



# 生理指標を用いた VR 空間と実空間の空間デザインによる 影響の比較

Comparison of the effect of space design between  
VR space and real space using physiological indexes

小林鷹智<sup>1)</sup>, Jadram Narumon<sup>1)</sup>, 菅谷みどり<sup>1)</sup>  
Takato KOBAYASHI, Narumon JADRAM, and Midori SUGAYA

1) 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 基盤システム研究室 (〒135-8584 東京都江東区豊洲 3-7-5, doly@shibaura-it.ac.jp)

**概要:** 近年, 空間デザインの現場では, 経済性の観点で空間評価に VR が用いられる. しかし, VR 空間を見た後に実空間をみると, 空間を見た時の印象や影響といった, 受ける影響が異なることがある. 空間の用途に適したデザインを考える際, 実空間と VR 空間から受ける影響の差を把握することが重要だと考えられる. しかし, VR 空間, 実空間から受ける影響の差は十分明らかではない. そこで本研究では, VR 空間と実空間の影響の差を明らかにすることを目的とする. 目的実現のため, 脳波・心拍指標を用いて VR 空間と実空間を見た際に受ける影響の差を評価する.

**キーワード:** 知覚, 感情, 脳

## 1. はじめに

### 1.1 背景

バーチャルリアリティ (VR) は, 現実に近い体験を可能にするとされる[1]. 近年では, VR を用いた空間の評価が行われる場合がある. VR 空間のモデルルームの体験では, デザインの途中段階で壁の色や家具など, 空間の要素を簡単に変更し評価することができる. このことから, 実際に建築するより, VR 空間の方が少ないコストで, 最適なデザインを選択, 評価できる. このように, VR を用いることで, 建設前の空間の評価が可能となり, 評価を参考に実空間を作ることが可能だと考えられる.

一般的に, 空間をデザインする際は, 用途に合わせた設計と利用者の感情を考慮した快適さが重要だと考えられる. 空間をデザインする際, 利用者が空間を見た時の感情, 印象が, 空間の目的に合っているか評価することで, 空間のデザインが用途に適しているか評価できる.

例えば, 学習塾の自習室は, 学生が勉強することを目的とした空間である. この場合, 勉強に集中できるようなデザインを設計するのが望ましいと予想される. しかし, 例えば, VR 空間では落ち着く, 実空間だと緊張する, といったように, VR 空間, 実空間それぞれで, その空間を見た時の空間から受ける印象や感情などに差がある可能性がある. この場合, 実空間の設計前に, VR 空間を用いてデザインした空間を評価する場合, 空間の用途に適しているか評価するには, VR 空間と実空間の差を把握しておく

必要があると考えられる.

### 1.2 先行研究・課題

VR 空間と実空間の印象の差を検討するため, VR 空間の評価を行った研究を調査した. Athif らは, 脳波を用いて, VR 空間を見る際の臨場感を評価した[2]. また, 藤木らは, 臨場感が上がるにつれ, その場にいるような感覚・印象があることを明らかにした[3]. しかし, 実際の空間との比較や差分については議論されていない. また, 何かしらの事柄に抱いた印象が大きいほど, 記憶に残りやすいことが知られている[4]. このことから, VR 空間と実空間を見た際の印象が異なるなら, 記憶への影響にも差が生じると考えられる. さらに, VR 空間は, 実空間と異なる空間知覚, 疲労が生じるという報告があった[5]. この疲労により, 空間に対する印象に影響を与える可能性がある. また, VR 空間を見た時の感情を評価した研究に, 横井らの研究がある[6]. 横井らは, 形容詞を用いて, 空間の印象や空間内での気分などの感性的側面について主観評価を行った. 結果として, VR 空間と実空間では有意に差があることを示した. しかし, 空間の印象の差を引き起こす要因は明らかではない. また, 要因が明らかでないため, 空間内にある要素が引き起こす差も十分明らかでない.

### 1.3 目的・提案

本研究では, 実際にある空間デザインと, それを再現した VR 空間から受ける影響の差を明らかにすることを目的とした. 目的達成のため, 影響の差を引き起こすと考えら

れる要因を文献により調査した。この調査結果から、先行研究においては臨場感[2]、記憶[4]、視覚[5]、感情[6]が VR 空間の評価に用いられていることがわかった。しかし、これらの研究では、同一の VR 空間と実空間の差については調査をしておらず、その差は明らかではない。このことから、本研究では、VR 空間と実空間の臨場感、記憶、視覚、感情を比較し、その差について議論するものとした。

評価について、臨場感、記憶、視覚は、先行研究を参考に脳波を用いた。感情について、生理指標を用いた感情評価手法を用いた[7]。さらに、先行研究を参考に、Semantic Differential Method (以下、SD 法) [8]によるアンケート調査を行う。実験では、実空間と、その実空間を VR 空間で再現したものを用いて評価を行い、議論するものとした。

## 2. 評価手法

### 2.1 生理指標による評価

本研究は VR 空間、実空間を見た際の臨場感、記憶、視覚、感情を評価するため、生理指標である脳波指標、心拍変動指標を用いる。各指標について次に述べる。

#### 2.1.1 脳波指標

本研究で用いた脳波の周波数帯域と解釈を表 1 に示す。

空間を見た際の臨場感への影響を調査するため、 $\theta$  波を比較した[4]。さらに、記憶への影響の調査のために  $\text{mid } \gamma$  波を、視覚への負荷を調査するために  $\text{low } \gamma$  波を用いた[9]。空間を見た際の集中力の指標として、白岩らの研究[10]を参考に、 $\text{Low } \beta / \text{Low } \alpha$  を覚醒度の評価として使用した。

本研究では、国際 10-10 法に基づいて前頭葉のある電極 AF3、AF4、後頭葉のある電極 Oz の脳波を計測した [11,12]。

分析の際、脳波のノイズ除去のために外れ値除去を行った。外れ値除去の方法として、脳波データの標準偏差 ( $\sigma$ ) を求め、 $3\sigma$  を越えるデータを補正するものとした。

表 1: 各周波数の範囲の解釈[4,9,13]

タイプ	周波数帯域	関連のある処理、能力
$\theta$ 波	4-7 Hz	臨場感、認知処理、課題遂行能力
$\text{Low } \alpha$ 波	8-9 Hz	リラックス、平穩、意識的
$\text{Low } \beta$ 波	13-17 Hz	思考、自己及び環境の認識
$\text{Low } \gamma$ 波	31-40 Hz	知覚などの認知現象
$\text{Mid } \gamma$ 波	41-50 Hz	ワーキングメモリーや学習能力

#### 2.1.2 心拍変動指標

心拍変動指標は、副交感神経指標として使われる pNN50 を用いた[14]。pNN50 は、隣り合う心拍間隔の差が 50 ミリ秒を超える回数の割合である。この値が大きいくほど副交感神経が優位、快適とし、値が小さいほど不快と解釈する。

### 2.2 感情評価

本研究では、空間を見た際の感情を客観的に評価するため、Russel の円環モデルをベースとし、脳波と心拍変動による感情評価手法を用いる[7]。Russel の円環モデルは、縦軸に「覚醒—眠気」の覚醒度、横軸に「快—不快」の快適度を表す 2 軸を取り、感情を可視化できる [15]。

感情の評価は、脳波と心拍変動の生理指標により、感情を中枢神経、自律神経から測ることができ、客観的に評価が可能である。さらに、可視化手法として、上野らが提案した感情マップを用いた[7]。感情マップは、心拍変動指標による快不快度を X 軸、脳波指標による覚醒度を Y 軸に対応付け、得られた位置情報を Russel の円環モデル上にプロットする。これにより、各刺激による感情への影響を、2 次元座標で表現できる。感情マップでは、原点を安静時の平均から取り、原点からの距離と方向で想起された感情を可視化することができる。感情マップは 4 つの象限があり、それぞれ第 1 象限が「喜」、第 2 象限が「怒」、第 3 象限が「哀」、第 4 象限が「楽」感情と解釈する。

### 2.3 主観評価

主観評価として SD 法によるアンケートを用いた。SD 法は、反対の意味を持つ形容詞対を複数用意し、対象を評定する方法である[8]。本研究では、空間に対する印象を表現すると予想される形容詞対として、「好きな-嫌いな」「落ち着いた-落ち着いた」「美しい-汚い」「派手な-地味な」「緊張した-緩んだ」「心地いい-不快な」「上品な-下品な」「涼しい-暖かい」「感動的な-平凡な」「狭い-広い」を用いた。

## 3. 実験

本実験の目的は、同一空間における実空間と VR 空間が臨場感、記憶、視覚、感情に与える影響を比較することである。目的達成のため、VR 空間と実空間を見た際の反応を、脳波と心拍変動の生理指標と、SD 法によるアンケートで評価する。実験協力者は健康な成人男女 42 名（男性 29 名、女性 13 名）である。

本実験では、VR を見る Head Mount Display (HMD) に Meta Quest2、脳波計は OpenBCI 社の Ganglion Board、心電計は Uniontool 社の MyBeat を用いた。

実験では 4 種類の空間を使用した。刺激は実空間と VR 空間があり、実空間は株式会社乃村工藝社の部屋を使用した。VR 空間は、実空間を 3D で再現したものを用いた。場所に関わらず同様の結果が再現するか確かめるため、計測場所を 2 か所選択し、計測地点 1、計測地点 2 として実験を行った (図 1)。



図 1: 実験に用いた 4 種類の空間

実験手順を図 2 に示す。安静、刺激の空間は、順序効果を考慮し、VR 空間、実空間をランダムに呈示した。安静の空間は、各刺激空間が見えないよう、パーテーションを

配置したものを用いた。計測時は、体動によるノイズ混入を防ぐため、ゆっくりと刺激空間を観察するよう指示した。

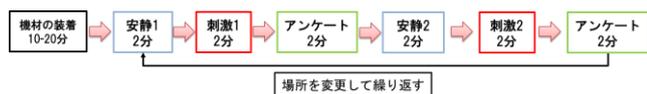


図 2: 実験手順

## 4. 実験結果

### 4.1 臨場感、記憶、視覚の評価

刺激時間は2分間だが、空間を見た直後に明確な反応が現れることが予想される。そのため、各空間を見る時の前半1分間の平均値を算出した。その後、各計測地点でVR空間と実空間の脳波指標を比較し、対応があるサンプルのt検定を行った。

**臨場感**：まず、空間を見る際の臨場感への影響を調査する。知的活動を担う前頭葉に着目し[12]、電極 AF4 の  $\theta$  波の平均値を求め、比較した。結果として、計測地点 1, 2 の両方とも有意差はなかった。 $\theta$  波は認知処理と関連があると報告されている[12]。結果について、「空間を見る」という認知行為による影響だと考察した。

**記憶**：記憶への影響を調査するため、mid  $\gamma$  波の平均値を比較した (図 3)。知的活動を担う前頭葉に着目し[12]、電極 AF4 の mid  $\gamma$  波を用いた。結果として、計測地点 1, 2 の両方で VR 空間が有意に大きい値を示した。mid  $\gamma$  波はワーキングメモリー、学習と関連があることから[9]、VR 空間の方が学習能力が働く可能性がある。さらに、実空間より学習能力が働き、より記憶に残る可能性もある。

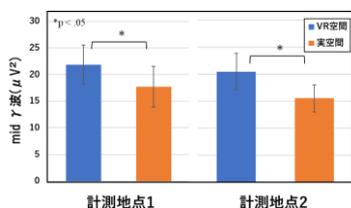


図 3: Mid  $\gamma$  波の平均

**視覚**：先行研究[9]にならない、視覚情報の処理、認知処理と関係のある low  $\gamma$  波の結果を示す (図 4)。視覚野のある後頭葉に着目するため[12]、電極 Oz での low  $\gamma$  波の平均値を求めた。結果として、計測地点 1, 2 の両方とも、VR 空間の方が有意に大きかった。結果から、計測地点に関係なく、VR 空間の方が視覚への負荷が大きいと考えられる。

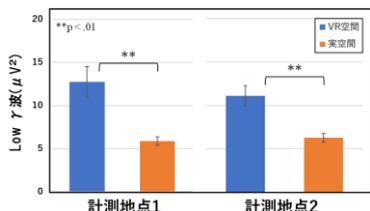


図 4: Low  $\gamma$  波の平均

### 4.2 感情マップの結果

先行研究[7]にならない、取得した脳波指標の low  $\beta$  / low  $\alpha$  と、心拍変動指標の pNNS50 を用い、感情マップを作成した。脳波指標について、実験協力者で値が大きく異なるため、ロバスト z スコアを用いた正規化を行った。全体の傾向を見るため、各空間における 40 名の感情マップを作成した。全員の感情マップの平均値は図 5 に示す。

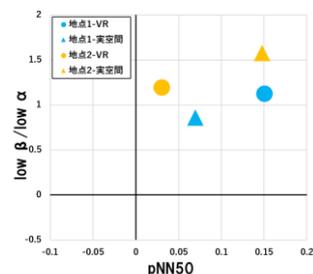


図 5: 各空間の平均による全員の感情マップ

図 5 から、どの空間も高覚醒、快適を示した。計測地点 1 では、VR 空間の方が覚醒度、快適度について実空間より大きな値となった。計測地点 2 では、実空間の方が覚醒度、快適度が VR 空間より大きいことを示した。

次に、各計測地点で VR 空間、実空間を見た時の感情マップを示す。図 6 は計測地点 1 の結果である。VR 空間について、覚醒度は原点周辺から、原点より高い位置にプロットされていた。快適度は、実空間と比較し、原点周辺に集まった。実空間について、覚醒度は VR 空間より分散が小さく、快適度は VR 空間より分散が大きかった。

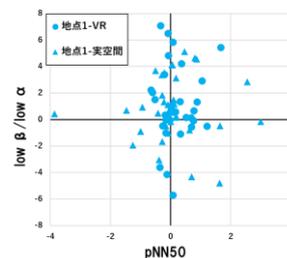


図 6: 計測地点 1 の VR 空間、実空間の感情マップ

次に、計測地点 2 の感情マップを図 7 に示す。VR 空間について、覚醒度は負の範囲から正の範囲まで広くプロットされた。快適度について、原点の周辺に集まる傾向がある。実空間と比較すると、快適度の分散は実空間より小さく、覚醒度の分散は実空間より大きくなった。

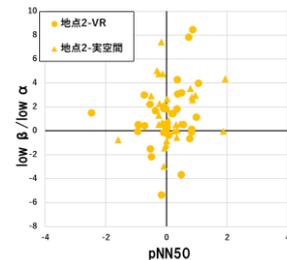


図 7: 計測地点 2 の VR 空間、実空間の感情マップ

### 4.3 SD 法による印象の比較

SD 法について、VR 空間と実空間の印象を比較するため、計測地点 1, 2 で形容詞対毎の平均値を算出し、VR 空間と実空間について、対応のあるサンプルの t 検定を行った (図 8)。結果として、計測地点 1 では「好きな-嫌いな」「派手な-地味な」「涼しい-暖かい」「感動的な-平凡な」形容詞対で有意差が見られた ( $p < 0.05$ )。計測地点 2 では、「好きな-嫌いな」「落ち着かない-落ち着いた」「美しい-汚い」「緊張した-緩んだ」「心地いい-不快な」「涼しい-暖かい」「感動的な-平凡な」形容詞対で有意差が見られた。どちらの計測地点でも、実空間と比較して VR 空間の方が「嫌いな」「涼しい」「平凡な」印象を与えた。

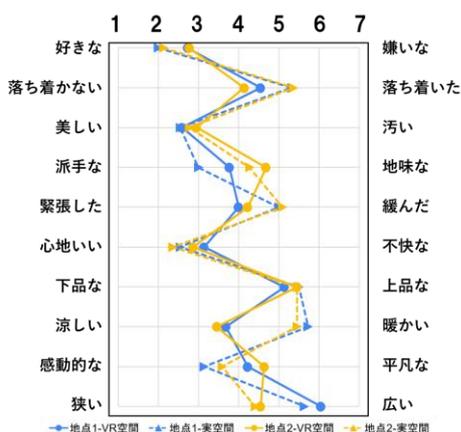


図 8:計測地点 1, 2 における形容詞対毎の平均値

## 5. 議論

### 5.1 感情

感情マップの結果 (図 5) を見ると、どの空間も高覚醒、快適にプロットされた。このことから、「空間を見る」行為によって高覚醒、快適になったと考察した。各計測地点の感情マップ (図 6, 図 7) に注目すると、どちらの計測地点でも VR 空間の覚醒度について、最大値は実空間より大きく、最小値は実空間より小さかった。このことから、個人差はあるが、VR 空間は実空間と比較し、空間を見た際の覚醒度への影響が大きく表れると考えた。快適度について、どちらの計測地点も、実空間の方が最大値は大きく、最小値は小さかった。このことから、実空間は VR 空間と比較し、快適さへの影響を受けやすいと考察した。また、各地点の平均値による感情マップの結果を見ると、どの空間も快適を表している。このことから、快適度が正の方向に分散が大きく、実空間の方が快適を示す傾向があると考えた。実験協力者 42 名に VR の使用頻度を質問すると、9 割以上が「ほとんど使わない」「使ったことがない」と回答した。このことから、初めて、久しぶりに VR を体験したため、普段と違う刺激を受け、緊張のような感情により、覚醒度が上昇したと考察した。

### 5.2 主観評価

SD 法の結果 (図 8) では、計測地点 1, 2 で 3 つの同じ形容詞対において有意差が見られた。また、計測地点 2 で

VR 空間は実空間より「落ち着かない」「緊張した」印象を与えた。この結果について、実験協力者が VR 空間に見慣れておらず、この影響が特に計測地点 2 で顕著に表れたために違和感が生じたと考察した。また、VR 空間は「平凡な」印象を与えた。この結果について、VR 空間は実空間と比較し、物の質感の精密さなど、情報量に欠けると予想される。この情報量の欠如により、実空間より「平凡な」印象を与えたと考察した。また、VR 空間について「色や材質の影響で作り物のようだった」との意見を多く聞いた。このことから、VR 空間は一目で作り物だと判断され、結果に影響を与えたと考えられる。

## 6. まとめ・今後の課題

本実験では、実空間と VR 空間が臨場感、視覚、記憶、感情に与える影響の違いを明らかにするため、脳波・心拍変動の計測を行った。VR 空間と実空間を見た際の影響について仮説を立て、生理指標を用いて比較した。

今後について、視覚へ作用すると予想される、VR 空間のテクスチャを実空間に近づけ、有意な差が出た指標について、空間のどの要素が影響を与えるか調査を行う。

### 謝辞

今回の研究のきっかけとなった乃村工藝社 (株) の鈴木和博様、江藤忠邦様、宮坂清佳様を始めとしたチームの皆様から、研究結果の解釈といったアドバイス、実験に用いる実空間と VR 空間を提供いただき、深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] 日本バーチャルリアリティ学会, バーチャルリアリティとは, 2012/01/13, <https://vrj.org/about/virtualreality/>, (2023 年 12 月 27 日参照)。
- [2] M.Athif, et al, Using Biosignals for Objective Measurement of Presence in Virtual Reality Environments, EMBC, 2020.
- [3] 藤木卓 (ほか), VR コンテンツの精度が現実感と酔いを与える影響, 日本教育工学会論文誌, 36 巻, p.73-76, 2012.
- [4] 比治山大学社会臨床心理学科, 知覚・認知心理学 9 記憶の特性(1), [https://maruhi-lab.com/chikakuninchi/?page\\_id=771](https://maruhi-lab.com/chikakuninchi/?page_id=771) (2024/02/27 参照)
- [5] 山本伸樹, 仮想空間内の奥行知覚に及ぼす両眼視差と運動視差の効果, 千葉大学人間生活工学研究室修論概要, 2000.
- [6] 横井梓, 斎藤美徳, VR 空間における心理的影響の評価に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 683 号, p1-7, 2013.
- [7] 上野翔太, 張潤青, 菅谷みどり, 脳波・心拍変動から算出した感情マップによる音楽聴取の評価, 第 22 回感性工学会大会, 2020.
- [8] Osgood, C.E., Suci, G.J., and Tannenbaum, P.H. "The Measurement of Meaning", University of Illinois Press, 1957.
- [9] Kai Yang, et al, High Gamma Band EEG Closely Related to Emotion: Evidence From Functional Network, Frontiers in Human Neuroscience, 2020, Volume 14, Article 89, p1-12.
- [10] 白岩 玄気, 菅谷 みどり, ロボットの声かけによる学習意欲向上検証理論解析による定量的評価, 信学技報, vol. 119, no. 446, CNR2019-45, pp. 1-6, 2020.
- [11] File:EEG 10-10 system with additional information.svg, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:EEG\\_10-10\\_system\\_with\\_additional\\_information.svg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:EEG_10-10_system_with_additional_information.svg) (2024/05/06 参照)
- [12] 脳の構造と働き (機能), <https://www.schrr.jp/cms/wp-content/uploads/2021/03/e7916daa4f9771ccea720101b09b05b7.pdf> (2024/1/30 参照)
- [13] Enriquez-Geppert S, et al, Self-regulation of frontal-midline theta facilitates memory updating and mental set shifting, Frontiers in Behavioral Neuroscience, 2014, Volume 8, Article 420, p1-8.
- [14] 高瀬凡平, 心拍変動でなにがわかるか, 日本集中治療医学会雑誌, 12 巻, 2 号, p.89-92, 2005.
- [15] James A. Russell, "A Circumplex Model of Affect", Journal of Personality and Social Psychology, Vol.39, No.6, pp.1161-1178, 1978