

MR 空間における歩行の安全性を考慮した空間切り替え制御手法 に関する一検討

小沢 健悟¹⁾, 小川 剛史²⁾

1) 東京大学大学院学際情報学府 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

2) 東京大学情報基盤センター 〒113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16

あらまし:屋外でHMDを用いて等身大のVR空間内を歩き回するためには安全性を確保することが重要である。提案手法では、ステレオカメラによる現実の映像とVR空間の映像を融合した映像をユーザに提示し、ユーザからの距離に応じてその視覚的融合比率を変化させることにより、VR空間での活動の楽しさを損ねることなく安全な歩行を実現することを目的とする。本稿では、提案手法の一部を実装したプロトタイプとその動作検証結果について述べる。

A Study on Space Merging Control Method Considering Walking Safety in MR Space

Kengo Ozawa¹⁾, Takefumi Ogawa²⁾

1) Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

2) Information Technology Center, The University of Tokyo
2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8658 Japan

Abstract: Safety is guaranteed when users prepare a world-scale VR space and the user walks around using HMD outdoors. In the proposed method of this research, real-life images from stereo cameras and images in VR space are presented to the user at the time and the visual integration ratio is changed according to the distance from the user to enjoy activities in the VR space while aiming to realize safe walking. In this paper, we describe some implementation of the proposed method and its verification results.

1. はじめに

VIVE Focus¹⁾やOculus Quest²⁾などPCを必要とせず、慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit, IMU) や Visual SLAM 技術を用いた自己位置推定によって6自由度 (Degree of Freedom, DoF) の移動に対応したスタンドアロン型のヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) が注目されている。スタンドアロン型HMDでは、これまで利用範囲の制約となっていたケーブルやトラッキング領域から利用者を解放し、室内から屋外へと利用範囲を拡張することで新たなVR体験が可能となる。例えば、SixerVRは、広いサッカー場などでの空間的制限のないVR (Virtual Reality) 体験は体験者の没入度を新

たなレベルへと引き上げると報告している[1]。等身大の広大なVR空間を実際に体験するためには、VR空間に対応した同等の現実空間が必要となり、現実空間の任意の場所でVR体験を提供するためには、現実空間の構造や実際に現実空間を歩いている人などによる移動の制約や危険を回避しなければならない。スタンドアロン型HMDの多くには、フロントカメラが搭載されており、周囲の環境を撮影して状況を認識することも可能ではあるが、日常的にHMDを装着して街中を活動するようになると、近年の世界的な社会問題となっている「歩きスマホ」と同様に「歩きVR」による危険が生じる可能性が指摘されている[1]。

本研究では、日常生活の中で常にHMDを装着してVR空間を体験できるようにするためのVR

¹ <https://enterprise.vive.com/jp/vivefocus/>

² <https://www.oculus.com/quest/>

空間提示手法について検討している。これにより、例えば仕事中に周囲の余分な視覚的情報を排除することで集中しやすい作業環境を提供したり、慣れた街の風景を宇宙や海底といった刺激的な景色へと上書きすることでエンターテインメント性の高い演出を可能にしたりでき、人々の日常生活を豊かで便利にできる場面が多く存在すると考えている。

そこで本稿では、「歩き VR」による危険を回避するための VR 空間提示に関する検討を行った。具体的には、現実空間と VR 空間を融合した MR (Mixed Reality) 空間を構築し、利用者からの距離に応じて視覚的融合比率を変更することで、表示する空間を視覚的に切り替え、安全な歩行を支援する。以下では、提案手法の詳細とプロトタイプの実装ならびに提案手法の妥当性を検証するために実施した実験について述べる。

2. 関連研究

2.1 提示空間の切り替え制御に関する研究

CompoundDome[2]は、ドーム型スクリーンを利用者が装着し、プロジェクタからドーム内に映像を投影することで、VR 空間を提示している。ドーム型スクリーンは、透明なアクリルにスクリーン塗料をメッシュ状に塗布することで構成しており、映像を投影しなければスクリーン越しに周囲の様子を視認できる。したがって、投影を停止したり、映像の提示場所を変更したりすることで、安全な歩行を実現している。

HeadLight[3]は、頭部搭載型プロジェクタから周囲の床や壁、家具などに映像を投影し、広視野な没入空間を提示している。室内空間の幾何形状を計測し、各面の形状に応じた映像を投影するだけでなく、ユーザ視点からは1枚の大きなスクリーンに映像が投影されているかのように室内の凹凸をキャンセルした映像投影や、壁や柱などで遮蔽された裏側の映像を投影した透視モードなどを実現している。

これらの研究では、HMD を使用することなく視覚的に提示する空間の切り替えを実現している

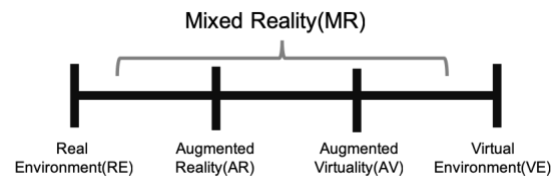


図1 Reality-Virtuality Continuum

が、映像を投影する対象の形状に制約を受ける、バーチャルオブジェクトの後ろの現実物体が見えてしまう、といった問題がある。本研究ではビデオシースルーHMD による空間提示を想定しており、これらの問題は生じない。

2.2 現実の映像をHMDに表示する研究

現実の映像をHMDに表示する研究は数多く行われている。これによりAR (Augmented Reality) からAV (Augmented Virtuality)、VR までシームレスな体験が可能となり、Milgram らの RV Continuum[4]を包括的に実現することができる。ここでは様々な研究目的と、使われている技術に関して述べる。

Poster[5]は、VR 空間におけるプレゼンス向上を目的として、体験者の体をVR 空間内に提示することにより、あたかも体験者がVR 空間内に入り込んだような視界を提供するシステムである。HMD に取り付けられたカメラで取得した映像から肌色抽出により体験者自身の手を認識し、手の部分だけをVR 空間に投影していることから、RV Continuum ではAV の中でもVE に近い空間として分類できる。

Avery らは、X 線映像をメタファとして、壁の向こう側にある建物を表示するAR システムを提案している[6]。透視する壁の数を利用者に提示することで対象物までの奥行き（距離）を表現したり、拡大表示によって対象物の詳細を把握させたり、通常肉眼では見ることでできない街の形状を利用者は知ることが可能である。この研究では、屋外にてビデオシースルーHMD を用いる研究である。

MagicBook[7]では、HMD 越しに、AR マーカ

VR locomotion techniques	Interaction type	VR motion type	VR interaction space	VR locomotion types
<1>	Physical	Continuous	Open	Motion-based
<2>			Limited	Roomscale-based
<3>				Outdoor-locomotion
<4>	Artificial	Continuous	Open	Controller-based
<5>		Non-continuous		Teleportation-based

図 2 VR ロコモーションの分類

が描かれたページを読む際、ボタン操作で AR モードと VR モードをシームレスに切り替えて物語の CG 映像を楽しむことができる。

以上の研究では、ビデオシースルーHMD を用いることにより、忠実に意図した加工を映像に対して施すことができる。このことでビデオシースルーHMD での体験は単なる AR・VR ではなく、RV Continuum の線上の任意の複数点に設定することができる。このことがこれらの研究事例から分かる。本研究では、現実空間の映像と VR 空間の映像を融合し MR 空間を構成する上で、柔軟にその割合を設定できるようにビデオシースルーHMD を使用する。

2.3 現実の平面映像以外の情報を提示する研究

現実空間の視覚以外の情報でも、HMD に表示される情報は存在する。ユーザに RV Continuum の任意点での体験を提供するためには、視覚以外の現実の情報をいかに取得し、変換し、提示するかが重要となる。

Remixed Reality[8]は、部屋の形状を RGBD カメラで計測し、三次元再構築した部屋を VR 空間で任意に操作する研究を行なった。具体的な操作方法として、物体の形状を変更する操作、テクスチャ情報などの見た目を変更する操作、映像の時間停止やループといった操作、レポートや視点移動といった操作などが挙げられる。

石黒らは、現実空間のイベントを VR 空間のイベントに同期させる研究として Real oriented Virtuality を提唱した[9]。この研究の目的は、自動運転車内で VR ゲームをプレイする際に、現実

と VR 空間での体性感覚の変化を伴うイベントを同期させることで酔いを軽減することであり、自動車の加減速・右左折などを伴うイベントを同期している。具体的には、人が車の前に立っていたら敵の出現、信号での停止・発進は門の開閉というように、VR ゲームとしての文脈に沿ったイベントに変換されユーザに提示される。

これらの研究のように、現実空間の情報を平面映像以外の提示手法で HMD に表示することで AV(Augmented Virtuality)に分類されるような体験を可能にする。本研究では、ビデオシースルーHMD と同様に、現実空間と VR 空間を融合し MR 空間を構成する上で視覚以外の現実空間の情報提示を行う。

2.4 VR ロコモーションに関する研究

VR 空間内での移動に関する研究は、VR 黎明期からの大きな課題であり、今日まで様々な移動のテクニック、インタフェースが様々な評価指標で研究されてきた。VR ロコモーションの分類に関する調査[10]では、体系的な分類がなされたが、本研究においては VR locomotion types に屋外での歩行を追加するべきであると考え、図 2 にその分類を示す。本研究は VR locomotion techniques のうち<3>に属すると考えられる。また、近い分類である<2>には以下のような研究が存在する。

Gerd らは、VR 空間内を歩行する場合の距離・速度・時間の認知が、現実空間を歩行する場合とどのような違いがあるのかを明らかにした [11]。Ferran らは、現実空間における障害物を没入型 VR にも登場させ、ユーザの回避行動について調査し、現実空間より VR 空間を歩行の方が、歩行スピードが遅く、障害物との最近接距離が大きかったと報告している[12]。

これらの研究は VR 空間内での歩行におけるユーザの認知に関わる研究を行なっている。しかし、VR ロコモーションの研究では空間表示手法を切り替えることによる歩行の安全性に着目した研究



図3 提案手法の概念図

は存在せず、ビデオシースルーHMD を用いた研究において歩行の安全性は所与のものとされており、ビデオシースルーHMD を用いた歩行の安全性に関する研究もまた存在しない。

3. 提案手法

3.1 現実とバーチャルの融合度が変化するMR空間

本研究では、等身大の広大なVR空間を、空間構造の異なる現実空間に居ながらにして、自由かつ安全に歩いて体験できるよう、現実空間とVR空間を融合したMR空間を構築し、ユーザの移動に応じた空間の提示手法を提案する。

ユーザは歩行の際に、危険度が高い物体が提示されれば衝突を回避できると考える。危険度はユーザとの距離、人や自転車、街路樹などといった物体のクラスなどにより変化し、危険度の高い物体ほど現実的に即した映像で表示されるべきであり、危険度が低くなるにつれ現実との乖離が許容される。本研究により提案するMR空間は、ユーザの周囲に存在する物体の危険度に応じて現実空間とVR空間の視覚的融合比率を決定し、ユーザに対して様々な空間を同時に提示するといった特徴を持つ。また、異なる視覚的融合比率の空間同士がシームレスに移り変わることで、違和感なく複数の空間が同時に存在しているように見せることが可能になる。

上記のようなMR空間を実装するにあたって、

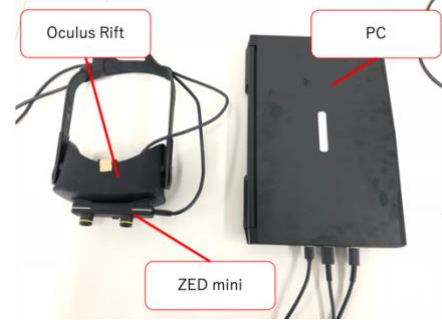


図4 装置構成図

図3に提案手法の概念図を示す。ユーザを中心とする半径の異なる2つの球で空間を3つの領域に分割し、各領域では異なる空間表示手法でユーザに映像を提示する。提示する空間の種類は全部で3種類存在し、ユーザ位置から近い順に、現実空間の映像を映し出す空間(Real Environment, RE)、現実空間の映像を3DCGに変換した空間(Augmented Reality Environment, AVE)、そしてバーチャル空間を映し出す空間(Virtual Environment, VE)である。

球の半径を近い順に r_1, r_2 とした時、3つの空間の担う領域(E_{RE} , E_{AVE} , E_{VE})はそれぞれ

$$\begin{cases} 0 < E_{RE} < r_1 \\ r_1 < E_{AVE} < r_2 \\ r_2 < E_{VE} \end{cases} \quad (1)$$

となり、ユーザと距離が近い領域ほど現実の情報を多く保有し、距離が離れるにしたがって現実に制約を受けないバーチャルな空間が広がる設計となっている。半径 r_1 の空間に現実映像を表示することにより、ユーザは自身の近くにある障害物や地形を把握でき、安全に歩行できる。

また、各空間の境界は漸次的に切り替わる設計とすることでシームレスに空間が移り変わるように見せる。

3.2 プロトタイプ

本稿では、まずREとVEによって構成されるシステムを実装した。これは式(1)において変数 r_1 と r_2 が等しい場合に相当する。実装はステレオカメラによるビデオシースルーHMDを用いて行う。ステレオカメラで周囲のdepth情報を取得し、カメラの近傍にある物体はHMDにそのまま描画し、



図 5 実装システムを装着した様子

遠方にある物体は描画しない。これは HMD 内の RE が表示される平面の各ピクセルの depth 値をもとに透明度を決定することにより実現し、式(2)に基づいて透明度 a_r を決定する。同時に VE に関しても同様に透明度を調節し、次第に VE が表示されるような設定をする。式(3)により透明度 a_v を決定する。変数 x はユーザからの距離[m]を示す。また式中の定数 k は RE と VE の境界部分における透明度の変化の傾きを表す。また定数 d は透明度が 0.5 になる距離を示す。

$$a_r = \frac{-\tanh(k*(x-d))+1}{2} \quad (2)$$

$$a_v = \frac{\tanh(k*(x-d))+1}{2} \quad (3)$$

これらの式により RE と VE の透明度を徐々に変化させていくことで、RE と VE がシームレスに繋がりユーザが歩行する上で違和感のない空間提示を行う。

図 4 にシステム構成を、図 5 にシステムを装着したユーザの様子を示す。PC はバックパックに入れて背負い、自由に歩き回れるようにした。

3.3 実装環境

以下の機器を用いてプロトタイプを実装した。

- ZED mini & ZED SDK 2.7
- Oculus Rift & Touch
- GALLERIA GCF1070GF
 - CPU : Intel(R)Core(TM) i7-8750H
 - メモリ : 16GB
 - GPU : NVIDIA GeForce GTX 1070
- Unity 2018.2.17f1



図 6 検証を行なった場所

4. 検証実験

4.1 実験概要

検証実験では、式(2)中の定数 k 、 d の値に応じて意図した挙動を示すかどうかを確認した。検証時に採用した定数(k,d)の組み合わせは、(1,5), (2,5), (1,10), (2,10)の 4 種類とした。検証を行なった際の様子を図 6 に示す。手前から 3m、5m、10m の位置にカラーコーンを配置し、HMD に表示される映像を確認した。

4.2 結果

図 7 にシステムが生成したシーンの例を示す。定数 k の値が等しい場合、ユーザの周囲に提示される RE は d が大きくなるにしたがってユーザを中心に領域が拡大されることを確認した。また、 k を 1 とした場合、2 の場合と比較して RE と VE の境界部分における透明度の変化の傾きがなだらかであることが確認できた。これは特に(k,d)が(1,5)の時と(2,5)の時を比べた際に顕著であった。

また、 d を 5,10 に設定すると、それぞれ相当する距離に配置したカラーコーンの透明度が 0.5 となり薄く表示される設計であったが、該当するカラーコーンは表示されなかった。式(2)の計算で使ったユーザとの距離 x [m]と実際の距離にスケールの誤差が存在することが分かった。

4.3 考察

本稿にて実装したプロトタイプについて、ユーザからの距離に応じた RE から VE へのシームレスなシフトは定性的には意図した挙動をすることが確認できた。しかし、定量的な評価としては、RE にて算出されるユーザからの距離は実際の距

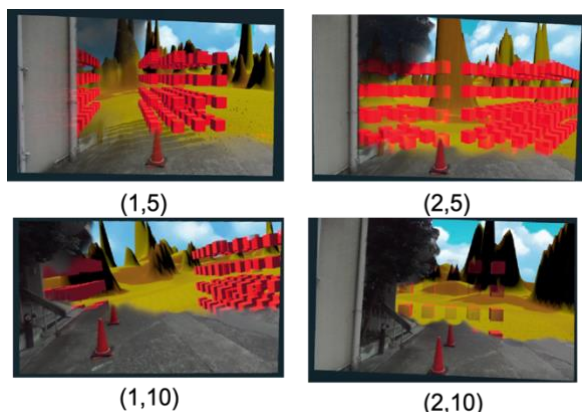


図7 定数(k, d)を変化させた場合の提示例

離より小さいものであることが分かった。これはステレオカメラにより算出されるユーザからの距離の精度によるものであると考えられる。

5. おわりに

本稿では、「歩き VR」による危険を回避するための VR 空間提示切り替え手法の提案とそのプロトタイプの実装を行い、検証実験を行なった。ユーザとの距離に応じて HMD に表示する映像をシームレスに切り替えることにより、現実と VR の両方の空間を同時に体験しつつ安全な歩行を実現する。また実験の結果、現実のユーザとの距離とステレオカメラにより計算される距離にはスケールの誤差があることが分かった。

今後は、提案手法で述べた AVE の構築を行い、3 つの空間を同時に提示するシステムを実装する予定である。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 16K00266 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] SixerVR, Return to Grindelind- a prototype Worldscales VR game, <https://www.sixervr.com/blog/2018/10/1/return-to-grindelind-a-prototype-worldscale-vr-game> <2018 年 2 月 4 日閲覧>
- [2] 丸山 英梨子, 暦本 純一: CompoundDome: スクリーンを部分的に透過することにより現実世界とインタラクションを可能にする装着型ドーム装置, 日本ソフトウェア科学会

インタラクティブシステムとソフトウェアに関する研究会 WISS2018, 2018

- [3] Kasahara, Shunichi. "Headlight: egocentric visual augmentation by wearable wide projector." ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies. ACM, 2018: 10.
- [4] Milgram, Paul, et al. "Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum." Telemanipulator and telepresence technologies. Vol. 2351. International Society for Optics and Photonics, 1995: 282-293.
- [5] Steinicke, Frank, et al. "Poster: A virtual body for augmented virtuality by chroma-keying of egocentric videos." 3D User Interfaces, 2009. 3DUI 2009. IEEE Symposium on. IEEE, 2009: 125-126.
- [6] Avery, Benjamin, et al. "Improving spatial perception for augmented reality x-ray vision." 2009 IEEE Virtual Reality Conference. IEEE, 2009: 79-82.
- [7] Billinghurst, Mark, et al. "The MagicBook: a transitional AR interface." Computers & Graphics 25.5, 2001: 745-753.
- [8] Lindlbauer, David, et al. "Remixed Reality: Manipulating Space and Time in Augmented Reality." Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2018: 129.
- [9] 石黒祥生, 山田献二郎. "自動運転車両内インフォテインメントのための VR ゲーム." エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集 2017: 210-216.
- [10] Boletsis, Costas. "The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology." Multimodal Technologies and Interaction 1.4, 2017: 24.
- [11] Bruder, Gerd, et al. "Threefolded motion perception during immersive walkthroughs." Proceedings of the 20th ACM symposium on virtual reality software and technology. ACM, 2014: 177-185.
- [12] Sanz, Ferran, et al. "Virtual proxemics: Locomotion in the presence of obstacles in large immersive projection environments." 2015 IEEE Virtual Reality (VR). IEEE, 2015: 75-80.