様は, 液晶ディスプレイ, 解像度 1,832 × 1,920, リフレッシュレート 90Hz/120Hz, 視野角 90 度(水平および垂直), 自由度 6DoF, スピーカ内臓, 重量 508 g である。

2.3.2 VR 映像

リラックス VR 映像として, YouTube VR の天生県立自然公園の映像を選定した。被験者は, 構築された自然が広がる VR 空間に没入し, 森林浴を疑似体験することができる(図 1)。

また, ストレス VR 映像として, Quest store の Epic Roller Coasters(B4T GAMES 社製)を選定した。被験者は, ジェットコースターの乗車を疑似体験することができる(図 2)。

2.4 生理学的指標

本研究では, 自律神経活動の指標として, 低周波領域のパワー値(Low Frequency power: LF power) [msec^2], 高周波領域のパワー値(High Frequency power: HF power) [msec^2],



図 1: リラックス VR 映像 (天生県立自然公園)



図 2: ストレス VR 映像 (Epic Roller Coasters)

LF power と HF power の比率(LF/HF)を計測した。

呼吸循環動態の指標として, 心拍数(Heart Rate: HR) [/min], 経皮的動脈血酸素飽和度(percutaneous oxygen saturation: SpO₂) [%], 脈動率(Pulse-amplitude Index: PI) [%], 呼吸数(Respiratory Rate: RR) [/min], 非侵襲連続推定一回拍出量係数(estimated Stroke Volume Index : esSVI) [$\text{mL}/\text{min}/\text{m}^2$], 非侵襲連続推定心係数(estimated Continuous Cardiac Index: esCCI) [$\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$], 体血管抵抗係数(Systemic Vascular Resistance Index: SVRI) [$\text{dyne} \cdot \text{sec}/\text{cm}^5/\text{m}^2$], 非観血血圧(Non-Invasive Blood Pressure: NIBP) [mmHg]を計測した。

2.5 心拍変動周波数解析

心臓の拍動は, 交感神経(sympathetic nervous system)と副交感神経(parasympathetic nervous system) および内分泌系による調節を受けており, 心身の適応状態を反映し, 心拍周期(R-R Interval: RRI)は変動する。この生理的なゆらぎを, 心拍変動(Heart Rate Variability: HRV)と呼ぶ。

HRV には, 主に血圧変動周期の刺激信号(Mayer 波)と, 呼吸変動周期の刺激信号との異なる 2 種類の周期性成分が存在する。従って, 心拍センサによって計測された RRI の時系列をパワースペクトル解析することによって, 各刺激信号の振幅成分を異なる周波数領域に分けて定量化し, 自律神経活動の客観的な評価が可能となる。本研究では, 0.04–0.15 Hz を低周波領域(Low Frequency), 0.15–0.40 Hz を高周波領域(High Frequency)とし, 各領域のパワー値を算出した。交感神経と副交感神経における情報伝達機構の違いから, LF Power [msec^2]は自律神経系の活動を, HF Power [msec^2]は副交感神経の活動を, LF/HF は交感神経の活動を反映する[10]。

2.6 非侵襲連続推定心拍出量および心係数

非侵襲連続推定心拍出量(estimated Continuous Cardiac Output: esCCO)は, 心拍出量(Cardiac Output: CO)を非侵襲かつ連続的に推定する技術である。心電図の R 波から, 手指

に装着したパルスオキシメータで検出される脈波の立ち上がりまでの時間を脈波伝搬時間(Pulse Wave Transit Time: PWTT)と呼ぶ。esCCOは、このPWTTと一回拍出量(Stroke Volume: SV)が負の相関関係にあることを利用し、COを算出する[11]。本研究では、心電図やパルスオキシメータ、NIBP、患者属性(生年月日、身長、体重、性別)などの基本的なパラメータから算出されたCOと体表面積(Body Surface Area: BSA)の商から非侵襲連続推定心係数(esCCI)を算出し、循環動態の指標として活用した。

2.7 統計解析

各測定値に対して Shapiro-Wilk の正規性の検定を行い、正規性を認める場合に t 検定を、正規性を認めない場合には Wilcoxon の符号付き順位検定を用いた。いずれも $p < 0.05$ を統計学的有意差と判定する。

3. 結果

3.1 正規性の検定

Shapiro-Wilk の正規性の検定の結果、LF power [msec²], HF power [msec²], LF/HF, HR [/min] は正規性を認めず、SpO₂ [%], 脈動率(PI) [%], 呼吸数(RR) [/min], esCCI [L/min/m²], SVRI [dyne*sec/cm⁵/m²], 収縮期血圧(NIBPsys) [mmHg], 拡張期血圧(NIBPdias) [mmHg], 平均血圧(NIBPmap) [mmHg] は正規性を認めた。

3.2 自律神経活動の比較

LF power [msec²]における Relax VR と Stress VR の中央値 [四分位範囲]は、309 [266–726] vs 741 [414–1221] ($p=0.016$)と Stress VR で有意に上昇した。

HF power [msec²]における Relax VR と Stress VR の中央値 [四分位範囲]は、244 [134–563] vs 310 [199–464] ($p=0.075$)と有意差を認めなかった。

LF/HFにおける Relax VR と Stress VR の中央値 [四分位範囲]は、1.55 [0.91–3.32] vs 2.96 [2.12–4.47] ($p=0.032$)と Stress VR で有意に上昇した。

表 1: 自律神経活動の評価

	Relax VR	Stress VR	p-value
LF power [msec ²]	309 [266–726]	741 [414–1221]	0.016
HF power [msec ²]	244 [134–563]	310 [199–464]	0.075
LF/HF	1.55 [0.91–3.32]	2.96 [2.12–4.47]	0.032

3.3 呼吸循環動態の比較

HR [/min]における Relax VR と Stress VR の中央値 [四分位範囲]は、72.0 [68.3–74.5] vs 77.1 [72.3–78.6] ($p=0.007$)と Stress VR で有意に上昇した。

SpO₂ [%]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、97.7±1.0 vs 98.2±0.7 ($p=0.072$)と有意差を認めなかった。

脈動率(PI) [%]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、3.48±1.32 vs 2.11±0.99 ($p < 0.001$)と Stress VR で有意に減少した。

呼吸数(RR) [/min]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、18.2±1.8 vs 18.3±2.7 ($p=0.839$)と有意

差を認めなかった。

esSVI [mL/min/m²]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、44.9±4.0 vs 45.9±4.4 ($p=0.023$)と Stress VR で有意に上昇した。

esCCI [L/min/m²]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、3.22±0.24 vs 3.42±0.20 ($p=0.004$)と Stress VR で有意に上昇した。

SVRI [dyne*sec/cm⁵/m²]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、1957±243 vs 1908±203 ($p=0.195$)と有意差を認めなかった。

収縮期血圧(NIBPsys) [mmHg]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、114.0±7.6 vs 117.0±8.0 ($p=0.007$)と Stress VR で有意に上昇した。

拡張期血圧(NIBPdias) [mmHg]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、72.1±7.5 vs 74.8±7.6 ($p=0.006$)と Stress VR で有意に上昇した。

平均血圧(NIBPmap) [mmHg]における Relax VR と Stress VR の平均値±標準偏差は、85.7±7.1 vs 88.5±7.3 ($p=0.003$)と Stress VR で有意に上昇した。

表 2: 呼吸循環動態の評価

	Relax VR	Stress VR	p-value
HR [/min]	72.0 [68.3–74.5]	77.1 [72.3–78.6]	0.007
SpO ₂ [%]	97.7±1.0	98.2±0.7	0.072
PI [%]	3.48±1.32	2.11±0.99	<0.001
RR [/min]	18.2±1.8	18.3±2.7	0.839
esSVI [mL/min/m ²]	44.9±4.0	45.9±4.4	0.023
esCCI [L/min/m ²]	3.22±0.24	3.42±0.20	0.004
SVRI [dyne*sec/cm ⁵ /m ²]	1957±243	1908±203	0.195
NIBPsys [mmHg]	114.0±7.6	117.0±8.0	0.007
NIBPdias [mmHg]	72.1±7.5	74.8±7.6	0.006
NIBPmap [mmHg]	85.7±7.1	88.5±7.3	0.003

4. 考察

Stress VR の視聴により、LF power, LF/HF, HR, NIBP, esCCI, esSVI の測定項目で有意差が認められ、HF power, SpO₂, 呼吸数(RR), SVRI においては有意差が認められなかった。

自律神経活動の評価から、Stress VR の視聴によって、LF power と LF/HF の有意な上昇が示された。現在の VR 技術は、映像の視聴覚を通じてリアルな空間を演出する。この視聴覚刺激は視床で感知され、大脳皮質で認識される。その後、大脳基底核による刺激の処理と、大脳辺縁系による情動・感情の処理を経て視床下部に到達し、環境や心理的状态の変化に応じて自律神経系を調節する。従って、VR によるジェットコースター乗車の疑似体験が、視聴覚を通じて緊張感や恐怖感を強めたことで、中枢神経を介して交感神経が活性化されたと考えられる。

Stress VR の視聴によって、HR, esSVI, esCCI の有意な上昇が示された。前述の通り交感神経は、内外の刺激によって活性化され、闘争・逃走反応を誘発し、HR および esSVI を上昇させたと考えられる。また、心係数(Cardiac Index: CI)は、一回拍出量(Stroke Volume: SV)と HR から以下(1)の式

で求められる。

$$CI [L/min/m^2] = \frac{SV [mL/min] \times HR [/min]}{BSA [m^2]} \quad (1)$$

このように、式(1)から CI は、SV および HR に比例することが分かる。従って、esSVI および HR の上昇が、esCCI の上昇に関与したことが考えられる。

血管抵抗は、ストレス反応の影響を強く受ける[12-13]。交感神経の活性化によってノルアドレナリンが分泌され、 $\alpha 1$ 受容体に結合することで血管平滑筋が収縮し、末梢血管抵抗が上昇して末梢血流量は減少する。本研究で活用した PI は、パルスオキシメータから照射される赤外光の透過光信号のうち、全透過光に対する脈動成分の比率を百分率で表した指標である。本研究では、プローブを示指に装着して計測を行ったため、指尖細動脈における局所的な脈動成分および末梢循環を反映している。従って、Stress VR による PI の有意な減少は、交感神経活性によるストレス反応に伴う局所的な末梢血管抵抗の上昇と末梢血流量の減少の影響から、脈動成分が小さくなったことが考えられる。

血圧(Blood Pressure: BP)は、電気工学におけるオームの法則を適用して考えることができ、CI と SVRI を用いて以下の式(2)が成立する。

$$BP [mmHg] = CI [mL/min/m^2] \times SVRI [dyne \cdot sec/cm^5/m^2] \quad (2)$$

このように、式(2)から血圧は、CI および SVRI に比例することが分かる。従って、esCCI の上昇が、血圧(NIBPsys, NIBPdias, NIBPmap)の有意な上昇に関与したことが考えられる。

5. 結論

LF power, HF power, LF/HF, HR, SpO₂, PI, 呼吸数, esSVI, esCCI, SVRI, NIBP といった生理学的指標を用いた客観的評価法は、緊張感をもたらす VR 映像の視聴覚刺激による交感神経の活性化の検出を可能とし、VR 映像の視聴時における心身の状態を把握する手段として有用である可能性が示唆された。

参考文献

- [1] Calvert J, Hume M : Improving student learning outcomes using narrative virtual reality as pre-training, *Virtual Reality*, Vol. 27, No. 3, pp. 2633–2648, 2023.
- [2] Abraham S, Acharya S, Babu J : Technology applications in architecture -A brief review, *Metszet Journal*, Vol. 8, No. 11, pp. 170–181, 2023.
- [3] 総務省 : 情報通信白書, 日経印刷株式会社, 令和 5 年度版, pp. 110–117, 2023.
- [4] Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS : Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, *Int J Aviat Psychol*, Vol. 3, No. 3, pp. 203–220, 1993.
- [5] Davies RS : *Designing Surveys for Evaluations and Research*, EdTech Books, 2020.
- [6] Cannon WB : Bodily changes in pain, hunger, fear, and rage, *JAMA Masthead*, Vol. 93, No. 12, pp. 170–181, 2023.
- [7] Lämsä J, Mannonen J, Tuhkala A, Heilala V, Helovuoto A, Tynkkynen I, Lampi E, Sipiläinen K, Kärkkäinen T, Hämäläinen R : Capturing cognitive load management during authentic virtual reality flight training with behavioural and physiological indicators, *Journal of Computer Assisted Learning*, Vol. 39, No. 5, pp. 1553–1563, 2023.
- [8] Kim H, Kim DJ, Kim S, Chung WH, Park KA, Kim JDK, Kim D, Kim MJ, Kim K, Jeon HJ : Effect of Virtual Reality on Stress Reduction and Change of Physiological Parameters Including Heart Rate Variability in People With High Stress: An Open Randomized Crossover Trial, *Front Psychiatry*, 12:614539. doi: 10.3389/fpsyt.2021.614539. PMID: 34447320; PMCID: PMC8384255, 2021.
- [9] Anderson AP, Mayer MD, Fellows AM, Cowan DR, Hegel MT, Buckley JC : Relaxation with Immersive Natural Scenes Presented Using Virtual Reality, *Aerosp Med Hum Perform*, Vol. 88, No. 6, pp. 520–526, 2017.
- [10] Malik M, Bigger JT, Camm AJ, Kleiger RE, Malliani A, Moss AJ, Schwartz PJ : Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, *European Heart Journal*, Vol. 93, No. 5, pp. 354–381, 1996.
- [11] Sugo Y, Ukawa T, Takeda S, Ishihara H, Kazama T, Takeda Z : A Novel Continuous Cardiac Output Monitor Based on Pulse Wave Transit Time, *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010: 2853-6, 2010.
- [12] Navar LG : Physiology: hemodynamics, endothelial function, renin-angiotensin-aldosterone system, sympathetic nervous system, *J Am Soc Hypertens*, Vol. 8, No. 7, pp. 519–524, 2014.
- [13] Sheng Y, Zhu L : The crosstalk between autonomic nervous system and blood vessels, *Int J Physiol Pathophysiol Pharmacol*, Vol. 10, No. 1, pp. 17–28, 2018.