

修士論文

現実の信念を保つ VR 体験のための全方位映像を用いた
現実-VR 間の遷移手法

桶田 真吾

2019 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

桶田 真吾

審査委員：

清川 清 教授	（主指導教員）
加藤 博一 教授	（副指導教員）
佐藤 智和 客員教授	（副指導教員）
酒田 信親 准教授	（副指導教員）

現実の信念を保つ VR 体験のための全方位映像を用いた 現実-VR 間の遷移手法*

桶田 真吾

内容梗概

既存の VR (Virtual Reality) システムでは、ユーザは通常、体験を現実として知覚・認識しない。例えば、災害シミュレータのユーザは提示された災害が現実のものでないことを意識的または無意識的に知っており、これにより VR 体験における学習効果は本質的に制限されている。VR 空間におけるプレゼンスを高めるため、CG (Computer Graphics) で構成された現実空間の代替環境から目的の VR 空間へと遷移する研究が存在するが、この手法は制作コストが高く、ユーザの現実にいるという感覚を保つことができない。VR 体験をより信憑性のある体験にするために、本論文では VR 環境における「いま・ここにある現実にいるという信念：いまここ感」を低コストで保つ新たな現実-VR 間の遷移インタフェースのフレームワークを提案する。本フレームワークでは現実-仮想化現実空間-VR 空間の 2 段階の遷移を行い、仮想化現実空間では現実空間とほぼ同じ視界を提供する全方位映像、仮想化現実空間と VR 空間の間では滑らかに遷移する映像効果を用いることにより、ユーザにいまここ感を維持させることを目指す。試作システムとして、小人のような現実空間での低い視点を提供する小人アプリケーション、まるで自分が別の場所に存在しているかのような感覚をもたらす旅行アプリケーションを制作し、被験者実験により各遷移段階でどれほどのいまここ感が保たれているか調査する。結果としてユーザは全方位映像に非常に高いレベルのいまここ感を感じ、遷移中では遷移効果なし・既存手法と比較して、より高い状態でいまここ感が保たれることが確認できた。

キーワード

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, 2019 年 3 月 15 日.

バーチャルリアリティ, 遷移インタフェース, 全方位映像

Toward More Believable VR by Smooth Transition between Real and Virtual Environments via Omnidirectional Video*

Shingo Okeda

Abstract

In conventional virtual reality systems, users usually do not perceive and recognize the experience as reality. For example, users of a virtual disaster simulator know, consciously or unconsciously, that the presented disaster is not real, which inherently limits the training effect. To increase the presence in the VR space, there is research to transition from the alternative environment of the real space created by Computer Graphics to the target VR space, but this method has high production cost and can not preserve the sense of “conviction about reality.” To make the virtual experience more believable, we propose a novel real-virtual transition technique that preserves the sense of conviction about reality (CR) in a virtual environment. In this framework, we make two-stage transition of real - virtualized reality environment - VR space. The transition is realized by spatio-temporal smooth transition from the real environment to the virtual environment with omnidirectional video captured in advance at the user’s position. We created a dwarf application that provides a low perspective in a real space and a travel application that brings a feeling as if he/she is in a different place. We investigated how much CR is preserved at each transition stage by a user study. The participants felt a high level of CR when they were presented an omnidirectional image before transition. During transition, the CR is lost with no effect and with an existing method whereas

*Master’s Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 15, 2019.

it is maintained relatively high with the proposed transition techniques.

Keywords:

Virtual Reality, Transitional Interface, Omnidirectional Image

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	先行研究	3
2.1	いま・この現実にいるという感覚：いまここ感	3
2.2	Transitional Interfaces	5
2.3	現実-VR 間の遷移手法におけるプレゼンス・いまここ感に関する 研究	8
2.4	仮想化現実空間を用いた体験に関する研究	9
2.5	本研究の位置づけ	10
第 3 章	提案手法	12
3.1	提案フレームワークの概要	12
3.2	全方位映像による仮想化現実空間の生成	12
3.3	現実-VR 間の遷移のための映像効果の生成	13
3.3.1	Gradual Movement (GM)	14
3.3.2	Gradual Replacement (GR)	14
3.3.3	Gradual Replacement with Edge Filtering (GREF)	15
3.4	HMD によるコンテンツの提示	16
第 4 章	試作システム	19
4.1	ハードウェア	19
4.2	ソフトウェア	20
4.3	システム構成	20
4.3.1	仮想化現実空間の生成	20
4.3.2	遷移映像効果の生成	20
	Gradual Movement	21
	Gradual Replacement	21
	Gradual Replacement with Edge Filtering	21
4.4	小人体験アプリケーション	23

4.4.1	仮想化現実空間の生成	23
4.4.2	遷移映像効果の生成 : Gradual Movement	24
4.4.3	オンライン処理における全方位映像の実時間変形	24
4.4.4	ユーザ体験	26
4.5	旅行アプリケーション	26
4.5.1	仮想化現実空間の生成	27
4.5.2	遷移映像効果の生成	27
	Gradual Movement	27
	Gradual Replacement と Gradual Replacement with Edge Filtering	27
4.5.3	ユーザ体験	28
第 5 章	実験	30
5.1	実験 1	30
5.1.1	実験目的	30
5.1.2	実験条件	30
5.1.3	タスク内容	32
5.1.4	結果	32
5.1.5	考察	34
5.2	実験 2	35
5.2.1	実験目的	35
5.2.2	実験条件	36
5.2.3	タスク内容	37
5.2.4	結果	38
5.2.5	考察	40
第 6 章	おわりに	47
	謝辞	48
	参考文献	49

第 1 章 はじめに

VR (Virtual Reality) 技術とは，人工的に生成した感覚刺激を提示することであたかも現実の環境にいるかのような主観的体験を作り出す技術であり，娯楽 [1] や教育 [2]，医療 [3]，トレーニング [4] など幅広い分野で利用されている．また近年では安価な HMD (Head Mounted Display) の出現により，VR は急速に普及してきている．しかし既存の VR システムでは，ユーザの周囲の現実空間と VR 空間との間に様々な要因によって体験の断絶が存在し，ユーザは VR 空間が本物の現実であるという信念を抱くことは難しい．例えば，オフィスにいるユーザが VR により災害シミュレーションを体験する場合，HMD を被る前後の情景などが全く異なるため，ユーザは「これは現実ではなく VR による疑似体験に過ぎない」と判断してしまう．よってユーザは災害体験を他人事のように感じてしまい，学習効果が低下する可能性がある．また，他の応用においても「いま・この現実にいるという信念」が損なわれることで，ユーザが知覚する様々な感覚（恐怖感や緊張感，高揚感など）には制限が生じると考えられる．

本研究では，この「いま・この現実にいるという信念」，つまりユーザが認識している空間が自らの存在している現実空間であると感じる感覚を「いまここ感」と定義する．そして本研究の目的はユーザが「いまここ感」を保ったまま体験可能な VR システムを構築することである．先行研究として代替現実感 [5] では過去撮影された全方位映像に対し高いいまここ感を保たせることに成功している．またテーマパークなどの分野では，テーミングという概念があり，この概念はある程度あるいは弱い「いまここ感」を来場者に保たせることを目的にしている．本研究ではそれらを踏まえ，いまここ感をある程度保つ新たな現実-VR 間の遷移インタフェースのフレームワークを提案する．具体的には，現実空間から VR 空間への遷移に焦点を当て，ユーザの視界を現実空間から現実に近い見えが保たれる仮想化現実空間，さらには仮想化現実空間から VR 空間へと空間的・時間的に滑らかに遷移させる．このように現実空間と VR 空間がシームレスに接続されることで，ユーザに現実であるという信念を維持させることを目指す．このとき仮想化現実空間には代替現実感でも用いられた全方位映像を使用し，遷移映像の作成にはテーミングの概念を一部適用する．

本フレームワークを用いて、小人の視点を再現する小人体験アプリケーション、他地点の現実空間や VR 環境の視点へと遷移する旅行アプリケーションを試作した。また、これらアプリケーションを用いた被験者実験により、提案手法によっていまここ感がどの程度保たれたかを評価した。結果としてユーザは仮想化現実空間では非常に高いレベルでのいまここ感を感じ、遷移中では遷移効果なし・既存手法と比較して、より高いいまここ感をユーザに感じさせることが確認できた。

本論文では、2章で現実-VR間を遷移する遷移インタフェースに関する研究を概観し、本研究の位置づけと方針を述べる。3章では、提案フレームワークの概要を述べる。4章では、提案フレームワークの有効性を示すために、試作アプリケーションを用いた実験を行い、結果を考察する。5章では、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章 先行研究

本章では、まず現実-VR の遷移手法について Transitional Interfaces という分野での研究について紹介する。その後、遷移手法を用いて特にユーザの感じるプレゼンスやいまこの現実にいるという感覚（いまここ感，2.1 節で詳述）について調査した研究に焦点を当て、現実空間を仮想化した研究に関して述べる。最後に本研究の位置づけを述べる。

2.1 いま・この現実にいるという感覚：いまここ感

VR はしばしば、「そこにいる (being there)」という感覚を生み出す技術として表現される。VR システムの目的は通常、現実のものと異なる場所と時間にユーザを移動させることである。実際、VR 空間での体験の内容がもっともらしい場合、たとえユーザ自身が本物でないことを十分に認識していても、ユーザは本物であるかのように反応する傾向がある [5]。一方、本研究では、「いまこの現実にいるという信念の度合い」を「いまここ感」と定義し、これに焦点を当てる。いまここ感はプレゼンスと似た感覚であるが根本的には異なっている。いまここ感は「ここにいる (being here)」という意味と、現在の時間である「いまにいる」という意味に基づいている。いまここ感を維持するための鍵は、自己と周辺環境を滑らかかつ連続的に維持することである。例えば、ビデオシースルー HMD を使用すると現実空間で実時間で移り変わる視覚体験をユーザに提供できる。この視覚体験ではユーザは現実空間を見回し、自身の手を見て、また日常的な生活と同様に現実のオブジェクトを掴むことができる。この状況において、ユーザが体験を現実のものとして信じない理由は存在しない。たとえ映像が図 2.1 のように実時間の画像処理によって白黒や単眼視、ワイヤフレームのものになったとしても、ユーザは体験が継続して実時間で進行している現実のものであると信じるだろう [6]。

鈴木ら [5] は、いまこの現実にいるという信念とそれに関連するメタ認知機能について研究するため、代替現実システムという新たな実験プラットフォームを開発した。代替現実システムはライブ映像 (ユーザが実際に存在しているシーン) と過去映像 (撮影され、編集されたシーン) の間をその差異に気付くことなく交互に体験

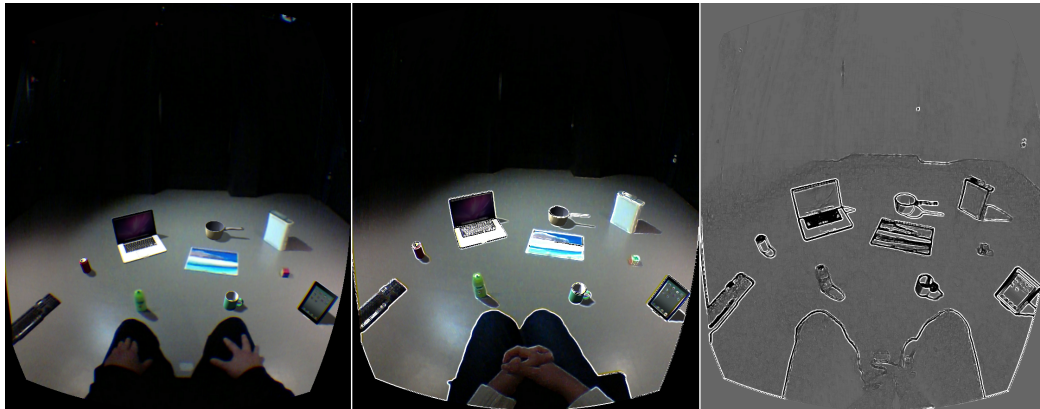


図 2.1 ユーザの視界が画像処理された図。(左) 元画像, (中央) エッジ処理によって現実空間にワイヤフレーム表示が重畳された画像, (右) 現実空間のワイヤフレームのみが表示された画像。

するよう設計された。代替現実システムは体験者に過去映像をライブ映像だと信じさせることに成功した (図 2.2 参照)。この研究に触発され、本研究では災害シミュレータのような一般的なシステムで、いまここ感を維持することを目指す。いまここ感を保つことのできるシステムの例として、ユーザの周囲の現実空間に写実的な津波や漂流物を重畳して提示するという拡張現実災害シミュレータ [7] が挙げられる。しかしながら、任意の VR システムにおいて、いまここ感を保つのは非常に困難、または不可能でさえある。例えば、山頂のオフィスにいるユーザに海岸と津波の VR 空間を提示しても、その体験を現実であると信じることはないであろう。なぜならば、ユーザは VR の光景がオフィスと大きく異なり、また自らの身体が実際には移動していないことを知っているからである。

一方で「テーミング」という概念がある。これはテーマパークで用いられる概念で、非日常的な体験をより信じられるものにするという効果を持つ。テーミングの目的はゲストが訪れた状況とゲスト間に調和した感情的なつながりを築くことである。テーミングは通常、装飾や看板、音楽や効果音、衣装などを段階的に使用して表現され、ゲストはアトラクションを待つ間の時間等で徐々にそのテーマに即する環境に没入していく (図 2.3 参照)。このような通常的环境からテーマに即する環境への滑らかな遷移によって、ユーザの期待は高まり、体験はより信頼できるものと



図 2.2 代替現実システム [5] 体験図. (左上) 右上図のユーザの視界に対する現実空間, (右上) ユーザが見ているライブ映像, (左下) 右上図のユーザの視界に対する現実空間, (右下) ユーザが見ている過去映像.

なる。つまりこのような状況では、ある程度のいまここ感または弱いいまここ感と呼べるものが保たれていると考えられる。既存の VR システムの多くは、主にプレゼンスをどのようにして高めるかに焦点を当てている。しかし通常これらの VR 空間はユーザに「突然」提示されるため、結果としていまここ感は失われることになる。例として、図 2.4 は JR 西日本で用いられている津波シミュレータ [8] である。シミュレータでは、津波は電車の運転室で発生しているが、ユーザはこの光景を現実空間であるオフィス内で HMD を装着した直後に突然見ることになっている。本研究ではこのような「突然さ」を排し、いまここ感をある程度保持するための低コストな遷移手法を提案する。

2.2 Transitional Interfaces

現実-VR 間をスムーズに繋ぐ遷移手法に関して、Transitional Interfaces[9] という分野で様々な研究が行われてきた。Grasset ら [9] は Transitional Interface で



図 2.3 テーマパークにおけるテーミング例

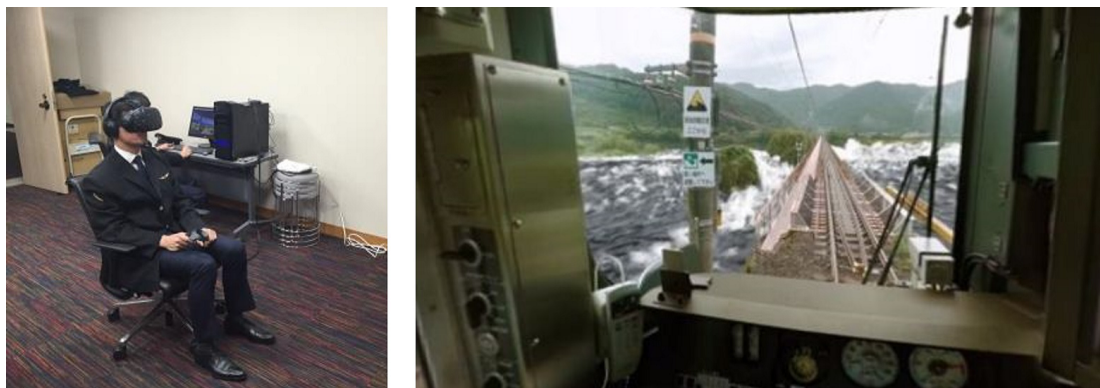


図 2.4 津波シミュレータ [8]. (左) 現実空間のオフィス環境におけるユーザの体験図, (右) 提示されている VR 空間のイメージ図.

用いられる要素を整理し、プレゼンスについて評価を行う必要性を論じた。また 2 つの空間の間の遷移中に視覚的および空間的な一貫性を維持する方法に関して詳しく研究する必要があると述べている。

The MagicBook[10] は現実空間と VR 空間を接続させたシステムの中でも特に有名な例である。このシステムは現実空間に存在する絵本と HMD から成り、ユーザは HMD を通してまず AR (Augmented Reality) によって拡張された絵本を体験する。その後コントローラのボタンを押すことでユーザの視界は本が迫ってくるような映像効果によって遷移し、絵本の中の人物の一人称視点のような視界を体験する (図 2.5 参照)。映像効果による遷移は急激に行われ、高いまここ感を保つことは難しいと言えるが、一方でその高いインタラクション性とテーマ性によって

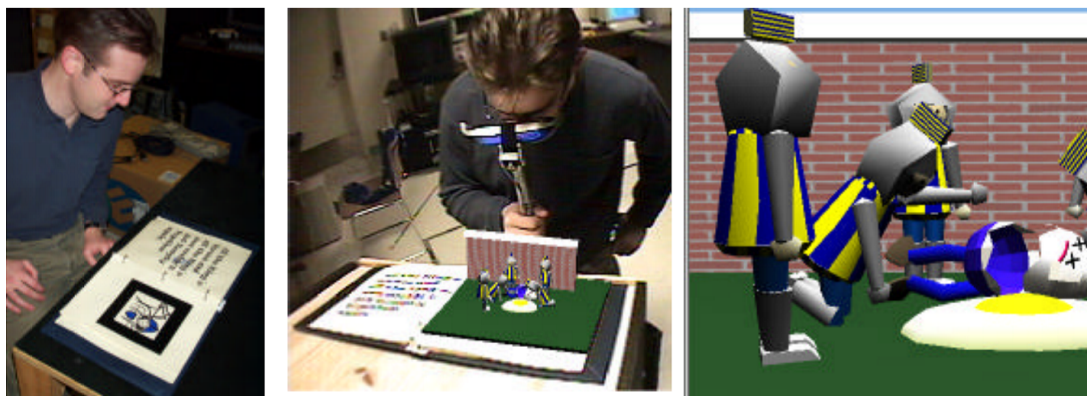
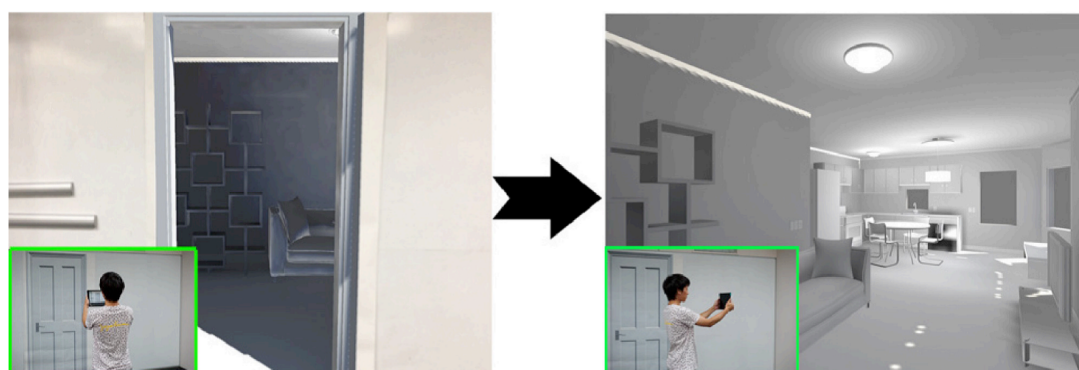


図 2.5 The MagicBook[10] 体験図. (左) 現実空間における絵本, (中央) AR 表示によって拡張された絵本, (右) 遷移後の VR 空間でのユーザの視界例.



AR重畳されたモデルに近づくと
扉が開く

扉の中のVRコンテンツ内を体験する

図 2.6 青木ら [11] のシステム概要図

ユーザに高い没入感をもたらしている。

青木ら [11] は図 2.6 のように現実空間に重畳表示させた CG の扉を介して, CG で構成された現実空間のレプリカ環境に遷移するシステムを開発した. 現実では入れない空間に侵入するアプリケーションに対して, このシステムを用いることにより, AR の長所である空間的連続性を保ちつつ VR の長所である自由度の高い表現の体験が可能になっている. 実験では遷移なしの場合と比べ, VR 空間に対するプレゼンスが高まる結果が示された.

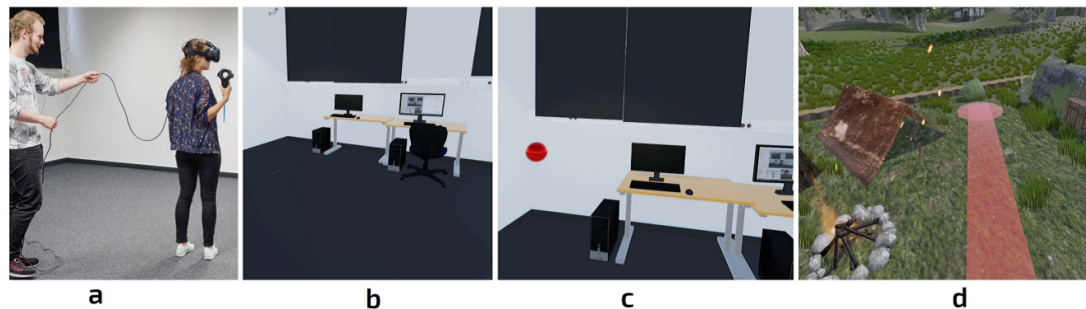


図 2.7 Smooth Immersion[12]. (a) 体験中の現実空間, (b) レプリカ空間でのユーザの視界の例, (c) レプリカ空間で CG オブジェクトを生成する様子, (d) 遷移後の VR 空間でのユーザの視界の例.

2.3 現実-VR 間の遷移手法におけるプレゼンス・いまここ感に関する研究

Smooth Immersion[12] は本研究に非常に近い研究で, 現実空間のレプリカを CG (Computer Graphics) オブジェクトを用いて再現し, このレプリカ環境から目的となる VR 空間にモーフィングによって遷移するというシステムである. このシステムでは HMD を装着した後, レプリカ環境で図 2.7(c) のような CG オブジェクトを生成したり, CG オブジェクトを探索するといったタスクを行うことによって VR 空間に慣れるという狙いがある. しかし結果として, 現実判断 (被験者が VR 空間に対して感ずる現実感) に統計的有意差は確認されなかった. この研究の問題点として, レプリカ環境と現実空間との間に断絶があることが挙げられる. 再現された現実空間は明らかに CG で人工的に作られたものと分かってしまう状態であり, これによっていまここ感は失われていると言える. また現実空間の物の配置が変化するとそのたびに CG の配置を変更する必要がある, CG の制作コストが高いという問題点もある.

Steinicke[13] らは現実空間からの遷移方法の違いによってどれほど VR 空間に対するプレゼンスが変化するか調査した. 図 2.8 のような CG で構成された飛行機内の椅子に座り飛行を体験するアプリケーションが用いられ, ユーザは上記の Smooth Immersion と同様に図 2.9 のような CG で構成された現実空間のレプリカから VR 空間へワームホールを用いて遷移する. 実験ではレプリカ環境を介すこと

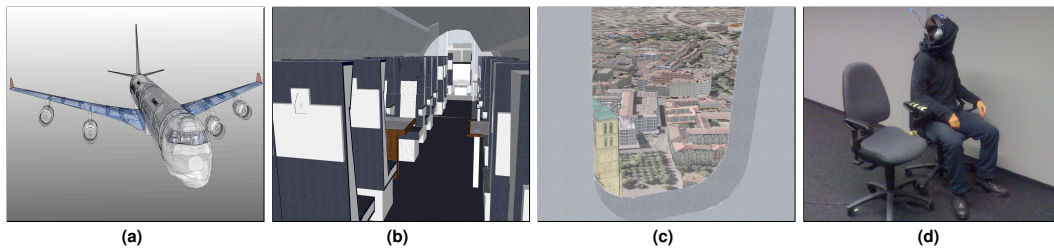


図 2.8 Steinicke ら [13] のシステムにおける遷移後 VR 空間イメージ図. (a) CG 俯瞰図, (b) 遷移した直後の体験者の視界例, (c) 椅子に座った状態での視界例, (d) 現実空間におけるユーザの体験図.

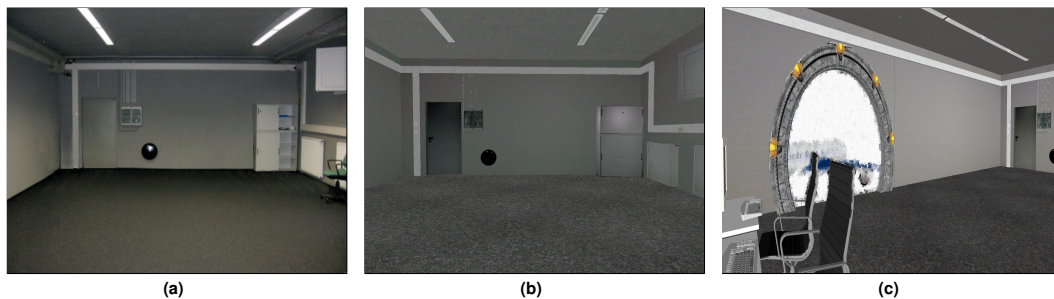


図 2.9 Steinicke ら [13] のシステムにおける遷移手法イメージ図. (a) 実験に用いられた現実空間, (b) CG によって構成されたレプリカ環境, (c) レプリカ環境から VR 空間に遷移するためのワームホールのイメージ図.

により、遷移がない体験に比べ大幅にプレゼンスが増すことが確認されている。しかし問題点は Smooth Immersion と同様、制作コストが非常に高いことやレプリカ環境が人工的に作られたものだと瞬時に分かってしまい、いまここ感が失われてしまうことである。

2.4 仮想化現実空間を用いた体験に関する研究

現実空間を 3DCG や全方位映像によって仮想化することで、ユーザは現実空間の様々な視点を体験できる。この概念は Virtualized Reality[14] で提唱され、この論文ではシステム例としてバスケットボール等のスポーツにおいて観客が立ち入れ

ないコート内の視点で観戦する例が挙げられている。

仮想化現実空間を用いる取り組みはテレグジスタンスという分野でも多くなされている。テレグジスタンスとは、自分自身が現存する場所とは異なった場所に実質的に存在し、その場所で自在に行動する人間の存在を拡張する概念であり、いまここ感とも密接に関わっている。Holoportation[15] は、複数台のカメラを用いてユーザと周囲の環境の精密な 3D モデルを実時間で作成し、HMD を通して AR 表示することで、まるで対話している相手が目の前の現実空間に存在しているような体験を生み出した。

JackIn Head[16] は全方位カメラを用いたテレグジスタンスシステムである。既存のウェアラブルカメラから撮影された一人称映像を用いるシステムの問題点として、映像がカメラの撮影方向に依存することが挙げられる。この研究では全方位カメラによって撮影された映像を視聴者に提供することで、高い没入型体験として映像を共有可能となった。視聴者は HMD を通して撮影された光景を見渡すことができ、実験では JackIn Head を用いることで、より少ない会話で効率的に協調作業が行えることが示唆された。

また全方位映像を用いた研究として、IAR(Indirect Augmented Reality)[17] がある。この研究では、ユーザ視点で撮影された全方位映像に事前に CG を重畳させておき、それを提示することで従来の AR における表示の際に発生する重畳表示のブレ(ジッタ)を低コストで完全に消すことができる。図 2.10 は IAR の例であり、ユーザはハンドヘルドデバイスを通して現実空間と類似した空間に重畳表示された CG(図 2.10 では建造物を指す吹き出し)を観察する。論文中では、「現代の人々はカメラのようなデバイスを通して現実空間を見ることに慣れており、全方位映像を提示されてもそれを現実の景色と信じる」とある。このことから高いいまここ感を保つ現実空間の仮想化に全方位映像は適していることが分かる。

2.5 本研究の位置づけ

鈴木ら [5] はいまここ感について調査する実験プラットフォームを開発し、代替現実システムによって過去の全方位映像に対して高いいまここ感を保つことを示した。Transitional Interfaces[9] の分野では現実空間と VR 空間をスムーズに接続



図 2.10 Indirect Augmented Reality[17] イメージ図.

するシステムを用いることによって，VR 体験におけるプレゼンスや没入感が高まることが確認されている．現実空間を模した空間を遷移に用いる研究には Smooth Immersion[12] や Steinicke ら [13] のものがあるが，これらのシステムはいまここ感を保てず，また制作コストが高い．テレイグジスタンスの分野や IAR[17] で用いられる全方位映像は低コストでいまここ感を高く保てる可能性がある．

これらの研究を踏まえ，本研究ではいまここ感を保持する現実-VR 間の Transitional Interfaces のフレームワークを提案する．遷移インタフェースには，過去撮影されたユーザ視点の全方位映像を用い，スムーズな遷移効果によって低コストかつ高いいまここ感を保つことを狙う．

第 3 章 提案手法

本章では、いまここ感を保つための現実空間と VR 空間の間の遷移インタフェースのフレームワークの概要について述べる。

3.1 提案フレームワークの概要

現実空間と VR 空間を繋ぐスムーズな遷移について、提案フレームワークの概要を図 3.1 に示す。提案フレームワークは、(i) 仮想化現実空間の生成、(ii) 遷移のための視覚効果の生成、(iii)HMD によるスムーズな遷移の提示、の 3 段階の処理によって構成される。このうち (i) と (ii) はオフライン処理であり、(iii) はオンライン処理である。

3.2 全方位映像による仮想化現実空間の生成

この処理では、ユーザの周囲の現実環境を「仮想化」(デジタル情報としてキャプチャ) することを行う。本研究ではこの仮想化現実空間の作成に全方位 (360 度) 映

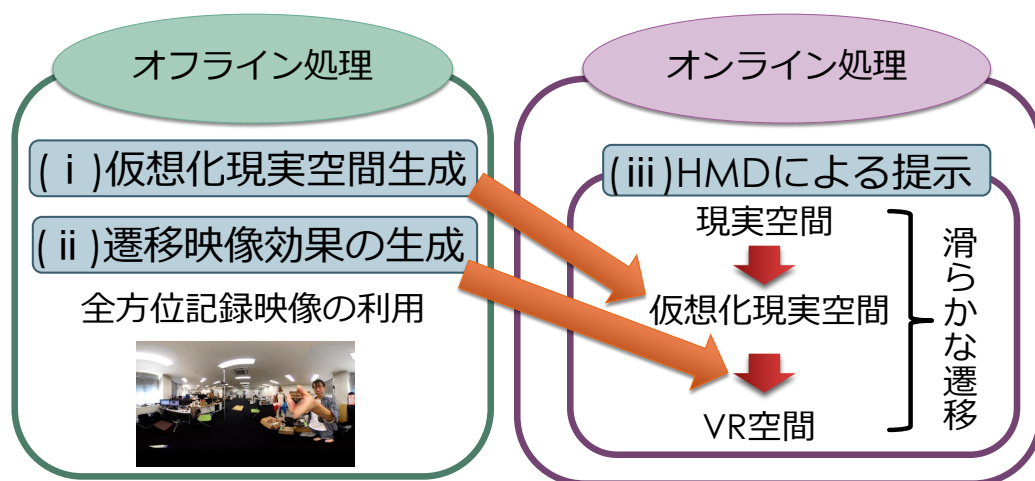


図 3.1 提案フレームワークの概要図。

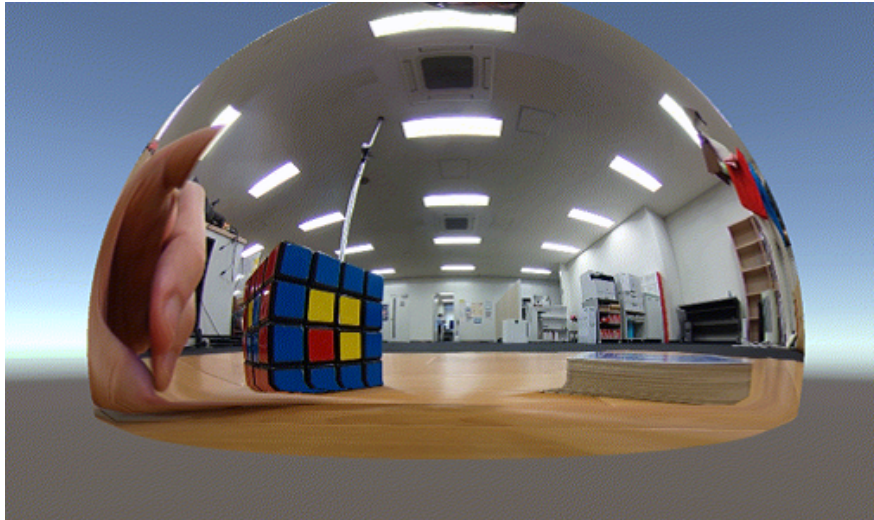


図 3.2 半球状 3D モデルにマッピングされた全方位映像.

像を用いることを提案する．近年，安価な全方位カメラの出現により，全方位映像は非常に一般的になりつつある．また全方位映像を用いることにより，ユーザは実際の現実環境に近い写実的な視覚体験が得られる．また，全方位映像は撮影時の視点から移動できない問題があるが，仮想化環境内の単純な 3D モデルにマッピングすることで (図 3.2 参照)，撮影視点の付近をある程度移動し，運動視差による立体視を知覚できる．

ユーザが仮想化現実空間で大きく移動することが想定される場合，Structure from Motion[18] / Multi-View Stereo[19] などで 3 次元再構築した精緻な 3D モデルを仮想化現実空間として利用することもできる．

3.3 現実-VR 間の遷移のための映像効果の生成

この処理では，仮想化現実空間から VR 空間を繋ぐスムーズな遷移に用いる視覚効果を全方向映像コンテンツとして作成する．映像効果の始点は 3.2 節で作成された実環境の全方位画像である．終点はある視点からレンダリングされた対象の VR 環境の全方位画像であり，その後に遷移後の VR 環境の 3D レンダリングを行う．始点から終点までをスムーズに遷移させることで，いまここ感を保つことを目指す．

スムーズな遷移のための映像効果手法としては、Transitional Interface[2] の分野で用いられているモーフィングやフェーディングが挙げられる。本研究では既存手法よりも高くいまここ感を保持する遷移手法として、以下の3手法を提案する。

3.3.1 Gradual Movement (GM)

遷移後の環境が仮想化された現実環境である場合、単純な遷移手法として、現実空間の初期位置から対象の位置へと視点が連続的に移動する全方向映像を用いることができる。例えば、図 3.3 では (a) 地点から (d) 地点まで移動しながら全方位カメラで周囲を撮影し、これを用いてユーザの仮想的な移動を実現する。体験時にはユーザは (a) 地点に立ち、HMD で全方位映像を見る。このとき HMD を着用する前後で周囲の視覚体験がほとんど変化しないことが重要である。この後、全方位映像が (b), (c), (d) 地点と移動するにつれて、ある程度のいまここ感を保ちながらユーザに自分自身が移動しているように感じさせることを狙う。より離れた地点に移動するためには、全方位カメラを搭載したドローンで空撮したり、Google Earth を利用して連続的な全方位映像を取得することが考えられる。このような全方位映像をユーザに提示することでスムーズな遷移が低コストかつ高品質に実現できる。一方で遷移前後の空間が地理的に離れている場合、遷移に時間がかかるというデメリットがある。

3.3.2 Gradual Replacement (GR)

GR はユーザの視界外の環境を変化させる遷移方法である。人間は注目していない領域で発生した明白な変化に気づき難い (change blindness, 変化盲) 性質があり [20], これを利用して違和感を抑えつつ、大きな映像変化を短時間に与えられるのではないかという狙いがある。例えば、図 3.4 の例では、(a) 初めユーザは初期位置で撮影された全方位画像を見ており、(b) 全方位画像のうちユーザ背後の部分が遷移後の VR 空間に置き換わる。(c) ユーザが左を向くとその視野の左に VR 空間が見え始め、(d) さらに左を向くことですべての視野が VR 空間に置き換わる。この遷移手法は遷移前と遷移後の空間が連続的に繋がっていなくても適用可能なため、

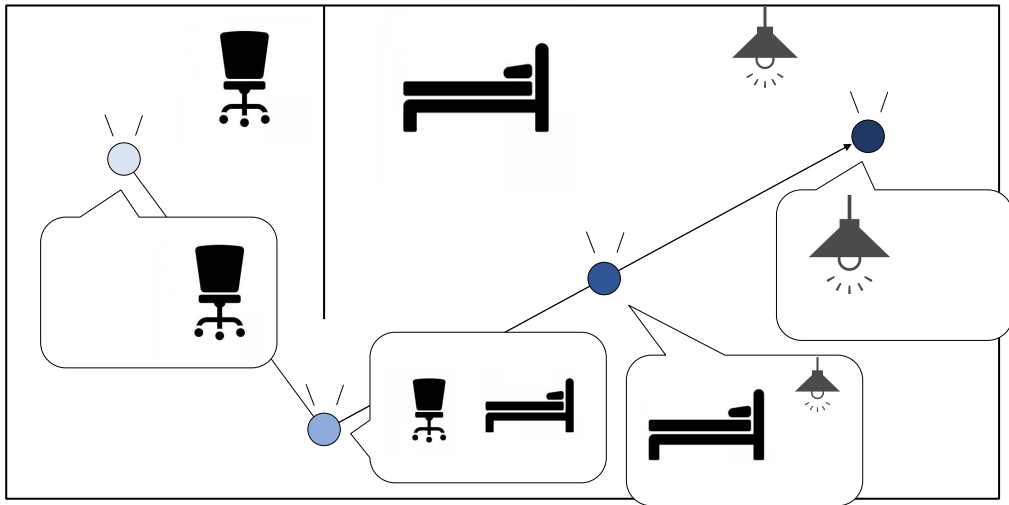


図 3.3 Gradual Movement の遷移イメージ図.

任意の VR コンテンツを遷移後の空間として利用できる。

3.3.3 Gradual Replacement with Edge Filtering (GREF)

Gradual Replacement は、ユーザの見回しにより遷移前と遷移後の映像境界が顕著となり、その断絶を意識してしまう可能性がある (図 3.5 参照)。そこで、その断絶を軽減し、よりスムーズな遷移を行うための手法として、Gradual Replacement with Edge Filtering を提案する。芹沢ら [21] は現実空間での視界を絵画調に変換する研究の中で、図 3.6 のように 2 つの全方位映像を絵画調にしたうえで合成することにより、その境界が目立たなくなることを示した。本研究では絵画調の変換に類似した効果があり、より単純なエッジ抽出を用いて、GR の際の境界を目立たなくすることを狙う。遷移の概要を図 3.7 に示す。Gradual Replacement with Edge Filtering では、まず遷移前にエッジ処理によって仮想化現実空間での視界を情報量を落とした白黒の視界へと置き換える。この置き換えにはフェーディングを用いる。そして白黒の世界で GR を行った後、再度フェーディングによってカラー化し VR 空間に遷移することになる。例えば、図 3.7 の例では、(a) 初めユーザは

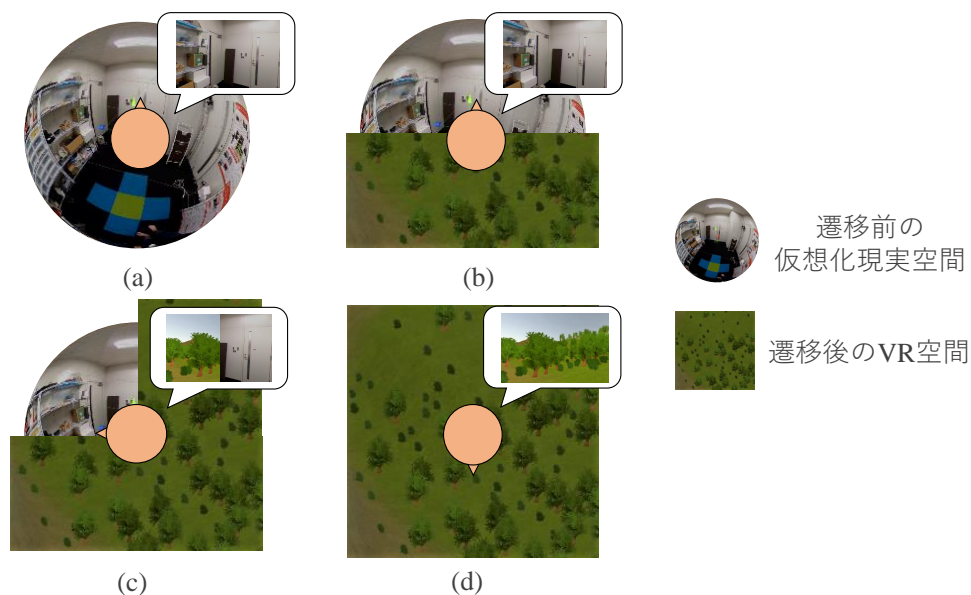


図 3.4 Gradual Replacement の遷移イメージ図. 吹き出し内の図はユーザの視界を表す. (a) 遷移前の状態, (b) 遷移が始まった直後の状態, (c) ユーザが左に 90° 振り向いた時の状態, (d) ユーザが 180° 振り向き遷移が終了した状態.

初期位置で撮影された全方位画像を見ており, (b) エッジ処理によって視界が白黒になる. (c) GR を用いて遷移し, (d) 振り向くことですべての視野が VR 空間に置き換わる. (e) 最後にカラー化し VR 空間に遷移が完了する. これにより, GR で確認された境界線の違和感の軽減が期待できる.

3.4 HMD によるコンテンツの提示

オンライン処理では, ユーザは 2 段階で対象の VR 空間へと遷移する. まず HMD を装着させ, 3.2 節で作成された仮想化現実空間内の視点がユーザに提示される. ユーザ視点から撮影された全方位映像は, 実際の現実環境を HMD 越しにビデオスルー方式で見た映像とほぼ同じように見えるため, 鈴木ら [5] の研究と同様にいまここ感は保たれると予想される. その後, 3.3 節で作成された映像効果がユーザに提示される. 遷移中, ユーザは徐々に遷移後の環境へと変化する映像を見渡せる. この 2 段階の遷移によって, 遷移後の空間を直接体験するよりも高いレ



図 3.5 Gradual Replacement における遷移途中での境界イメージ図.



図 3.6 芹沢ら [21] の研究における全方位映像の合成図. (左) 変換前の元画像, (右) 画風変換をかけた画像.

ベルでのいまここ感の保持が期待される.

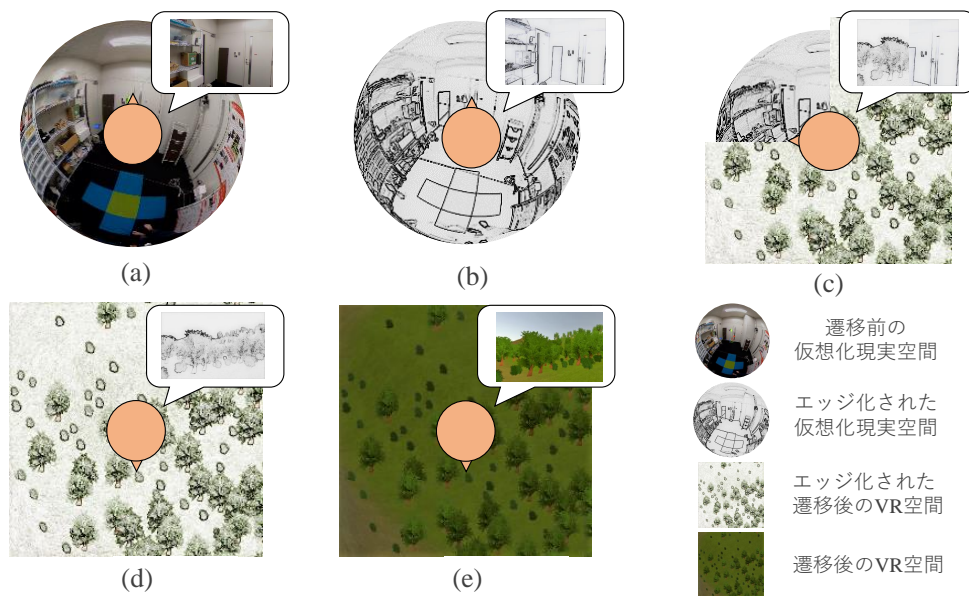


図 3.7 Gradual Replacement with Edge Filtering の遷移イメージ図. 吹き出し内の図はユーザの視界を表す. (a) 遷移前の状態, (b) エッジ処理が行われた状態, (c) GR を用いて遷移している状態, (d) ユーザが 180° 振り向き GR が終了した状態, (e) エッジ処理から元の視界に戻り遷移が終了した状態.

第 4 章 試作システム

本章では，3 章の提案手法に基づいて実際に試作したシステムについて述べる．また，試作システムを用いて開発した 2 種類のアプリケーションについて述べる．

4.1 ハードウェア

試作システムに用いたデスクトップ PC，全方位カメラである RICHO THETA V，HMD である HTC VIVE Pro のスペックをそれぞれ表 4.1，表 4.2，表 4.3 に示す．

表 4.1 デスクトップ PC のスペック．

CPU	Intel®Core™ i7-3970X / 3.50GHz
GPU	NVIDIA®GeForce GTX TITAN X / 32GB Memory
メモリ	32GB

表 4.2 RICHO THETA V のスペック．

カメラ画素	1200 万
カメラ解像度	3840 × 1920
フレームレート	最大 30 フレーム / 秒
重量	121g

表 4.3 HTC VIVE Pro のスペック．

ディスプレイ	有機 EL (90Hz)
解像度	2880 × 1600 (片目あたり 1440 × 1600)
水平画角	100°
対角画角	110°
センサ	SteamVR トラッキングセンサ，加速度センサ，ジャイロスコープ，近接センサ，IPD センサ
重量	765g

4.2 ソフトウェア

システムは 3D ゲームエンジンである Unity 2018.2.14f1 を用いて実装した。RICO THETA の 2 個の半球レンズによってセパレート撮影された映像を正距円筒図法に変換するため、RICO THETA 基本アプリを用いた。

4.3 システム構成

本節では提案フレームワークを適用した試作システムにの実装について述べる。

4.3.1 仮想化現実空間の生成

ユーザの存在する実環境を模した仮想化現実空間として、現実空間のユーザ視点で撮影された全方位映像を用いる。全方位映像は正距円筒図法で保存されており、マッピングのため、全方位映像のテクスチャ座標 (s, t) 球面上の 3 次元直交座標 (x, y, z) との対応付けを行う (図 4.1 参照)。まずテクスチャ座標を極座標変換する。極座標 (θ, ϕ) は以下のように表せる。

$$\theta = \left(s - \frac{n}{2}\right) \cdot \frac{2\pi}{n}, \phi = \left(\frac{m}{2} - t\right) \cdot \frac{\pi}{m}$$

このとき n, m は画像のピクセルサイズである。これをさらに以下の式で球の 3 次元直交座標に変換する。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \cos(\theta) \\ \sin(\phi) \\ \cos(\phi) \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

4.3.2 遷移映像効果の生成

前章では遷移手法として、GM, GB, GREF を提案した。本節では、各遷移手法の実装の詳細について述べる。

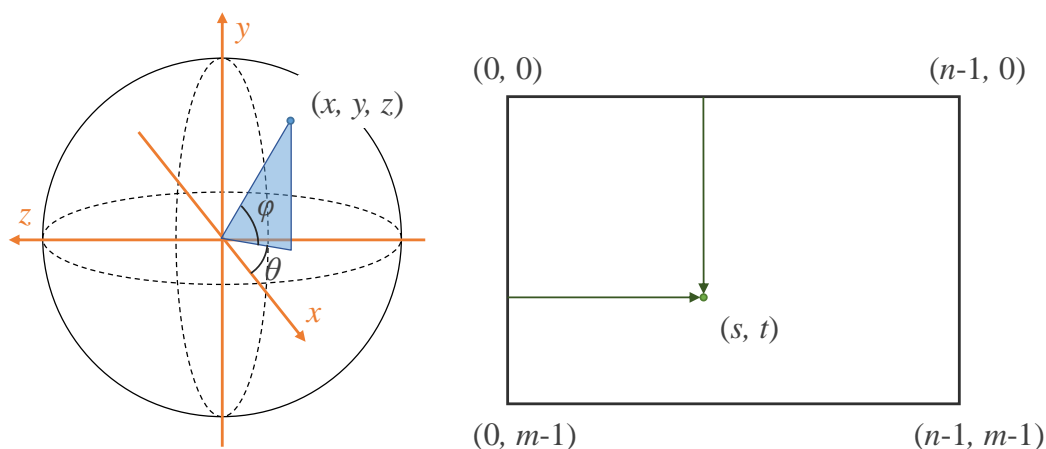


図 4.1 球の 3 次元直交座標系とテクスチャ画像の 2 次元直交座標系.

Gradual Movement

Gradual Movement は図 4.5 のように RICO THETA によって撮影された映像の表示によって実装される．特定のボタンを押すことで，再生が開始され，再生終了後に最終的な VR 空間へと切り替わる．

Gradual Replacement

まず球の中心を原点とし，球の各点 i と原点の座標から，各点の原点からのベクトル \mathbf{V}_i を取得する．毎ループごとにユーザの向いている方向をベクトル \mathbf{A} として取得する．そして \mathbf{A} と各 \mathbf{V}_i について角度が 90 度以上離れていたら，原点に向かって \mathbf{V}_i 方向に i の座標を描画される範囲外になるまで動かす (図 4.2)．もし点の 90% 以上が移動した場合は，テクスチャの画素のアルファ値を 0 にすることでフェードアウトさせる．

Gradual Replacement with Edge Filtering

Unity のアセット KinoContour を用いて視界にエッジ検出フィルタを施す．KinoContour は図 4.3 のように Unity 内でレンダリングされた映像を Canny 法によってエッジ抽出し，任意の 2 色を用いたエッジ化映像に変換する．GREF ではまずフェーディングによってエッジ化された視界に置換される．その後特定のボタ

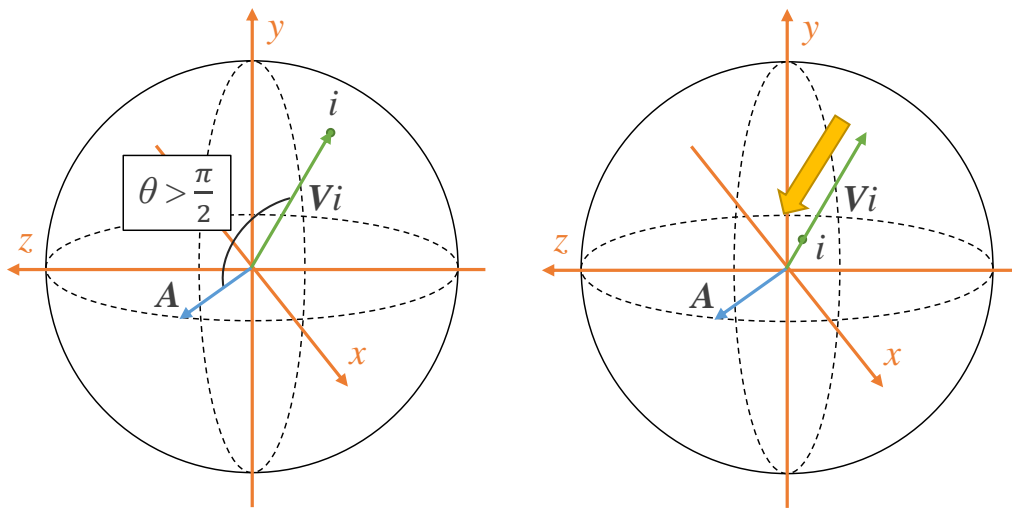


図 4.2 GR において球の各点で行われる処理の概要図.

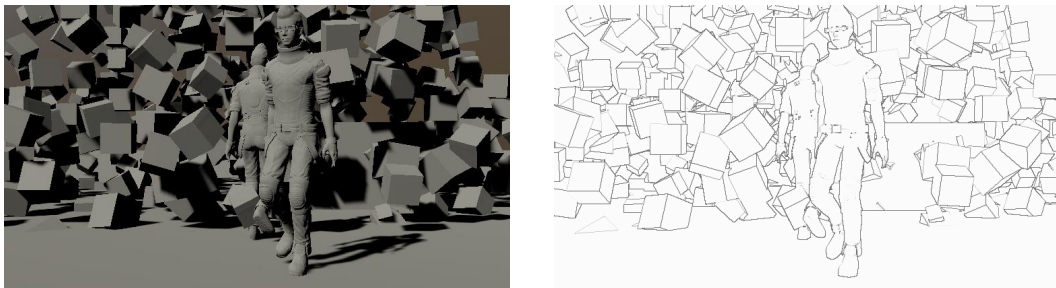


図 4.3 KinoContour によるエッジ処理例.

ンを押すことで GR が開始され、遷移先の映像に置換された点が 90% 以上になったタイミングでエッジ化されていない本来の遷移先映像にフェーディングにより置換される。

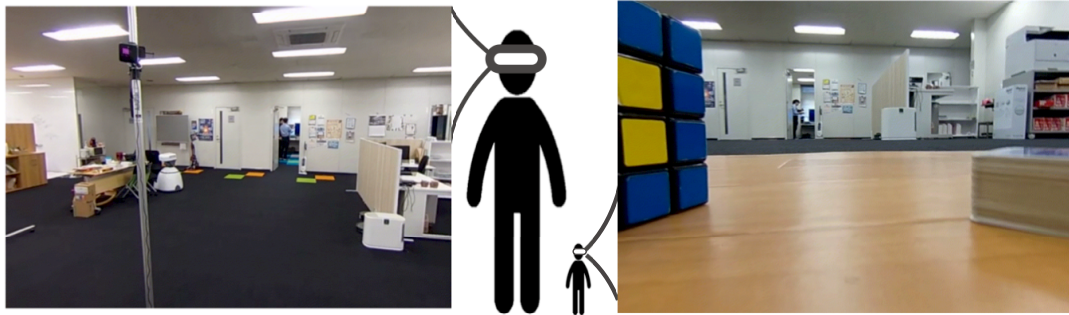


図 4.4 小人体験アプリケーションの概要図。

4.4 小人体験アプリケーション

小人体験アプリケーションは、図 4.4 のようにユーザの視点位置を低くすることによって、まるで小人のように自らが小さくなっている感覚を与えるアプリケーションである。このとき同時に瞳孔間距離も変更しており、それにより知覚される物体のサイズや物体までの距離も変化する。これにより、あたかも自らが小人になったかのような感覚が強まることが期待される。ユーザは HMD を装着した後に徐々に視点が下がる映像を経て、最終的に 50 倍の大きさに見えるように、ルービックキューブのようなサイズに馴染みのある 3D オブジェクトを含む VR 空間へと遷移する。VR 空間ではユーザは周囲を歩き回ることができ、その範囲は HTC VIVE pro のトラッキングエリアに設定した 3m×3m である。本アプリケーションにおけるマッピングされた球の半径は 11m で固定されており、遷移中の球の実時間変形によって遷移中及び遷移後は床部に対して立体視が有効である。

4.4.1 仮想化現実空間の生成

現実空間のユーザ視点で撮影された全方位映像を用いる。図 4.5 で撮影された映像の 1 フレーム目が提案フレームワークにおける仮想化現実空間に相当する。

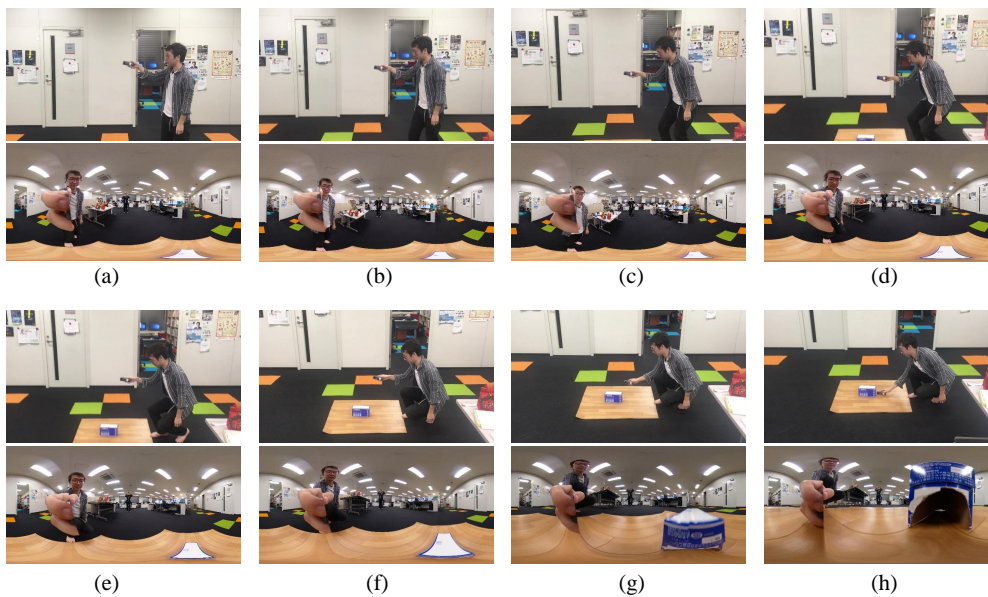


図 4.5 GM に用いる全方位映像撮影の様子と撮影された全方位映像.

4.4.2 遷移映像効果の生成 : Gradual Movement

全方位カメラにより図 4.5 のような、ユーザの視点から小人の低い視点まで連続的に下がっていく全方位映像を用いる。図 4.5 における (a) はユーザ視点であり、ここからユーザの足元付近の視点 (h) まで視点が徐々に下がっていくような映像となるよう、カメラをゆっくり降ろすことで視点 (b)~(g) を撮影した。この映像をオンライン処理で再生することで、スムーズな遷移を実現する。映像が再生し終わったのち、ユーザの視界内に存在するオブジェクトを 3D オブジェクトに置き換え、最終的な VR 空間へと遷移する。

4.4.3 オンライン処理における全方位映像の実時間変形

図 4.6 のように全方位映像がマッピングされた 11m の球の内、全方位映像の床部を平面化させ簡易 3D モデル化することで、ある程度の運動視差と両眼視差をユーザに与えられる。小人体験アプリケーションにおいては、ユーザは通常の高さから徐々に床面に近づく映像を体験する。この下降に合わせて床面が広がるように、初

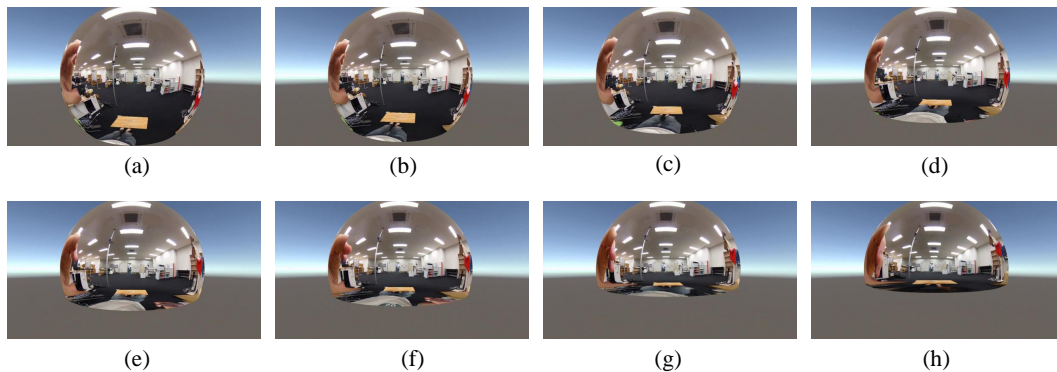


図 4.6 実時間での変形イメージ. (a)~(h) は図 4.8 の視界例に対応する.

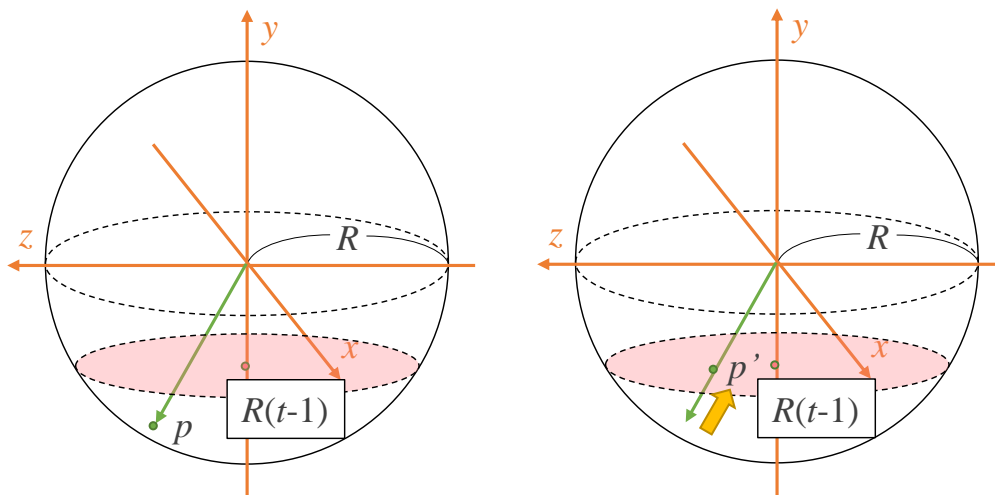


図 4.7 全方位映像の実時間変形概念図.

期形状が球, 最終形状が半球となるように簡易 3D モデルを変形させる.

変形の概要を図 4.7 に示す. 球の半径を R とし, 全方位映像の再生時間を t ($0 \leq t \leq 1$) とする. このとき, $y = R(t - 1)$ を床面として, $y < R(t - 1)$ となる球面上の点を床面上に移動する. 点 $p(x, y, z)$ が $p'(x', y', z')$ に移動する時, $x' = R(t - 1) \cdot \frac{x}{y}$, $y' = R(t - 1)$, $z' = R(t - 1) \cdot \frac{z}{y}$ となる.

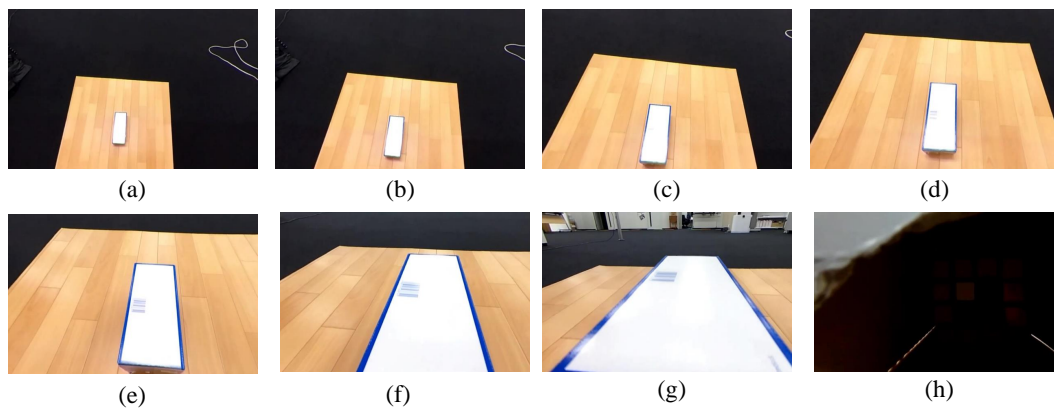


図 4.8 小人体験アプリケーションにおけるユーザの視界例.

4.4.4 ユーザ体験

本アプリケーションでは、ユーザはまず指定された位置に立ち、HMD を装着する。HMD で提示された映像は HMD を装着する前の光景とほぼ同一であり、それを周囲を見渡すことで確認する。この時の視界例が図 4.8 における (a) である。遷移が始まると自らの視点が徐々に下がっていき、下方向を見ると床部が迫ってきている様子を確認できる ((b)~(g))。遷移中も周囲を見渡すことが可能であり、遷移の終わり際には地面すれすれの視点に到着する ((h))。到着した瞬間、目の前に巨大なルービックキューブが出現し、遷移後はその巨大なオブジェクトの周囲を歩き回ることができる。

4.5 旅行アプリケーション

旅行アプリケーションは図 4.9 のように、まるで自分が別の場所に存在しているかのような感覚をもたらすアプリケーションである。遷移後の VR 空間は全方位カメラで撮影された現実空間における他地点での視点または、CG 空間から切り取られたある一視点である。

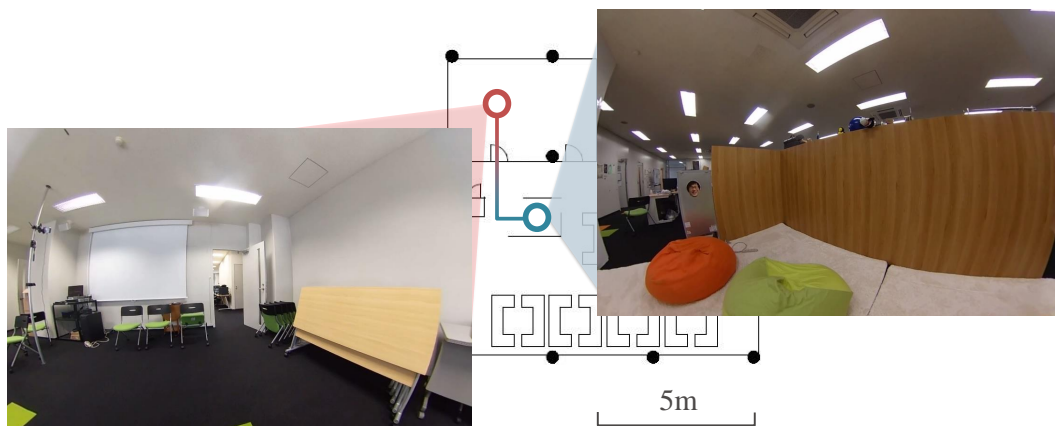


図 4.9 旅行アプリケーションの概要図.

4.5.1 仮想化現実空間の生成

小人体験アプリケーションと同様，現実空間のユーザ視点で撮影された全方位映像を用いる．図 4.10 の左上のような全方位映像の 1 フレーム目を仮想化現実空間とする．

4.5.2 遷移映像効果の生成

Gradual Movement

図 4.10 のような 2 地点を空間的に連続的に繋ぐ全方位映像を用いる．遷移前の視点から視点後の視点への移動がスムーズに見えるよう，カメラを平行移動させて撮影した．

Gradual Replacement と Gradual Replacement with Edge Filtering

GM にて撮影した全方位映像の 1 フレーム目である仮想化現実空間を，遷移後の空間で撮影された全方位映像，または CG で構成された VR 空間に置き換える．旅行アプリケーションにおける GR の遷移イメージ図として図 4.11，GREF の遷移イメージ図として図 4.12 を示す．

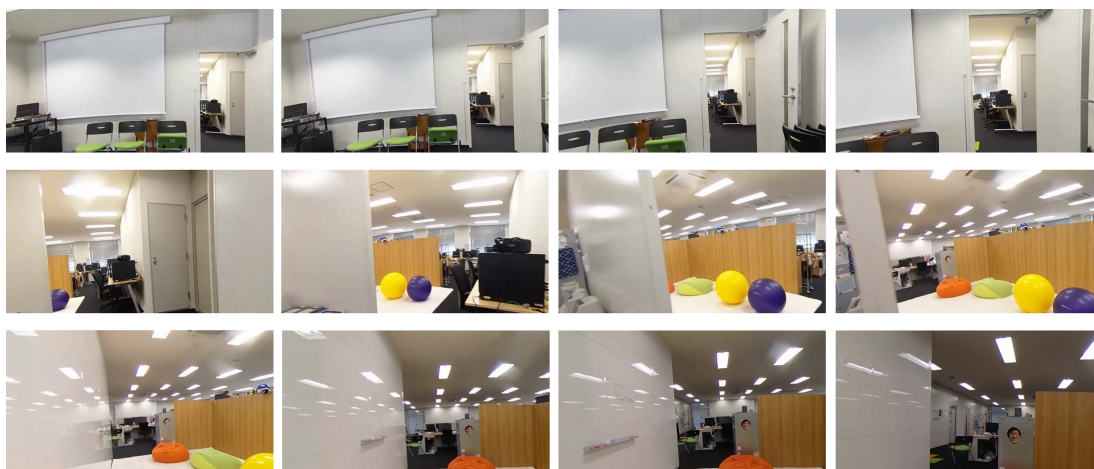


図 4.10 旅行アプリケーションにおける Gradual Movement イメージ図.



図 4.11 旅行アプリケーションにおける Gradual Replacement イメージ図.

4.5.3 ユーザ体験

旅行アプリケーションにおいてもユーザが指定された位置に立ち、HMD を装着して周囲の現実環境とほぼ同じ光景を見渡すという点は同様である。その後 GM による遷移では、図 4.10 のようにユーザの視点が水平方向に移動する。扉や仕切りを超え、ユーザは自分が移動しているような感覚を得る。遷移中も周囲を見渡すことが可能であり、おおよそ 10 秒ほどで最終的な目的地である、開始地点とは別の部屋の空間の視点到着する。到着後は周囲を見渡し、他の視点へと移動してき



図 4.12 旅行アプリケーションにおける Gradual Replacement with Edge Filtering イメージ図.

たことを確認する。

GR や GREF による遷移では、ユーザはまず周囲を見回すように指示される。図 4.11 のようにユーザが背後や側面に振り向くことで、別の部屋の映像への切り替わりを確認する。しばらく見回し続けることにより、全方位において別の部屋の光景になっていることに気づき遷移は終了する。遷移後は GM の場合と同様に周囲を見渡し、他の視点へと移動してきたことを確認する。

第 5 章 実験

本章では、4 章で述べた試作システムの 2 つのアプリケーションを用いた被験者実験の内容とその結果について述べる。実験 1 ではいまここ感が保ちやすいと期待される条件で、提案フレームワークによってどれほどいまここ感を保てるのかを調査する。実験 2 ではより一般的なアプリケーションを想定した、いまここ感が保ちにくい可能性がある条件で提案フレームワークの有効性を調査する。

5.1 実験 1

5.1.1 実験目的

実験 1 では、いまここ感を高く保ちやすいと期待される条件、具体的には遷移前の空間と遷移後の空間の間の地理的断絶が少ない条件で提案フレームワークによって、いまここ感がどれほど保たれるかを調査する。いまここ感が保持されることについて、VR 空間に遷移するまでの体験を遷移前 (仮想化現実空間の提示)、遷移中 (遷移映像効果の提示)、遷移後 (VR 空間内の視点提示) の 3 段階に区切り、各段階でどれほどのいまここ感を感じたかをアンケートによって調査する。比較のため、遷移手法は提案手法の他に後述する遷移効果なしの場合と Transitional Interfaces で提案されている既存手法を用いた。

5.1.2 実験条件

遷移前の空間と遷移後の空間の間の地理的断絶が少ない条件を満たすよう、小人体験アプリケーションの遷移後の空間は図 5.1 のようなユーザの足元に近い空間、旅行アプリケーションの遷移後の視点は図 5.2 のような同じ建物内の別の部屋のある 1 視点とした。

遷移手法について、小人体験アプリケーションでは以下の 3 手法を比較する。

- GM (Gradual Movement):
3・4 章で述べた提案手法。

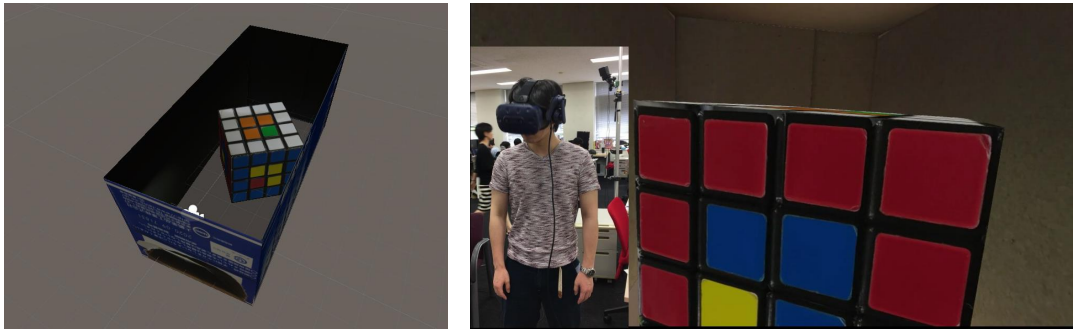


図 5.1 小人体験における遷移後空間イメージ図。(左) 俯瞰視点で撮影されたCG, (右) 被験者の視界例.



図 5.2 旅行アプリケーションにおける遷移後空間イメージ図。(左) 正距円筒図法で表示されたテクスチャ画像, (右) 被験者の視界例.

- FD (Fading):
数秒で遷移前の全方位映像がフェードアウトし, 最終的に遷移後空間の視界へと切り替わる手法.
- CT (Cutting):
全方位映像から遷移後空間の映像へと瞬間的に切り替わる手法.

旅行アプリケーションでは以下の 3 手法を比較した.

- GM (Gradual Movement):
3・4 章で述べた提案手法.
- GR (Gradual Replacement):

3・4章で述べた提案手法.

- FD (Fading):

数秒で遷移前の全方位映像がフェードアウトし, 最終的に遷移後空間の視界へと切り替わる手法.

評価にはアンケートを用いた. 以下の4つの質問に5段階のリッカード尺度で回答する. それぞれの質問について「あてはまる」は5, 「あてはまらない」は1と回答させた.

- Q1. 小人になった感覚がした. / 遷移先に存在している感覚がした.
- Q2. 遷移前の空間にいまここ感を感じた.
- Q3. 遷移中の映像にいまここ感を感じた.
- Q4. 遷移後の空間にいまここ感を感じた.

5.1.3 タスク内容

各アプリケーションごとに被験者は指定された位置に立ち, HMDを装着してから提示された全方位映像を見渡すように求められる. 全方位映像の確認後, 3つの遷移方法の内1つを用いてVR空間に遷移する. 遷移後, 被験者はHMDを外される前に, 小人体験アプリケーションであれば拡大された3Dオブジェクト(ルービックキューブ)を周囲を歩き回ることによって観察し, 旅行アプリケーションであれば遷移後の空間を見渡すことによる観察する. 各アプリケーションに対し, この一連の流れは3つの異なる遷移手法を用いて1度ずつ, 合計3度繰り返される. 被験者は全ての遷移手法を体験した後, いまここ感について説明を受け, アンケートに回答する. 3つの遷移手法の体験順序はラテン方格法に従い被験者ごとに入れ替える.

5.1.4 結果

被験者は20歳から24歳までの大学生・高等専門学校生で, 人数は小人体験アプリケーションが12人, 旅行アプリケーションが13人であった. 図5.3, 図5.5にてそれぞれのアプリケーションにおける実験結果の度数分布図を示す. また図5.4,

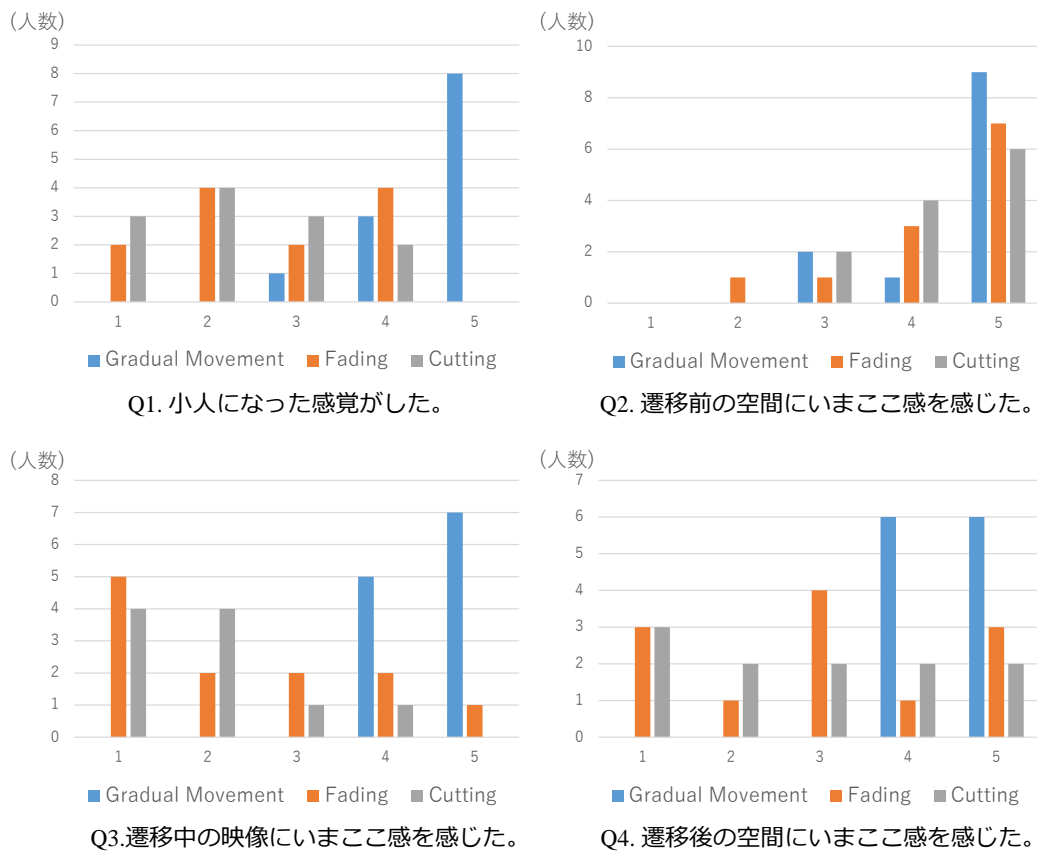


図 5.3 小人体験アプリケーションの度数分布図。

図 5.6 にてアンケート結果を間隔尺度とみなした場合の平均値と 95% 信頼区間を示す。

クラスカル・ウォリス検定により、Q1・Q3・Q4 の結果に統計的な有意差を確認した。Q1 は小人体験アプリケーションでは $p < 0.001$ ，旅行アプリケーションでは $p < 0.001$ である。Q3 は小人体験アプリケーションでは $p < 0.001$ ，旅行アプリケーションでは $p < 0.001$ である。Q4 は小人体験アプリケーションでは $p < 0.05$ ，旅行アプリケーションでは $p < 0.01$ である。各質問に対して、下位検定としてボンフェローニ補正を用いたマン・ホイットニーの U 検定を行った。それぞれの図中で統計的有意差のあった箇所を* ($p < 0.05$)，** ($p < 0.01$)，*** ($p < 0.001$) で示す。

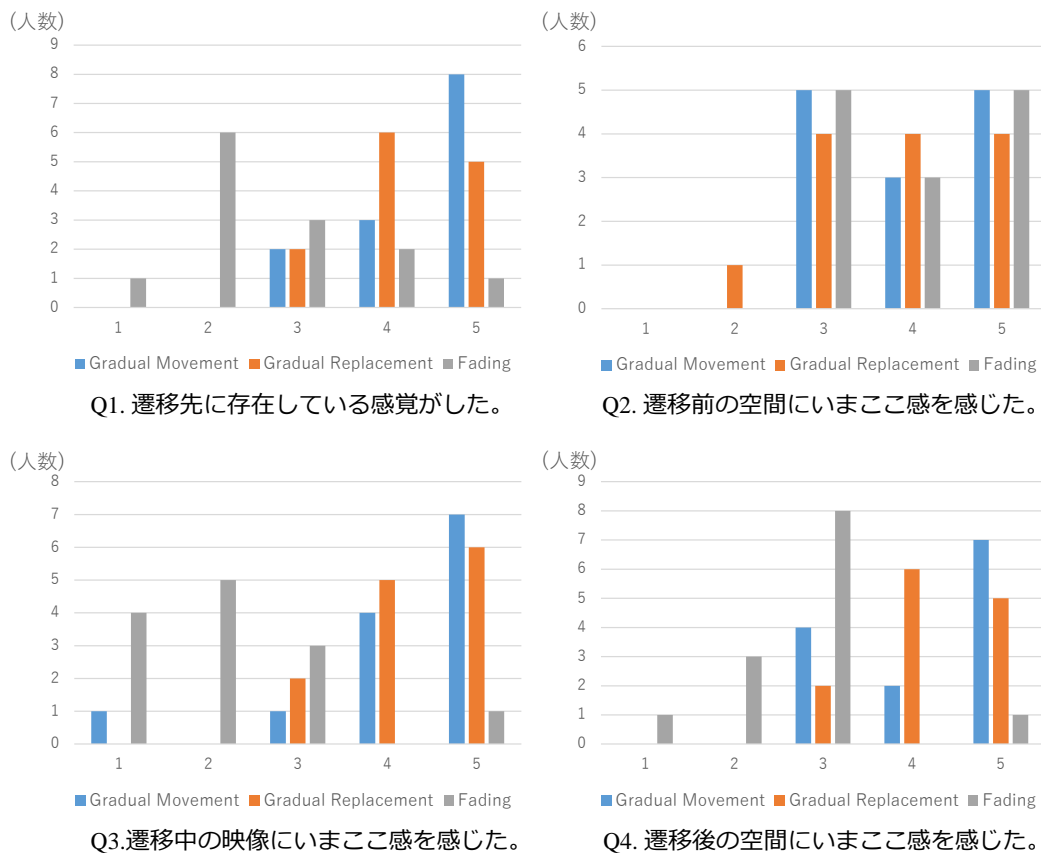


図 5.4 旅行アプリケーションの度数分布図.

5.1.5 考察

Q1 の結果は、両方のアプリケーションにおいて提案された遷移手法を使用することによって、遷移後の空間におけるプレゼンスがフェーディングなどの従来の手法と比較して改善されることを示している。いまここ感の変化に関して、被験者はすべての条件で全方位映像を提示されたときに中レベルから高レベルのいまここ感を感じた。これは代替現実感 [5] と同様な結果であり、全方位映像を提示することで、現実空間の CG 化よりもはるかに少ない手間でかつ十分にいまここ感を保てることが確認された。

Q3, Q4 から遷移中および遷移後のいまここ感はフェーディングまたはカッティングにより失われるが、提案手法では比較的高く維持されることが確認できた。実

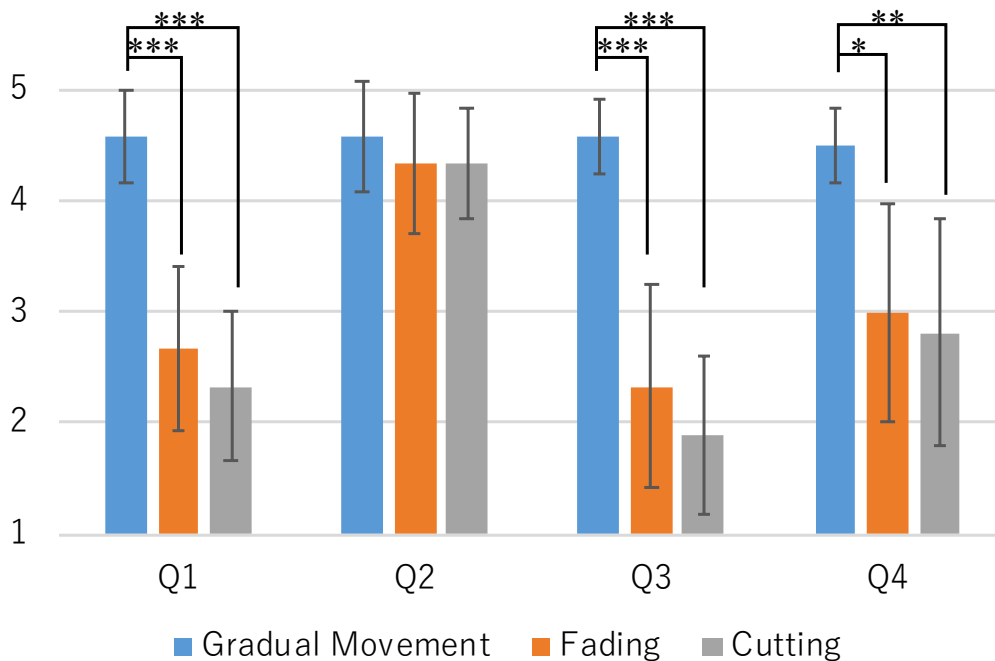


図 5.5 小人体験アプリケーションにおける実験結果の平均値と 95% 信頼区間.

験後のインタビューでは「(GM は) 徐々に小さくなっていくため小人感があった」「(GR は) 振り向くことによって遷移するのが良かった」などの意見があり、視覚的に連続的な遷移 (GM) と遷移におけるインタラクティブ性 (GR) がいまここ感の保持に寄与することが示唆された。

5.2 実験 2

5.2.1 実験目的

実験 1 により、いまここ感を保ちやすい条件で提案フレームワークを用いて、いまここ感の保持に対する有効性を示した。これを受け実験 2 では、より一般的な VR アプリケーションを想定し実験を行う。実験 2 の目的はいまここ感を保ちにくい可能性がある条件、具体的には遷移前の空間と遷移後の空間の間の地理的断絶が大きい条件で提案フレームワークによるいまここ感への影響を調査することである。

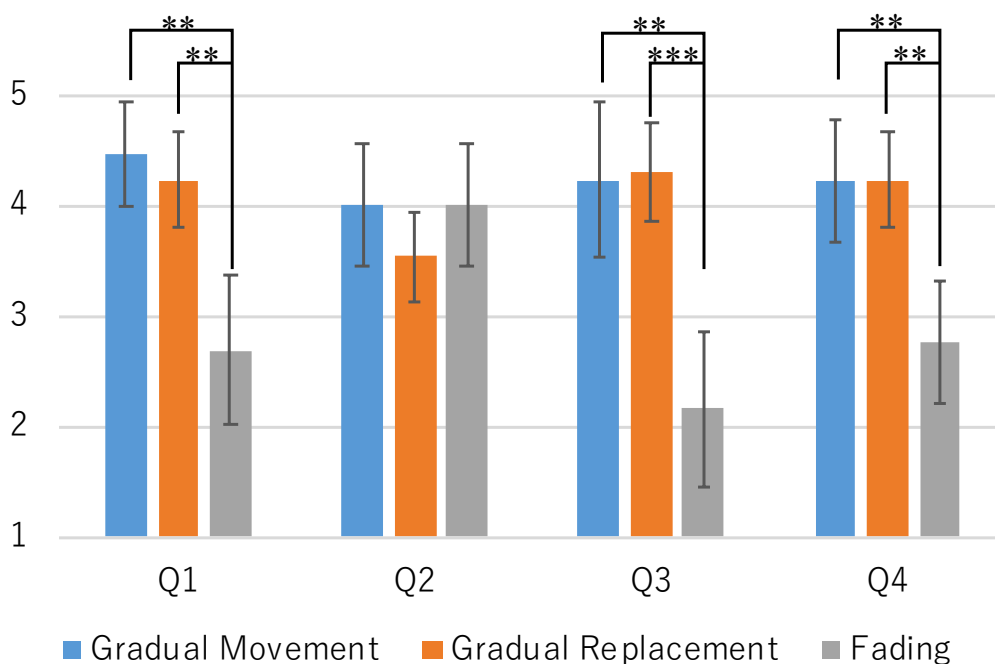


図 5.6 旅行アプリケーションにおける実験結果の平均値と 95% 信頼区間.

る。検証内容は実験 1 と同様に遷移前・遷移中・遷移後の各段階でどれほどいまここ感が保たれたかを調べる。評価手法にはアンケートの他に心拍数と発汗量を用いた。

5.2.2 実験条件

実験 2 では旅行アプリケーションを用いる。遷移後の空間は 2 種類あり、図 5.7 のような災害風景の全方位画像を実画像条件、図 5.8 のような CG で構成された VR 空間を CG 条件とする。実験 1 では VR 空間の体験後、アンケートに回答するため現実空間に戻る際、HMD を外すことによって実際の現実空間に瞬時に遷移していた。この急激な遷移は VR 空間に対して感じていたいまここ感を減少させ、アンケート回答に負の影響を及ぼす可能性がある。そこで遷移手法を VR 空間へと遷移する「行き」に用いるだけでなく、仮想化現実空間へと戻る「帰り」にも用い、仮想化現実空間に戻った後に HMD を外すことにする。遷移手法の比較は以下の 3 手



図 5.7 実画像条件における遷移後空間イメージ図. (左) 正距円筒図法で表示されたテクスチャ画像, (右) 被験者の視界例.

法で行う.

- GREF (Gradual Replacement with Edge Filtering):
3・4章で示した提案手法.
- FD (Fading):
数秒で遷移前の全方位映像がフェードアウトし, 最終的に遷移後の空間の視界へと切り替わる手法.
- CT (Cutting):
突然全方位映像から遷移後空間の映像に切り替わる手法.

実験中は, 現実空間から聞こえる聴覚情報がいまここ感を下げる要因とならないように, マイクを通して HMD から流れる音声によりオペレートを行った. 評価には実験 1 と同じアンケートを用いる他, Grove 社の心拍センサ・GSR センサによって被験者の心拍数と発汗量を計測する. いまここ感が保たれることにより, VR 空間に対する緊張感や高揚感が高まり心拍数や発汗量が増加することが予想される.

5.2.3 タスク内容

実験 1 と同様, まず被験者は各条件ごとに指定された位置に立ち, HMD を装着してから提示された全方位映像を見渡すように求められる. 全方位映像の確認後は, 3つの遷移方法の内 1つを用いて遷移し, 遷移後は VR 空間を見渡すことで観

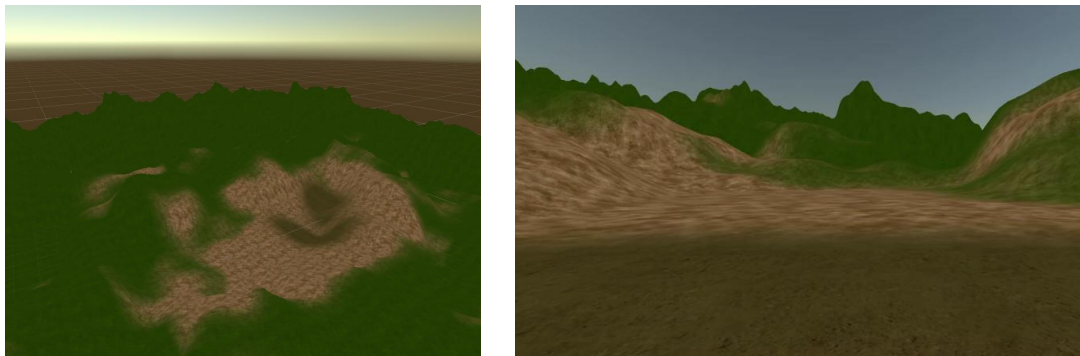


図 5.8 CG 条件における遷移後空間イメージ図。(左) 俯瞰視点で撮影されたものであり、(右) 被験者の視界例。

察する。実験 2 では VR 空間の確認後、行きの遷移に用いた映像効果を使い再度仮想化現実空間へと遷移する。各遷移後空間に対し、この一連の流れは 3 つの異なる遷移手法に対して 1 度ずつ、合計 3 度繰り返される。被験者は全ての遷移手法を体験した後、HMD を外しいまここ感について説明を受け、アンケートに回答する。3 つの遷移手法の体験順序はラテン方格法に従い被験者ごとに入れ替える。

5.2.4 結果

被験者は 22 歳から 30 歳までの大学院生 18 人 (男性 13 人, 女性 5 人) である。図 5.9, 図 5.10 にてそれぞれの条件における実験結果を示す。また図 5.11, 図 5.12 にてアンケート結果を間隔尺度とみなした場合の平均値と 95% 信頼区間を示す。クラスカル・ウォリス検定により、実画像条件の Q3, CG 条件の Q3・Q4 の結果に有意差を確認し、CG 条件の Q1 に有意傾向を確認した。実画像条件の Q3, CG 条件の Q3・Q4 は $p < 0.05$, CG 条件の Q1 は $p < 0.1$ である。各質問に対しては下位検定としてボンフェローニ補正を用いたマン・ホイットニーの U 検定を行い、図中、*は有意確率 $p < 0.05$ であることを示す。

GSR センサの結果を観察したところ、おおむね変化がなく、変化にも共通点は見られなかった。変化に乏しかった被験者の例として被験者 A の GSR センサと心拍数の変位を図 5.13, 図 5.14 に示す。一部被験者においては遷移前後に GSR センサの

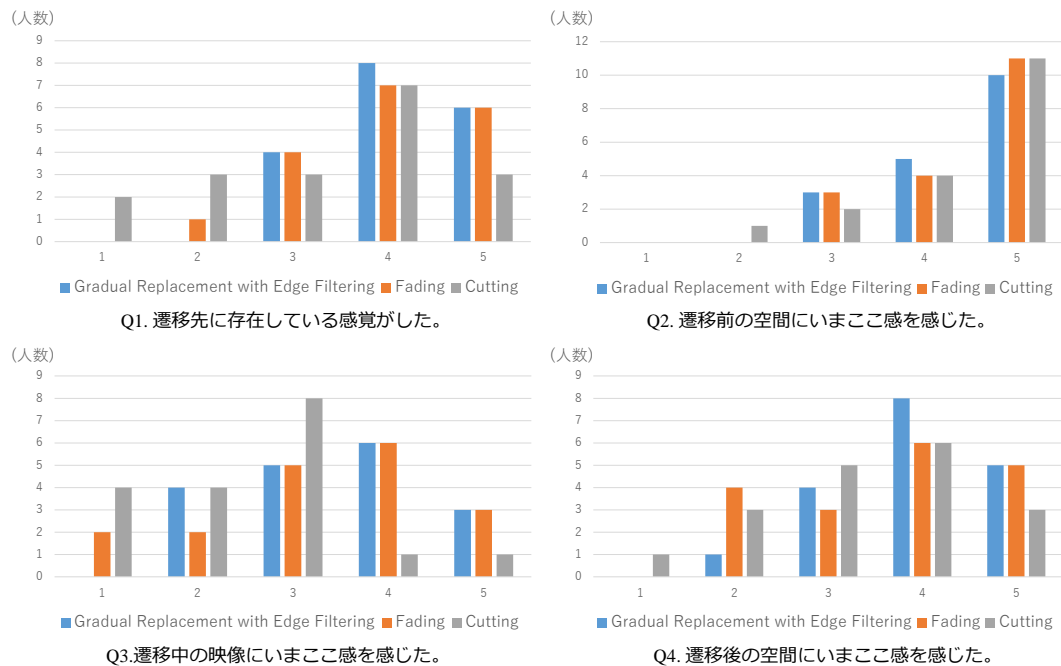


図 5.9 実画像条件の度数分布図.

値が下がり，発汗の増加を確認できた．図 5.15，図 5.16 に示す被験者 B では，提案手法による遷移中に最も発汗が増加していることが確認できる．また図 5.17，図 5.18 の被験者 C は実画像条件においてフェーディングでの遷移後にもっとも発汗が増加していた．心拍センサの結果は GSR センサ変化が乏しく，心拍数の変動は随時確認されたが，そのタイミングに共通点を見出すことはできなかった．代表的な結果例として図 5.13～5.18 にて結果を GSR センサの結果と共に示す．

遷移手法によって発汗量及び心拍数が変化したか調査するため，各遷移手法によって遷移した後の平均 GSR センサ値と心拍数を比較する．GSR センサ値は被験者によって値の範囲が大きく異なるため，最大値 100，最小値 0 となるよう正規化した上で比較する．結果を図 5.19，図 5.20 に示す．各条件に対して分散分析によって検定を行った結果，有意差は確認されなかった．

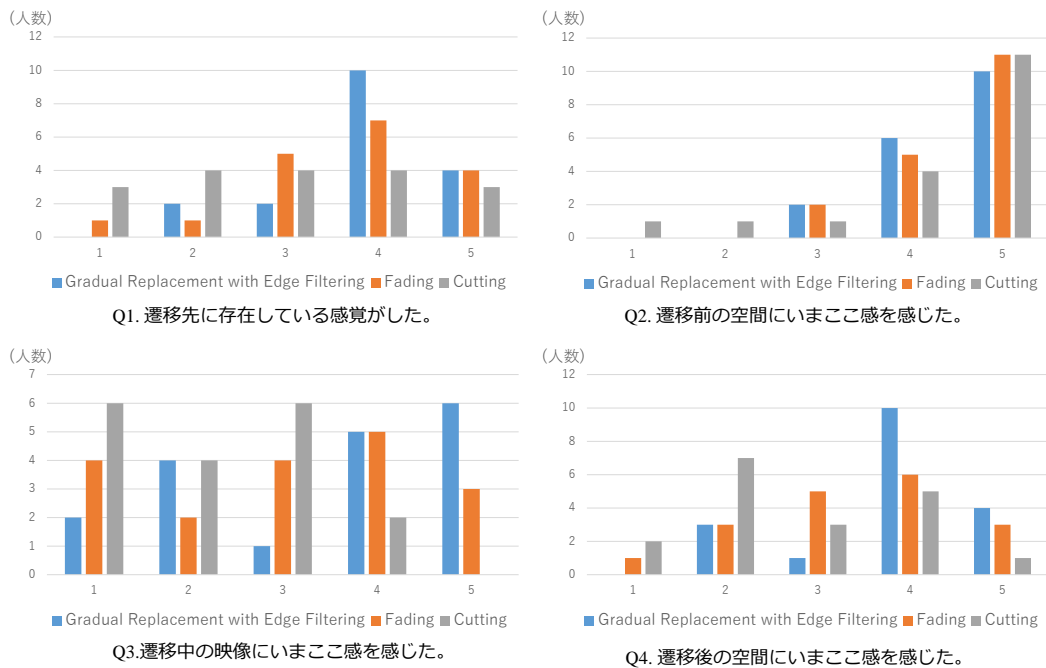


図 5.10 CG 条件の度数分布図.

5.2.5 考察

実験 1 とは異なり，Q1 で有意差は見られなかったが，全体的な傾向として提案手法がフェーディング・カッティングより有効である傾向が見て取れた．特に両条件における Q3・Q4 の結果により，提案手法を用いることで現実空間との断絶が大きい条件でもいまここ感が比較的高く保たれることが確認できた．Q2 の質問からは実験 1 と同様，被験者は全方位映像を提示されたときに中レベルから高レベルのいまここ感を感じている．実際，実験後のインタビューでは，全方位映像が実時間の現実空間ではないことに気付いた被験者は 18 人中 2 人のみであった．

個々の実験結果見ると，今回の実験では提案手法よりフェーディングの方が高いいまここ感を感じたという被験者が一定数存在した．インタビューでは GREF で視界が白黒化したことによって現実味が薄まったという意見があった．しかし逆に白黒化によっていつの間にか遷移した感覚を持てたという意見もあり，エッジ化された空間といまここ感の関係については今後も研究の余地がある．

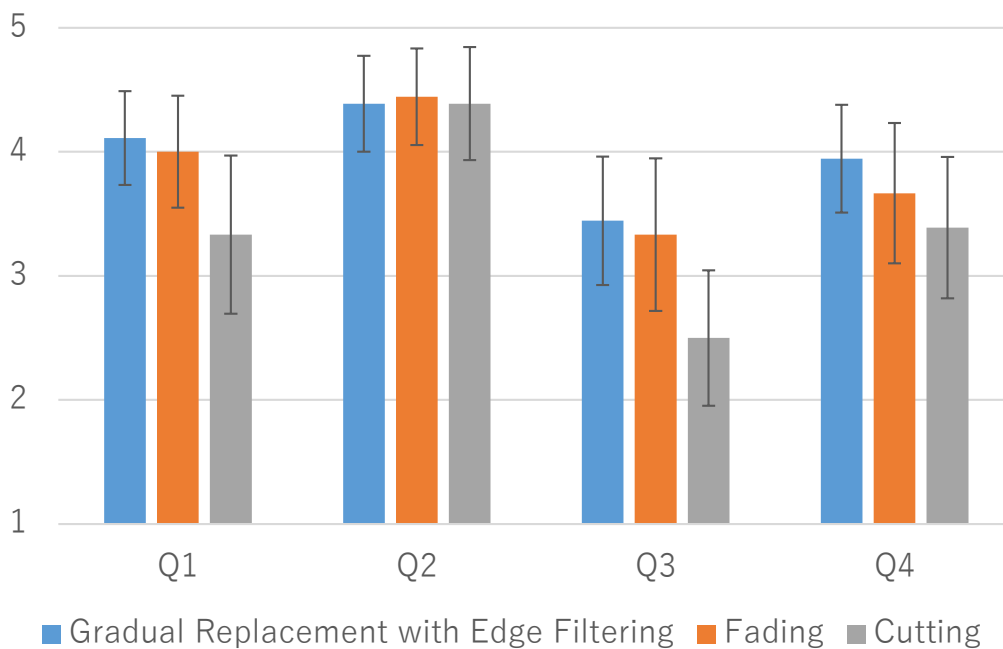


図 5.11 実画像条件における実験結果の平均値と 95% 信頼区間。

GSR センサの結果より，一部被験者においては遷移手法により発汗量の変化が確認できた．特に被験者 B は提案手法によって発汗が他の遷移手法より増加しており，遷移後の空間に対してより高い緊張感や高揚感を感じた可能性がある．このことから遷移手法を工夫することで VR 体験の質が変化することが示唆された．

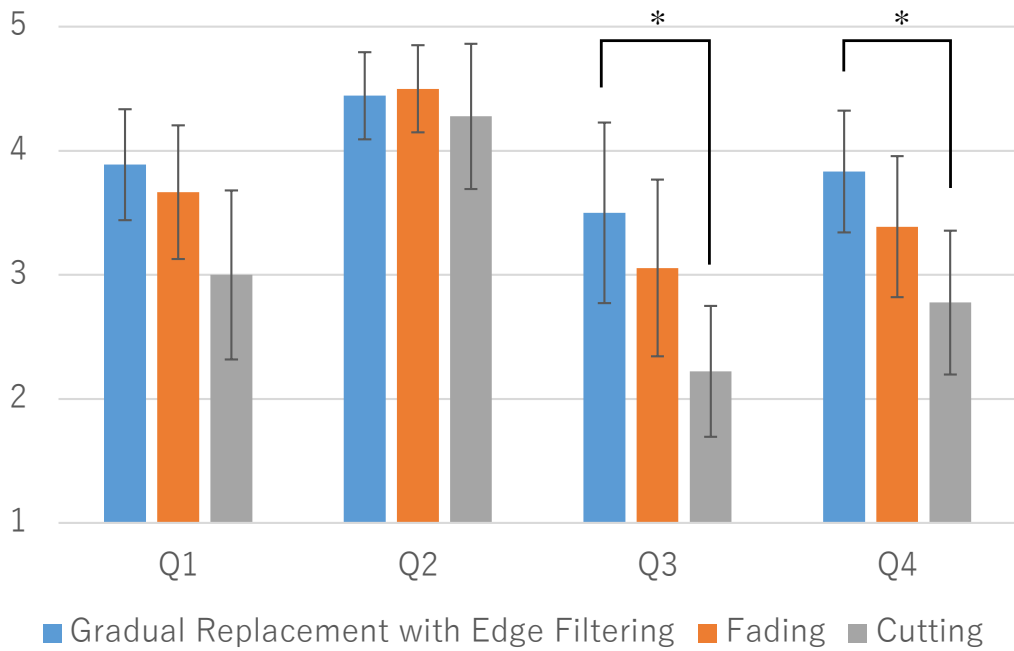


図 5.12 CG 条件における実験結果の平均値と 95% 信頼区間.

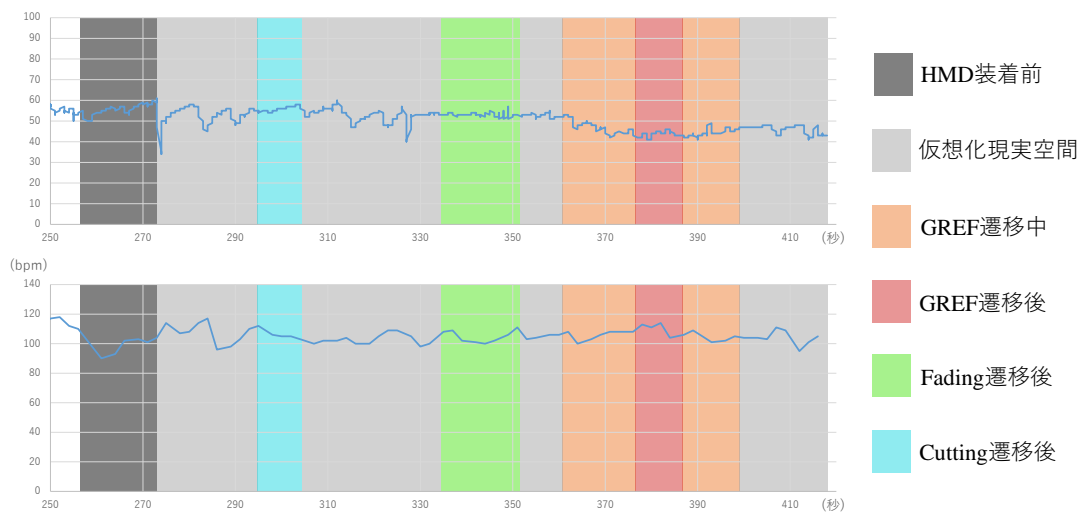


図 5.13 (上) 実画像条件における被験者 A の GSR センサのグラフ, (下) 心拍数グラフ.

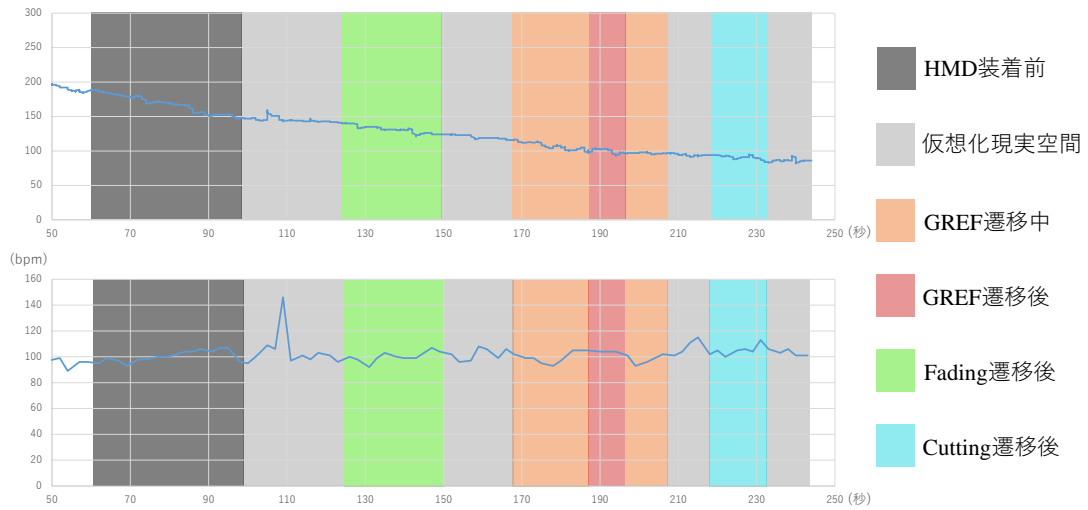


図 5.14 (上) CG 条件における被験者 A の GSR センサのグラフ, (下) 心拍数グラフ.

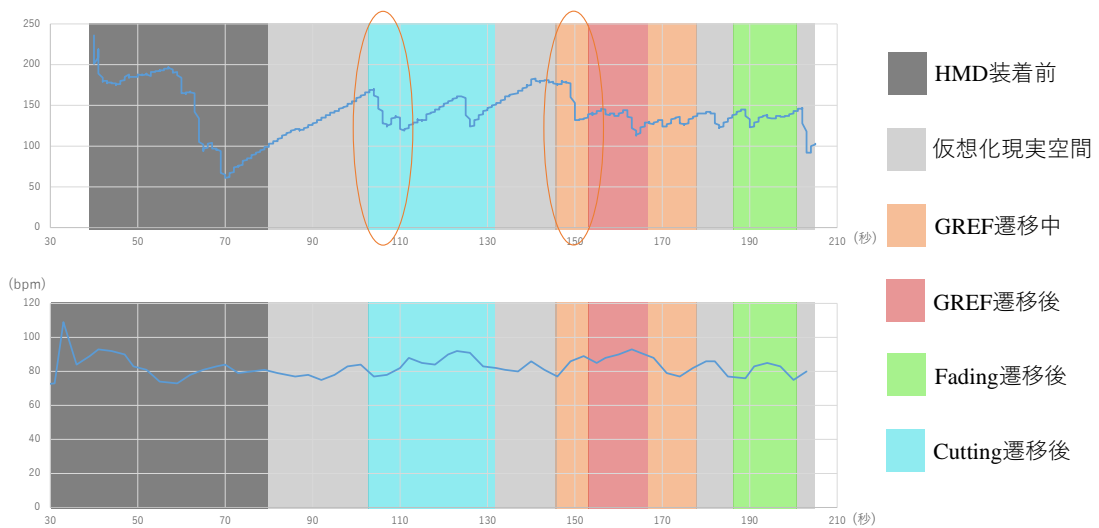


図 5.15 (上) 実画像条件における被験者 B の GSR センサのグラフ, (下) 心拍数グラフ.

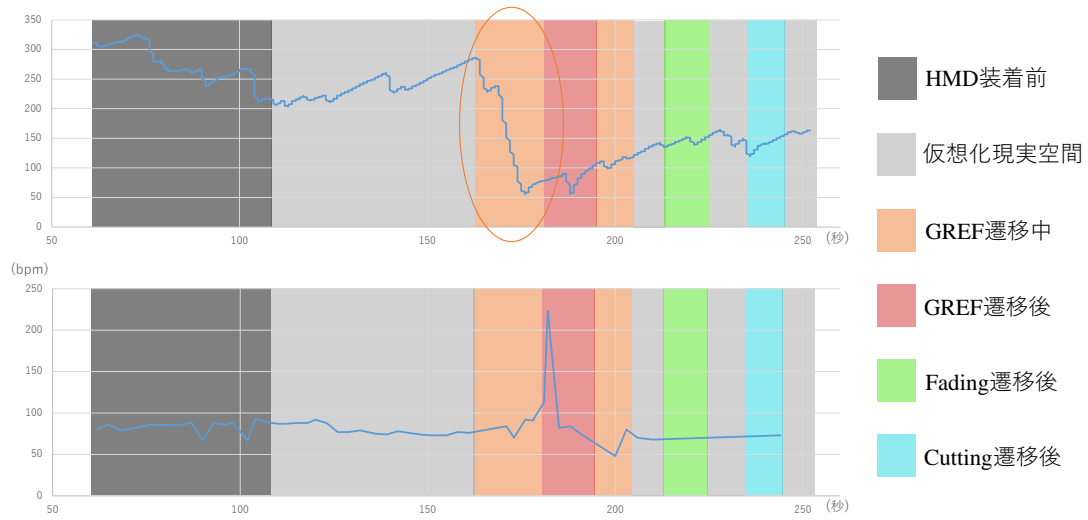


図 5.16 (上) CG 条件における被験者 B の GSR センサのグラフ, (下) 心拍数グラフ.

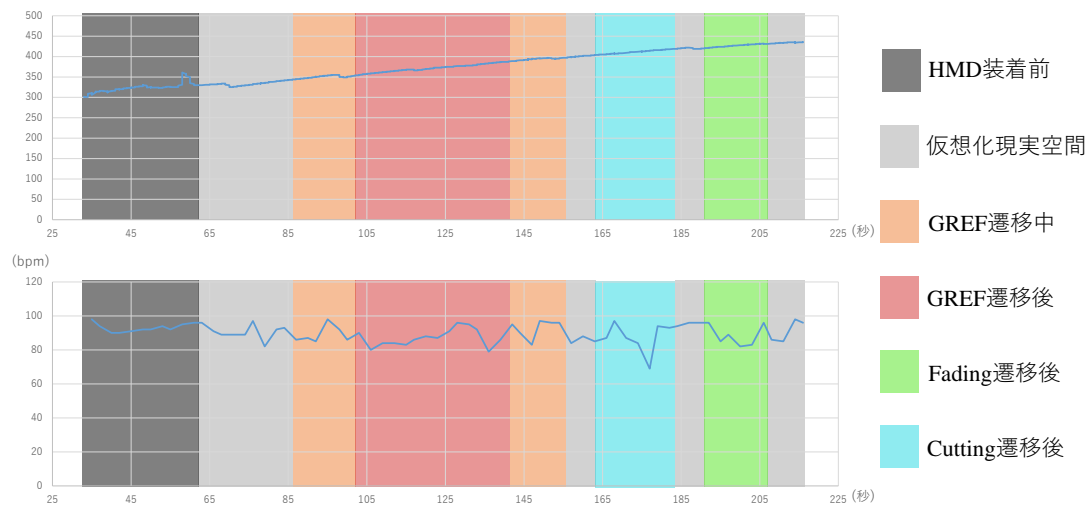


図 5.17 (上) 実画像条件における被験者 C の GSR センサのグラフ, (下) 心拍数グラフ.

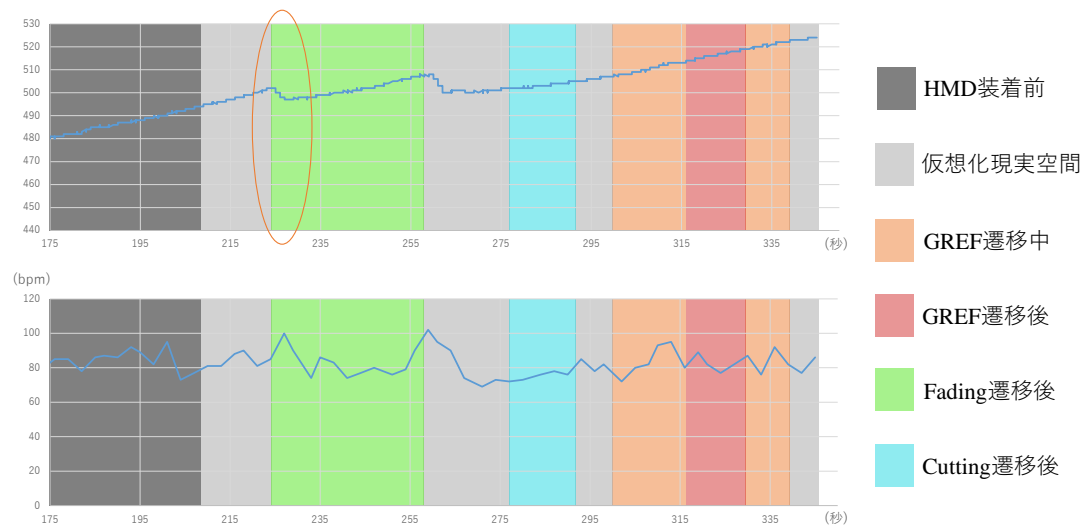


図 5.18 (上) CG 条件における被験者 C の GSR センサのグラフ, (下) 心拍数グラフ.

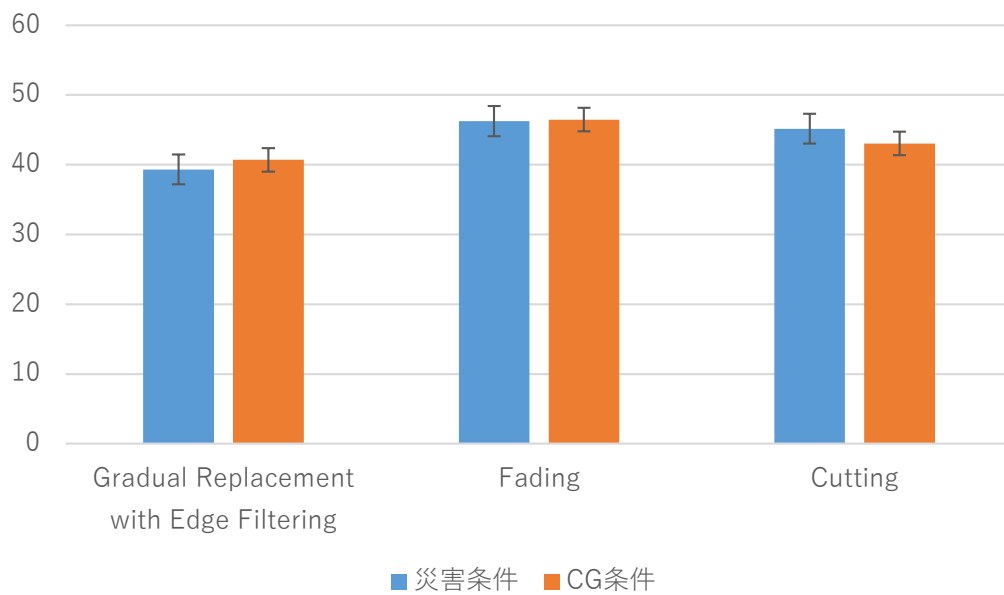


図 5.19 各遷移手法によって遷移した VR 空間体験時の平均 GSR 値と標準誤差.

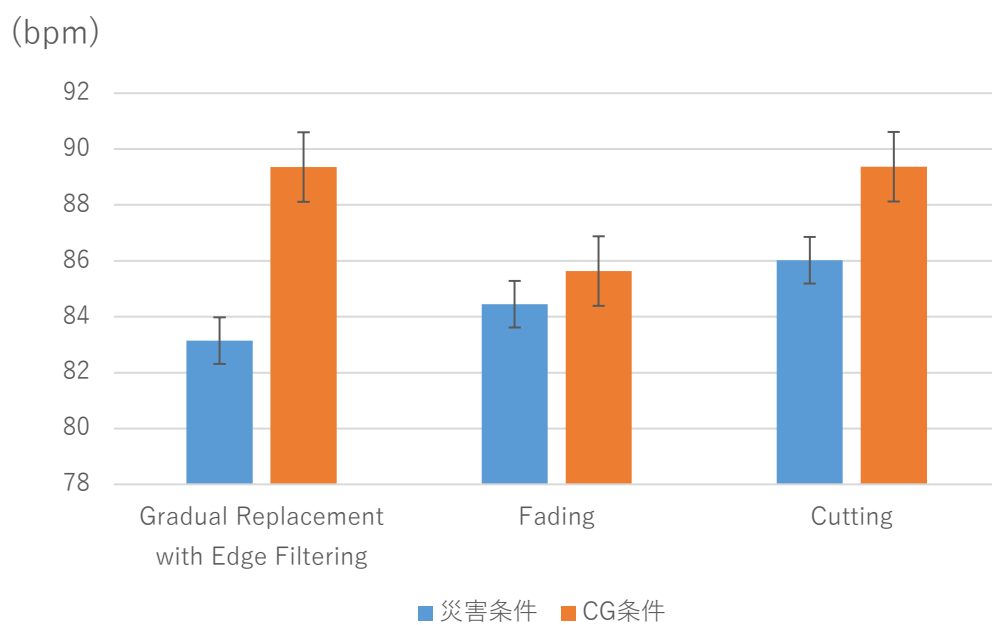


図 5.20 各遷移手法によって遷移した VR 空間体験時の平均心拍値と標準誤差.

第6章 おわりに

本研究では、VR体験における「いまこの現実にいるという信念の程度」を「いまここ感」と定義し、その感覚をある程度保つ Transitional Interfaces のフレームワークを提案した。本フレームワークでは、ユーザが HMD を装着することで、まず全方位映像を用いた仮想化現実空間が提示され、その後遷移映像効果によってスムーズに VR 空間へと遷移する。試作システムを用いて実験を行った結果、遷移効果がない場合や既存手法に比べユーザの主観的な評価によっていまここ感の上昇が確認できた。また汎用的な遷移手法の実現のために、遷移手法には時間・空間的な連続性やインタラクシオン性を持たせる必要性が示唆された。

今後の課題として、よりいまここ感を保てる遷移手法の考案が挙げられる。そのためにいまここ感を保つために必要な要素をさらに分析する必要がある。例として、立体視や色情報といった視覚的情報、視覚以外の聴覚・触覚といった多感覚による情報、インタラクシオン性や VR 環境におけるユーザの自由度などいまここ感との関係性を明確にし、より適用範囲の広いフレームワークへの拡張が考えられる。また、本フレームワークを災害シミュレータやホラーコンテンツといったより実用的なアプリケーションに適用し、提案手法によっていまここ感を保った結果、学習効果や緊張感・恐怖感が実際に向上するかの調査が考えられる。

謝辞

本研究の遂行，及び論文の作成にあたっては，多くの方々のご指導，ご協力をいただきました。本研究に関して終始ご指導ご鞭撻をいただきました指導教員の清川清教授および副指導教員の酒田信親准教授に深く感謝申し上げます。本研究の副査を引き受けて頂いたインタラクティブメディア設計学研究室 加藤博一教授，滋賀大学データサイエンス学部 佐藤智和教授に感謝いたします。また本研究において数多くのご助言，ご指導をいただいた株式会社センスタイムジャパンの河合紀彦客員准教授，滋賀大学データサイエンス学部 田中琢真准教授に感謝いたします。最後に，研究生活で日々お世話になった研究室メンバーに感謝の意を表し，謝辞を締めくくらせていただきます。

参考文献

- [1] Michael Zyda. From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, Vol. 38, No. 9, pp. 25–32, 2005.
- [2] Zhigeng Pan, Adrian David Cheok, Hongwei Yang, Jiejie Zhu, and Jiaoying Shi. Virtual reality and mixed reality for virtual learning environments. *Computers & graphics*, Vol. 30, No. 1, pp. 20–28, 2006.
- [3] Robert Riener and Matthias Harders. Vr for medical training. In *Virtual Reality in Medicine*, pp. 181–210. Springer, 2012.
- [4] Per Backlund, Henrik Engstrom, Cecilia Hammar, Mikael Johannesson, and Mikael Lebram. Sidh-a game based firefighter training simulation. In *Information Visualization, 2007. IV'07. 11th International Conference*, pp. 899–907. IEEE, 2007.
- [5] Kesuke Suzuki, Sohei Wakisaka, and Naotaka Fujii. Substitutional reality system: A novel experimental platform for experiencing alternative reality. *Scientific Reports*, Vol. 2, No. 459, 2012.
- [6] William Steptoe, Simon Julier, and Anthony Steed. Presence and discernability in conventional and non-photorealistic immersive augmented reality. In *Proc. ISMAR*, pp. 213–218. IEEE, 2014.
- [7] Tomoki Itamiya. The virtual tsunami disaster situation experience system using a head-mounted display. In *Media and Communication for Disaster Risk Reduction: Showcasing Innovation, An initiative for the Third UN World Conference on Disaster Risk Reduction in Sendai*, pp. 2–3, 2015.
- [8] JR 西日本. VR 技術を活用した安全教育プログラムを導入. https://www.westjr.co.jp/press/article/2018/04/page_12286.html, 最終アクセス 2019 年 1 月 27 日.
- [9] Raphael Grasset, Julian Looser, and Mark Billinghurst. Transitional interface: Concept, issues and framework. *Proc. ISMAR*, pp. 231–232, 2006.
- [10] Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, and Ivan Poupyrev. The magicbook-moving seamlessly between reality and virtuality. *IEEE Computer Graphics*

- and applications*, Vol. 21, No. 3, pp. 6–8, 2001.
- [11] 青木大樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝. Ar・vr コンテンツをシームレスに接続するモバイルアプリケーションの提案. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1A3-05, 2017.
 - [12] Dimitar Valkov and Steffen Flagge. Smooth immersion: the benefits of making the transition to virtual environments a continuous process. *Proc. 5th Symposium on Spatial User Interaction*, pp. 12–19, 2017.
 - [13] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Klaus Hinrichs, Klaus Hinrichs, and Alexander L. Gerlach. Does a gradual transition to the virtual world increase presence? *Proc. IEEE VR*, pp. 203–210, 2009.
 - [14] Takeo Kanade, Peter Rander, and PJ Narayanan. Virtualized reality: Constructing virtual worlds from real scenes. *IEEE multimedia*, Vol. 4, No. 1, pp. 34–47, 1997.
 - [15] Sergio Orts-Escolano, Christoph Rhemann, Sean Fanello, Wayne Chang, Adarsh Kowdle, Yury Degtyarev, David Kim, Philip L Davidson, Sameh Khamis, Mingsong Dou, et al. Holoportation: Virtual 3d teleportation in real-time. In *Proc. UIST*, pp. 741–754. ACM, 2016.
 - [16] Shunichi Kasahara, Shohei Nagai, and Jun Rekimoto. Jackin head: Immersive visual telepresence system with omnidirectional wearable camera. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1222–1234, 2017.
 - [17] Jason Wither, Yun-Ta Tsai, and Ronald Azuma. Indirect augmented reality. *Computers & Graphics*, Vol. 35, No. 4, pp. 810–822, 2011.
 - [18] Johannes L. Schönberger and Jan M. Frahm. Structure-from-motion revisited. *Proc. IEEE CVPR*, pp. 4104–4113, 2016.
 - [19] Steven M Seitz, Brian Curless, James Diebel, Daniel Scharstein, and Richard Szeliski. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *Proc. IEEE CVPR*, Vol. 1, pp. 519–528. IEEE, 2006.
 - [20] Daniel J Simons and Daniel T Levin. Change blindness. *Trends in cognitive*

sciences, Vol. 1, No. 7, pp. 261–267, 1997.

- [21] 芹沢信也, 脇坂崇平, 泉原厚史, 高原慧一, 檜山敦, 稲見昌彦. Style transferred reality: 画風変換による絵画世界 vr 没入システムの構築. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 22E-3, 2018.

発表リスト

[1] 桶田真吾, 武原光, 河合紀彦, 佐藤智和, 酒田信親, 清川清. 全方位映像による仮想化現実世界を介した現実空間と VR 空間の遷移に関する一考察. 第 80 回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 269–270, 2018.

[2] Shingo Okeda, Hikari Takehara, Norihiko Kawai, Nobuchika Sakata, Tomokazu Sato, Takuma Tanaka and Kiyoshi Kiyokawa: Toward More Believable VR by Smooth Transition between Real and Virtual Environments via Omnidirectional Video; *Proc. IEEE ISMAR*, 2018.

[3] Shingo Okeda, Hikari Takehara, Norihiko Kawai, Nobuchika Sakata, Tomokazu Sato, Takuma Tanaka and Kiyoshi Kiyokawa: Smooth Transition between Real and Virtual Environments via Omnidirectional Video for More Believable VR; *Proc. IEEE VR*, 2019 (to appear).