

CJ-001

ドームスクリーンを用いた VR における頭部運動補償の効果の検討 An Examination of the Effect of Head Movement Compensation in VR with Dome-shaped Screen

大道 雄也[†]
Yuya Daido

伊藤 久祥[†]
Hisayoshi Ito

1. はじめに

近年、メタバースへの関心の高まりに伴い、VR(Virtual Reality)に関する研究が盛んに行われている。

VR の映像提示デバイスとしては HMD(Head Mounted Display)が広く用いられているが、HMD はデバイスの重量や装着感により長時間の使用に適さず、視野角の狭さによる VR 酔いなどデバイスの特性上の課題も存在する。

HMD に代わる映像提示手法としては CAVE[1]をはじめとした IPT(Immersive Projection Technology)があるが、システムの運用に係る負担やコンテンツへの没入感において課題がある[2]。

著者の所属する研究室では体験者の頭部位置を捕捉し、位置情報を基に映像に変化を加えることで没入感の向上を図る頭部運動補償について研究を行っている[3]。上記研究では、平面スクリーンへ投影した映像に対し頭部運動補償を適用することによる没入感の向上が確認された。

本研究では IPT のうち比較的手軽に運用可能なドームスクリーンに着目し、ドームスクリーンへ投影した映像に対し頭部運動補償を適用することによる効果を検討する。

2. 提案手法

本研究のために開発したドームスクリーンおよびドームスクリーン用 VR システムについて以下に説明する。

2.1 ドームスクリーン

現在、一般向けに市販されているドームスクリーンは組み立てが複雑な製品が多く、移設や片付けのために分解して再度組み立てることが困難である。そこで本研究では、組み立てが容易かつ可搬性に優れたドームスクリーンを独自に開発した。実際に製作したスクリーンを図 1 に示す。



図 1 開発したドームスクリーン

本スクリーンは完全な球面ではなく、3V ジオデシックドームを基に設計した多面体型のスクリーンである。直径はおおよそ 2m だが、スクリーンの下部は設置のために下端

から 20cm 程を切除した形状となっている。素材には投影面の剛性を確保し、かつ軽量にするためスチロールボードを用いた。ボードの接合には 3D プリンターで造形したジョイントを使用した。また、映像がより鮮明に映るように投影面を白色に塗装している。

2.2 ドームスクリーン用 VR システム

本研究におけるシステムの概要図を図 2 に示す。

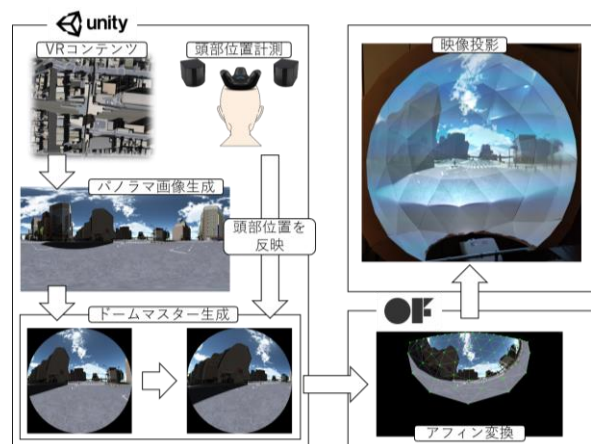


図 2 システム概要図

本システムは Unity で開発した VR システム及び openFrameworks を用いて開発した映像投影システムから構成される。以下より各システムの詳細について説明する。

2.2.1 VR システム

本システムでは頭部位置計測、VR コンテンツの処理、およびドームマスター画像のレンダリングを行う。

本研究では頭部位置計測に先行研究同様 HTC VIVE Tracker 2018(以下 VIVE Tracker)を使用した。本システムにおけるトラッキング領域を図 3 に示す。

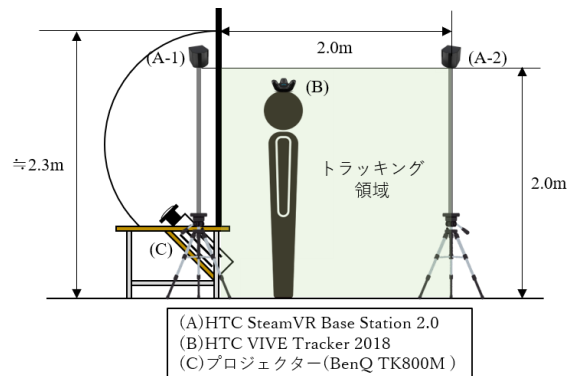


図 3 トラッキング領域

ドームスクリーン正面の 2 m²の範囲をトラッキング領域とし、HTC SteamVR Base Station2.0 を 2 台設置した。この際の VIVE Tracker からの入力値は実空間上の x, y, z 座標

[†] 岩手県立大学 Iwate Prefectural University

を-1-1の範囲で正規化した数値となる。なお、VIVE Trackerがトラッキング領域外にある場合座標の絶対値が1を超えてしまうため、1を超える絶対値は全て1として扱った。

上記の処理によって得られた頭部位置情報を用いてドームマスター画像のレンダリングを行う。ドームマスター画像の生成には正距円筒図法によるパノラマ画像を使用する。なお、レンダリング処理はUnityのシェーダーを用いて実装した。

ドームスクリーンのような球面スクリーンを用いた従来のVRシステムでは体験者の頭部位置を考慮したものは少ない。しかしながら、実際の視野においては頭部の位置によって景色の見え方は変化するはずである。従って、頭部位置を反映した映像投影を行うことで、従来の手法よりも没入感や臨場感の高い体験を提供できることが期待される。頭部運動補償により頭部位置を反映してレンダリングしたドームマスター画像を図4に示す。

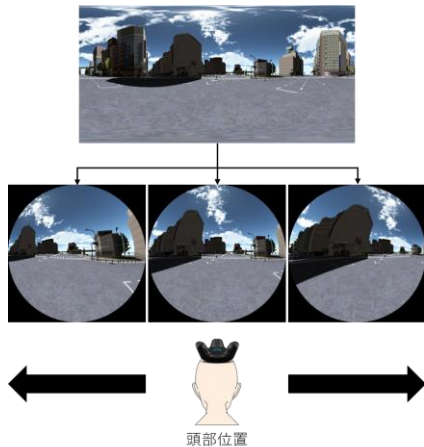
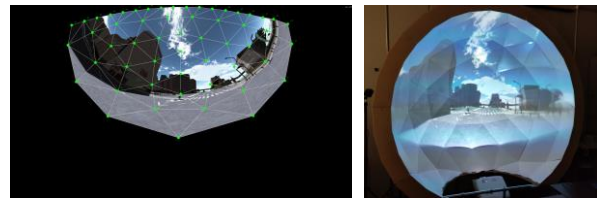


図 4 頭部運動補償を適用したドームマスター画像

レンダリングされたドームマスター画像は異なるソフトウェア間で映像の共有を行うためのフレームワークであるSpout[4]を用いて映像投影システムへ送信される。送信された画像はドームスクリーンの形状に合わせて適切に投影されるように変換処理を行ったのちスクリーンへ投影される。

2.2.2 映像投影システム

本システムではUnityで開発したVRシステムから受信したドームマスター画像をドームスクリーンへ投影するための幾何学変換を行う。本研究では体験者がスクリーンに可能な限り近づいて映像を視聴できるようにするため、プロジェクターをスクリーン下部に設置し、光軸に仰角をつけている。そのため、受信したドームマスター画像をそのまま投影した場合、投影される映像には歪みが発生する。これを解消するため、スクリーンの頂点位置を用いたキャリブレーション機能を実装した。本機能ではキャリブレーションにより得られた投影画像と、スクリーンとの頂点位置の対応を用いてアフィン変換を行うことで、スクリーンの形状に合わせた補正を行う。補正を加えたドームマスター画像と投影結果をそれぞれ図5に示す。



(a) 補正後の画像 (b) 投影結果

図 5 補正後の画像および投影結果

3. 実験

本実験では現在VRにおいて広く利用されているHMDとドームスクリーンで同一の映像を提示し、アンケートによりそれぞれの映像提示方法が与える影響について評価・比較を行う。この際、ドームスクリーンを用いたVRにおいては従来の頭部位置を考慮しない提示方法と、頭部運動補償を適用した提示方法の2通りで映像を提示する。すなわち、提示する映像はHMD、ドームスクリーン(頭部運動補償無し)、ドームスクリーン(頭部運動補償有り)の3種類となる。HMDでの映像提示にはHTC VIVE Pro Eyeを使用した。スクリーンへ映像を投影するプロジェクターにはBenQ TK800Mを使用し、スクリーン全体へ映像を投影するために超広角魚眼レンズのOpteka 37mm 0.2x HDをプロジェクターの光軸に合わせて取り付けられた。なお、被験者は21-27歳の学生16名(男性12名、女性4名)である。

3.1 提示映像

本実験ではUnity Asset StoreでZENRINから公開されているJapanese Otaku City[5]を仮想空間として使用し、仮想空間内の特定のルートを一人称視点で移動する映像を3種類の提示手法により提示する。解像度はHMDでは片目あたり1440×1600px、ドームスクリーンでは4K解像度の映像を提示した。フレームレートはHMDでは平均52.6fps、ドームスクリーンではパノラマ画像およびドームマスター画像のレンダリング時の計算負荷により平均23.3fpsである。なお、実験に使用したPCの仕様は表1の通りである。

表 1 実験で使用したPCの仕様表

仕様	
CPU	AMD Ryzen 5 3500 (3.6GHz-4.1GHz/6コア/6スレッド)
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060 12GB GDDR6
メモリ	16GB DDR4 SDRAM(PC4-25600/8GB×2/2チャンネル)

3.2 アンケート

本研究では提案システムと既存の映像提示手法間で没入感やVR酔いにおいてどのような差があるかを検討するために以下の3つのアンケートを実施する。以下、それぞれのアンケートについて説明する。

3.2.1 Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

それぞれの映像提示手法における没入感や臨場感を評価するためのアンケートとしてIPQ[6]を利用する。本アンケートでは全14個の質問に1から7の7段階で回答する。それぞれの質問は一般的な臨場感(General Presence)、空間的な臨場感(Spatial Presence)、没入感(Involvement)、現実感(Experienced Realism)の4つのカテゴリに分類できる。

3.2.2 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

それぞれの映像提示手法が VR 酔いに与える影響を評価するためのアンケートとして SSQ[7]を利用する。本アンケートでは全 16 個の質問に 0(なし), 1(わずかに), 2(中程度), 3(激しく)の 4 点法で回答する。評価の際には Kennedy らの集計方法に従い、吐き気(Nausea)、眼精疲労(Oculomotor)、失見当識(Disorientation)、統合スコア(TotalScore)の 4 つのスコアを算出し評価を行う。

3.2.3 事後アンケート

本アンケートでは 3 種類の提示手法で映像を視聴したのち、それぞれの提示手法のうち最も視聴しやすいもの、しづらいものを主観で回答する。また、なぜそのように判断したのかを自由記述形式で回答してもらった。その他実験参加時点での HMD 及びドームスクリーンでの VR の経験の有無と、実験中に気になった点を回答してもらった。なお、実験中に気になった点については任意回答とした。

3.3 実験手順

HMD での映像視聴に際し被験者ごとに焦点距離が異なるため、初めに焦点距離の調整を行った。その後、HMD、ドームスクリーンそれぞれの初見効果を軽減するために各提示手法でサンプルコンテンツの視聴を行った。

実験では(a)HMD、(b)ドームスクリーン(頭部運動補償無し)、(c)ドームスクリーン(頭部運動補償有り)の 3 種類の提示方法について 4 通りの提示順を設定し、被験者ごとに割り振った。設定した提示順を表 2 に示す。なお、3 種類の提示方法では 6 通りの提示順が考えられるが、2 回目に HMD を使用するパターンはデバイスの付け外しによる影響を考慮し除外した。

表 2 映像提示パターン

提示パターン	1回目	2回目	3回目
A	(a)	→ (b)	→ (c)
B	(a)	→ (c)	→ (b)
C	(b)	→ (c)	→ (a)
D	(c)	→ (b)	→ (a)

被験者は各提示手法で映像を視聴し、IPQ および SSQ に回答する。これをすべての提示手法で行う。3 回目の映像視聴終了後、事後アンケートに回答し実験終了とした。

3.4 結果

次節より各アンケートの結果について説明する。

3.4.1 Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

各提示方法におけるカテゴリ別平均スコアを表 3 に示す。平均値はどのカテゴリにおいても(a), (c), (b)の順にスコアが高い。

表 3 カテゴリ別平均スコア (IPQ)

カテゴリ	(a)	(b)	(c)
一般的な臨場感	5.8750	3.2500	4.8125
空間的な臨場感	4.7750	3.3125	3.9625
没入感	4.5156	3.7813	4.0938
現実感	3.6406	2.9844	3.4219

次に各標本についてカテゴリ別に検定を行った。検定にあたり標本の正規性をシャピロ・ウィルク検定により検定したところ、一般的な臨場感、現実感については正規性が認められず、他 2 つのカテゴリについては正規性が認められた。よって本研究における検定にはノンパラメトリック検定を採用し、(a), (b), (c)の 3 群間での比較にはフリードマン検定、各群同士の比較にはウィルコクソンの符号順位検定を採用した。

はじめに各カテゴリの 3 群比較の結果を表 4 に示す。検定の結果、一般的な臨場感、空間的な臨場感、現実感では $p < 0.01$ 、没入感では $p < 0.05$ となり、3 群間で有意差があると判断した。

表 4 3 群比較の結果 (IPQ)

カテゴリ	p 値
一般的な臨場感	0.0000 **
空間的な臨場感	0.0000 **
没入感	0.0280 *
現実感	0.0001 **

$p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **

次に各カテゴリにおける 2 群比較の結果を表 5 に示す。本研究では頭部運動補償の効果を検証するため、((a), (c)), ((b), (c))の組について 2 群比較を行った。

表 5 2 群比較の結果 (IPQ)

表5-1: ((a), (c))の比較			表5-2: ((b), (c))の比較		
カテゴリ	p 値		カテゴリ	p 値	
一般的な臨場感	0.0072 **		一般的な臨場感	0.0020 **	
空間的な臨場感	0.0097 **		空間的な臨場感	0.0008 **	
没入感	0.1234		没入感	0.0324 *	
現実感	0.1781		現実感	0.0021 **	

$p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **

((a), (c))の 2 群比較では一般的な臨場感、空間的な臨場感について有意水準 0.01 で有意差がみられた。一方、没入感、現実感については有意差がみられなかった。

((b), (c))の 2 群比較では一般的な臨場感、空間的な臨場感、現実感について有意水準 0.01 で有意差がみられた。また、没入感では有意水準 0.05 で有意差がみられた。

3.4.2 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

各提示方法におけるカテゴリ別平均スコアを表 6 に示す。

表 6 カテゴリ別平均スコア (SSQ)

カテゴリ	(a)	(b)	(c)
吐き気	18.4838	7.7513	4.1738
眼精疲労	21.7925	7.1063	9.0013
失見当識	24.3600	6.0900	4.3500
統合スコア	24.5438	8.1813	7.2463

平均値ではどのカテゴリにおいても HMD の方がドームスクリーンよりもスコアが高い。頭部運動補償の有無で比較すると吐き気、失見当識、統合スコアでは(c)の方がスコアが低い、眼精疲労については(b)の方がスコアが低い。

SSQ においても標本の正規性について検定を行ったところ、いずれのカテゴリでも正規性は認められなかった。よって、こちらも IPQ と同様の手順で検定を行った。

表 7 3 群比較の結果 (SSQ)

カテゴリ	p 値
吐き気	0.0003 **
眼精疲労	0.0000 **
失見当識	0.0048 **
統合スコア	0.0000 **

$p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **

各カテゴリの 3 群比較の結果を表 7 に示す。検定の結果、全てのカテゴリにおいて有意水準 0.01 で 3 群間に有意差があると判断した。

次に各カテゴリにおける 2 群比較の結果を表 8 に示す。

表 8 2 群比較の結果 (SSQ)

表 8-1 : ((a), (c)) の比較			表 8-2 : ((b), (c)) の比較		
カテゴリ	p 値		カテゴリ	p 値	
吐き気	0.0029 **		吐き気	0.0578	
眼精疲労	0.0014 **		眼精疲労	0.1875	
失見当識	0.0277 *		失見当識	0.7389	
統合スコア	0.0010 **		統合スコア	0.6320	

$p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **

$p < 0.05$: *, $p < 0.01$: **

((a), (c)) の組では吐き気、眼精疲労、統合スコアが有意水準 0.01 で有意差がみられた。また、失見当識では有意水準 0.05 で有意差がみられた。

((b), (c)) の組では全てのカテゴリで有意差はみられなかった。

3.4.3 事後アンケート

はじめに被験者の HMD およびドームスクリーンの使用経験の有無について述べる。被験者 16 名中 HMD では 10 名、ドームスクリーンでは 3 名が経験ありと回答した。

次に各提示手法のうち最も視聴しやすいもの、しづらかったものについて述べる。最も視聴しやすいものとして回答したのは(a)が 7 名、(b)が 3 名、(c)が 6 名であった。また、最も視聴しづらいものとして回答したのは(a)が 5 名、(b)が 7 名、(c)が 4 名であった。各項目についての回答理由を整理したものを表 9 に示す。

○で記載しているものはポジティブな理由、●で記載しているものはネガティブな理由として挙げられたものであり、末尾の数字は件数を表す。

表 9 回答理由

(a)	(b)	(c)
○映像の鮮明さ : 4	○シンプルさ : 2	○装着感のなさ : 2
○追従性の高さ : 3	○視野角の広さ : 1	○感覚のずれが少ない : 2
○360°見渡せる : 2	●見え方の違和感 : 6	○疲労感の少なさ : 1
○没入感 : 2	●歪みの違和感 : 3	○視野角の広さ : 1
●酔い・疲労感 : 4		○没入感 : 1
●不快な装着感 : 2		●歪みの違和感 : 4
		●映像の不鮮明さ : 1

4. 考察

IPQ ではすべてのカテゴリにおいて従来の頭部運動補償を適用しない手法よりもスコアが高く、有意差がみられた。また HMD との比較ではいずれのカテゴリにおいても平均スコアは低い、没入感、現実感の 2 項目については HMD との有意差がみられなかった。よって、没入感、現実感においては頭部運動補償を適用することにより HMD に近い水準での VR 体験が可能になると考えられる。

SSQ では HMD とドームスクリーンでスコアに大きな差があり有意差がみられたことから、VR 酔いのしにくさにおいてドームスクリーンの方が優れているといえる。

その反面、頭部運動補償の有無で有意差はみられなかった。これは HMD とドームスクリーンでは VR 酔いの原因の一つである視野角や、デバイスの装着感などの違いがあるのに対し、頭部運動補償の有無では条件に大きな違いがなく、差が生じにくかったためだと考えられる。

また、SSQ のスコアの平均値では眼精疲労のみ頭部運動補償を適用した群の方がスコアが高かった。これは頭部位置に応じて頻繁に映像が変化することで視覚的な負荷が大きくなったためだと考えられる。

本研究で開発したシステムは HMD とドームスクリーンとでフレームレートに 2 倍以上の差があった。しかしながら、事後アンケートの回答では実行速度について言及されず、SSQ のスコアからもドームスクリーンは HMD よりも VR 酔いしにくいことが示されている。よって、フレームレートにかかわらずドームスクリーンが HMD よりも酔いを誘発しにくかったのは明白である。

ドームスクリーンに対するネガティブな意見として、解像度、光量などのデバイスに起因したものと、歪みの違和感についての指摘が多くみられた。前者については設備規模とのトレードオフになるため改善は容易ではないが、後者については投影システムのアルゴリズムを最適化することで歪みを軽減できると考える。よって、システムの改善を行うことでより高水準での VR 体験を実現できる可能性がある。

5. おわりに

本研究ではドームスクリーンを用いた VR において頭部運動補償を適用することによる効果について検討した。結果、頭部運動補償を適用しない従来の手法よりも没入感や臨場感を高めることが示唆された。また、VR 酔いにおいては HMD よりもドームスクリーンの方が酔いを誘発しにくいことを明らかにした。

今後の課題として、システムの動作速度の向上や歪み補正アルゴリズムの最適化を行う必要がある。

参考文献

- [1] Carolina Cruz-Neira, Daniel J.Sandin, Thomas A.DeFanti, "Surround -Screen Projection -Based Virtual Reality :The Design and Implementation of the CAVE", SIGGRAPH '93: Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, September 1993, Pages 135-142
- [2] 大井田 かおり, 中辻 晴香, 河野 千春, 尾久土 正己, "同一映像をドーム映像またはHMD映像としてバーチャル観光に用いた場合のそれぞれの効果的使用についての一考察", [観光研究] 2020. 3 / Vol. 31 / No.2 日本観光研究学会機関誌 Journal of Japan Institute of Tourism Research The Tourism Studies, 2020. 3/ Vol. 31 / No.2 PP. 47-57
- [3] 風間 龍成, "頭部位置補償が没入感に与える効果の検討", 岩手県立大学ソフトウェア情報学部 2019 年度卒業論文, 2020. 3
- [4] Spout: [https://spout.zeal.co/\(2022.6.14\)](https://spout.zeal.co/(2022.6.14))
- [5] Japanese Otaku City: [https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/urban/japanese-otaku-city-20359#description\(2022.6.14\)](https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/urban/japanese-otaku-city-20359#description(2022.6.14))
- [6] igroup.org: igroup presence questionnaire (IPQ) overview , [http://www.igroup.org/pq/ipq/index.php\(2022.6.10\)](http://www.igroup.org/pq/ipq/index.php(2022.6.10))
- [7] R.S.Kennedy,et al.: Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, The International Journal of Aviation Psychology, 3(3), 1993, pp.203-220