

没入型ディスプレイを用いたパッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響

市野 順子^{1,a)} 浅野 裕俊² 徳永 悠介³ 和田 将幸³

受付日 2020年3月13日, 採録日 2020年8月7日

概要: 没入型ディスプレイを用いたパッシブなパノラマ映像の視聴の影響を探索する研究の多くは、ユーザビリティや UX など主に「フロントエンド」の機能性に焦点を合わせてユーザの反応を評価している。これに対して、本研究は認知活動に焦点を合わせてユーザの反応を評価する。具体的には、2 種類の没入型ディスプレイ HMD と CAVE のできるだけ公平な比較を通して、没入型ディスプレイを用いたパッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を、認知活動のパフォーマンスとプロセスの両側面から検討する。15 名の参加者を対象に、3 つの没入型ディスプレイタイプ（HMD、背面まである CAVE、背面までありかつ HMD と水平視野角が同一の CAVE）を用いて、2 つの映像ジャンル（ドキュメンタリ、アニメ）のパノラマ映像を視聴する実験を行った。その結果、ディスプレイタイプに関しては、背面あり CAVE は HMD よりも、見回し行動を促進しないが、認知活動を促進する（適度な認知負荷を与え、記憶を促す）ことがわかった。つまり、パノラマ映像視聴時にユーザの認知活動の促進を期待する場合は、HMD よりも CAVE が適している。HMD を用いた参加者は重いゴーグルを装着していたにも関わらずパノラマ映像をよく見回したことが、よく見回したのは水平視野角が狭いからではなかったこと、そしてよく見回したにも関わらず映像の内容をそれほど覚えていなかったことは興味深い。映像ジャンルに関しては、ドキュメンタリはアニメよりも、見回し行動を促進しないが、認知活動を促進する（適度な覚醒を促し、記憶を促す）ことがわかった。

キーワード: 没入型ディスプレイ, HMD, CAVE, パノラマ映像, 360 度映像, パッシブ, 再認, 脳波, 覚醒度, 鼻部皮膚温度, 認知負荷, 動眼視野角, 視野角, 平面視, 固定視点

Effects of Passive Panoramic Video Viewing with Immersive Displays on User's Cognitive Activity

JUNKO ICHINO^{1,a)} HIROTOSHI ASANO² YUSUKE TOKUNAGA³ MASAYUKI WADA³

Received: March 13, 2020, Accepted: August 7, 2020

Abstract: Many studies exploring the effects of passive panoramic video viewing with immersive displays have focused primarily on “front-end” functionality, such as usability and UX, to evaluate user responses. In this paper, we focus on cognitive activity and investigate the effects of passive panoramic video viewing with immersive displays on users' cognitive activity from aspects of both performance and process of cognitive activity through as fair a comparison as possible between two types of immersive displays, head-mounted display (HMD) and CAVE-like display (CAVE). For fifteen participants, we conducted an experiment to view panoramic videos in two video genres, documentary and animation, using three immersive display types (HMD, CAVE including back, and CAVE including back and having the same FOV as HMD). Regarding the display type, we found that CAVE including back rather than HMD encourages less looking around, but more cognitive activity, i.e., it gives moderate cognitive load and promotes recognition. In other words, CAVE is more suitable than HMD for encouraging users' cognitive activity when viewing a panoramic video. It is interesting that participants with HMD looked around a panoramic video more despite wearing heavier goggles, that the reason for looking around more was not because of the narrower FOV, and that they remembered less what they viewed even though they looked around more. Regarding the video genre, we found that documentary rather than animation encourages less looking around, but more cognitive activity, i.e., it gives moderate arousal and promotes recognition.

Keywords: Immersive display, HMD, CAVE, Panoramic video, 360° video, Passive, Recognition, EEG, Arousal, Nasal skin temperature, Cognitive load, Field of regard (FOR), Field of view (FOV), Monoscopic, Fixed-viewpoint.

¹ 東京都市大学
Tokyo City University, Yokohama, Kanagawa 224–8551, Japan

² 工学院大学
Kogakuin University, Shinjuku, Tokyo 163–8677, Japan

³ 香川大学
Kagawa University, Takamatsu, Kagawa 761–0396, Japan

a) ichino@tcu.ac.jp

1. 序論

パノラマ映像（360 度映像）は、ある視点を中心にして周囲をぐるりと見渡せる映像である。コンピュータやカメラの性能や機能の向上に伴って、パノラマ映像の制作や視聴が容易になり、人々が目にする機会が増えている。

パノラマ映像を制作する側の代表である Web メディア (例えば、一次メディアの New York Times [1], 消費者生成メディアの Facebook [2]) は、新しいパノラマ映像を日々追加している。パノラマ映像が包含する範囲は広い。ユーザの映像への関与の点からみると、歩行運動や手指の動き等ユーザのアクションに応じて内容やストーリーが動的に変化するインタラクティブなものと、変化しないパッシブなものがある。映像の奥行きを点からみると、平面視映像と立体視映像がある。ユーザの視点の自由度の点からみると、頭部の回転に連動して映像が変化する固定視点映像や、回転だけでなく並進にも連動して映像が変化する自由視点映像などがある。本研究は、これらのうち、現在最も一般的に利用可能である、パッシブで平面視で固定視点のパノラマ映像を対象にする。パッシブなパノラマ映像は、今後パノラマ映像が普及した際に、ゲームユーザ以外の一般ユーザに頻繁に利用されることが予想されるため、その理解を深めておく必要がある。

パノラマ映像の視聴に適した没入型ディスプレイの市場も拡大しつつあり、その代表がヘッドマウントディスプレイと CAVE 型ディスプレイ [3] である。

ヘッドマウントディスプレイ (以降, HMD) は、視界を覆うゴーグルのような機器を頭部に装着する没入型ディスプレイであり、パノラマ映像や xR^{*1} を体験するためのデバイスとして市場規模が拡大している。コンシューマ向け HMD の世界累計出荷台数に関して、2019 年から 2023 年までの 4 年間の年間成長率は 66.7 % で、2023 年には 6,860 万台に達すると予測されている [4]。

CAVE 型ディスプレイ (以降, CAVE) は、プロジェクタや大型ディスプレイを用いた複数の表示面で構成される没入型ディスプレイである。低価格化が進む HMD に対して、従来の CAVE は高価で専用の空間が必要となる。しかし、プロジェクションマッピング技術やプロジェクション型 AR 技術——映画館のスクリーンのような矩形の白色平面ではなく、任意の形状や色を含む物体に映像を投影するための幾何補正技術や色補償技術——の進歩に伴い、一般家庭でも利用可能な CAVE の開発が進んでいる (例えば、Microsoft の Illumiroom [5], RoomAlive [6], Project Ariana [7])。将来的には、CAVE は一般家庭のリビングルーム等で利用される映像視聴システムの選択肢になり得る。

同じ内容であってもそれを受け取るデバイスが異なるとユーザの反応は異なることを、1960 年代にメディア論を展開したマクラーハン [8], [9] から近年 (例えば文献 [10], [11], [12]) に至るまで、多くの研究が示している。つまり、同じ映像であっても HMD で視聴した場合と CAVE で視聴した場合とでユーザの反応は異なる可能性がある。

加えて、表 1 が示すように、HMD と CAVE それぞれに利点があり、一概にどちらか一方が優れていると言えない。それゆえ、今後普及が見込まれる HMD と CAVE を比較し、それぞれの没入型ディスプレイを用いたパノラマ映像の視聴がユーザに及ぼす影響を理解しておく必要がある。

HMD と CAVE を用いたパノラマ映像の体験がユーザに及ぼす影響を比較した研究は存在する (例えば文献 [13], [14], [15])。しかし、先行研究の多くは、インタラクティブなパノラマ映像を対象にしており (例えば [16], [17], [18]), パッシブなパノラマ映像を対象にしたものは多くない。また、先行研究の多くは、背面を含まない CAVE を用いて HMD と比較しており、比較の公平性の点で改善の余地がある。さらに、先行研究の多くは、ユーザビリティやユーザエクスペリエンス (以降, UX) など、「フロントエンド」の機能性に焦点を合わせており (例えば文献 [13], [14], [19]), ユーザの認知活動、つまり、どのようにユーザは映像情報と認知的に関わるか、に焦点を合わせたものは限られる。

以上より、本研究は、2 種類の没入型ディスプレイ HMD と CAVE のできるだけ公平な比較を通して、没入型ディスプレイを用いたパッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を明らかにする。

表 1 HMD と CAVE の一般的な相違点

Table 1 General differences between HMD and CAVE.

	HMD	CAVE
頭部を覆うデバイスの有無	有 (着脱が煩雑、重い、閉塞感がある、他人と共用すると衛生、髪型や化粧が崩れる等の不快感を招く可能性がある)	無 (但し、立体視映像を視聴するためにメガネを装着するものもある)
外界の視覚情報の有無	無 (ユーザが映像空間に没入しやすい)	有 (ユーザは映像空間に没入しにくい)
水平視野角 (FOV: Field of View)	現在普及している HMD の視野角は 100-110 度程度	約 120 度 [20] (人間本来の水平方向の両眼共通視野角)
焦点距離	数センチ。焦点距離 ^{*2} による奥行き知覚と輻輳角 ^{*3} による奥行き知覚にずれが出るため眼精疲労を引き起こす可能性がある	1~3 メートル程度
視聴位置	ユーザが映像空間の中心に常に配置されるように制御できる	HMD のような制御は難しく、視聴位置が中心からずれていく可能性がある
身体性 (Embodiment)	パッシブなパノラマ映像を視聴する場合、ユーザの身体は一般的に映像空間上に表示されない	実空間にいるためユーザは自分自身の身体が自然に見える
価格	安価	高価

2. 関連研究

2.1 パノラマ映像の視聴を目的としたディスプレイ同士の比較

本節では、パノラマ映像を視聴するためのデバイスとして、複数種類のディスプレイを比較した先行研究を概観す

*1 VR (Virtual Reality), AR (Augmented Reality), MR (Mixed Reality) の総称

*2 目から映像表示面までの物理的な距離

*3 視認対象を見る際の両目の視線のなす角度

る。先行研究の多くは、没入型と非没入型のディスプレイを比較している。例えば、没入型のHMDと非没入型の各種ディスプレイ（スマートフォン[21]、タブレット[22]、デスクトップモニタ[17]、[23]、[24]、[25]、[26]、[27]、[28]、大型TVモニタ[15]、[29]、1面の投影型スクリーン[19]、[26]、[27]、[30]、[31]、AR/MR用HMD[32]）を比較した研究や、没入型のCAVEと非没入型のディスプレイ（デスクトップモニタ[33]、[34]、[35]）を比較した研究がある。これらに加え、近年は、没入型のディスプレイ同士を比較する研究も増えており、例えば、HMDとCAVEを比較した研究[13]、[14]、[15]、[16]、[17]、[18]、[36]、[37]、[38]がある。

以降では、前段落で参照した先行研究のうち、いずれも没入型ディスプレイであるHMDとCAVEを比較した研究に絞り概観する。先行研究が比較の際に用いたCAVEの多くは、3側面（正面、左右面）[15]または3側面+床面[13]、[14]、[16]、[18]、[36]、[37]で構成されており、背面を含まない。背面を含まない構成のCAVEは、水平方向の動眼視野角（FOR: Field of Regard）が360度ではない。つまり、ユーザはパノラマ映像のうちの自分の背後に位置する部分を視聴できない。動眼視野角が360度に満たないCAVEと、360度あるHMDを比較することは、公平性の点で疑問が残る。

より公平な、水平方向の動眼視野角が360度——4側面（正面、左右面、背面）——あるいはそれに近い値のCAVEを用いてHMDと比較した研究[17]、[38]も少ないが存在する。しかし、これらはいずれもインタラクティブなパノラマ映像を対象としており、パッシブなパノラマ映像を対象としていない。例えばKimら[17]は、6面（正面、左右面、背面、天井、床面）で構成されるCAVEを用いて、HMDおよびデスクトップモニタと比較した。ストループタスク^{*4}を実施したところ、HMDはCAVEよりもタスク遂行時間が長く、映像酔いを誘発した。またCordeilら[38]は、80枚の46型スクリーンをユーザを円筒状に囲むように配置して構築された、水平方向の動眼視野角が330度あるCAVEを用いて、HMDと比較した。2人1組によるネットワークの最短経路の探索や部分グラフのカウントを行うタスクを実施したところ、HMDはCAVEよりもタスク遂行時間が短かったが、タスクの正確さには差がなかった。

以上より、パノラマ映像を視聴するためのデバイスとして、複数のディスプレイを比較した研究は多数存在する。しかし、パッシブなパノラマ映像を対象として、水平方向の動眼視野角がHMDと概ね同様のCAVEを用いて、HMDとCAVEを比較した研究は、我々の知る限りでは見当たらない。

2.2 パノラマ映像の視聴におけるユーザの反応の評価手法

本節では、パノラマ映像の視聴におけるユーザの反応

の評価手法に着目し、先行研究を概観する。先行研究の多くは、インタラクティブなパノラマ映像を対象として、ユーザに何らかのタスクを与え、そのパフォーマンスを測定している。例えば、歩行による映像空間内の移動[16]、[18]、[26]、[27]、[28]、[30]、[36]、[37]、指[17]、[38]または手[14]によるオブジェクト操作、車の運転[31]等をタスクとして、タスク遂行のスピードや正確さ等を測定している。しかし、パッシブなパノラマ映像の場合、同様の評価手法を適用できない。

パッシブなパノラマ映像の視聴におけるユーザの反応を評価した研究もいくらかは存在する[13]、[14]、[15]、[19]、[21]、[22]、[25]、[39]、[40]、[41]（これらのうち、本研究と同様にHMDとCAVEを比較した研究は[13]、[14]、[15]）。これらの多くは、ユーザビリティ[19]やUX[13]、[14]、[21]など、主に「フロントエンド」の機能性に焦点を合わせ、心理的指標[13]、[14]、[15]、[19]、[21]、[22]、[39]、[40]や生理的指標[19]、[39]、[40]を用いてユーザの反応を評価している。例えばPhilpotら[13]は、パッシブなパノラマ映像（ドキュメンタリ）を対象として、UXをインタビューと主観評価アンケートを用いて評価し、HMDとCAVE（3側面+床面）を比較した。その結果、UXに関するユーザの反応は、両方で類似していた。Tcha-Tokeyら[14]は、パッシブなパノラマ映像（エデュテインメント）を対象として、UXを主観評価アンケート等を用いて評価し、HMDとCAVE（3側面+床面）を比較した。その結果、UXの下位項目のうちの応答性、説得性、可制御性などの項目において、CAVEはHMDよりも高評価であった。MacQuarrieら[15]は、パッシブなパノラマ映像（ドキュメンタリ、ホラー、物語）を対象として、楽しさを主観評価アンケートを用いて評価し、HMD、CAVE（3側面）、非没入型の60型TVモニタの3者を比較した。その結果、楽しさに関して、HMDとCAVEで差はなかったが、HMDとTVモニタでは差がみられHMDの方が高評価であった。

では、パッシブなパノラマ映像の視聴におけるユーザの反応を評価する際、上述の、「フロントエンド」の機能性に焦点を合わせるだけで十分であろうか。パッシブなパノラマ映像の視聴行為は、一般的に「パッシブ（受動的）」な体験と考えられている。しかし、パノラマ映像全体を見るためには、ユーザは能動的に周囲をぐるりと見渡す必要がある。つまり、パノラマ映像を視聴しているユーザは、映像情報を受動的に受け取り処理するという単純な認知活動を行っているのではなく、複合的な認知活動を行っている。これはパノラマ映像の大きな特徴である。それゆえ、パノラマ映像視聴時の「フロントエンド」の機能性だけでなく、ユーザの認知活動、つまり、どのようにユーザはパノラマ映像情報と認知的に関わるか、を理解することは興味深い。

ユーザの認知活動に及ぼす影響を評価する場合、認知活動のパフォーマンスとプロセスの両側面から評価すること

^{*4} 色名を示す文字を色名とは異なる文字色で表示し、表示された文字または文字の色を答えさせる課題。

が重要となる [42]. パッシブなパノラマ映像を対象として、ユーザの認知活動をパフォーマンスの側面から評価した研究はいくらか存在する [15], [25]. 例えば, Rizzo ら [25] は, パッシブなパノラマ映像 (ニュース) を対象として, ユーザの映像内容の再生成績や再認識成績を測定し, HMD と非没入型のデスクトップモニタを比較した. その結果, 再生成績が, HMD はデスクトップモニタよりも低かった. MacQuarrie ら [15] は, パッシブなパノラマ映像 (キュメンタリ) を対象として, ユーザの映像内容の再生成績を測定し, HMD, CAVE (3 側面), 非没入型の 60 型 TV モニタの 3 者を比較した. その結果再生成績は 3 者で差がなかった.

以上より, パッシブなパノラマ映像を対象として, ユーザの反応を, 認知活動のパフォーマンスの側面から評価した研究は存在する. しかし, パフォーマンスとプロセスの両側面から評価した研究は, 我々の知る限りでは見当たらない.

以上 2.1 節と 2.2 節の検討をふまえ, 本研究の目標は, HMD と CAVE の 2 種類の没入型ディスプレイを用いて, パッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を, 認知活動のパフォーマンスとプロセスの両側面から評価すること, および, 水平方向の動眼視野角を含めできるだけ公平な方法でこれらディスプレイを比較することである.

3. 実験方法

3.1 実験計画

実験計画は, ディスプレイタイプ (3 水準: HMD, CAVE, CAVE-G) と映像ジャンル (2 水準: ドキュメンタリ, アニメ) を要因とする, 3×2 の 2 要因計画であった. 2 要因いずれも参加者内要因であった. 実験条件は, 2 要因を組み合わせた 6 条件を設定した. 各参加者が 6 条件それぞれでパノラマ映像を視聴した. 実験条件と実験材料 (3.5 節) は, 順序効果を避けるためにカウンターバランスをとった.

上述したように, ディスプレイタイプは比較の公平性を考慮して, 3 水準設けた. まず, 水平方向の動眼視野角を HMD と CAVE で概ね等しくする (2.1 節) ために, 4 側面 (正面, 左右面, 背面) で構成される CAVE を準備した. 次に, HMD と CAVE の水平方向の視野角 (表 1) を概ね等しくするために, 本実験では, 2 つの CAVE (一般的な利用方法に近い CAVE 条件と, ゴーグルを装着して使用する CAVE-G 条件) を設けた.

3.2 参加者

15 名 (男性 12, 女性 3) の大学院生または学部生が実験に参加した. 平均年齢は 23.1 歳 (21~25 歳) であった. 参加条件は, 日本語母語話者, 裸眼または矯正視力 1.0 以上であった. 禁止事項は, 実験前日の飲酒と睡眠不足 (6 時間未満), 実験当日の過度な運動, 実験開始 2 時間前からの飲食であった. 参加者には, 報酬として 3000 円相当

のモバイルバッテリーを提供した. 実験は, 香川大学工学部研究倫理審査委員会の承認を得て実施した.

3.3 実験環境

実験に使用した部屋 (室温は $23.0^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 室内は無風) および 3.4 節で述べる生理的反応の測定方法は, すべての実験条件で同一であった.

3.3.1 HMD

HMD 条件の参加者は, HMD (HTC VIVE) を用いて映像を視聴した. HMD の解像度は 2160 (片眼 1080×2) $\times$ 1200 , 水平視野角は約 110 度, リフレッシュレートは 90 Hz である. 映像のフレームレートは 30 fps で, 再生時に人の目で認識できる遅延は生じなかった. ディスプレイタイプ以外の要因の差異をできるだけ小さくするために, HMD 条件の実験環境は, CAVE 条件の実験環境 (参加者はスクリーンに囲まれた空間内で座面回転式椅子に座る, 図 1) と同じであった.

3.3.2 CAVE

CAVE 条件の参加者は, 4 側面のスクリーンからなる CAVE 型ディスプレイの中央で映像を視聴した (図 1, 図 2). スクリーンには布 (白色) を用い, 1 面分のサイズは高さ 230 cm 幅 230 cm であった. 1 面につき 1 台の液晶プロジェクタ (Acer H5380BD) を用い, スクリーン上部から映像を投影した. 上部からの投影によって生じる台形歪みは, プロジェクタの台形補正機能によって矯正された. 映像の投影範囲は, 床から 88 cm の位置から, 高さ 130 cm 幅 230 cm であった. 1 つのパノラマ映像を 4 台のプロジェクタを用いて投影するために, 動画編集ソフトを用いてパノラマ映像を水平方向に 4 分割し, 分割映像を同期再生し各プロジェクタから投影した. 映像空間の中心に参加者の目が位置しているようにするために, 参加者ごとに椅子の位置と高さを調整した. 椅子は, 参加者の視聴位置が映像空間の中心からずれることを防ぐために固定脚で, かつ, 参加者が頭部や身体を自由に動かしてパノラマ映像を視聴できるようにするために座面回転式のものを選定した. 各プロジェクタの解像度 (画素数) は 1280×720 , リフレッシュレートは 60 Hz である. 映像のフレームレートは 30 fps で, 再生時に人の目で認識できる遅延は生じなかった. 映像視聴中の参加者の視界の映像を記録するために, 参加者の頭部に小型カメラを取り付けた.

以上の設定により, CAVE 条件の参加者は, HMD 条件の参加者と概ね同様に, 自由に視聴方向を変えながら, パノラマ映像を視聴した.

3.3.3 CAVE-G

CAVE-G 条件の参加者は, 潜水用ゴーグルを装着することを除いて, CAVE 条件の参加者と全く同じであった. 水平視野角を HMD 条件と同一にするために, ゴーグルのレンズ面に紙を貼って調整した (図 3).

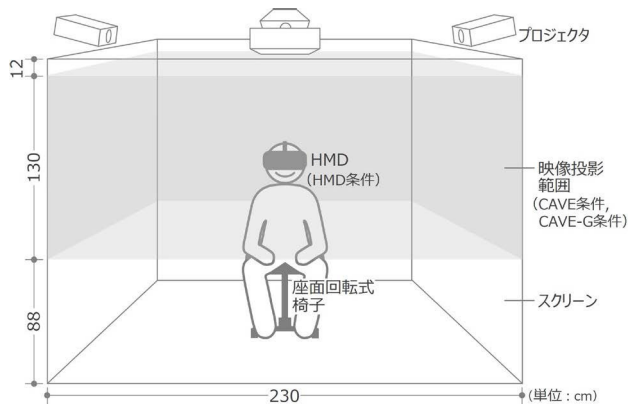


図 1 実験環境

Fig. 1 Experimental environment.



図 2 4 側面投影型スクリーンにパノラマ映像を投影した様子 (CAVE 条件・CAVE-G 条件)

Fig. 2 Panoramic video projected on four-sided projection screen for CAVE and CAVE-G conditions.



図 3 CAVE-G 条件で参加者が装着したゴーグル

Fig. 3 Goggle worn by participants in CAVE-G condition.

3.4 生理的反応の測定

すべての実験条件で、参加者は、頭部に脳波計測用電極 (g.tec medical engineering GmbH g.USBamp), 鼻部と額部に皮膚温度計測用電極 (グラム LT-USB1) を装着した (図 4)。

脳波計測に際し、電極配置は、国際 10-20 法 (図 5) に基づき、計測用電極を前頭部 (F_Z)・中心部 (C_Z)・頭頂部 (P_Z)、基準電極を左耳 (A₁)、接地電極を後頭部 (O_Z) に貼付した。各電極には、振動や発汗によって電極に混入したノイズをフィルタリングにより除去できるアクティブ電極を用いた。電極の装着不良を防ぐため、参加者に頭部用ネット包帯を着用してもらった。脳波計のサンプリング周波数は 100 Hz であった。

皮膚温度計測に際し、計測温度がゴーグル (HMD や



図 4 生理的反応の測定

Fig. 4 Measurement of physiological response.

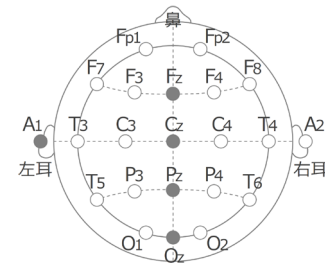


図 5 国際 10-20 法の脳波計測用電極配置。頭を上から見た図。黒い円が本実験で用いた電極。

Fig. 5 The 10-20 International system of EEG electrode placement on the human head.

CAVE-G 条件で用いたゴーグル) を装着していることによる影響を受けないようにするために、鼻部と額部に貼る電極がゴーグルに接触しないよう貼る位置を調整した。額部の電極を貼る場所は、ゴーグルの外側であった。皮膚温度計のサンプリング周波数は 0.5 Hz であった。

3.5 実験材料

一般に、パノラマ映像のジャンルには、ドラマ、バラエティ、ドキュメンタリ、映画、アニメ、ミュージックビデオ、広告などさまざまある。本実験では、本番用映像として特性が異なる 2 つの映像ジャンル——ドキュメンタリとアニメ——を、練習用映像としてミュージックビデオを選んだ。

ドキュメンタリとアニメの主な違いは、実写と作画、フィクションとノンフィクションである。参加者が後続の実験条件で同じ映像を視聴することを防ぐために、ジャンルごとに 3 つずつ、合計 6 つの映像を既存の、パッシブで平面視で固定視点のパノラマ映像の中から選定した^{*5}。アニメの映像はいずれも、図 2 に示すようなタッチで描かれた映像であった。参加者の映像酔いを引き起こさないようにするために、画面切り替えや映像の揺れが多くないものを選定した。さらに、6 つの映像間の差異を小さくするために、以下の 2 点に関してオリジナル映像を編集した。1 つ目に、各映像の長さが異なっていたため、ストーリーが変わらな

ときだけ自分の周囲に雨が降るメガネをプレゼントされた少女、街にきたサンタクロースを不審者と勘違いして追跡する男性、路上ギターで稼ぎながら車で旅をする父親と娘、を主人公にした物語であった。

^{*5} 3 つのドキュメンタリ映像はそれぞれ、2011 年に始まったシリア内戦によって発生した難民、2015 年にインドのチェンナイで発生した洪水被害、コンゴで流行している感染症・医療事情、に関するものであった。3 つのアニメ映像はそれぞれ、かけている

いよう留意し、4～5分（平均4.6分）間の長さになるように編集した。2つ目に、オリジナル映像が、頭上や足元を含む全天球型であった場合は、頭上や足元をカットして水平方向のみ360度ある全周型になるように編集した。最終的に、本実験で用いた映像はいずれも、解像度3840×544の全周型のパノラマ映像であった。

3.6 実験手順

1つの本番用映像の視聴を1試行とする。実験条件は、3（ディスプレイタイプ：HMD・CAVE・CAVE-G）×2（映像ジャンル：ドキュメンタリ・アニメ）の計6条件ある。参加者は1実験条件につき1試行を実施した。参加者は、1日に2試行、3日間で計6試行を実施した。

図6に1試行の流れを示す。練習用映像の視聴は、ディスプレイの新奇性効果を減らし、かつ、参加者にディスプレイに慣れてもらうために設けた。本番用映像の視聴中、参加者の生理的反応の測定と視界映像の録画を行った。本番用映像の視聴後に行う再認課題は、ノートパソコンを用いて実施し、参加者にできるだけ速く回答するよう教示した。本番用映像の視聴前後にシミュレータ酔いアンケート（SSQ: Simulator Sickness Questionnaire）[43]を実施した。1試行の所要時間は約30分間であった。

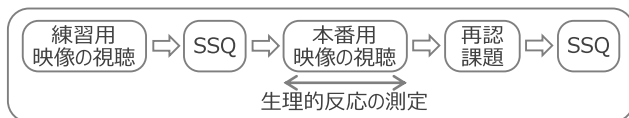


図6 1試行の流れ

Fig. 6 The procedure for one trial.

4. 評価指標・結果・考察

パッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を、認知活動のパフォーマンスとプロセスの両側面から評価する。可読性を考慮し、パフォーマンス（5節）とプロセス（6節）で節を分け、節ごとに評価指標、結果、考察を述べる。図7と表2に結果の要約を示す。図7中の各グラフの誤差バーは標準誤差を表す。図7と表2の記号*は有意水準（*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$ ）を表す。

5節と6節の検討に加え、本実験で用いた映像が、参加者の映像酔いを引き起こさなかったかを、SSQを用いて確認した（3.6節）。SSQは16の質問項目で構成され、素点に対し重み付けされた4つのスコア（総合評価：0～179.52点、吐き気：0～200.34点、眼球運動：0～159.18点、ふらつき感：0～292.32点）を用いて評価する。映像視聴前後のSSQの各スコアの変化量を分析した結果、各スコアの増加量は、各スコアの範囲をふまえると、実験条件に関わらず極めて小さかった（図71）。よって、本実験で用いた映像は、参加者の酔いをほとんど引き起こさなかったと判断した。

5. 認知活動のパフォーマンス

5.1 評価指標

パノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を、認知活動のパフォーマンスの側面から評価するために、再認課題を行い、記憶と想起に伴う主観的意識を検討した。

5.1.1 記憶

再認課題は、計9つの設問で構成し、いずれも4肢選択式であった。各設問は本番用映像のあるシーンに関するもので、参加者に問題文（例えば「図の人々は何をしていましたか」、「図の女の子はサングラスを誰から受け取りましたか」）と一緒に、映像から切り出したそのシーンの静止画を提示した。本番用映像はいずれも、メインシーンのほとんどは、360度のうちの前方180度の範囲内に配置されていたため、映像の前方180度の範囲内にあるシーンから設問用のシーンを抽出した。また、設問が参照しているシーンの出現時刻が、9つの設問を通して偏らないようにした。

記憶に関する評価指標は、再認率（再認課題の全設問数における正解数の割合）と再認反応時間とした。

5.1.2 想起に伴う主観的意識

再認課題では、修正された Remember/Know 手続き [44], [45], [46] も行い、参加者に想起に伴う主観的意識を尋ねた。Remember/Know 手続きは、参加者に、学習事象に関する詳細な情報を意識的に想起できる場合は Remember、詳細な情報を想起せずに項目を単に認識できる場合は Know、学習していない場合は New と回答してもらうことで、再認における想起の影響を推定する方法である。本実験では、参加者は、再認課題の1つの設問に回答した後続けて、その設問が参照しているシーンに関して Remember/Know/New を選択した。

想起に伴う主観的意識に関する評価指標は、Remember 反応率（再認課題の全設問数のうち Remember と反応した数の割合）と Know 反応率とした。

5.2 結果

本節で用いる各評価指標は、いずれも次に示す統計的手法を用いて分析した。各評価指標を従属変数、ディスプレイタイプと映像ジャンルを独立変数（要因）とする、2要因の反復測定分散分析を行った。Mauchly の球面性の検定が有意だった場合は、Greenhouse-Geisser のイプシロンを用いて分散分析の結果を修正した。分散分析において主効果や交互作用が有意であった場合は、下位検定として Bonferroni の調整による多重比較検定または単純主効果検定を行った。

5.2.1 記憶

再認率を図7aに示す。分散分析の結果、ディスプレイタイプの主効果が有意で、多重比較検定の結果、CAVE条件がHMD条件よりも再認率が有意に高かった。映像ジャ

ルの主効果も有意で、ドキュメンタリ条件はアニメ条件の約 1.7 倍高く、再認率に大きな差がみられた。

再認反応時間を図 7b に示す。全 6 実験条件とも近似した値を示した。分散分析の結果、主効果、交互作用はいずれも有意でなかった。

5.2.2 想起に伴う主観的意識

再認時の Remember 反応率と Know 反応率は、類似した傾向がみられた。

Remember 反応率を図 7c に示す。分散分析の結果、映像ジャンルの主効果が有意で、多重比較検定の結果、ドキュメンタリ条件がアニメ条件よりも Remember 反応率が有意に高かった。

Know 反応率を図 7d に示す。分散分析の結果、映像ジャンルの主効果が有意で、多重比較検定の結果、ドキュメンタリ条件がアニメ条件よりも Know 反応率が有意に高かった。

5.3 考察

再認反応時間は、ディスプレイタイプや映像ジャンルに関わらず近似していた。このことから、ディスプレイタイプ間や映像ジャンル間で、再認率、Remember 反応率、Know 反応率を比較することは適当と考えられる。

5.3.1 ディスプレイタイプ

ディスプレイタイプの要因による差がみられた評価指標は、再認率であり、CAVE 条件は HMD 条件よりも記憶を促すことがわかった。

ここで、2.2 節で述べた、パノラマ映像の内容の再生成績を HMD・CAVE・TV モニタの 3 者で比較した MacQuarrie らの結果 [15] を検証する。MacQuarrie らの結果は、再生成績に関して 3 者に差がみられなかった。一方、本研究の結果は、再認成績に関して HMD と CAVE で有意差がみられた。MacQuarrie らと本研究の実験条件は、CAVE の構成 (MacQuarrie ら：背面を含まない、本研究：背面を含む) の点において異なることに留意する必要があるが、本研究の結果は MacQuarrie らの結果を追認しなかった。

5.3.2 映像ジャンル

映像ジャンルの要因による差がみられた評価指標は、再認率・Remember 反応率・Know 反応率であり、ドキュメンタリ条件はアニメ条件よりも、記憶や想起に伴う主観的意識を促すことがわかった。

6. 認知活動のプロセス

6.1 評価指標

パノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を、認知活動のプロセスの側面から評価するために、映像視聴中の参加者の、脳波に基づく覚醒度、鼻部皮膚温度に基づく認知負荷、パノラマ映像の見直し行動について検討した。脳波や鼻部皮膚温度といった生理的指標は、客観的かつ定量的であり、無意識下の不随意的な反応も検出でき

る等の優れた特徴があるため採用した。

6.1.1 覚醒度 (脳波)

認知活動と深く関わっているとされる指標の一つに覚醒度 (脳の「活発さ」) がある。覚醒度は低すぎたり高すぎたりすると認知活動のパフォーマンスが低下し、中程度だと向上する [47]。

覚醒度評価の有効な手段とされている生理的指標に脳波がある。覚醒度と脳波の各周波数帯域の活動状態との関係について文献 [48], [49], [50] よりまとめると、安静時や閉眼時には α 波が後頭部に出現し、まどろみ状態では θ 波、深い睡眠では δ 波が出現する。一方、脳が活動的で集中しているときには、 α 波が減衰し、普通はまどろみ状態で出現する θ 波が前頭部に出現する。

電極ごとに計測された脳波データを次のように処理した。まず、脳波データに対して、バンドパスフィルタを用いて脳波の周波数帯とされる 0.5~30 Hz を抽出し、FFT により θ 波 (4~8 Hz)・ α 波 (8~13 Hz)・ β 波 (13~30 Hz) の 3 周波数帯域のパワースペクトル密度を算出した。次に、各周波数帯域のパワースペクトル密度から、基線変動成分を除去し、さらに全参加者の平均値から標準偏差の 3 倍以上離れた値を外れ値とみなし除去した。除去後に残ったデータを用いて、 θ 波・ α 波・ β 波含有率、つまり、全帯域 (4~30 Hz) に対する θ 波・ α 波・ β 波の含有量の割合、を算出した。

覚醒度に関する評価指標は、 θ ・ α ・ β 波含有率とした。

6.1.2 認知負荷 (鼻部皮膚温度)

覚醒度と同様に、認知負荷 (精神的な「大変さ」) も、認知活動と深く関わっている。認知負荷は、高すぎると認知活動のパフォーマンスが低下する。また、低すぎても、減退的な効果が生じ、パフォーマンスが低下する (例えば、単調さや倦怠感によって見落としが増加する) [51]。中程度だと、意欲の向上などの促進的な効果が生じ、パフォーマンスが向上する [52]。

認知負荷評価の有効な手段とされている生理的指標に鼻部皮膚温度がある [51], [53], [54], [55]。鼻部周辺には、交感神経^{*6}支配下にある末梢皮膚血管が集中しているため、血流量の変化が皮膚温の変化に直接的に反映される。交感神経が優位の状態 (つまり認知負荷が高い状態) では、血流量の減少によって鼻部皮膚温が下降し、交感神経が優位でない状態 (つまり認知負荷が低い状態) では、血流量の増加によって鼻部皮膚温が上昇する [49]。

計測された鼻部皮膚温度データを次のように処理した。一般的に、皮膚温度は基礎体温の差によって個人差が生じる。上述したように、鼻部は末梢部に位置しているため、鼻部の皮膚温度は交感神経の状態に伴って変化する。一

^{*6} 自律神経は、交感神経と副交感神経から成り立っており、緊張やストレスを感じているときには交感神経が活発になり、リラックスしているときや眠いときは副交感神経が活発になる。

方、額部は体幹部に位置しているため、額部の皮膚温度は鼻部に比べて安定している。よって、鼻部皮膚温度と額部皮膚温度の差分を標準化された鼻部皮膚温度とした [49]。

認知負荷に関する評価指標は、映像の視聴開始時点基準とした鼻部皮膚温度の変化量とした。

6.1.3 見回し行動

参加者が実際にどの程度、パノラマ映像空間の前方だけでなく左右や後方までを見回したかを、参加者の視界映像 (3.6 節) を用いて推定した。本研究では、タイムサンプリング法を用い、10 秒ごとに視界映像を停止し、その瞬間において「パノラマ映像を見回す」行動が生起していれば得点 1、いなければ 0 を与えた。HMD 条件で用いた HMD の水平視野角は約 110 度 (3.3.1 節, 3.3.3 節) であり、CAVE と CAVE-G 条件で参加者の視界映像の録画に用いたカメラ (3.3.2 節) の水平画角は 110 度であった。よって、収集された参加者の視界映像の画角は、実験条件に関わらず約 110 度となる。参加者の視界画像に、360 度のうちの後方 180 度の領域の画像が一部でも含まれていたら、見回し行動が生起したとみなした。

見回し行動に関する評価指標は、見回し率 (全サンプリング数における見回し行動の合計生起得点の割合) とした。但し、CAVE 条件の参加者の実際の視界は、人間本来の水平方向の両眼共通視野角である約 120 度 (表 1) 程度はあったと考えられる。そこで、CAVE 条件に関しては、算出された見回し率を約 1.1 倍 (120 度/110 度) した。

6.2 結果

脳波については、 $\theta \cdot \alpha \cdot \beta$ 波それぞれの含有率を従属変数、ディスプレイタイプと映像ジャンルと計測部位 ($F_Z \cdot C_Z \cdot P_Z$, 図 5) を独立変数 (要因) とする、3 要因の反復測定分散分析を行った。鼻部皮膚温度については、映像の視聴開始から終了までの 30 秒区間ごとの鼻部皮膚温度の変化量を従属変数、ディスプレイタイプと映像ジャンルを独立変数とする、2 要因の反復測定分散分析を行った。見回し行動については、見回し率を従属変数、ディスプレイタイプと映像ジャンルを独立変数とする、2 要因の反復測定分散分析を行った。Mauchly の球面性の検定が有意だった場合は、Greenhouse-Geisser のイプシロンを用いて分散分析の結果を修正した。分散分析において主効果や交互作用が有意であった場合は、下位検定として Bonferroni の調整による多重比較検定または単純主効果検定を行った。

6.2.1 覚醒度 (脳波)

θ 波含有率を図 7g に示す。分散分析の結果、計測部位の主効果、映像ジャンルの主効果、ディスプレイタイプと映像ジャンル間の 1 次交互作用が有意であった。ディスプレイタイプと映像ジャンル間の 1 次交互作用が有意であったため、映像ジャンルの主効果の有意性は扱わない。扱うのは、計測部位の主効果と、ディスプレイタイプと映像ジャンル間の 1 次交互作用である。まず、主効果が有意であった計測部位について、多重比較検定を行った結果、 F_Z (前頭部) 条件は C_Z (中心部) および P_Z (頭頂部) 条件よりも、 θ 波含有率が有意に高かった。次に、1 次交互作用が有意であったディスプレイタイプと映像ジャンルそれぞれについて、単純主効果検定を行った。その結果、映像ジャンルがアニメ条件の場合に、HMD 条件は CAVE-G 条件よりも、 θ 波含有率が有意に高かった (図 7h 左)。また、ディスプレイタイプが HMD 条件と CAVE 条件の場合に、アニメ条件はドキュメンタリ条件よりも、 θ 波含有率が有意に高かった (図 7h 右)。

α 波含有率を図 7i に示す。分散分析の結果、計測部位の主効果、映像ジャンルの主効果、計測部位と映像ジャンル間の 1 次交互作用が有意であった。計測部位と映像ジャンル間の 1 次交互作用が有意であったため、計測部位の主効果と映像ジャンルの主効果の有意性はいずれも扱わない。扱うのは、計測部位と映像ジャンル間の 1 次交互作用である。1 次交互作用が有意であった計測部位と映像ジャンルそれぞれについて、単純主効果検定を行った。その結果、計測部位が P_Z (頭頂部) 条件の場合に、ドキュメンタリ条件はアニメ条件よりも、 α 波含有率が有意に高かった (図 7j 左)。また、映像ジャンルがドキュメンタリ条件の場合に、 P_Z (頭頂部) 条件は F_Z (前頭部) および C_Z (中心部) 条件よりも、 α 波含有率が有意に高く、映像ジャンルがアニメ条件の場合に、 C_Z および P_Z 条件は F_Z 条件よりも、 α 波含有率が有意に高かった (図 7j 右)。

30 秒区間ごとの鼻部皮膚温度の変化量を図 7f に示す。すべての実験条件において、鼻部皮膚温度が時間経過とともに下降した。分散分析の結果、映像視聴開始から 90 秒経過した時点以降のすべての時点で、ディスプレイタイプの主効果が有意であった。多重比較検定の結果、開始から 90 秒と 120 秒の時点で、CAVE 条件は HMD 条件よりも、鼻部皮膚温度の下降量が有意に大きかった。

6.2.2 認知負荷 (鼻部皮膚温度)

見回し率を図 7e に示す。分散分析の結果、ディスプレイの主効果が有意で、多重比較検定の結果、HMD 条件は CAVE および CAVE-G 条件よりも見回し率が有意に高かった。映像ジャンルの主効果も有意で、アニメ条件はドキュメンタリ条件の約 1.5 倍高く、見回し率に大きな違いがみられた。各サンプリング時点における見回し行動の全参加者の生起得点の平均を図 7k に示す。

6.2.3 見回し行動

見回し率を図 7e に示す。分散分析の結果、ディスプレイの主効果が有意で、多重比較検定の結果、HMD 条件は CAVE および CAVE-G 条件よりも見回し率が有意に高かった。映像ジャンルの主効果も有意で、アニメ条件はドキュメンタリ条件の約 1.5 倍高く、見回し率に大きな違いがみられた。各サンプリング時点における見回し行動の全参加者の生起得点の平均を図 7k に示す。

6.3 考察

6.3.1 ディスプレイタイプ

ディスプレイタイプの要因による差がみられた評価指標は、主に鼻部皮膚温度と見回し率であった。すべてのディスプレイタイプで鼻部皮膚温度は時間経過とともに下降

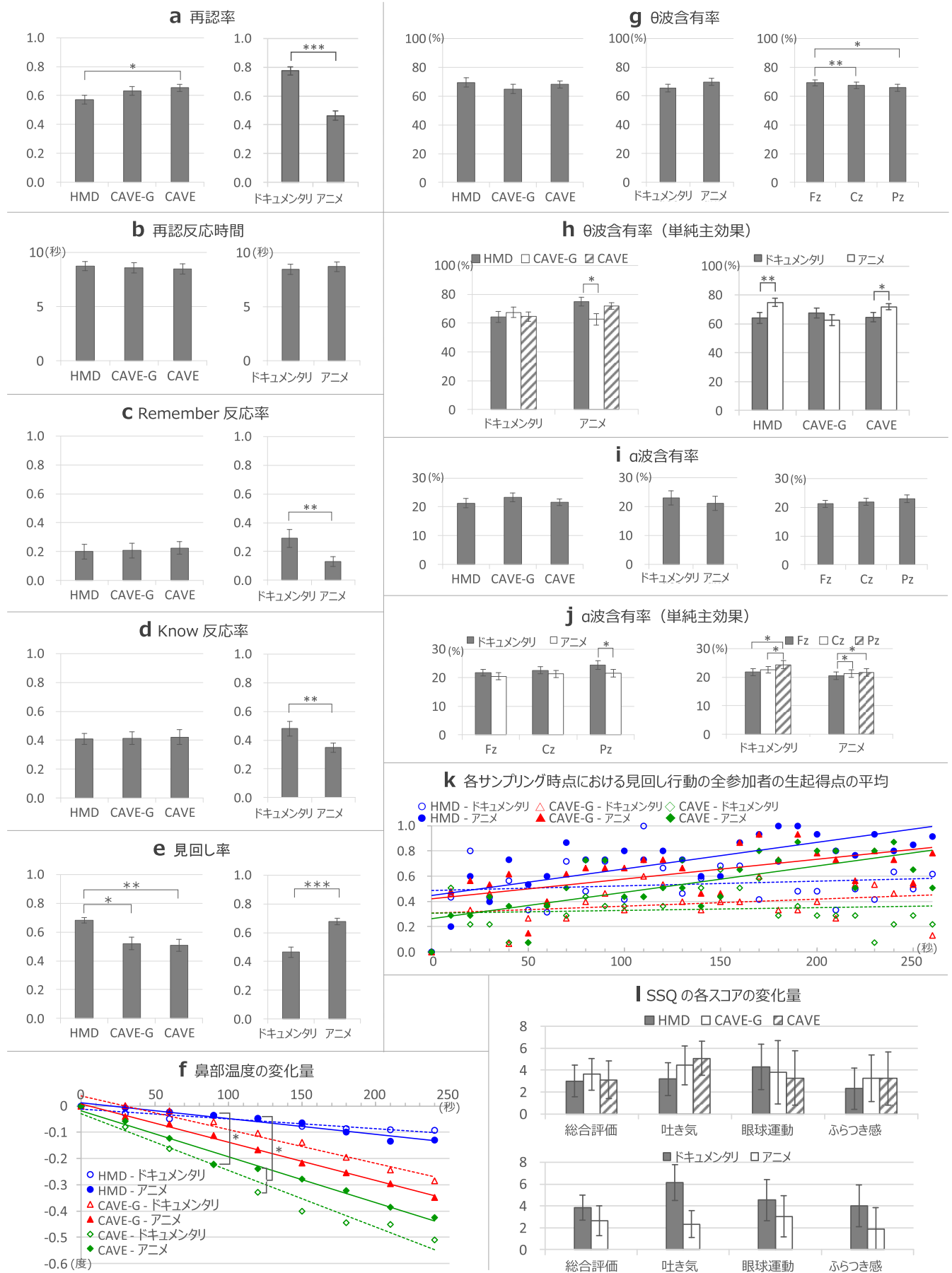


図 7 各評価指標の条件別の平均値と標準誤差
Fig. 7 Mean and standard error of each measure.

表 2 各評価指標の分散分析および下位検定の結果

Table 2 Results from ANOVAs and significant post-hoc analyses for all computed measures.

従属変数 分散分析の結果				下位検定の結果		従属変数 分散分析の結果				下位検定の結果	
再認率	主効果(デ)	F _{2,28} = 4.89	p < 0.05*	CAVE > HMD		θ 波	主効果(デ)	F _{2,24} = 1.08	p = 0.356	—	
	主効果(映)	F _{1,14} = 61.74	p < 0.001***	ドキュメンタリ > アニメ		含有率	主効果(映)	F _{1,12} = 5.60	p < 0.05*	交互作用があるため実施せず	
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 1.44	p = 0.254	—			主効果(部)	F _{1,25,14.97} = 11.22	p < 0.01**	Fz > Cz, Pz	
再認反応時間	主効果(デ)	F _{2,28} = 0.31	p = 0.735	—			交互作用(デ×映)	F _{2,24} = 6.22	p = 0.01**	アニメ: HMD > CAVE	
	主効果(映)	F _{1,14} = 1.11	p = 0.310	—						HMD: アニメ > ドキュメンタリ	
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.04	p = 0.957	—						CAVE: アニメ > ドキュメンタリ	
Remember 反応率	主効果(デ)	F _{2,28} = 0.28	p = 0.759	—			交互作用(デ×部)	F _{1,66,19.96} = 1.05	p = 0.356	—	
	主効果(映)	F _{1,14} = 9.38	p < 0.01**	ドキュメンタリ > アニメ			交互作用(映×部)	F _{1,32,15.85} = 2.53	p = 0.125	—	
	交互作用(デ×映)	F _{1,37,19.24} = 1.09	p = 0.332	—			交互作用(デ×映×部)	F _{1,73,20.80} = 1.02	p = 0.368	—	
Know 反応率	主効果(デ)	F _{2,28} = 0.03	p = 0.967	—		α 波	主効果(デ)	F _{2,24} = 1.18	p = 0.325	—	
	主効果(映)	F _{1,14} = 10.20	p < 0.01**	ドキュメンタリ > アニメ		含有率	主効果(映)	F _{1,12} = 4.78	p < 0.05*	交互作用があるため実施せず	
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.53	p = 0.595	—			主効果(部)	F _{1,36,16.30} = 11.62	p < 0.01**	交互作用があるため実施せず	
鼻部皮膚温度の変化量	30秒	主効果(デ)	F _{1,46,20.37} = 3.03	p = 0.084	—		交互作用(デ×映)	F _{1,35,16.21} = 1.70	p = 0.214	—	
	60秒	主効果(映)	F _{1,14} = 0.00	p = 0.970	—		交互作用(デ×部)	F _{1,71,20.48} = 0.74	p = 0.471	—	
		交互作用(デ×映)	F _{1,45,20.27} = 1.71	p = 0.190	—		交互作用(映×部)	F _{1,27,15.29} = 6.03	p < 0.05*	Pz: ドキュメンタリ > アニメ	
90秒		主効果(デ)	F _{2,28} = 4.22	p < 0.05*	有意差なし					ドキュメンタリ: Pz > Fz, Cz	
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.03	p = 0.865	—					アニメ: Cz, Pz > Fz		
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.81	p = 0.457	—		交互作用(デ×映×部)	F _{1,56,18.66} = 0.73	p = 0.462	—		
120秒	主効果(デ)	F _{2,28} = 5.66	p < 0.01**	CAVE > HMD		β 波	主効果(デ)	F _{2,24} = 0.80	p = 0.460	—	
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.16	p = 0.691	—		含有率	主効果(映)	F _{1,12} = 3.52	p = 0.085	—	
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.18	p = 0.833	—			主効果(部)	F _{1,25,15.02} = 5.04	p < 0.05*	Fz < Cz	
150秒	主効果(デ)	F _{2,28} = 5.70	p < 0.01**	CAVE > HMD			交互作用(デ×映)	F _{2,24} = 5.00	p < 0.05*	アニメ: CAVE-G > HMD	
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.03	p = 0.865	—					HMD: ドキュメンタリ > アニメ		
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.84	p = 0.441	—		交互作用(デ×部)	F _{1,61,19.30} = 1.15	p = 0.327	—		
180秒	主効果(デ)	F _{2,28} = 4.94	p < 0.05*	有意差なし			交互作用(映×部)	F _{1,13,13.60} = 0.30	p = 0.622	—	
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.08	p = 0.784	—			交互作用(デ×映×部)	F _{1,60,19.19} = 1.09	p = 0.342	—	
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 1.03	p = 0.372	—		見回し率	主効果(デ)	F _{2,20} = 7.79	p < 0.01**	HMD > CAVE, CAVE-G	
210秒	主効果(デ)	F _{2,28} = 4.20	p < 0.05*	有意差なし			主効果(映)	F _{1,10} = 29.62	p < 0.001***	アニメ > ドキュメンタリ	
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.04	p = 0.839	—			交互作用(デ×映)	F _{2,20} = 1.71	p = 0.207	—	
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.65	p = 0.529	—							
240秒	主効果(デ)	F _{2,28} = 3.44	p < 0.05*	有意差なし		表中の略記は以下の要因を示す。 デ: ディスプレイタイプ 映: 映像ジャンル 部: 計測部位					
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.01	p = 0.910	—							
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.26	p = 0.773	—							
240秒	主効果(デ)	F _{2,28} = 4.05	p < 0.05*	有意差なし							
	主効果(映)	F _{1,14} = 0.00	p = 0.952	—							
	交互作用(デ×映)	F _{2,28} = 0.35	p = 0.704	—							

したが、中でも特に CAVE 条件の下降量が大きく、HMD 条件との差は有意であった。認知負荷が高いと鼻部皮膚温は下降する (6.1.2 節) ことから、CAVE 条件は HMD 条件よりも認知負荷を与えることがわかった。また、HMD 条件は CAVE 条件よりも見回し行動を促進することがわかった。

HMD はまだそれほど一般的に使用されていないため、新奇性効果が結果に影響を及ぼす可能性がある。しかし、本番用映像の視聴前に練習映像を視聴した (3.6 節) ことと、時間経過とともに見回し行動の頻度が高まった (図 7k) ことをふまえると、その可能性は低いと考えられる。

6.3.2 映像ジャンル

映像ジャンルの要因による差がみられた評価指標は、 θ 波・ α 波の含有率と見回し率であった。アニメ条件はドキュメンタリ条件よりも、HMD 条件と CAVE 条件において、前頭部側で θ 波が多く出現した (図 7g, h の右)。また、アニメ条件はドキュメンタリ条件よりも、後頭部側で α 波の減衰がみられた (図 7i, j)。覚醒度が高いと、 α 波が減衰し θ 波が前頭部に出現する (6.1.1 節) ことから、アニメ条件はドキュメンタリ条件よりも覚醒を促すことがわかった。また、アニメ条件はドキュメンタリ条件よりも見回し行動を促進することがわかった。

7. 総合考察

7.1 ディスプレイタイプ

ディスプレイタイプの要因による差がみられた、記憶 (再認率: 図 7a 左)、認知負荷 (鼻部皮膚温度の下降量: 図 7f)、見回し行動 (見回し率: 図 7e 左) の各結果を照合すると、いずれも値が CAVE, CAVE-G, HMD 条件の順に並ぶという類似した傾向がみられる。まず、認知負荷と記憶の 2 つの結果に着目する。認知負荷 (鼻部皮膚温度の下降量)、記憶 (再認率) いずれも、CAVE, CAVE-G, HMD 条件の順に高かった。認知負荷は、高すぎたり低すぎたりすると認知活動のパフォーマンスが低下し、中程度だと向上する (6.1.2 節) ことから、CAVE 条件の認知負荷は、HMD 条件と比べれば相対的には高かったものの、認知活動のパフォーマンスの向上に寄与する中程度 (適度な認知負荷) であったと考えられる。この解釈をふまえ、ディスプレイタイプの要因に関する見回し行動・認知負荷・記憶の結果を平易な表現で記述すると、「CAVE ユーザは、パノラマ映像をそれほど見回さないが、適度な認知負荷を感じ、その内容をよく覚えている。一方、HMD ユーザは、パノラマ映像をよく見回すが、認知負荷をそれほど感じず、その内容をそれほど覚えていない。」となる。

以降では、上述の結果に至った原因や既存の理論との整合性を考察する。

- (1) **水平視野角**：本実験では、HMD 条件と CAVE-G 条件の水平視野角は同一であったにも関わらず、両者の見回し率は異なっており、HMD 条件の方が高かった。したがって、水平視野角（表 1）が上述の結果の原因である可能性は低い。
- (2) **頭部を覆うデバイスの有無や重さ**：本実験では、デバイスが重い HMD 条件が、デバイスが軽い CAVE-G 条件やデバイスのない CAVE 条件よりも、見回し率が高かった。したがって、頭部を覆うデバイスの有無（表 1）や重さが上述の結果の原因である可能性は低い。
- (3) **その他の可能性のありそうなディスプレイ特性の違い**：上述した考察の他に、本実験で用いた HMD と CAVE では、外界の視界情報の有無（表 1）、焦点距離（表 1）、解像度（3.3 節）、明るさなどが異なる。これらの項目が上述の結果の原因である可能性については本研究からは判断できないため、今後の課題としたい。
- (4) **注意資源の配分**：人間が一度に利用できる注意資源量には限界があり、作業の遂行に必要な注意資源がその限界を超えると、作業のパフォーマンスが低下すると考えられている [56]。この理論に基づけば、パノラマ映像、つまり視聴の対象が広域に分布する映像、を視聴すると、映像視聴における認知のパフォーマンスが低下する可能性がある。これは、見回し率が最も高かった HMD 条件の再認率が最も低かったという本実験結果と合致する。一方で、注意資源を多く使用している状態は認知負荷が高い状態にあると考えられるが、本実験の HMD 条件の認知負荷は低かった。よって、注意資源の理論は、我々の結果を部分的に説明できる可能性がある。
- (5) **ユーザの情報処理様式（二重過程理論）**：さまざまな研究者が取り上げてきた二重過程理論（例えば文献 [57], [58], [59]）では、人間には 2 つの情報処理様式（システム 1 とシステム 2）が備わっており、2 つが互いに影響し合って思考や意思決定が行われると考えられている。システム 1 は、高速、感覚的、無意識的、認知負荷が低いといった特徴、システム 2 は、低速、論理的、意識的、認知負荷が高いといった特徴がある。これらの特徴と我々の結果を照合すると、HMD ユーザはシステム 1 を、CAVE ユーザはシステム 2 を利用する傾向があると解釈できるかもしれない。

7.2 映像ジャンル

映像ジャンルの要因による差がみられた、記憶（再認率：図 7a 右）、想起に伴う主観的意識（Remember 反応率：図 7c, Know 反応率：図 7d）、覚醒度（脳波：図 7g~j）、

見直し行動（見回し率：図 7e 右）の各結果を照合する。まず、覚醒度と記憶の 2 つの結果に着目する。覚醒度はアニメ条件よりドキュメンタリ条件の方が低く、記憶（再認率）はアニメ条件よりドキュメンタリ条件の方が高かった。覚醒度は、高すぎたり低すぎたりすると認知活動のパフォーマンスが低下し、中程度だと向上する（6.1.1 節）ことから、ドキュメンタリ条件の覚醒度は、アニメ条件と比べれば低かったものの、認知活動のパフォーマンスの向上に寄与する中程度（適度な覚醒度）であったと考えられる。この解釈をふまえ、映像ジャンルの要因に関する見直し行動・覚醒度・記憶・想起に伴う主観的意識の結果を平易な表現で記述すると、「ドキュメンタリを視聴するユーザは、パノラマ映像をそれほど見回さないが、適度に覚醒し、その内容をよく覚えている。一方、アニメを視聴するユーザは、パノラマ映像をよく見直し、過度に覚醒し、その内容をそれほど覚えていない。」となる。

本段落では、上述の結果に至った原因を考察する。実験で用いた映像を見返したところ、シーンの空間構成がドキュメンタリとアニメで異なっていた。ドキュメンタリは、360 度の映像空間が主にメインシーンと背景で構成され、メインシーンは主に前方に配置されていた。一方、アニメは、360 度の映像空間が主にメインシーン・サブシーン・背景で構成され、メインシーンは主に前方、サブシーンは主に左右や後方に配置されていた。これらのことから、アニメ映像の方がシーンが広範囲に分布していたことが、アニメ条件の見直し行動や覚醒を促した可能性は十分に考えられる。この推察が正しければ、360 度の空間にシーンが満遍なくかつ多く分布したパノラマ映像を視聴した場合、映像ジャンルがアニメ以外であっても、本研究のアニメ条件の結果と類似した結果が得られることが予想される。

8. 結論

本研究は、2 種類の没入型ディスプレイ HMD と CAVE のできるだけ公平な比較を通して、HMD と CAVE を用いたパッシブなパノラマ映像の視聴がユーザの認知活動に及ぼす影響を、認知活動のパフォーマンスとプロセスの両側面から検討した。15 名の参加者を対象に、3 つの没入型ディスプレイタイプ（HMD、背面まである CAVE、背面までありかつ HMD と水平視野角が同一の CAVE）を用いて、2 つの映像ジャンル（ドキュメンタリ、アニメ）のパッシブなパノラマ映像を視聴する実験を行った。その結果、ディスプレイタイプに関しては、背面あり CAVE は HMD よりも、見直し行動を促進しないが、認知活動を促進する（適度な認知負荷を与え、記憶を促す）ことがわかった。つまり、パノラマ映像視聴時にユーザの認知活動の促進を期待する場合は、HMD よりも CAVE が適している。HMD を用いた参加者は重いゴーグルを装着していたにも関わらずパノラマ映像をよく見回したと、よく見回したのは水

平視野角が狭いからではなかったこと、そしてよく見回したにも関わらず映像の内容をそれほど覚えていなかったことは興味深い。映像ジャンルに関しては、ドキュメンタリはアニメよりも、見直し行動を促進しないが、認知活動を促進する（適度な覚醒を促し、記憶を促す）ことがわかった。

本研究の主な課題を以下に示す。1つ目は、垂直方向の動眼視野角を考慮した実験条件の設定である。本研究は、水平方向のみ 360 度ある全周型のパノラマ映像（3.5 節）を用いて、HMD と CAVE で水平方向の動眼視野角を概ね等しくして、両者を比較した。今後、前後左右だけでなく頭上や足元も含む全天球型のパノラマ映像が増えることが予想されるため、HMD と CAVE で、水平方向だけでなく垂直方向の動眼視野角を等しくして、両者を比較する必要がある。2つ目は、複数人によるパノラマ映像視聴におけるユーザの反応の評価である。現在は、パッシブなパノラマ映像を、1 人で視聴することが一般的である。しかし、ソーシャル xR に関する研究開発が急速に発展しており、今後は、パッシブなパノラマ映像も、複数人で一緒に視聴する状況が予想される [60]。

謝辞 本研究の一部は、放送文化基金「平成 29 年度助成」およびカシオ科学振興財団「令和元年度研究助成」の助成により行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] New York Times: The Daily 360, available from <https://www.nytimes.com/video/the-daily-360> (accessed 2019-07-01).
- [2] Facebook: New steps toward the future of virtual reality, available from <http://newsroom.fb.com/news/2016/02/new-steps-toward-the-future-of-virtual-reality/> (accessed 2019-07-01).
- [3] Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A., Kenyon, R.V. and Hart, J.C.: The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment, *Comm. ACM*, Vol.35, No.6, pp.64–73, ACM (1992).
- [4] IDS, available from <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS44966319> (accessed 2019-07-01).
- [5] Jones, B.R., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A.D.: IllumiRoom: Peripheral projected illusions for interactive experiences, *Proc. ACM CHI '13*, pp.869–878, ACM (2013).
- [6] Jones, B., Sodhi, R., Murdock, M., Mehra, R., Benko, H., Wilson, A., Ofek, E., MacIntyre, B., Raghuvanshi, N. and Shapira, L.: RoomAlive: Magical Experiences Enabled by Scalable, Adaptive Projector-camera Units, *Proc. ACM UIST '14*, pp.637–644, ACM (2014).
- [7] Razer: Project Ariana, available from <http://www.razerzone.com/project-ariana> (accessed 2019-07-01).
- [8] McLuhan, M. and McLuhan, E.: *Laws of Media: The New Science*, University of Toronto Press, Scholarly Publishing Division (1988).
- [9] Krugman, H.E.: Brain wave measures of media involvement, *Journal of Advertising Research*, Vol.11, No.9, pp.3–9 (1971).
- [10] Sellen, A. and Harper, R.: Paper as an analytic resource for the design of new technologies, *Proc. ACM CHI '97*, pp.319–326, ACM (1997).
- [11] Piper, A.M. and Hollan, J.D.: Tabletop displays for small group study: affordances of paper and digital materials, *Proc. ACM CHI '09*, pp.1227–1236 (2009).
- [12] Takano, K., Shibata, H., Omura, K., Ichino, J., Hashiyama, T. and Tano, S.: Do tablets really support discussion?: Comparison between paper, tablet, and laptop pc used as discussion tools, *Proc. ACM OzCHI '12*, pp.562–571 (2012).
- [13] Philpot, A., Glancy, M., Passmore, P.J., Woods, A. and Fields, B.: User Experience of Panoramic Video in CAVE-like and Head Mounted Display Viewing Conditions, *Proc. ACM TVX '17*, pp.65–75, ACM (2017).
- [14] Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O. and Richir, S.: Effects on User Experience in an Edutainment Virtual Environment: Comparison Between CAVE and HMD, *Proc. ECCE '17*, pp.1–8, ACM (2017).
- [15] MacQuarrie, A. and Steed, A.: Cinematic virtual reality: Evaluating the effect of display type on the viewing experience for panoramic video, *IEEE VR '17*, pp.45–54, IEEE (2017).
- [16] Juan, M.C. and Pérez, D.: Comparison of the Levels of presence and anxiety in an acrophobic environment viewed via HMD or CAVE, *Teleoperators and Virtual Environments 2009*, Vol.18, No.3, pp.232–248, MIT Press (2009).
- [17] Kim K, Rosenthal, M.Z., Zielinski, D. and Brady, R.: Comparison of desktop, head mounted display, and six wall fully immersive systems using a stressful task, *Proc. IEEE VRW '12*, pp.143–144, IEEE (2012).
- [18] Mallaro, S., Rahimian, P., O'Neal, E.E., Plumert, J.M. and Kearney, J.K.: A comparison of head-mounted displays vs. large-screen displays for an interactive pedestrian simulator, *Proc. ACM VRST '17*, No.6, ACM (2017).
- [19] He, L., Li, H., Xue, T., Sun, D., Zhu, S. and Ding, G.: Am I in the theater?: Usability study of live performance based virtual reality, *Proc. ACM VRST '18*, No.28, ACM (2018).
- [20] Henson, D.B.: *Visual Fields* (Oxford Medical Publications), Oxford University Press (1993).
- [21] Tran, H.T., Ngoc, N.P., Pham, C.T., Jung, Y.J. and Thang, T.C.: A subjective study on QoE of 360 video for VR communication, *Proc. IEEE MMSP 2017*, pp.1–6, IEEE (2017).
- [22] Fonseca, D. and Kraus, M.: A comparison of head-mounted and hand-held displays for 360° videos with focus on attitude and behavior change, *Proc. ACM AcademicMindtrek '16*, pp.287–296, ACM (2016).
- [23] Mania, K. and Chalmers, A.: The Effects of Levels of Immersion on Presence and Memory in Virtual Environments: A Reality Centred Approach, *CyberPsychology and Behavior*, Vol.4, No.2, pp.247–264 (2001).
- [24] Moreno, R. and Mayer, R.E.: Learning science in virtual reality multimedia environments: Role of methods and media, *Journal of Educational Psychology*, Vol.94, No.3, pp.598–610, APA (2002).
- [25] Rizzo, A.A., Pryor, L., Matheis, R., Schultheis, M., Ghahremani, K. and Sey, A.: Memory assessment using graphics-based and panoramic video virtual environments, *Proc. 5th ICDVRAT*, pp.331–338, University of Reading (2004).
- [26] Sharples, S., Cobb, S., Moody, A. and Wilson, J.R.: Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop

- and projection display systems, *Displays*, Vol.29, No.2, pp.58–69, Elsevier (2008).
- [27] Polcar, J. and Horejsi, P.: Knowledge acquisition and cyber sickness: A comparison of VR devices in virtual tours, *MM Science Journal*, pp.613–616 (2015).
- [28] Chowdhury, T.I., Ferdous, S.M.S. and Quarles, J.: Information recall in a virtual reality disability simulation, *Proc. ACM VRST '17*, No.37, ACM (2017).
- [29] Luong, T., Martin, N., Argelaguet, F. and Lécuyer, A.: Studying the Mental Effort in Virtual Versus Real Environments, *Proc. IEEE VR '19*, ACM (2019).
- [30] Freiberg, J., Kitson, A. and Riecke, B.E.: Development and Evaluation of a Hands-Free Motion Cueing Interface for Ground-Based Navigation, *Proc. IEEE VR '17*, pp.273–274, IEEE (2017).
- [31] Weidner, F., Hoesch, A., Poeschl, S. and Broll, W.: Comparing VR and non-VR Driving Simulations: An Experimental User Study, *Proc. IEEE VR '17*, pp.281–282, IEEE (2017).
- [32] Keighrey, C., Flynn, R., Murray, S. and Murray, N.: A QoE evaluation of immersive augmented and virtual reality speech & language assessment applications, *Proc. IEEE QoMEX '17*, pp.1–6, IEEE (2017).
- [33] Schroeder, R., Steed, A., Axelsson, A.-S., Heldal, I., Abelin, Å., Wideström, J., Nilsson, A. and Slater, M.: Collaborating in networked immersive spaces: As good as being there together? *Computers and Graphics*, Vol.25, pp.781–788, Elsevier (2001).
- [34] Gruchalla, K.: Immersive Well-Path Editing: Investigating the Added Value of Immersion, *Proc. IEEE VR '04*, pp.157–164, IEEE (2004).
- [35] Limniou, M., Roberts, D. and Papadopoulos, N.: Full immersive virtual environment CAVETM in chemistry education, *Computers & Education*, No.51, No.2, pp.584–593, Elsevier (2008).
- [36] Bowman, D.A., Datey, A., Ryu, Y.S., Farooq, U. and Vasnaik, O.: Empirical Comparison of Human Behavior and Performance with Different Display Devices for Virtual Environments, *Proc. HFES '02*, pp.2134–2138 (2002).
- [37] Krijn, M., Emmelkamp, P.M., Biemond, R., de Wilde de Ligny, C., Schuemie, M.J. and van der Mast, C.A.: Treatment of acrophobia in virtual reality: The role of immersion and presence, *Behaviour Research and Therapy*, Vol.42, No.2, pp.229–239, Elsevier (2004).
- [38] Cordeil, M., Dwyer, T., Klein, K., Laha, B., Marriott, K. and Thomas, B.H.: Immersive Collaborative Analysis of Network Connectivity: CAVE-style or Head-Mounted Display?, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol.23, No.1, pp.441–450, IEEE (2017).
- [39] Egan, D., Brennan, S., Barrett, J., Qiao, Y., Timmerer, C. and Murray, N.: An evaluation of Heart Rate and ElectroDermal Activity as an objective QoE evaluation method for immersive virtual reality environments, *Proc. IEEE QoMEX '16*, pp.1–6, IEEE (2016).
- [40] Ahmaniemi, T., Lindholm, H., Muller, K. and Taipalus, T.: Virtual reality experience as a stress recovery solution in workplace, *Proc. IEEE LSC '17*, pp.206–209, IEEE (2017).
- [41] Schnall, S., Hedge, C. and Weaver, R.: The immersive virtual environment of the digital fulldome: Considerations of relevant psychological processes, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol.70, No.8, pp.561–575, Elsevier (2012).
- [42] 海保博之, 加藤隆 (編著): 認知研究の技法, 福村出版 (1999).
- [43] Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S. and Lilienthal, M.G.: Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, *Int. J. Aviat. Psychol.*, Vol.3, No.3, pp.203–220 (1993).
- [44] Tulving, E.: Memory and consciousness, *Canadian Psychology*, Vol.26, pp.1–12 (1995).
- [45] Gardiner, J.M.: Functional aspects of recollective experience, *Memory & Cognition*, Vol.16, pp.309–313 (1988).
- [46] 藤田哲也: 潜在記憶の測定法, 心理学評論, Vol.43, pp.107–125 (1999).
- [47] Tecce, J.J.: Contingent negative variation (CNV) and psychological processes in man, *Psychological Bulletin*, Vol.77, No.2, pp.73–108 (1972).
- [48] Baars, B. and Gage, N.M.: *Fundamentals of cognitive neuroscience: A beginner's guide*, Academic Press (2013).
- [49] 独立行政法人産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門 (編): 人間計測ハンドブック, 朝倉書店 (2003).
- [50] 日本人間工学会 PIE 研究部会 (編): 商品開発・評価のための生理計測とデータ解析ノウハウ, NTS (2017).
- [51] 日本認知心理学会 (編): 認知心理学ハンドブック, 有斐閣ブックス (2013).
- [52] Nachreiner, F.: International standards on mental workload — the ISO 10075 series —, *Industrial Health*, Vol.37, pp.125–133 (1999).
- [53] 野澤昭雄, 内田雅文, 井出英人: 鼻部熱画像を用いた伝達情報理解度の推定法, 電気学会論文誌 A, Vol.126, No.9, pp.909–914 (2006).
- [54] Mizuno, T., Sakai, T., Kawazura, S., Asano, H., Akehi, K., Matsuno, S., Mito, K., Kume, Y. and Itakura, N.: Facial Skin Temperature Fluctuation by Mental Workload with Thermography, *Proc. ICES '15*, pp.212–215 (2015).
- [55] Khan, M.M., Ward, R.D. and Ingleby, M.: Toward Use of Facial Thermal Features in Dynamic Assessment of Affect and Arousal Level, *IEEE Trans. Affect. Comput.*, Vol.8, No.3, pp.441–450, IEEE (2017).
- [56] Kahneman, D.: *Arousal and attention in: Attention and Effort*, pp.28–49, Prentice-Hall (1973).
- [57] Evans, J.St. B.T.: Dual-Processing Accounts of Reasoning, Judgment, and Social Cognition, *Annual Review of Psychology*, Vol.59, pp.255–278 (2008).
- [58] Stanovich, K.E.: *Rationality and the Reflective Mind*, Oxford University Press (2011).
- [59] Kahneman, D. and Frederick, S.: Representativeness revisited: Attribute substitution in intuitive judgment, Gilovich, T., Griffin, D. and Kahneman, D. (Eds.), *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment*, pp.49–81, Cambridge University Press (2002).
- [60] Tang, A. and Fakourfar, O.: Watching 360° Videos Together, *Proc. ACM CHI '17*, pp.4501–4506, ACM (2017).



市野 順子 (正会員)

1998年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程修了。1998–2001年大日本印刷(株)。2001–2006年TIS(株)。2003–2006年(独)情報通信研究機構けいはんな情報通信融合研究センター自然言語グループ特別研究員。2007年神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。2007–2014年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教。2010–2011年カルガリー大学コンピュータサイエンス学部客員研究員。2014–2017年香川大学工学部准教授。2017年より東京都市大学メディア情報学部情報システム学科教授。協調活動・感性的活動の支援，ユーザーの認知・行動特性の理解に関する研究に従事。電子情報通信学会，ACM各会員。博士(工学)



浅野 裕俊

2007年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了。2008年青山学院大学理工学部電気電子工学科助手。2012年香川大学工学部電子・情報工学科助教，2015年同大学講師，2018年香川大学創造工学部創造工学科准教授を経て，現在，工学院大学情報学部コンピュータ科学科准教授。生体計測，生体制御，生体情報工学に関する研究に従事。IEEE，日本生体医工学会，電子情報通信学会，電気学会会員。博士(工学)



徳永 悠介

2018年香川大学工学部電子・情報工学科卒業。現在，テレビせとうち株式会社技術局技術部にて放送設備の維持，管理，運行業務に従事。



和田 将幸

2016年香川大学工学部電子・情報工学科卒業。2018年香川大学大学院工学研究科博士前期課程修了を経て，現在，オムロンソフトウェア株式会社にてシステムエンジニアとして従事。