

VR コンテンツの臨場感と高所における ストレス反応の関係性に関する研究

西野 岳 社本 勇希[†] 檜垣 泰彦[‡]

千葉大学大学院工学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

[†] 千葉大学工学部 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

[‡] 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: [‡] higaki.yasuhiko@faculty.chiba-u.jp

あらまし 映像技術は現在に到るまで絶え間なく進化し続けており、近年では Virtual Reality(以下「VR」という)と呼ばれる 3D 技術も一般に普及し始めている。しかしながら、VR コンテンツを構成する各要素とプレイヤーに与える影響との関連性は完全には明らかにはなっていない。そこで本研究ではゲーム統合開発環境である Unity と HTC Vive を用いて臨場感を構成する要素を変更した VR コンテンツを 5 つ作成した。そして、これらを被験者に体験してもらい体験前及び体験中のストレス値を測定することで臨場感と高所におけるストレス反応の関係性を調べた。ストレス反応の測定には生理的指標として脈波を測定、主観的評価としてリッカート尺度による質問紙を実施した。また、VR の体験によるストレス反応を考慮するために Simulation Sickness Questionnaire によって体験前後の体調を比較し、その結果を含めて評価を行った。

キーワード VR, Unity, ストレス, SSQ, 臨場感, LF/HF

A study on the relationship between the presence of VR content and stress response at height

Gaku NISHINO[†] Yuki SHAMOTO Yasuhiko HIGAKI[‡]

[†] [‡] Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

Faculty of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522 Japan

E-mail: [‡] higaki.yasuhiko@faculty.chiba-u.jp

Abstract Video technology continues to evolve to the present, and in recent years 3D technology called virtual reality (hereinafter referred to as "VR") has begun to spread in general. However, the relevance between each element making up the VR content and the effect on the player has not been fully clarified. Therefore, in this research, we created five VR contents which changed the elements which make up the presence feeling using Unity and HTC Vive which is game integration development environment. Then, we asked the subjects to experience these, and examined the relationship between the presence feeling and the stress response at the altitude by measuring the stress values before and during the experience. Pulse waves were measured as a physiological index for the measurement of stress response, and questionnaires by the Likert scale were carried out as subjective evaluation. Also, in order to consider the stress response due to VR experiences, the physical condition before and after the experience was compared by Simulation Sickness Questionnaire and the results including the results were evaluated.

Keywords VR, Unity, Stress, SSQ, Presence, LF/HF

1. はじめに

映像技術は現在に到るまで絶え間なく進化し続けており、近年では Virtual Reality(以下「VR」という)と呼ばれる 3D 技術も一般に普及し始めている。VR とはコンピューター上に人工的な環境を作り出しヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD という) を通して

あたかもその場にいるかのような感覚を味わう事のできる技術である。

HMD を用いた VR 技術自体は 1960 年代頃から存在しており、そこから現在に至るまで VR に関する研究はされ続けている。しかし、数年前までは VR 技術関連デバイスは高価であり、一部の専門的な研究機関のみで

扱われていたため、様々な分野において VR に関連した研究の余地が多く残されている。例えば、作成された VR コンテンツの精度が VR 酔いの度合いに影響を与えることも既存の研究から分かっている[1]。しかしながら、VR コンテンツを構成する各要素とプレイヤーに与える影響との関連性は完全には明らかにはなっていない。これらが明らかになっていなければ VR コンテンツを作成して実験を行うような研究等において、VR コンテンツの内容や質によって必要としている正確なデータがとれない事も考えられるだろう。

前述の背景より、VR 技術を利用した実験環境が整え易くなり研究が増えていくなかで、臨場感と自律神経活動の評価及び主観評価との関係性を調べる事が重要であると考えた。

本研究では、VR コンテンツにおける臨場感と高所におけるストレスとの関連性を検証することを目的とし、実際に VR 高所コンテンツを作成して体験中の脈波を測定することでストレス値と臨場感の関係を調べることにした。

2. VR コンテンツの作成

本実験では VR コンテンツ自体によるストレスと高所によるストレスを区別するために、高所の VR 体験だけでなく低所の VR 体験もさせる必要がある。そのため、まず低所での体験後に高所に移動し、到着した高所から下を見下げるといった内容で作成した。また、高所におけるストレスをわかりやすくするために、コンテンツ内の足場の縁に立ってもらったようにした。次に作成した VR 高所コンテンツの要件及びその実装について述べる。なお、作成には統合型のゲーム開発環境を内蔵したゲームエンジン Unity と VR 向け HMD である HTC Vive を用いた。

(1) 臨場感構成要素

● オブジェクトのテクスチャの品質

テクスチャとは物の表面の質感・手触りなどを指す概念のことで、3D モデル表面に質感を与えるための手法のことをテクスチャマッピングという。実際にオブジェクトを間近にみることができる VR コンテンツにおいてはテクスチャの品質がそのまま臨場感に関わってくることが考えられる。テクスチャマッピングにはいくつかの手法があり、一般的に使われる法線マッピングのみでは VR 内で視認した時に、質の低さがわかりやすくなってしまう。よって本実験においては法線マッピングに加えハイトマッピングを適用した。

図 1 に色だけのオブジェクトと高品質テクスチャを貼り付けたオブジェクトを示す。

● VR コンテンツ内における足の再現

VR コンテンツでは基本的には HMD 以外はトラッキ

ングされておらず、手や足を動かしても視認することができない。今回制作する VR 高所コンテンツにおいては足場の縁に立ってもらうため、自分の足が視認できるかどうかは臨場感の向上と共に高所ストレスにも関連していると考えられる。本作成では 2 つの Vive トラッカーと呼ばれるコントローラを靴に取り付け、Unity 内で座標を取得し用意しておいた靴の 3D モデルをその座標に描写することで VR 空間内において自分の足の位置を視認できるようにした。

● 音の再現

私達の身の回りには意識をしても様々な音が溢れている。高所の知覚は基本的に視覚によるものが多いと考えられるが、身の回りの音の再現によって臨場感を高めることで高所ストレスへの影響があるかを検証する必要がある。Valve 社が配布している Unity の VR コンテンツ向けの開発キットの Steam Audio SDK を利用して音の再現を行った。Steam Audio SDK では HRTF ベースのバイノーラルオーディオを簡単に実装することができる。HRTF ベースのオーディオを再生することでより現実に近い音を再現することができる。今回制作した VR 高所コンテンツでは配置したエアコンの動作音等の環境音を再現した。

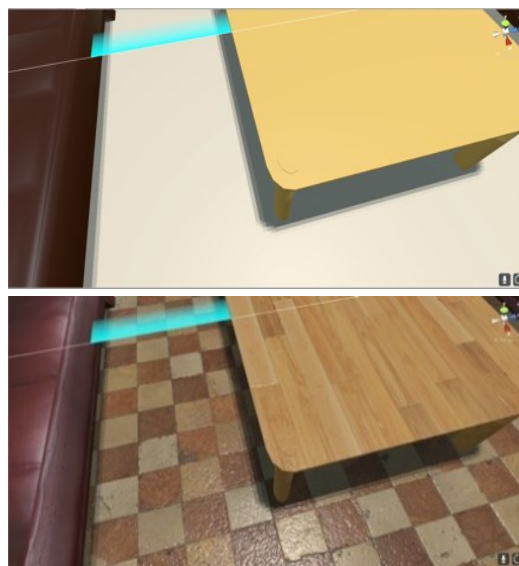


図 1 オブジェクトのテクスチャの品質の違い



図 2 現実と VR コンテンツにおける足場

● 触覚の再現

作成する VR 高所コンテンツでは足場の縁に立ってもらうが、自分が見ている映像の中では縁に立っていても実際の足は床に付いており、縁に立っているような感覚は得られない。こういった感覚の不一致は高所におけるストレス及び臨場感に関連していると考えられる。本作成ではルームスケールの範囲内に実際に厚さ約 3cm の鉄板を配置し、VR コンテンツ内でも同じサイズのオブジェクトを配置した。実際に設置した足場とそれに対応する VR 内での足場を図 2 に示す。

(2) VR 酔いへの対処

VR 酔いに関するストレスを軽減するために、VR 酔いの対策も VR コンテンツの要件に加える。VR 酔いの原因となる感覚の不一致と疲労による酔いを最小限に抑えるために次の 2 つを要件として設定した。以下に設定した 2 つの要素と設定した理由について述べる。

● 描画負荷の低減

描画負荷が高くなってしまいうことでフレームレートが低下し、映像に遅延が発生してしまう。遅延が発生してしまうと、頭の動きと見ている映像の不一致により VR 酔いが発生する可能性が高くなってしまいう。描画負荷を低減するためには、単純に VR コンテンツにおける処理の重さを解消する必要がある。また、オブジェクトの多さによっても描画負荷が高くなってしまいうため、VR コンテンツの状況を壁で囲んだ一室にすることで、オブジェクトの量を減らした。

● 実験時間の調整

通常パソコンやテレビのモニターを見る場合には、目からモニターまでの距離は 0.5 メートル~1.5 メートルほど離れているが、HMD の場合は画面との距離は僅か数センチメートルである。これによる眼精疲労や、HMD 自体の圧迫感や蒸れによる疲労によって酔いだけでなく別のストレスとして生理的反応に影響を与えてしまいう可能性があるため、実験時間の設定には注意しなくてはならない。

3. 実験

作成した VR 高所コンテンツを臨場感の構成要素の数に応じてシーン 1 からシーン 5 の 5 つのレベルに分けて被験者に体験してもらった。各シーンの臨場感の構成要素について表 1 に示す。

表 1 各シーンの臨場感構成要素

シーン名	テクスチャ	音の再現	足の再現	触覚の再現
シーン 1	×	×	×	×
シーン 2	○	×	×	×
シーン 3	○	○	×	×
シーン 4	○	○	○	×
シーン 5	○	○	○	○

シーン 1 からシーン 5 になるにつれて臨場感構成要素が増えていき、5 つのシーンそれぞれで臨場感に差が出るように設計してある。被験者には体験前後の SSQ アンケートへの回答及び体験中の脈拍の測定、そしてアンケートに協力してもらった。次に実際に実験に使われた評価方法と実験手順について述べる。

(1) 評価方法

● 脈波測定

脈波から読み取った心拍変動の分析により短時間におけるストレスを算出することができることから本実験ではストレスを評価するために、実験中の脈波の計測及び分析を行う。また、心拍変動をストレス評価に使用している既存研究も多く、その妥当性も高い。既存研究の多くはストレス測定中ずっとストレスを与え続けるというものであるが、本実験のような短時間のストレスの評価に使った例もある。武田らはゴルフカートと人の接近によるストレスの計測に心拍変動の分析を用いた [2]。この研究では FFT 法によるスペクトル解析では、時間幅として時系列データを 64 点以上利用すれば安定した解析ができるという既存研究から、ストレス刺激が起こった瞬間を中心とした 64 拍分のデータを分析に使用して評価している。本実験では武田らの手法をベースに高所ストレス刺激が起こる瞬間を中心とした 64 点以上の脈波データを用いて心拍変動の分析を行うことにした。

脈波の計測にはマイコンボードと開発環境からなるシステムである Arduino Uno と Arduino 用のパルスセンサー及び付属のプログラムを使用した。付属のプログラムでは生の脈波データから脈拍数[bpm]と隣り合うピーク点の間隔である Inter Beat Interval (以下 IBI という) を計算しシリアル通信を使って、パソコンにデータ入力することができる。この際のサンプリング周波数は約 50[Hz]であり、これは脈波におけるピークを検出するのに十分な周波数とされている[3]。また、脈波の計測は主に指先か耳朶によって行われるが、本実験では被験者は HMD によって視界が塞がれてしまいうため、指先にパルスセンサーを装着してしまいうとセンサから Arduino Uno へと繋がる導線やマイコンからパソコンへと繋がる USB ケーブルに誤って接触してしまいう恐れがあったため本実験では、専用のクリップを用いて耳朶に装着して計測を行うことにした。心拍変動の分析には IBI を振幅とした信号を使用するが、記録されたままの状態では 不等間隔の時系列信号となるため、サンプリング周波数 128Hz でスプライン補間をしながらサンプリングし、等間隔の時系列信号を生成して高速フーリエ変換を行ってパワー スペクトルを算出した。IBI のプロットとスプライン補間後のグラフの例を図 3 に示す。

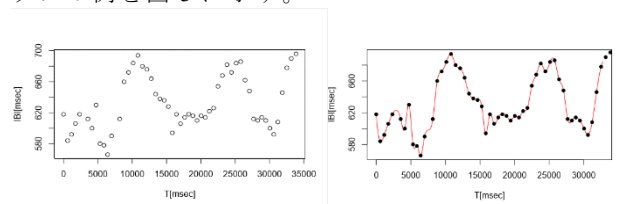


図 3 IBI プロットスプライン補完

周波数分析したパワースペクトルから LF(Low Frequency)と呼ばれる 0.04[Hz]から 0.15[Hz]の低い周波数帯域のパワー、HF(High Frequency)と呼ばれる 0.15[Hz] から 0.40[Hz]の高い周波数帯域のパワーのそれぞれの総和を自立神経活動の指標とすることができ。それぞれ HF の大きさが副交感神経活動、LF/HF の大きさが交感神経活動の指標となるとされており、ストレスを受けることで交感神経活動が活発になることから、本実験では LF/HF の値を求めてストレスの評価に使用することにした。以下にパワースペクトル算出のための高速フーリエ変換の式と LF,HF のパワー積分値算出に使用した式を示す。

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, (k=0,1,2,...,N-1)$$

$$LF = \frac{\sum |X_{LF}|^2}{f_s N}, X_{LF} = \{X[k] | 0.04Hz \leq \frac{k f_s}{N} \leq 0.15Hz\}$$

$$HF = \frac{\sum |X_{HF}|^2}{f_s N}, X_{HF} = \{X[k] | 0.15Hz \leq \frac{k f_s}{N} \leq 0.45Hz\}$$

ストレス評価のための心拍変動解析について述べてきたが LF/HF の値は個人差が大きく、そのまま比較することは難しい。これに対して許らはデータの平均で全てのデータを除することで変化率を求め比較・分析を行った[4]。本研究でもこれを参考にし、変化率を求めて考察を行うことにした。また、心拍変動はストレス以外の様々な影響を受けやすく、データに外れ値が含まれやすい。よって、分析結果から変化率を求めた後にスミルノフ・グラブス検定を繰り返し行うことで外れ値を全て除外し、外れ値の影響を抑えることにする。

● SSQ アンケート

VR システムを用いた実験では VR 酔いによる生理反応も測定の結果として出てしまうことが考えられる。よって、個人の VR 酔いによる生理的反応を考慮に入れるために Kennedy らによる Simulator Sickness Questionnaire(以下 SSQ という)アンケートを日本語訳したものを被験者に回答してもらった。SSQ アンケートは 16 の主観評価項目からなり、0 から 3 の 4 段階の尺度で回答する。各回答に対して Nausea(吐き気)、Oculomotor(眼球運動)、Disorientation (ふらつき)として与えられた重みをかけ、合計値や 3 つの領域ごとの集計値を求め映像による酔いの度合いの分析を行うことができる。

● 主観評価

作成した VR 高所コンテンツにおける臨場感の度合い及び生理反応以外の高所におけるストレスを評価するために質問に回答してもらった。また、実験に関する質問は一般的によく用いられている 5 段階のリッカート尺度を使用して作成した。高さや怖さ、そして臨場感に関係する質問に対して 5 段階で回答してもらう。

(2) 実験手順

高所ストレス刺激が起こる瞬間を中心とした 64 点以上の脈波データを計測する必要があるため本実験では、低所において 30 秒から 60 秒程度の体験、高所において 30 から 60 秒程度の体験をしてもらい体験中の脈波を計測する。脈拍を落ち着かせて慣れを軽減させる目的から、実験は 3 人 1 組のグループで行い、同じシーンを順番に体験してもらうことで毎回 5 分から 10 分間の休憩をとってもらった。また、VR への慣れによる臨場感への印象の変化を考慮するため、グループごとに体験してもらうシーンの順序を変更して実験を行った。実際の実験の流れを表 2 に示す。また、脈波の測定は比較材料として 1 人の被験者につき実験前に立位での計測、実験中各シーンにおいて 1 回ずつ計測し、合計 6 回計測を行った。

表 2 実験手順

実験の流れ			
	被験者Ⅰ	被験者Ⅱ	被験者Ⅲ
1	SSQアンケートへの回答		
2	立位での脈波計測		
3	VRコンテンツ体験及び脈波計測	休憩	休憩
4	休憩	VRコンテンツ体験及び脈波計測	
5		休憩	VRコンテンツ体験及び脈波計測
6	全てのシーンを体験し終わるまで2-5の手順を繰り返す。		
7	SSQアンケート及び主観調査アンケートへの回答		
	全計測が終了するまで約1時間30分		

4. 結果と考察

20代の男性 11 名、20 代の女性 4 名の計 15 名を対象に実験を行った。それぞれの被験者を A から O とする。前章で述べた 3 つの評価項目について、それぞれ結果を示し、考察をする。15 名の被験者のそれぞれの計測状況における LF/HF 変化率の平均値及び標準偏差の計算結果を表 3 に箱ひげ図を図 4 に示す。

表 3 LF/HF 変化率

被験者D \ 計測状況	立位	シーン1	シーン2	シーン3	シーン4	シーン5
A	0.131	1.03	1.04	0.244	3.13	0.431
B	0.946	0.298	1.08	2.12	0.314	1.25
C	0.407	1.11	1.65	1.09	1.14	0.604
D	0.990	1.92	0.607	0.242	0.575	1.67
E	0.970	0.785	2.27	0.233	1.25	0.496
F	2.26	0.343	0.653	0.466	1.68	0.598
G	0.420	1.75	1.06	0.158	2.09	0.528
H	1.07	1.41	1.32	1.17	0.208	0.820
I	3.06	0.369	1.01	0.605	0.277	0.680
J	1.08	0.984	1.68	1.51	0.213	0.524
K	0.662	0.373	1.20	0.613	1.69	1.47
L	0.337	1.61	1.19	0.462	0.818	1.59
M	0.307	0.603	0.915	1.49	1.48	1.21
N	0.323	1.70	2.04	0.166	0.076	1.69
O	0.348	0.123	1.24	0.779	0.742	2.76
平均	0.615	0.960	1.26	0.756	0.896	0.968
標準偏差	0.776	0.584	0.452	0.575	0.828	0.636

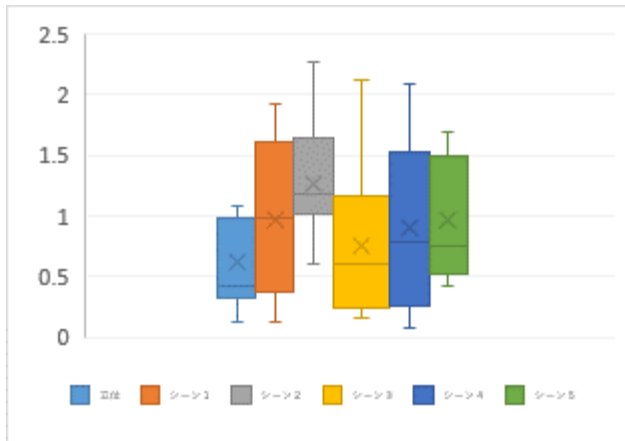


図 4 LF/HF 変化率箱ひげ図

表 3 において太字で示した数字は外れ値検定により除外した値であり，平均や標準偏差の値には含まれていない。次に，LF/HF 変化率の有意差をノンパラメトリック検定である Mann-Whitney 検定を用いて検証することにした。検定結果を表 4 に示す。

表 4 Mann-Whitney 検定

計測状況の組み合わせ	n.s 非有意, *p<0.05	
	p 値	有意差
立位-シーン1	0.16	n.s
立位-シーン2	p<0.001	*
立位-シーン3	0.72	n.s
立位-シーン4	0.49	n.s
立位-シーン5	0.029	*
シーン1-シーン2	0.15	n.s
シーン1-シーン3	0.35	n.s
シーン1-シーン4	0.62	n.s
シーン1-シーン5	0.85	n.s
シーン2-シーン3	0.013	*
シーン2-シーン4	0.15	n.s
シーン2-シーン5	0.13	n.s
シーン3-シーン4	0.62	n.s
シーン3-シーン5	0.17	n.s
シーン4-シーン5	0.63	n.s

図 4 をみると，全ての計測状況において LF/HF 値のばらつきが大きいことがわかる。平均の値だけ見れば，立位からシーン 2 にかけて LF/HF 変化率が上昇していき，シーン 3 で一度下がってから再びシーン 5 に向けて上昇していく法則性が見える。

また，Mann-Whitney 検定によって，VR コンテンツ間ではシーン 2 と シーン 3 において有意差があることがわかった。他の二つの組み合わせと違い，シーン 2 からシーン 3 においては，LF/HF 値が減少している。ここに有意差が得られたということはシーン 3 において追加された音の再現という臨場感構成要素が LF/HF 値に影響を与えた可能性がある。それを考慮にいれて平均の値を見ると，シーン 1 からシーン 2 にかけてストレス値の増加，シーン 3 においてストレス値が減少し，再びシーン 5 に向けて増加するという構成要素と LF/HF 変化率の比例関係が可能性としてみてとれる。次に SSQ アンケートの結果を図 5 に示す。

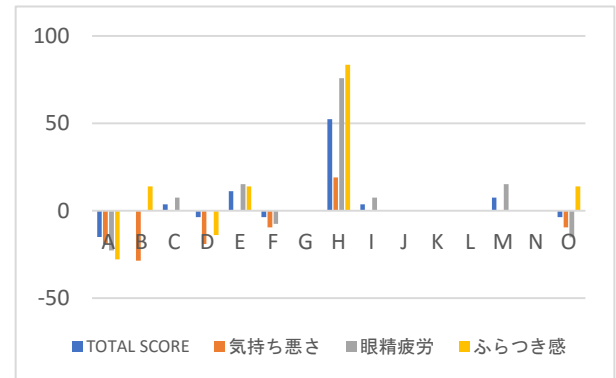


図 5 SSQ アンケート実験前後のスコア差

図 5 をみると一人を除いて高いスコアはでなかったことがわかる。また，LF/HF 値との相関をピアソンの無相関検定を行ったところ優位水準 5%を上回り，有意差が得られなかった。このことから VR 酔いは LF/HF の値は影響しなかったと考えられる。

また，主観評価における「感じた高さ」の結果を図 6 に，「感じた怖さ」の結果を図 7 に，そして本研究にて定義した臨場感に関する質問への回答を図 8 に示す。

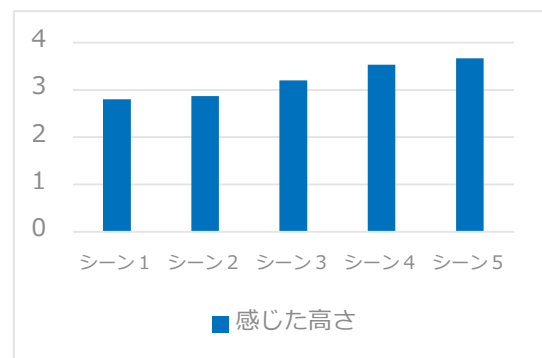


図 6 感じた高さに関する質問

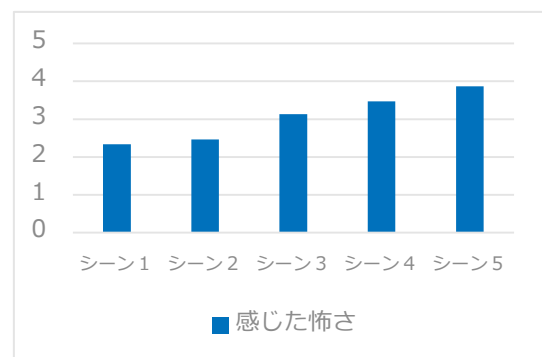


図 7 感じた怖さに関する質問

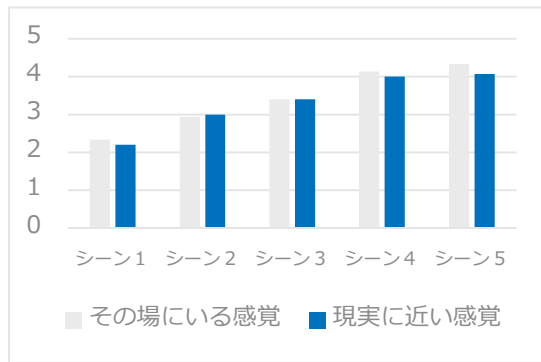


図 8 臨場感に関する質問

全体的に臨場感が増えるにつれて、点数があがっている傾向が見て取れる。

感じた高さに関する回答においては、臨場感構成要素が2つ以上離れた組み合わせでのみ有意差がみられた。VRコンテンツの環境が室内であったために壁のパスなどで高さを測れてしまい、感じた高さに大きな変化はなかったと考えられる。

また、感じた怖さに関する回答で有意差が得られた組み合わせは音の再現が追加されてからのシーンと無音のシーンの組み合わせである。つまり LF/HF の値と違い、音の再現によって主観による怖さは増加しているという結果が得られた。このことから被験者たちの意識の外で音がストレスに作用している可能性も示唆される。

最後に本実験における臨場感の定義であった「より現実に近いと感じる感覚」と「実際にその場にいるように感じる感覚」に関する質問であったが、2つのアンケートの検定結果において、t検定を行ったところ、p値に違いはあるが同じ組み合わせにおいて有意差が得られている。有意差が得られなかった組み合わせは聴覚、及び触覚に関する臨場感構成要素の違いであることから、主観評価による臨場感の評価では視覚による影響が比較的大きいと考えられる。

5. 課題

脈波計測において音の再現によるストレス値の低下が示唆されたが、音によって高所ストレスが軽減されたのか、音がないことによってストレス値が大きくなっていたのかは今回の実験の結果からは推測できなかった。本実験では既存論文を元に4つの臨場感を構成していると考えられている要素を選んだが、そのひとつひとつを対象にVRコンテンツ上で発生するストレスとどういった関係があるかを検証していく必要がある。また、聴覚、触覚に比べて視覚に関する臨場感構成要素が主観によ

る臨場感の評価に関わっていることが示唆されたが、これについても要素ごとにどれだけ臨場感の主観評価に影響を与えるかを検証し、数値化することができれば、ストレスの値との関係もより深く考察できるだろう。最後に、今回の実験では脈波と主観評価からストレス反応の判断を行なったが、関連研究では皮膚電気活動をストレスの指標にするなど他の方法もとられている。LF/HF値の算出には最低でも30秒程度の脈波のデータが必要になり、瞬間的な心拍変動を解析する場合、信頼性にかかる可能性がある。こういった計測装置も同時に使うことにより、複数の生理指標から考察をすることも重要であると考えられる。

6. おわりに

臨場感構成要素1つのVR高所コンテンツに音の再現を加えた時にストレス値が有意に減少するという結果が得られた。コンテンツ同士で有意差が得られたのはこの場合のみで、音の再現によりストレス値が減少したと考えられる。主観評価では聴覚、触覚に関する臨場感構成要素より、視覚に関する臨場感構成要素の方がより臨場感の度合いに影響を与えることがわかった。VRが我々の身近なものになってからまだ数年も経っていないが、技術の発展とともにこれから様々な領域でVRは活躍していくだろう。しかし、VR酔いを代表としてまだ解決しなければならない問題が多く存在しているのも確かである。そういった課題の解決を最終的な目標として、未知の部分の検証から行っていく事でこれからVRの発展による新しい社会への足がかりにしたい。

文献

- [1] 藤木卓, 市村幸子, 寺嶋浩介, 小清水貴子 “VRコンテンツの精度が現実感と酔いに与える影響” 日本教育工学会論文誌 36(Suppl.), 73-76, 2012
- [2] 武田将司, 猪井博登, 栗山龍起, 土肥正男 “ストレス計測によるゴルフカートと人の接近可能距離の検証” 土木系各学会研究・講演集, CD-ROM(165), 2013
- [3] 渡邊志, 安形将史, 秋田谷研人, 小川勇人, 松本有, 富田雅史, 近藤優輝, 武内諭右大, 森 幸男 “Visual Analog Scaleによる不快音聴取時の主観評価と心拍変動解析との相関” バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌 14(1), 19-26, 2012
- [4] 許鳳浩, 王紅兵, 上馬場和夫 “炭酸泉足浴と淡水足浴による生理・心理・生化学的变化の比較” 日本温泉気候物理医学会雑誌 70(3), 172-185, 2007