

VR建設現場の体験評価のための生理的指標の 簡易モニタリング手法に関する基礎的研究

位 田 達 哉^{*1}・三 上 可 菜 子^{*2}

Fundamental Study on a Simple Monitoring Method of Physiological Indicators for Evaluation of VR Construction Site Experience

Tatsuya Inden^{*1} and Kanako Mikami^{*2}

Abstract: The purpose of this study is to investigate the method of simple monitoring of physiological indicators for evaluation regarding the experience of VR construction site simulators, in order to obtain physiological indicators simply and without any hindrance to the VR experience. The biometric device conditions were examined through experiments on subjects. The results are as follows.

- (1) α , β , and γ waves could be easily measured using a wireless meditation device. Heart rate and R-R interval were also easily measured using a chest heart rate sensor.
- (2) Wireless meditation device had a problem with measurement involving movement, but this problem was alleviated by fixing the device with a hair band.
- (3) The chest heart rate sensor and optical heart rate monitor could be used together to verify the heart rate. The optical heart rate monitor was unnecessary if the chest heart rate sensor was worn because of its overlapping functions.

Key words: Electroencephalogram, Heart Beat, R-R Interval, Physiological Indicator, VR Construction Site

1. 緒 論

近年、大学中途退学者の増加が進み、修学意欲喪失を退学理由とするケースが顕著となってきている。修学意欲を促す教育環境の構築が急務となっているなか、著者は精神科医との共同研究で、建築材料施工に関する修学の実態を把握するため、NLP（Neuro Linguistic Programming；神経言語プログラミング）を基にした建築系大学生へのアンケートを考案・実施した^{1) 2)}。その結果、身体感覚を優位に認知させることが学生の興味を惹き、修学意欲を高められることから、大学中途退学者を抑制させるための学修方法として、体験型授業が有効であることを見出した。建築材料施工の分野では、この体験型授業のひとつに建設現場の見学が挙げられるが、建設現場は危険が多いことから、学生は自由に歩き回ることにはできず、安全が確保された動線においての見学に限られる。事故や不具合などに関する緊急対応を目の当たりにすることができれば、現場力を高めるための貴重な経験になり得

るはずであるが、学生の危険を顧みない見学・体験ができるような機会を設けることは、教育・安全の観点から許されるものではない。そこで著者は、VR上に仮想の建設現場を作成し、そこで不安全行動や労働災害を仮想的に体験させることで、従来なし得なかった革新的な体験型学修ができると考え、労働災害の仮想体験を目的としたVR建設現場シミュレータ（図1）を開発している³⁾。

ここで、このVR建設現場シミュレータを大学の授業で活用するためには、体験に対する適切な評価が求められる。すなわち、VR体験という第三者が観察できない

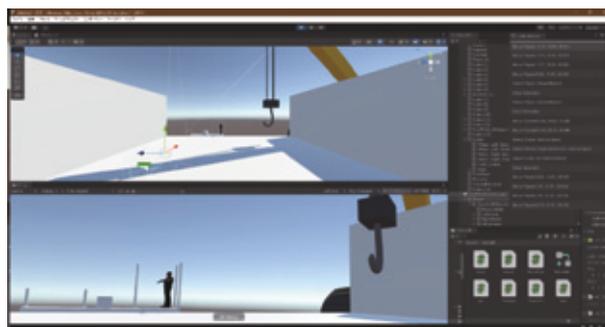


図1 VR建設現場シミュレータ（労働災害体験）

^{*1} 理工学部理工学科建築学系、准教授

^{*2} 工学研究科、特任助教・博士（工学）

行動に対する計測として、時間経過を追った解析ができ、それが物理量として定量化できるような方法が必要である。著者らは、このVR体験時の計測方法として、脳波や心拍といった生理的指標を用いることで、被験者の学修効果や意欲の変化を客観的に評価できるのではないかと考えている。集中して視聴していれば、例えば急な事故の発生で驚くはずであり、その驚きは脳波や心拍に少なからず影響を及ぼす。例えば山家ら⁴⁾は、VR体験時の心拍変動に関して、ジェットコースターのような恐怖感を煽るソフトウェアによるバーチャルリアリティは、交感神経系の緊張度を増大させる可能性を示唆しており、この生体反応を脳波計測や心拍計測してリアルタイムモニタリングできれば、集中の度合いを計る指標となり得る。建築生産の分野における生体情報の活用に関しては、例えば赤川ら⁵⁾は、建設現場の作業員の体調管理のために心拍数をはじめとするバイタルデータを用いた管理を試みているが、熱中症対策に限った体調管理に留まっている。現状では、建設現場や建築施工教育としての評価ツールとしての脳波および心拍の活用は、十分であるとは言い難い。

本研究は、VR建設現場シミュレータの体験に対する学修評価をするための生理的指標の簡易モニタリング方法の確立を目的とし、本論文では、HMD (Head Mount Display; 頭部装着ディスプレイ) によるVR体験中の計測を想定し、支障なくVR体験ができるだけでなく、簡易に生理的指標を取得するための生体情報デバイスの選定とその手順について検討した。

なお、本研究は国士館大学“人を対象とした研究に関する理工系倫理評価委員会”の承認を受けて実施したものである (R3-005)。

2. 安価なデバイスを用いた脳波・心拍の計測

2.1 目的

はじめに、安価な機器を用いた簡易な生理的指標の計測方法について検討した。本論文では、精密な脳波情報を取得するよりも、被験者の負担を軽減し、また気軽に普段のペースで自然に行うことができ、結果として再現性を高めることを趣旨とした。すなわち、教室での複数人被験や自宅学習としての運用も視野に入れ、安価かつ簡便に計測できることに軸足を置いた。

2.2 生体情報デバイスの選定

2.2.1 選定の基準

生体情報の計測項目は、脳波、心拍数、呼吸数、発汗、唾液、瞳孔径、酸素消費量、筋電などが挙げられる。本研究では、HMDによるVR視聴中の労働災害の仮想体験をリアルタイムで検知できる計測方法を選定する必要があり、以下の理由により、脳波および心拍数を計測するのが適しているものと考えた。

心拍数は、血圧と高い相関がある⁶⁾とされており、心拍数を測定しておくことで、血圧の代用特性となり得ると考えられる。また、唾液や瞳孔径の計測は、HMDと併用した計測が難しい。さらに、酸素消費量や筋電は動作そのものを計測するものであり、VR上でのスポーツや肉体労働の仮想体験が趣旨ではないため除外した。

以上より、生体情報として脳波および心拍を選定した。

2.2.2 脳活動計測

脳活動を把握するための手法として、機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI)、ポジトロン断層法 (PET)、脳磁図 (MEG)、近赤外光トポグラフィ (NIRS) といった脳のイメージング技術が使用されている。その中でもNIRSは他の方法よりも計測環境と比較して制限が少なく、リハビリテーションやスポーツなど、動きを伴う際の脳活動計測手法として研究が進められている。医療機関で実施される臨床検査が厳密な計測のために頭部を固定して安静にした状態で脳波を計測するのは対照的に、近年ではNIRSの無線化も試みられており、例えば、簡易な動作計測に用いられている事例^{7) 8)}もあるが、計測精度は十分であるとは言い難い。また、国際10-20法 (JIS T 1203) に基づく電極配置での計測では、図2のようにNIRSとHMDとの干渉は避けられない。また、一般的なNIRSは有線型のものが多いことから、ケーブルがVR体験を少なからず妨げ、そのストレスから脳波への影響が懸念される。さらに、計測機器そのものが高価であるため、大学生が身近に教育教材として用いることが難しいなど、HMDを装着したVR体験中において、脳活動計測のためにNIRSを併用するには課題が残されている。

そこで本論文では、NIRSに代わる脳活動計測デバイスとして安価な無線型瞑想デバイス (I社製Muse2) を用い、VR体験時における簡易脳波計としての適用可能性について検証した。

本デバイスの脳波電極位置は国際10-20法に基づくAF7、AF8、TP9およびTP10であり、脳活動 (EEG) を前額部のEEGセンサにより検出可能であるほか、心拍数 (PPG+パルスオキシメータ)、身体の動き (ACC) および呼吸 (PPG+Gyroscope) のセンサを有している。



図2 脳波計 (国際10-20法) およびHMDの装着状況

本デバイスはHMDの下に装着することができ、互いに物理的な干渉がないことを確認している。これらのデータはBluetoothによる無線接続でリアルタイムに取得することができ、特にEEGはFFT解析により α , β , γ , δ , θ 波への分離が可能である。

2.2.3 心拍計測

心臓の電気的活動を図にしたものを心電図と呼ぶ。心電図は、安静時心電図と心臓に負荷をかけた後で計測する負荷心電図、日常生活のなかで心電図変化を調べるホルタ心電図などに分類できるが、いずれも医療機関で実施される臨床検査は日本産業規格（JIS T 1304, JIS T 60601-2:47）に準じた厳密な計測であり、その計測機器も高額なものとなる。その一方で、生体工学の分野では心拍変動がストレスを簡便に計測できる指標⁹⁾として研究が重ねられており、医学や生理学とは一線を画し、スポーツトレーニングのほか、建築や自動車などの心地良さや精神的負担の評価^{10) 11)}などにも応用されている。加えて、活動量計として心拍数などの機能を有するウェアラブル端末¹²⁾なども市販されはじめて久しく、個人が身体管理のために使用するなど、心拍計測デバイスは多くの選択肢を有するようになってきている。

このように、心拍計測は人間を対象とした動作の定量的評価に活用されている一方で、建築生産における作業者の能率測定では、石岡¹³⁾の指摘のように、1990年に発行された作業能率測定指針¹⁴⁾に定められたストップウォッチを片手と記録紙でアナログに作業を記録する作業能率分析から現在に至るまで大きく進展していない。

そこで、本論文ではスポーツ競技のトレーニング用に開発された無線型胸心拍センサ（P社製H10）および無線型光学式心拍モニタ（P社製Verity Sense）を併用し、VR体験時における心拍計測ができることを確認した。

胸心拍センサでは、心臓の電気的活動（ECG）を計測し、心拍数およびR-R間隔を計測した。同時に、光学

式心拍モニタでは、光電式容積脈波記録法（PPG）に基づいた光学式心拍数計測（OHR）を計測した。

2.3 計測の方法

被験者は、21歳女性の国土館大学理工学部学生1名を対象とした。安静時における主な身体計測データを表1に示す。現在治療中の疾患はなく、心身共に健康状態が良好の者を対象とした。気分プロフィール検査（日本語版POMS2全項目版）を実施し、気分状態を判定したところ、総合的な気分状態は「平均的」であった。

なお、本論文では被験者が1名のため、計測データに偏りがある可能性がある。現在、被験者を増やして実験を進めており、本論文の結果を精査する予定である。

被験者には情報デバイスを装着させ、椅子に10分間着席させることで安静を保たせた。計測は、目を閉じた場合と目を開けた場合に分け、脳波および心拍を1分間計測した。生体情報デバイスとその装着状況を図3に示す。胸心拍センサは撮影のために模式的に服の上に装着しているが、実際の計測では皮膚に接触させて計測した。

表1 被験者の生理的情報（21歳女性・安静時）

測定項目	平均値	中央値
身長 [cm]*	159.3	159.3
体重 [kg]	53.8	—
最高血圧 [mmHg]*	102.7	103.0
最低血圧 [mmHg]*	59.7	59.0
体温 [°C]*	36.4	36.4
脈拍数 /min*	55.3	56.0
呼吸数 /min*	16.7	16.0

【注】*：平均値および中央値は、3回測定して算出した。



a. 使用した生体情報デバイス



b. デバイス装着時の被験者

図3 生体情報デバイスおよび装着の様子

2.4 計測の結果および考察

2.4.1 脳波計測

着席時において目を閉じた時と目を開いた時の脳波の状況を図4に示す。目を開くことで視覚情報が增加することから α 波の脳波成分比率(α 波出現率 [%])が23.5 [%] から16.2 [%] に低下した。また、 γ 波が増加する傾向があり、目を開けたことで目を閉じた時よりも脳神経活動が活発化する状態を本機で確認できた。

2.4.2 心拍計測

A. HR (心拍数) およびR-R間隔

着席した安静時において、胸心拍センサで計測した心電図から得た心拍数 (HR) およびR-R間隔を図5に示す。HRとR-R間隔は脳波の場合と異なり、目を閉じた場合と開いた場合のいずれの場合においてもHRは62～69 [bpm], R-R間隔は836～1056 [msec.] で推移しており、大きな差異は認められなかった。

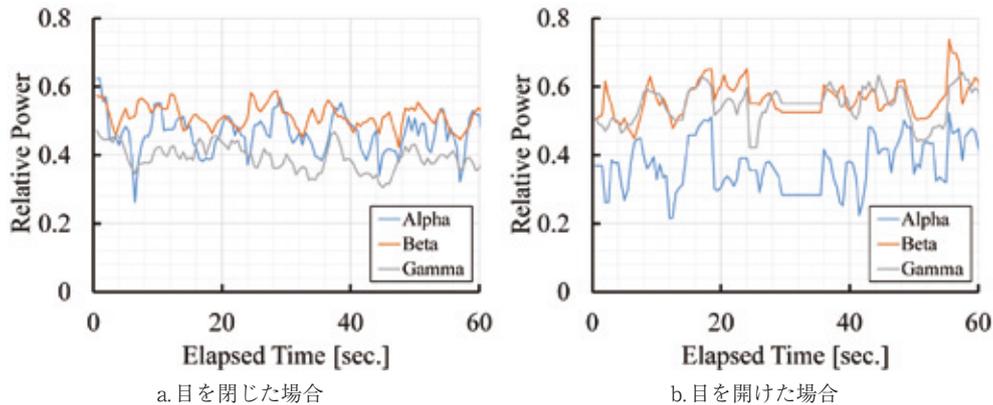


図4 被験者着席時の脳波

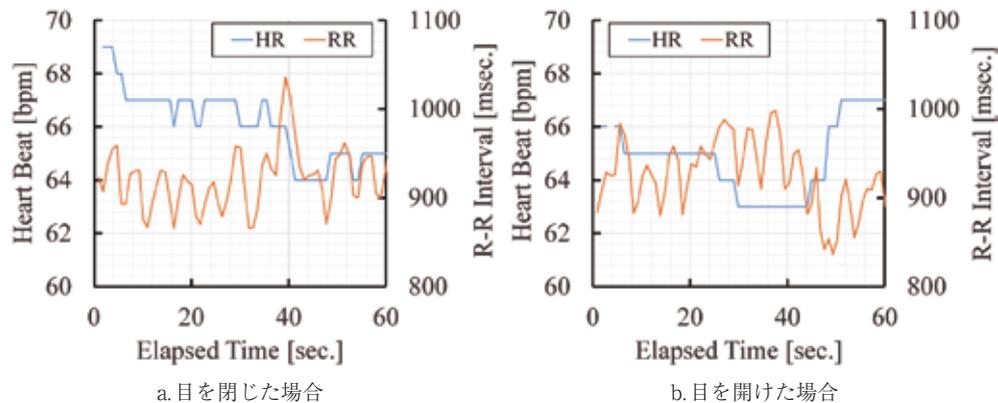


図5 着席時のHRおよびR-R間隔

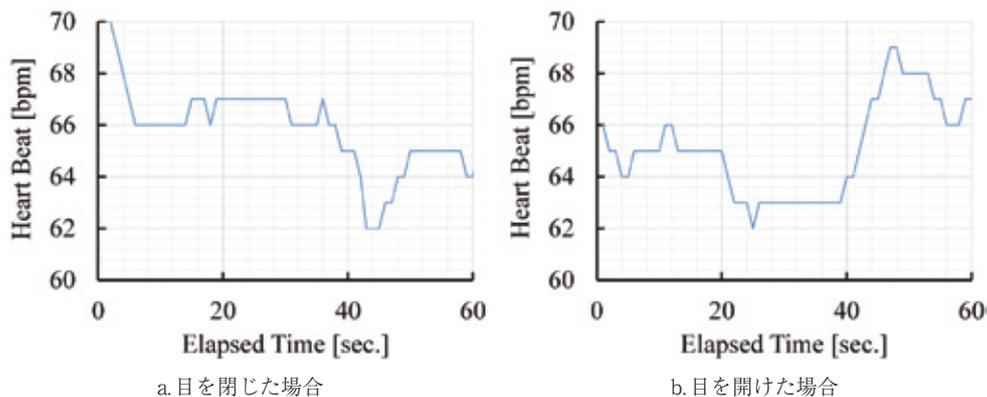


図6 被験者着席時のOHR

B. OHR (光学式心拍数)

着席した安静時において、光学式心拍モニタで計測した心拍数を図6に示す。計測値は、図5とほぼ同値となる62~70 [bpm] で推移しており、図5の心拍変動と概ね同じ概形を描いた。すなわち、腕に巻くだけで装着が簡便なOHRの適用可能性が示唆される。しかし、本機はその仕様上、R-R間隔を直接計測できないため、心拍数とR-R間隔を同時に計測できる胸心拍センサが望ましい。光学式心拍モニタの用途としては、装着が簡便であることから、胸心拍センサで取得したデータの検証に利用できるものと考えられる。

2.4.3 生体情報デバイスに関する考察

安静時の脳波は、ノイズを含んでいるものの、 α 、 β 、 γ 波を簡易に取得できることを確認した。また、安静時の心拍は、心拍数およびR-R間隔を簡易に取得できた。

心電図は波形の詳細を読み取ることで多くの情報を得られるが、簡易的に評価するには心拍数とR-R間隔がわかれば十分であると判断した。また、光学式心拍モニタは非常に簡便に装着できるが、現行機種では心拍の計測のみとなるため、以降は扱わないこととした。

以上より、本研究においては、無線型瞑想デバイスを用いて脳波(α 、 β 、 γ 波)、胸心拍センサを用いた心拍(心拍数およびR-R間隔)を計測することとし、これら3つを簡易な生理的指標として扱う方針とした。

3. VR体験を想定した脳波・心拍の計測

3.1 目的

VR体験時に想定される動作に対し、前章で定めた計測方法で、脳波(α 、 β 、 γ 波)、心拍数およびR-R間隔が計測可能であることを検証した。

3.2 計測の方法

前章と同様の被験者1名に対し、前章で用いた無線型瞑想デバイス(I社製Muse2)および無線型胸心拍センサ(P社製H10)を装着させた。

VR体験時の動作を想定し、足踏み(2Hz:記号W)、駆け足で足踏み(3Hz:記号R)、真上にジャンプ(2Hz:記号J)をそれぞれ実施したときの脳波(α 、 β 、 γ 波)、心拍数およびR-R間隔を計測した。

特に脳波計測については、被験者の動作によって瞑想デバイスの探触子位置がずれて計測不可となる可能性があったため、ヘアバンドでデバイスを押さえ込んで固定した場合も合わせて実施してこれらを比較した。

3.3 計測の結果および考察

3.3.1 脳波計測

図7は、それぞれの動作における α 、 β 、 γ 波の計測結果をヘアバンドの有無に分けて整理したものである。

ヘアバンドによるデバイスの固定が脳波に及ぼす影響は、デバイスのみの場合では、足踏み以上の激しい動作では脳波が取得できなかったが、ヘアバンドで固定することで3Hzの駆け足でも脳波を取得できた。無線型瞑想デバイスを装着した被験者にHMDを装着させてVR体験をさせた予備実験では、被験者の身体の動きによりデバイスがずれて脳波が検出できなくなる場合が散見されたため、ヘアバンドを装着させることによってVR体験時の脳波計測の精度を高める効果が期待できる。

ヘアバンドの有無が脳波に与える影響を確認するため、2Hzの歩きを比較すると、ヘアバンドなしの α 波の脳波成分比率は22.6 [%]、 β 波の脳波成分比率は22.5 [%]に対して、ヘアバンド装着時の α 波の脳波成分比率は19.6 [%]、 β 波の脳波成分比率は35.0 [%]となった。ヘアバンド装着時の3Hz駆け足では、 α 波の脳波成分比率19.8 [%]、 β 波の脳波成分比率は31.4 [%]となり、ヘアバンドを装着することによって、 α 波と β 波を比較すると β 波優位となる傾向にあった。また、経時変化、すなわち運動時間が長くなるほど上昇する傾向にあり、一般的な生理現象と同様の傾向を示した。

3.3.2 心拍計測

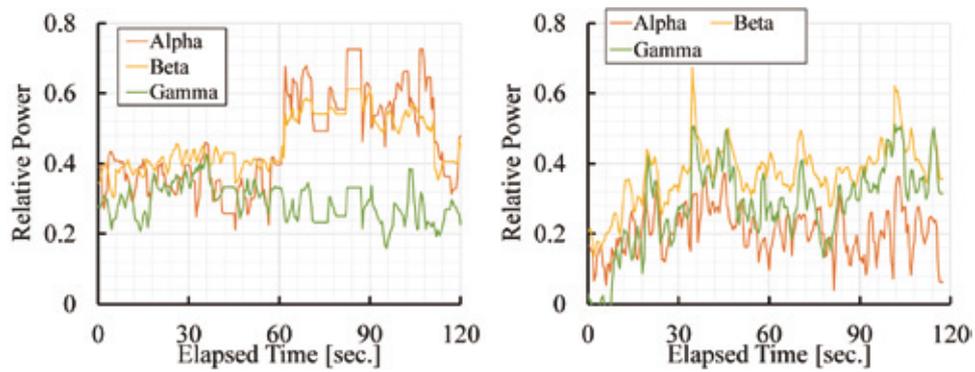
図8は、各動作における心拍数およびR-R間隔の計測結果である。心拍数は初期値の62~66 [bpm]から時間と共に増加し、2Hz足踏み92 [bpm]、3Hz駆け足114 [bpm]、2Hzジャンプ121 [bpm]と、激しい運動ほど高くなった。R-R間隔は経過時間とともに減少した。脳波の場合と同様、心拍の結果も一般的な生理現象に近い傾向を示した。

3.3.3 被験者動作時における計測条件の整理

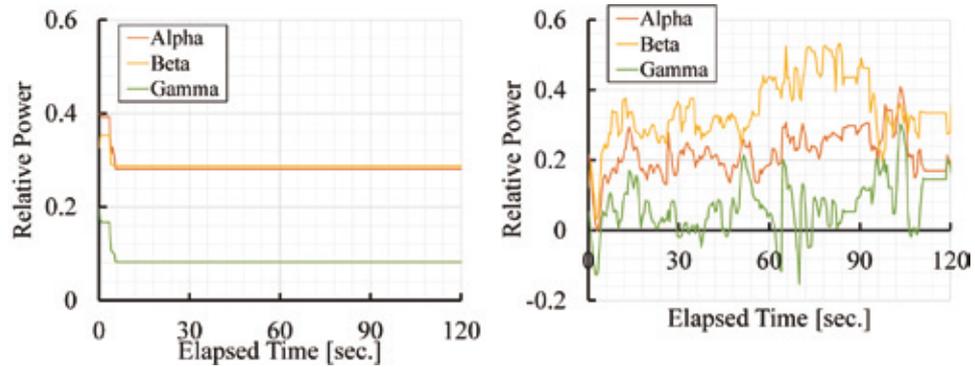
被験者が動作をしている際の計測に関して、脳波は無線型瞑想デバイスを用いて α 、 β 、 γ 波の簡易計測ができたものと判断する。HMD使用時においても物理的に干渉せず、無線によるデータ転送にも支障がないことを確認しており、VR体験時における脳波の取得は可能であるものと考えられる。ただし、ヘアバンドを使用することで無線型瞑想デバイスの電極のずれをある程度防止できることはわかったが、激しい動きには計測できない可能性があるため、さらなる検討が必要である。

心拍は、無線型胸心拍センサを用いて心拍数およびR-R間隔の計測が可能であり、HMD使用時において無線によるデータ転送にも支障がないことを確認した。無線型胸心拍センサはトレーニング用のデバイスであり、VR体験時において激しい動きがあったとしても、それに追従した計測が可能であるものと考えられる。

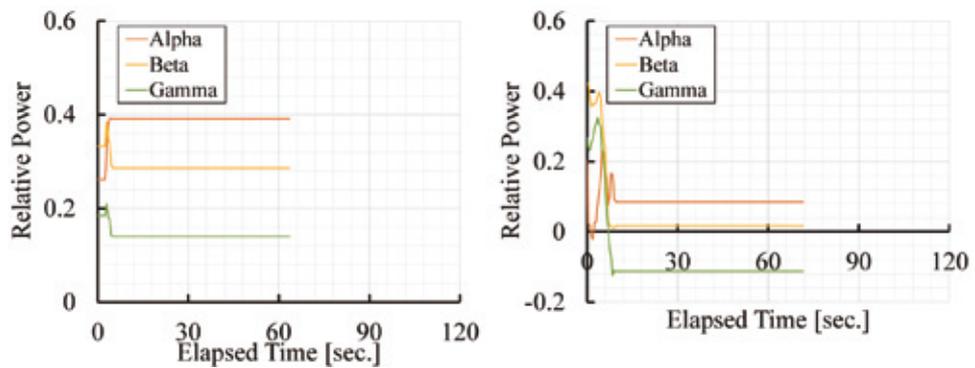
本研究では、HMDを装着する前の事前検討としての計測条件を整理した。引き続き、複数の被験者でこれらの検証をするとともに、今回使用した生体情報デバイスとHMDを同時に装着した際の生体情報の解析について検討する。



a. 足踏み (2Hz)

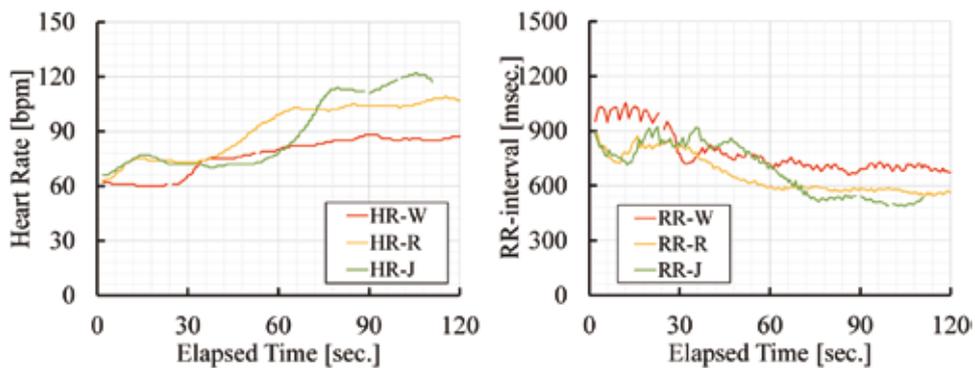


b. 駆け足で足踏み (3Hz)



c. 真上ジャンプ (2Hz)

図7 被験者動作時の脳波 (α , β , γ 波)
(左図: デバイスのみ, 右図: デバイスをヘアバンド固定)



a. HR

b. R-R 間隔

図8 被験者動作時のHRおよびR-R間隔

4. 結 言

VR建設現場シミュレータに用いる生理的指標の簡易モニタリング手法として、HMDを装着していない状態において安価なデバイスで脳波および心拍の計測を試みた。結果は以下の通りである。

- 1) 無線型瞑想デバイスを用いて、 α , β , γ 波を簡易計測できた。また、胸心拍センサを用いて、心拍数およびR-R間隔を簡易計測できることを確認した。
- 2) 無線型瞑想デバイスは身体の動きを伴う計測に支障があったが、ヘアバンドでデバイスを固定することでこれを緩和することができた。
- 3) 胸心拍センサと光学式心拍モニタのそれぞれで心拍数の検証をすることができた。光学式心拍モニタは機能が重複することから、胸心拍センサを着用していれば不要であるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、JSPS科研費挑戦的研究（萌芽）21K18526およびカシオ科学振興財団（39-59）の助成を受けた。また、本論文の査読者の方々からは被験に対する考え方や信頼性向上に資する有益な意見をいただいた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 位田ほか：修学特性に合わせた建築材料施工教育の試み（第1報 心の情報処理傾向の現状調査および考察），第一工業大学研究報告，29，pp.99-102，2017.3
- 2) 位田ほか：修学特性に合わせた建築材料施工教育の試み（第2報 心の情報処理傾向に合わせた教育の実践例），第一工業大学研究報告，30，pp.67-70，2018.3
- 3) 位田：建築系大学生を対象とした労働災害体験型VRシミュレータの試作，国土館大学理工学部紀要，15，pp.35-39，2022.3
- 4) 山家智之ほか11名：ヘッドマウンテッドディスプレイによるバーチャルリアリティにおける心拍変動の非線形解析，日本バーチャルリアリティ学会論文集，1（1），pp.10-15，1996.9
- 5) 赤川宏幸ほか4名：建設現場におけるWBGTと生体情報を用いた暑熱対策に関する研究 その2 WBGTと心拍数の同時測定とその関係性，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学I，pp.939-940，2018.7
- 6) 佐藤佑，石河利寛，青木純一郎，清水達雄，前嶋孝：運動に対する心拍数，血圧，呼吸数の反応の年齢別，性別特性に関する研究，体力科学，26（4），pp.165-176，1977.12
- 7) 竹野英敏：NIRSを用いた小学校向けプログラミングのデバッグ学習における脳活動の評価，日本科学教育学会研究会研究報告，35（7），pp.35-38，2021.6
- 8) 大関麻帆，小島翔，椿淳裕，大西秀明：運動習熟過程における大脳皮質運動関連領域の酸素化ヘモグロビン濃度変化について，日本基礎理学療法学雑誌，15（2），pp.29-36，2012
- 9) 田中宏貴，原田英世，塗木淳夫，湯ノ口万友：心拍変動から見るアスリートと非アスリートに関する研究，電気関係学会九州支部連合大会講演論文集，66，p.529，2013.9
- 10) 太田周彰，岩前篤，木村文雄，安福勝，平栗靖浩：環境要因と被験者の体動及び心拍変動が主観的睡眠感に及ぼす影響，日本建築学会環境系論文集，85（778），pp.923-933，2020.12
- 11) 遠藤文人，池田圭吾，三野輪良祐，加藤英晃，成田正敬：生理心理計測を応用した乗り心地の制御，人間工学，55，p.1D1-4，2019.6
- 12) 横山清子，林映見，伊藤久敏，河原ゆう子：腕時計型心拍計の測定データを用いた心拍変動指標の推定，電気学会論文誌C，142（1），pp.46-54，2022.1
- 13) 石岡宏晃：生産性向上に向けた建築作業者の動作手順評価に関する研究，日本建築学会計画系論文集，742，pp.3193-3203，2017.12
- 14) 日本建築学会：作業能率測定指針，1990.1