

NAIST-IS-MT1551049

修士論文

球体ディスプレイのための映像表現に関する考察

佐藤 大夢

2017 年 2 月 2 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

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。

佐藤 大夢

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
加藤 博一 教授	(副指導教員)
舩富 卓哉 准教授	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)

球体ディスプレイのための映像表現に関する考察*

佐藤 大夢

内容梗概

近年，非平面の提示面を持つディスプレイが開発され，普及が進んでいる．一方で，従来の映像表現は基本的には平面ディスプレイでの提示を想定しているため，同様の手法を非平面ディスプレイに直接適用できるかは明らかにされていない．そこで本研究では，非平面ディスプレイとして球体ディスプレイ，映像表現として映像内の2層の間に生じる奥行き差である浮遊感表現に焦点を当て，球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の知覚について調査及び考察することを目的とする．通常ディスプレイは1層の提示面しか持たないため，物理的な構造で観察者に奥行きを提示することは困難である．一方で，人間は日常生活において様々な視覚的活動から立体的な広がりや奥行きを知覚しており，それらを活用することで1層の提示面でも観察者に複数の層やその間の奥行き差を知覚させることができると考えられる．そこで，球体ディスプレイの提示面上を異なる速度で回転する2つの映像を重畳表示することにより生じる運動視差を活用することで浮遊感表現を実現するとともに，その映像を見た観察者の浮遊感知覚を定量評価する．本研究では，球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の浮遊感知覚についての仮説を立てた後，実際に球体ディスプレイを用いた被験者実験を行うことで観察者の浮遊感知覚を評価し，その結果について考察する．また，球体ディスプレイと平面ディスプレイの浮遊感知覚を比較することで，球体ディスプレイでの浮遊感表現に関するより詳細な知見を得る．

キーワード

球体ディスプレイ，映像表現，運動視差，知覚，評価

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, NAIST-IS-MT1551049, 2017年2月2日.

Discussion of visual expression for spherical display*

Hiromu Sato

Abstract

In recent years, non-planar displays have been developed. They are expected to be applied such as data visualization, art, and exhibition. However, detail relationships between visual expression for a non-planar display and observer's perception are unknown because conventional visual expression has been made for a planar display. In this study, we focus on floating-expression for a spherical display and aim to quantify human floating-perception. We make a hypothesis about observer's floating-perception based on motion parallax and evaluate it through experiments using a spherical display. We also compare floating-perception stimulated from a spherical display with a planar display and discuss it.

Keywords:

spherical display, visual expression, motion parallax, perception, evaluation

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1551049, February 2, 2017.

目 次

1. はじめに	1
2. 球体ディスプレイ	4
2.1 球体ディスプレイの概観	4
2.2 Geo-Cosmos	7
3. 球体ディスプレイでの浮遊感表現	8
3.1 浮遊感表現	8
3.2 奥行き判断の要因	9
4. 実験 1：運動視差の提示による浮遊感知覚の効果の確認	11
4.1 実験目的	11
4.2 実験環境	11
4.3 評価映像の作成	11
4.4 実験方法	19
4.5 実験結果	20
5. 浮遊感知覚の定式化	24
5.1 一般的な運動視差	24
5.2 球体ディスプレイにおける運動視差	25
6. 実験 2：回転速度比と浮遊感知覚の関係性の調査	27
6.1 実験目的	27
6.2 実験環境	27
6.3 評価映像の作成	28
6.4 実験方法	30
6.5 実験結果	30
7. 実験 3：平面ディスプレイと球体ディスプレイの比較	33
7.1 実験目的	33

7.2	実験環境	33
7.3	評価映像の作成	33
7.4	実験方法	36
7.5	実験結果	36
8.	まとめ	40
	謝辞	41
	参考文献	43
	発表リスト	45

図 目 次

1	cobra curved display	2
2	Ensphered Vision	2
3	SFV-RS	3
4	Geo-Cosmos	3
5	Panorama Ball Vision	6
6	Omni Globe	6
7	WONDER MOMENTS	6
8	WORLDEYE	6
9	Geo-Cosmos (図 4 再掲)	7
10	本研究で表現する“浮遊感”	8
11	実験 1：実験環境	12
12	Geo-Cosmos 入力画像（黄色領域：設定された視点位置から観察で きる領域）	13
13	設定された視点位置から観察できる見え	13
14	表示映像の回転	14
15	実験 1：評価映像（地球映像）	17
16	実験 1：評価映像（ドット映像）	18
17	実験 1：評価結果	21
18	一般的な運動視差	25
19	球体ディスプレイにおける運動視差	26
20	実験 2：実験環境	27
21	実験 2：評価結果	32
22	実験 3：実験環境	34
23	実験 3：評価結果	38
24	実験 3：球体ディスプレイと平面ディスプレイの評価結果の相関	39

表 目 次

1	Geo-Cosmos の主要スペック	7
2	実験 1 : 回転速度パターン	16
3	実験 1 : 評価項目	19
4	実験 2 : 回転速度パターン	29
5	実験 2 : 評価項目	30
6	実験 3 : 回転速度パターン	35

1. はじめに

昨今の情報化社会において、人間に情報を視覚的に提示することができるディスプレイやプロジェクタなどの表示技術は生活に欠かせない存在となっている。また、近年の情報の高次元化・複雑化に伴い「どの情報を提示するか」といった単純な情報の提示だけでなく「どのように情報を提示するか」など情報の提示手法についても重要視されてきており、数多くの研究や技術開発が行われている [1][2]。さらに、より豊かな映像表現を実現したいという需要も高まっており、ディスプレイの大型高精細化や裸眼立体視ディスプレイによる立体映像の実現など、応用的な映像表現に関する研究もなされている [3]。

一方で、近年、従来のディスプレイとは対照的に非平面の提示面を持つディスプレイが開発され、普及が進んでいる。例として、cobra curved display (図 1) や Ensphered Vision (図 2) では、ディスプレイに観察者の周辺を覆うような形状を持たせることによって、没入感の高い映像表現を実現している [4][5][6]。また、SFV-RS: Super Frontech Vision-Round Signage (図 3) のように円柱型の形状を持つディスプレイは、平面と比較して広視野角に情報を提示できる点やその形状が特に建物の支柱などの建造物との親和性が高い点から、デジタルサイネージや展示開発用途での活用が期待されている [7]。さらに、日本科学未来館に展示されている球体ディスプレイ Geo-Cosmos (図 4) は、球という立体的な提示面を持つことから、特に天球や惑星など球形状を持つ情報の表現において観察者に高い現実感を与えることができるとして注目を浴びている [8]。

このように、非平面ディスプレイはその特徴から今後データの可視化やデジタルサイネージ、展示開発用途での活用が期待されている。中でも没入感や臨場感の高さを利用した立体表現は特に注目されており、既に観察者に立体感のある映像体験を提供する新しい映像コンテンツなどが実現されている。一方で、非平面ディスプレイ用に製作された映像コンテンツとそれを見た観察者が得る知覚の関係性の詳細は明らかにされていないため、映像コンテンツの製作は製作者の経験に頼ることになる。例えば、非平面ディスプレイを利用した映像表現では、幾何学情報や運動視差などの効果を有効に活用することで観察者に立体感を提示できることは知られているが、それらの物理量と観察者の知覚の関係性は明らかにさ



図 1 cobra curved display[4]



図 2 Ensphered Vision[6]

れていない．また，奥行きや立体感の知覚に関する研究や観察者に立体感を知覚させる映像コンテンツの製作はこれまでも行われているが，従来の映像表現は基本的には平面ディスプレイでの提示を想定しているため，同様の手法を非平面ディスプレイに直接適用できるかは明らかにされていない．

そこで本研究では，非平面ディスプレイの中でも特に球体ディスプレイに着目し，球体ディスプレイでの映像表現における観察者の知覚について調査及び考察することを目的とする．映像表現には様々なものが考えられるが，上述したように非平面ディスプレイは没入感や臨場感の高さを活かした立体表現が得意であることから，本研究では立体表現の一つとして映像内の 2 層の間に生じる奥行き差を浮遊感と定義し，その表現に着目する．また，球体ディスプレイは 360 度方向の提示面をもつことから，すべての観察者に同じ情報を提示することなどを目的として表示映像を提示面上で回転させることが多い．そこで，球体ディスプレイの提示面上を異なる速度で回転する 2 つの映像を重畳表示することにより生じる運動視差を活用することで浮遊感表現を実現するとともに，その映像を見た観察者の浮遊感知覚を定量評価する．球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の知覚を定量化できた場合，三次元データの可視化や情報の強調表示を目的とした映像製作の補助などへの応用が期待できる．

本研究では，はじめに球体ディスプレイでの映像表現において運動視差が観察者に浮遊感を知覚させるかについて確認するための被験者実験を行う．次に，球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の浮遊感知覚についての仮説を立



図 3 SFV-RS[8]



図 4 Geo-Cosmos

てるとともに、観察者の浮遊感知覚を定式化する．その後、再度被験者実験を行い、観察者の浮遊感知覚の評価結果を仮説と比較することで、球体ディスプレイでの浮遊感表現と観察者の浮遊感知覚の関係性について考察する．また、球体ディスプレイと平面ディスプレイの浮遊感知覚を比較することで、球体ディスプレイでの浮遊感表現に関するより詳細な知見を得る．

本論文は8章から構成される．第2章では、球体ディスプレイの概観と、本研究で主に使用する球体ディスプレイ Geo-Cosmos について述べる．第3章では、本研究で焦点を当てる浮遊感表現の定義について述べた後、人間が奥行き判断に用いている要因を列挙する．第4章では、球体ディスプレイでの映像表現において運動視差が観察者に浮遊感を知覚させるかについて確認する．第5章では、一般的な運動視差について述べた後、特に球体ディスプレイにおける運動視差について考察し、球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の浮遊感知覚についての仮説を立てるとともに、観察者の浮遊感知覚を定式化する．第6章では、仮説に基づいた被験者実験を行うことで、球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の浮遊感知覚について考察する．第7章では、球体ディスプレイと平面ディスプレイの浮遊感知覚を比較する．最後に、第8章で本論文をまとめるとともに、今後の展望を示す．

2. 球体ディスプレイ

球体ディスプレイは、名前の通り球形状の提示面を持つディスプレイである。観察者の目を引く特徴的な形状を有していることや360度すべての方向の観察者に情報を提示できることから、特に展示開発用途や映像・アート分野での活用が始まっている。本章では、球体ディスプレイの概観について述べた後、本研究の被験者実験で主に使用する球体ディスプレイ Geo-Cosmos について述べる。

2.1 球体ディスプレイの概観

代表的な球体ディスプレイは2002年にMachidaによって報告された世界初の球体LEDディスプレイ、初代Geo-Cosmosである[9]。Geo-Cosmosは直径約6m、重量約15tの大型球体ディスプレイであり、10mmピッチ、縦横16個のLEDを埋め込んだ160mm角LEDパネル3,715枚（総画素数951,040画素）で球体表面を構成することで自発光の球体ディスプレイを実現している。

初代Geo-Cosmos報告以降、現在に至るまで様々な企業が球体ディスプレイを開発している。ナック・イメージ・テクノロジー社は完全球体のLEDディスプレイとしてPanorama Ball Vision（図5）を発表している[10]。Panorama Ball Visionでは、人間の目の残像効果に着目し、経線上にLEDを配列させた球体を横方向に回転させることで、直径約60cm程度の球面状の映像表現を実現している。また、アーク・サイエンス・シミュレーションズ社は、バックプロジェクション方式による球体ディスプレイOmni Globe（図6）を発表している[11]。Omni Globeでは、球体の最下端部に上向きに配置されたプロジェクタから球体の最上端部に取り付けられた半球ミラーに映像を投射し、投射した映像を拡散反射して球体内部全体に映し出すことで、直径約80cmから2m程度の球体ディスプレイを実現している。ただし、ミラーが取り付けられた部分は映像が投射されないため、遮蔽される。これに対して、フロントプロジェクション方式によって球形状の映像表現を実現する手法も存在している。水族館ニフレルによる空間アートWONDER MOMENTS（図7）では、直径約5mの球にプロジェクションマッピングを行うことで、球体ディスプレイに近い表現を実現している[12]。球面に映像を投射する

方式であることから物理的な継ぎ目やバックプロジェクション方式における遮蔽領域が存在せず、より臨場感の高い表現が可能である一方で、観察者がプロジェクションを遮蔽しないようなプロジェクタ及び投影対象の配置の決定や映像を投射する各プロジェクタ間のキャリブレーションなど、設置環境に制約がある。

上述した球体ディスプレイは展示会や博物館などでの利用が想定されており、導入コストや設置環境などの点から一般の消費者が利用することは非常に困難である。一方で、近年では価格や可搬性を考慮した小型・中型の球体ディスプレイも開発、販売されている。学研は、一般向け教材としてバックプロジェクション方式による直径約 30cm の半球ディスプレイ WORLDEYE（図 8）を販売している [13]。また、株式会社 JVC ケンウッドは、同じくバックプロジェクション方式による直径約 80cm の半球ディスプレイ、触れる地球を販売している [14]。このような一般普及を目的とした球体ディスプレイを利用することによって、利用者は手持ちのコンテンツを球面で楽しむことができる。



图 5 Panorama Ball Vision[10]



图 6 Omni Globe[11]

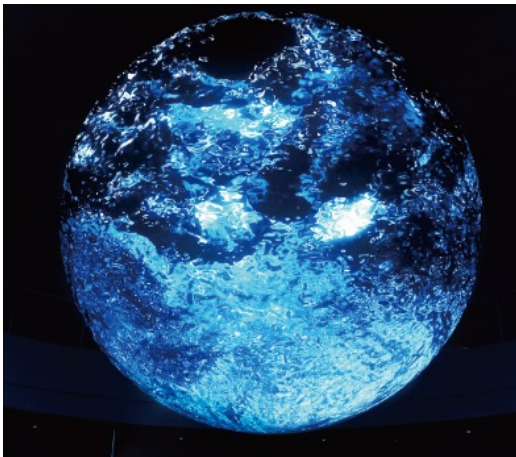


图 7 WONDER MOMENTS[12]



图 8 WORLDEYE[13]

2.2 Geo-Cosmos

本節では，本研究の被験者実験で主に使用する球体ディスプレイ Geo-Cosmos（図 9）について述べる．Geo-Cosmos は，日本科学未来館に展示されている球体ディスプレイである [8]．現在の Geo-Cosmos は 2.1 節で取り上げた初代 Geo-Cosmos の後継機であり，96mm 角の有機 EL パネル 10,362 枚（総画素数 1,000 万画素以上）によって直径約 6m の自発光による球体ディスプレイを実現している．コンテンツには人工衛星が撮影した地表，気象画像などの科学データをはじめとした映像が用意されており，観察者は様々な視点からリアルな地球の様子を観賞することができる．表 1 に，Geo-Cosmos の基本スペックを示す．



図 9 Geo-Cosmos（図 4 再掲）

表 1 Geo-Cosmos の主要スペック

サイズ	半径約 3m
発光デバイス	有機 EL(96mm 角パネル 10,362 枚)
出力解像度	3840 × 1930
リフレッシュレート	30Hz

3. 球体ディスプレイでの浮遊感表現

本章では，本研究で焦点を当てる映像表現である浮遊感表現の定義について述べた後，浮遊感表現を実現するために活用できると考えられる要素として人間が日常生活で奥行き判断に用いている要因を列挙する．

3.1 浮遊感表現

球体ディスプレイは平面での表現と比較して没入感や臨場感の高い表現が可能であることから，特に立体表現のように現実世界との親和性が高い表現が得意であると考えられる．そこで本研究では，立体表現の一つとして映像内の特定の2層の間で知覚する奥行き差を浮遊感として定義し，着目する．図10は，本研究で表現する浮遊感を簡単な図で示したものである．浮遊感表現によって球体ディスプレイの提示面上で奥行き差を表現できた場合，観察者は球体ディスプレイがあたかも半径の異なる2つの球から構成されているように知覚することができる．

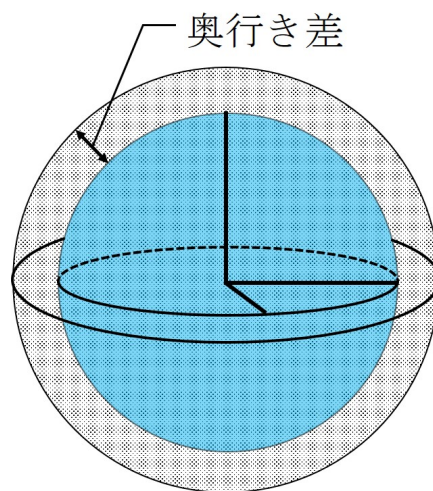


図 10 本研究で表現する“浮遊感”

3.2 奥行き判断の要因

通常ディスプレイは1層の提示面しか持たないため、物理的な構造で観察者に奥行きを提示させることは困難である。一方で、人間は日常生活において様々な視覚的活動から立体的な広がりや奥行きを知覚しており、それらを活用することで1層の提示面でも観察者に複数の層やその間の奥行き差を知覚させることができると考えられる。以下では、人間が日常生活で奥行き判断に用いている要因をいくつか取り上げる。

運動視差

運動視差とは、網膜上に投影された対象について、観察者または観察対象が運動したときに生じる相対的な網膜像のずれ量である。日常で見られる例として、新幹線の車窓から近くにある木と遠くにある山を眺めるようなシーンや、横断歩道で静止している歩行者が異なる奥行きを同じ速度で走行する複数の自動車を観察するようなシーンなどが挙げられる。前者の例では、近くの対象ほど速く、遠くの対象ほど遅く運動しているように見えることで、この速度差により対象の遠近を把握することができる。また、後者の例では、同じ速度で運動している対象でも、観察者から近い対象ほど速く、遠い対象ほど遅く運動しているように見えることで、この速度差により対象の遠近を把握することができる。前者は観察者の運動によって生じる運動視差、後者は観察対象の運動によって生じる運動視差としてそれぞれ知られている [15]。

両眼視差

両眼視差とは、ある対象を注視した際にその対象の遠近で生じる左右の眼球間の網膜像のずれ量のことである。人間は二つの目を持っており、両眼で見た情報を脳で統合することで、対象までの遠近や奥行きを知覚することができる。

輻輳

両眼で対象を注視する際、人間は像が網膜の中央に映るように眼球を回転させる。この動作を輻輳と呼び、この時両視線が交わる角度を輻輳角と呼

ぶ。注視点が知覚にあるほど輻輳角は大きくなり、この時の動眼筋の緊張度が奥行き知覚の手がかりとなる。

経験的要因

上述した奥行き知覚の要因は、人間の生理的要因（一次的手がかり）によるものである。人間はこれらの生理的要因に加え、経験的要因（二次的手がかり）からも奥行きを知覚している。経験的要因による奥行き知覚の例としては、大きい対象ほど近いと知覚する大小遠近法や対象同士の重なりから前後を判断する重畳遠近法、その他対象の高低や模様の粗密、陰影による奥行き知覚などが挙げられる。

本研究では、上述した奥行き判断の要因の中でも特に観察対象の運動によって生じる運動視差を活用することで、ディスプレイのように1層の提示面しか持たない情報提示媒体での見かけの奥行きの提示を実現する。球体ディスプレイを利用した情報提示では360度すべての方向の観察者に同じ情報を提示するために表示映像を提示面上で回転させることも多いため、運動視差との相性は良いと考えられる。本研究では、球体ディスプレイの提示面上を異なる速度で回転する2つの映像を重畳表示することによって生じる運動視差を活用することで、球体ディスプレイでの浮遊感表現の実現を試みる。

4. 実験 1：運動視差の提示による浮遊感知覚の効果の確認

4.1 実験目的

はじめに，実験 1 として，球体ディスプレイでの映像表現において，運動視差の提示が観察者に浮遊感を知覚させるかについて確認することを目的とした被験者実験を行う．本実験では，調査事項として以下の 2 つを設定した．

a. 運動視差と浮遊感知覚の関係性

運動視差の提示による浮遊感知覚の有無や度合いについて確認する．

b. 浮遊感知覚の映像依存性

球体ディスプレイに表示する映像の内容が，運動視差の提示による浮遊感知覚に影響するかを確認する．

4.2 実験環境

本実験では，球体ディスプレイとして日本科学未来館に展示されている大型球体ディスプレイ Geo-Cosmos を使用する．観察者は，半径 3 m の球体ディスプレイを距離 11 m（観察者から一番近い提示面までの距離）の位置から観察することで，浮遊感知覚を評価する（図 11）．

4.3 評価映像の作成

評価映像の作成にあたって，はじめに Geo-Cosmos の入出力について述べる．Geo-Cosmos の入力は， 3840×1930 の正距円筒図法で描かれた画像の上下に 3840×115 の非表示領域を加えた 3840×2160 の画像または映像である（図 12）．このような解像度の映像を Geo-Cosmos に入力することによって，球形状の情報提示が可能となる．また，Geo-Cosmos は日本科学未来館内の特定のスポットを視点



図 11 実験 1：実験環境

位置として設定することができ，このようにして設定された視点位置から Geo-Cosmos を観察した時に観察者が観察できる領域（図 13）が，入力画像における中央 1930×1930 の正方形領域（図 12 黄色領域）に相当する．

次に，表示映像の回転について述べる．表示映像を赤道に対して平行に回転させるような操作は，入力画像を赤道に対して平行にシフトさせることで実現することができる（図 14）．すなわち，球体ディスプレイの提示面上で運動視差を提示する操作は，異なる速度でシフトする 2 つの入力画像を重畳表示した映像を作成することに相当する．また，任意のベクトルを軸とした表示映像の回転は，座標変換やベクトル回転などの幾何計算によって実現することができる．

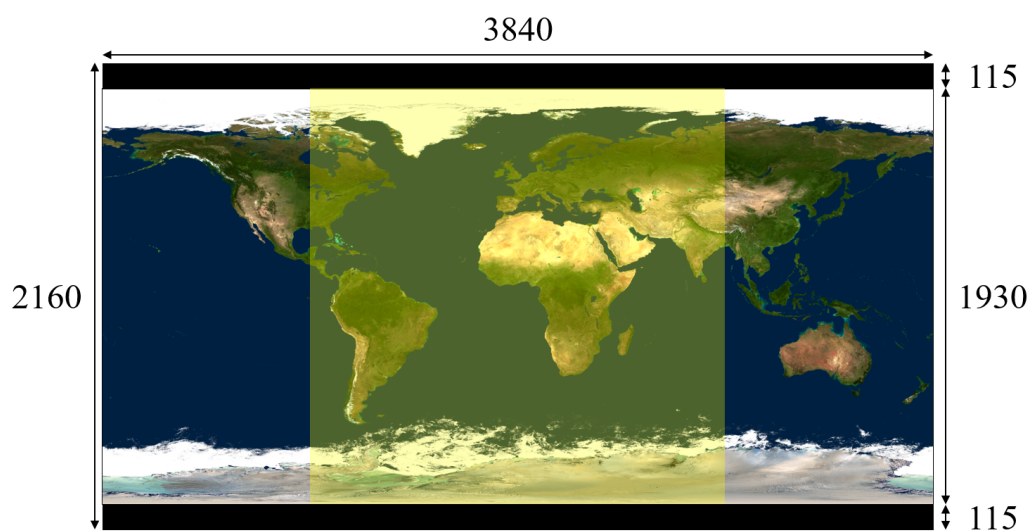


図 12 Geo-Cosmos 入力画像（黄色領域：設定された視点位置から観察できる領域）



図 13 設定された視点位置から観察できる見え

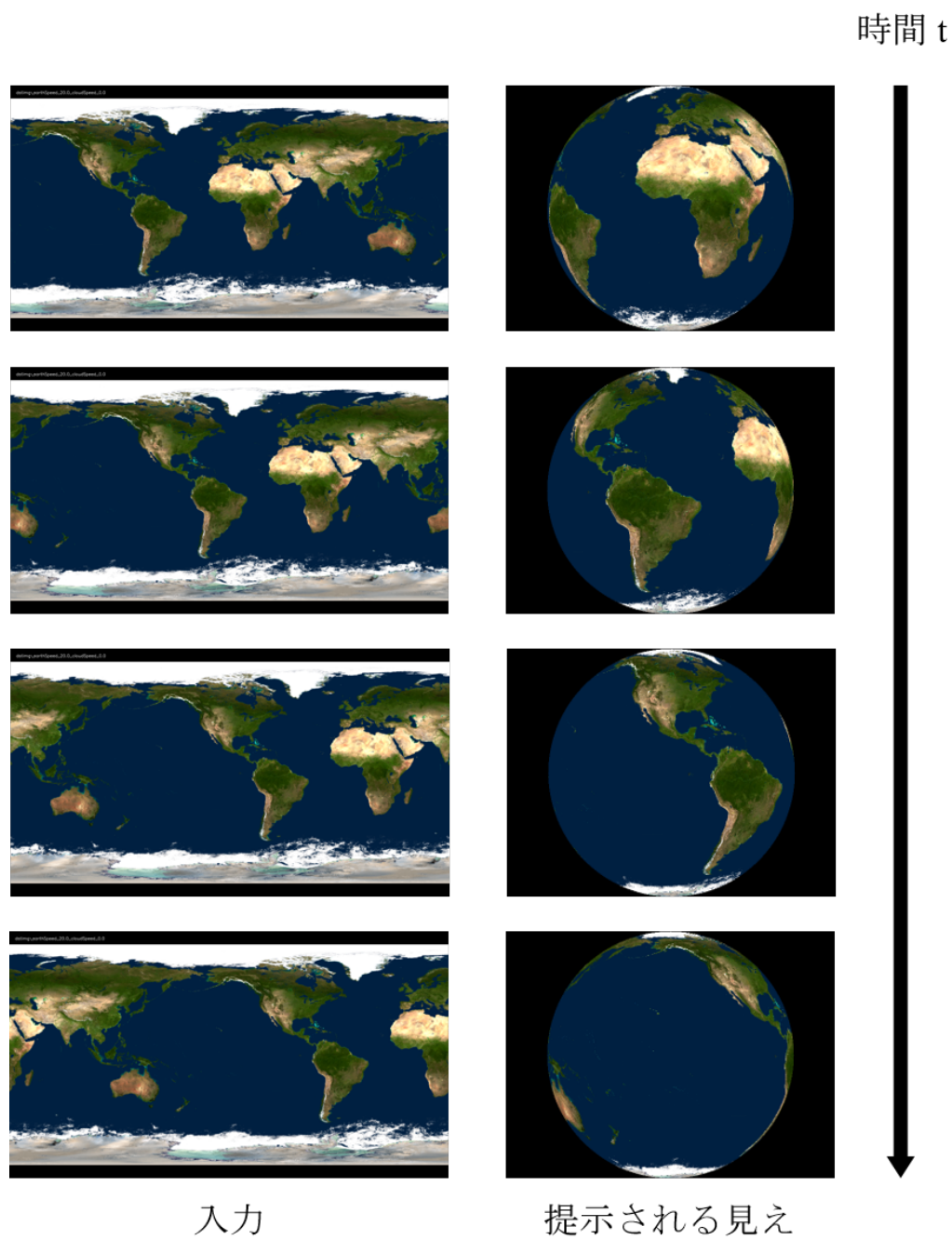


図 14 表示映像の回転

本実験で使用する評価映像の作成について述べる．4.1 節で述べた 2 つの調査事項について確認することを目的に，以下のような評価映像を作成した．

a. 運動視差と浮遊感知覚の関係性

本実験では，任意の速度で回転する映像（下レイヤ）と下レイヤ以上の速度で回転する映像（上レイヤ）の重畳表示によって，運動視差を提示する．回転速度パターンとしては，下レイヤは 0.0 deg/s から 10.0 deg/s まで 2.5 deg/s 刻みの 5 パターン，上レイヤは下レイヤに対する相対速度として 0.0 deg/s から 10.0 deg/s まで 2.5 deg/s 刻みの 5 パターンを設定し，それらを組み合わせた計 25 パターンからなる映像群を評価映像として用意した（表 2）．これらの映像の浮遊感知覚の評価結果について考察することで，運動視差と浮遊感知覚の関係性を調査する．

b. 浮遊感知覚の映像依存性

球体ディスプレイに表示する映像の内容が運動視差の提示による浮遊感知覚に影響するかを確認するために，本実験では地球映像（図 15），下レイヤ：地表画像，上レイヤ：雲画像 [16]）とドット映像（図 16，下レイヤ：ドット画像，上レイヤ：ドット画像）の 2 種類の映像を用意した．雲は地表に対して浮いているという知識は周知されているため，地球映像は浮遊感のイメージを掴みやすい映像であると考えられる．対照的に，ドット映像は単純な幾何学模様から構成される映像であるため，観察者の事前知識が影響しにくい映像だと考えられる．この 2 種類の映像の評価結果を比較することで，浮遊感知覚の映像依存性について調査する．なお，地球映像について，実際の雲は発生と消滅を繰り返しながら風の速さや向きに従って移動するため，図 15 のように同じ形状の雲が回転し続けるような現象は実際には起こりえないが，本実験の目的は球体ディスプレイでの映像表現において運動視差の提示が観察者に浮遊感を知覚させるかについて確認することであるため，本実験ではこの厳密性は考慮していない．

表 2 実験 1：回転速度パターン

映像 No.	下レイヤ回転速度 [deg/s]	上レイヤ回転速度 [deg/s]	回転速度差
1	0.0	0.0	0.0
2	0.0	2.5	2.5
3	0.0	5.0	5.0
4	0.0	7.5	7.5
5	0.0	10.0	10.0
6	2.5	2.5	0.0
7	2.5	5.0	2.5
8	2.5	7.5	5.0
9	2.5	10.0	7.5
10	2.5	12.5	10.0
11	5.0	5.0	0.0
12	5.0	7.5	2.5
13	5.0	10.0	5.0
14	5.0	12.5	7.5
15	5.0	15.0	10.0
16	7.5	7.5	0.0
17	7.5	10.0	2.5
18	7.5	12.5	5.0
19	7.5	15.0	7.5
20	7.5	17.5	10.0
21	10.0	10.0	0.0
22	10.0	12.5	2.5
23	10.0	15.0	5.0
24	10.0	17.5	7.5
25	10.0	20.0	10.0

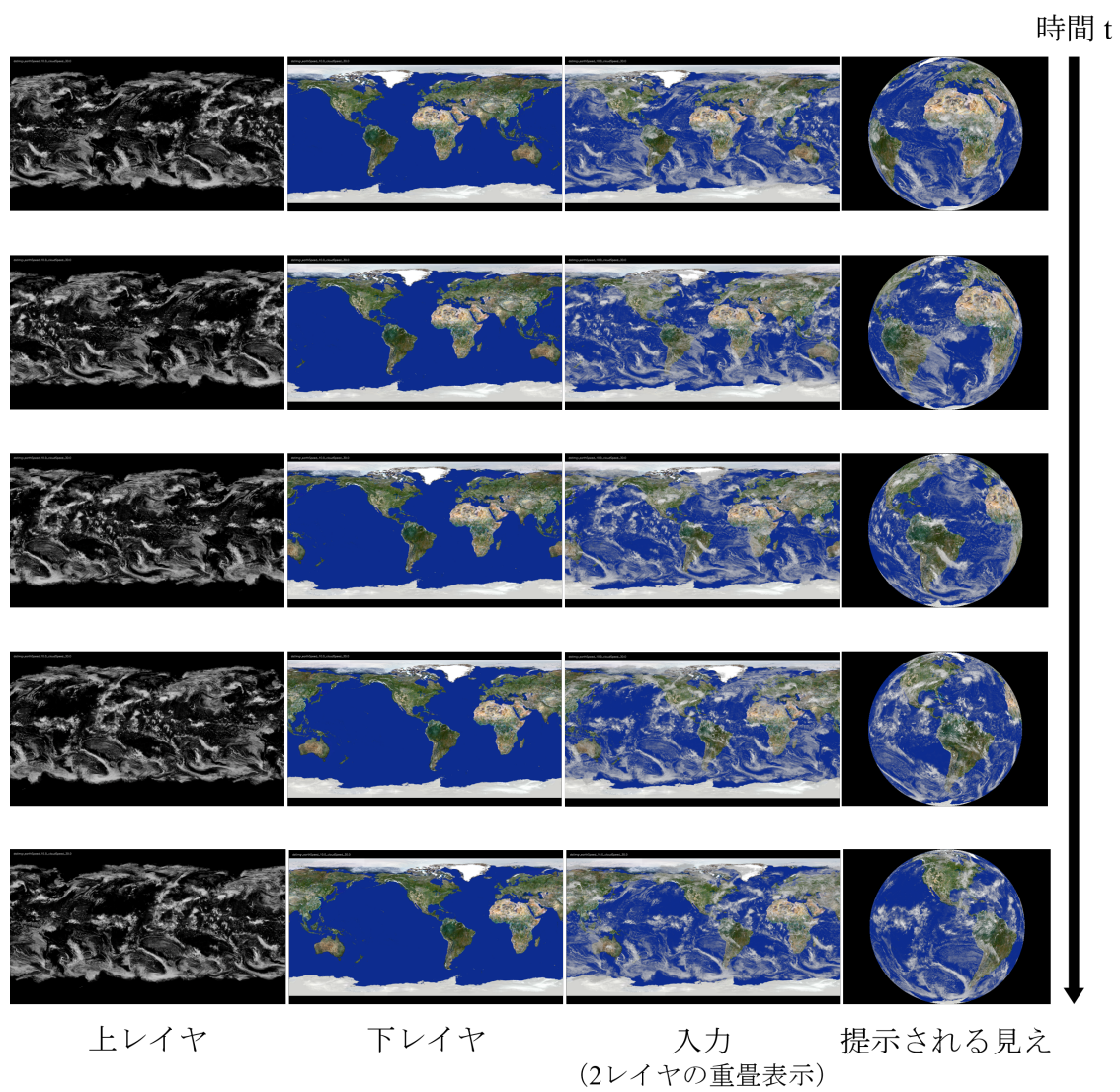


図 15 実験 1：評価映像（地球映像）

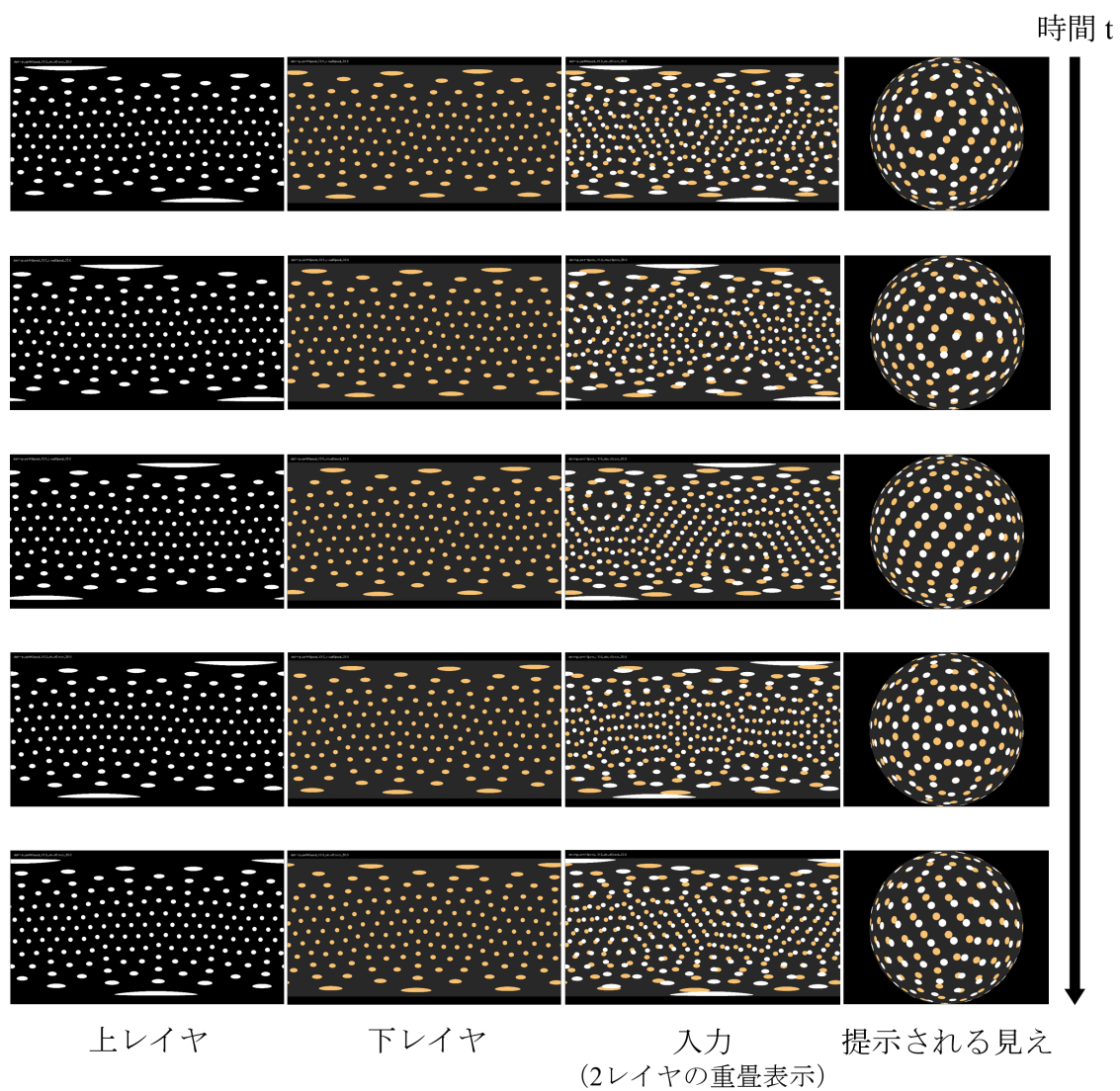


図 16 実験 1 : 評価映像 (ドット映像)

4.4 実験方法

本実験では、以下の二つの手順を繰り返すことによって浮遊感を評価する。

1. 映像の観察 (10 s)

球体ディスプレイに評価映像を表示する。観察者は10秒間その映像を観察し、映像から知覚した浮遊感の有無やその度合いについて確認する。

2. 浮遊感の評価 (10 s)

観察した映像から知覚した浮遊感を表3で示す5段階で評価する。ここで、各映像に対する評価がその前に提示した映像との相対評価になってしまうことを防ぐために、評価の間、球体ディスプレイにはグレー画像 (R:128, G:128, B:128) を表示しておく。

以上の手順をランダムな順番で表示される25パターンの評価映像に対して繰り返し行うことによって、それぞれの評価映像に対する浮遊感知覚の評価結果を得る。また、地球映像の評価終了後は、ドット映像に対しても同様の実験を行う。

表3 実験1：評価項目	
浮遊感評価	評価内容
1	全く浮いていない
2	少し浮いている
3	浮いている
4	かなり浮いている
5	浮き過ぎである

4.5 実験結果

本実験では、8名の被験者から評価映像に対する浮遊感知覚の評価結果を得た。すべての評価終了後、得られた5段階の評価結果に対して観察者ごとに標準化を行った。この操作により、観察者ごとの浮遊感知覚の評価のばらつきを無視することができる。標準化式は評価データ x_i 、評価結果の平均 μ 、評価結果の標準偏差 σ を用いて以下の式で表される。

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}. \quad (1)$$

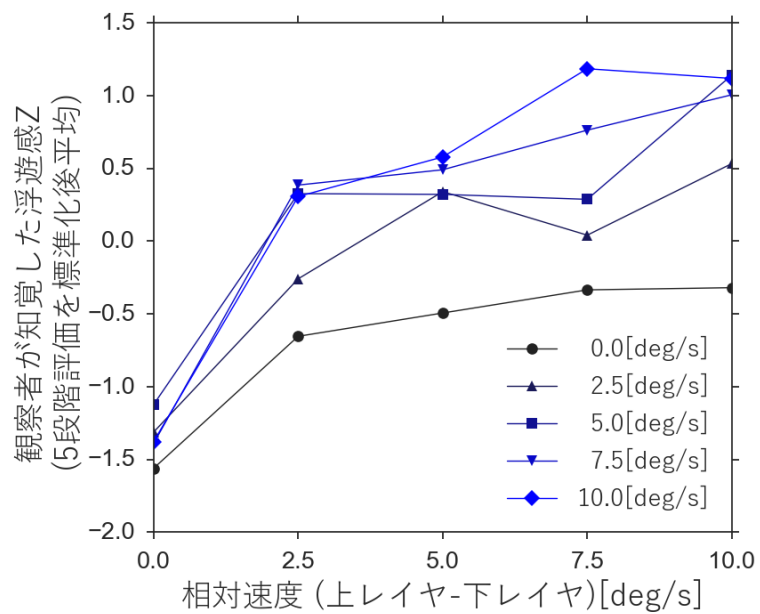
a. 運動視差と浮遊感知覚の関係性

図 17(a) は、地球映像に対する浮遊感知覚の評価結果である。2レイヤの回転速度差に対する浮遊感知覚の推移を確認するために、グラフの横軸に下レイヤに対する上レイヤの相対速度、縦軸に観察者の浮遊感知覚の評価結果をプロットしている。また、下レイヤの回転速度に対する浮遊感知覚の推移を確認するために、凡例として下レイヤの回転速度をプロットしている。

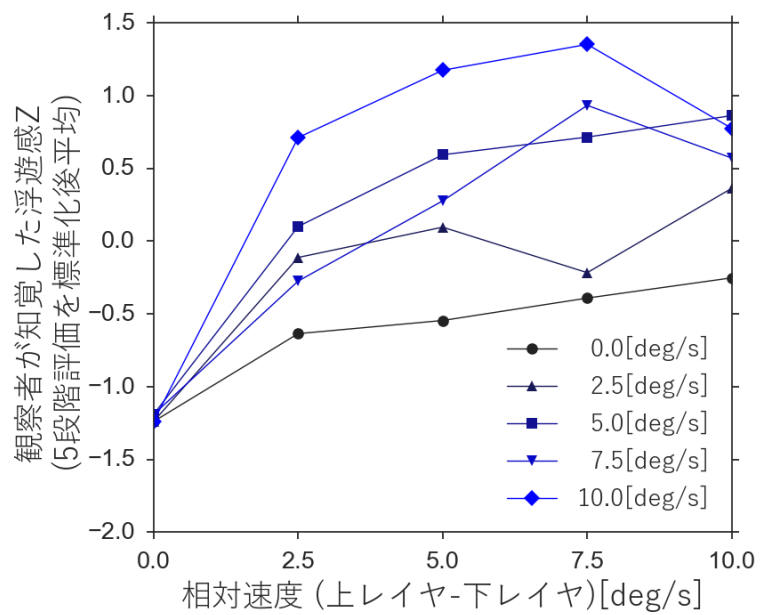
図 17(a) から、2レイヤの相対速度が大きくなるほど、浮遊感知覚の評価結果も増加傾向にあることがわかる。また、下レイヤの回転速度が速いほど、観察者が知覚する浮遊感も増加している。このことから、球体ディスプレイでの浮遊感表現において、観察者が知覚する浮遊感は2レイヤ間の相対速度及び各レイヤの絶対速度と単調増加の関係にあると考えられる。この結果は、運動視差によるものと考えれば説明がつく。

b. 浮遊感知覚の映像依存性

次に、浮遊感知覚の映像依存性について確認するために、地球映像とドット映像の評価結果を比較する。図 17(b) はドット映像に対する浮遊感知覚の評価結果である。図 17(b) において、浮遊感知覚の評価結果は2レイヤの相対速度及び各レイヤの絶対速度に対して単調増加の傾向にあり、これは地球映像の評価結果と類似している。このことから、2レイヤの回転速度差が観察者の浮遊感知覚に与える影響は、表示する映像の内容に依らないと考えられる。



(a) 地球映像



(b) ドット映像

図 17 実験 1 : 評価結果

実験1より、はじめに設定した2つの調査事項に対して以下のような知見が得られた。

a. 運動視差と浮遊感知覚の関係性

異なる速度で回転する2つの映像の重畳表示によって生じる運動視差は観察者に浮遊感を知覚させ、その度合いは2レイヤ間の相対速度及び各レイヤの絶対速度に対して単調増加の関係にある。

b. 浮遊感知覚の映像依存性

運動視差の提示によって観察者が知覚する浮遊感は、表示映像の内容に依らない。

また、上記以外に、被験者から以下のような感想・知見が得られた。

・ Geo-Cosmos を観察する時間帯によって表示映像に対する印象が変化する

観察対象である Geo-Cosmos は日本科学未来館内に展示されている球体ディスプレイであるため、館内の照明が球体ディスプレイの提示面に反射する。また、Geo-Cosmos の周辺はガラス張りの建築でデザインされているため、時間帯によって太陽光が館内の照明と同様に Geo-Cosmos に反射する。本実験では、これらの外光によって表示映像に対する印象が変化するという感想が得られた。

・ 評価項目の表現が適切でない

表2で示した5段階評価の評価項目について、「1. 全く浮いていない」から「4. かなり浮いている」までは浮遊感知覚が大きいほど良いという評価軸であるのに対して、「5. 浮き過ぎである」は浮遊感知覚が大きいほど悪いという評価軸であることから、「5. 浮き過ぎである」という評価項目は表現が適切ではないのではないかという意見が得られた。さらに「5. 浮き過ぎである」という表現は、“浮遊感知覚が大きすぎるため違和感が生じた”という考え方や、“地球映像から得られた浮遊感知覚は現実の雲の高度に対して浮き過ぎている”という考え方など

観察者によって様々に定義できてしまうことから，この評価項目は浮遊感知覚を評価する上で適切でないと考えられる．

5. 浮遊感知覚の定式化

第4章で述べた実験から，球体ディスプレイでの映像表現において，運動視差の提示によって観察者に浮遊感を知覚させることができるという知見が得られた．次に，運動視差に対する浮遊感知覚の定式化について考える．本章では，はじめに一般的な運動視差について述べた後，特に球体ディスプレイにおける運動視差について考察し，球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の浮遊感知覚についての仮説を立てるとともに，観察者の浮遊感知覚の定式化を行う．

5.1 一般的な運動視差

はじめに，静止している観察者の頭部から距離 d_A だけ離れた前額平行面上を，対象 A が速度 v で運動する場合について考える (図 18(a))．運動の結果，対象 A の方向が角度 θ_A だけ変化すると仮定すると，対象 A に対する対象運動視差は以下の式 (2) で表すことができる．

$$\theta_A = \arctan \frac{v}{d_a} \quad (2)$$

いま，対象 A の微小時間内での運動による角度 θ_A の変化が微小であると仮定すると，式 (2) は

$$\theta_A \simeq \frac{v}{d_A} \quad (3)$$

と近似することができる．式 (3) より，対象 A の速度 v 及び運動視差 θ_A が与えられた場合，観察者から対象 A までの距離 d_A を計算できることがわかる．

次に，前額平行面上の異なる奥行き位置を同じ速度で運動する2点，対象 A 及び対象 B を観察した場合について考える (図 18(b))．観察者から対象 B までの距離を d_B とすると，対象 B に対する運動視差 θ_B は以下の式 (4) で表すことができる．

$$\theta_B \simeq \frac{v}{d_B} \quad (4)$$

式 (3) 及び式 (4) より，

$$\frac{d_B}{d_A} = \frac{\theta_A}{\theta_B} \quad (5)$$

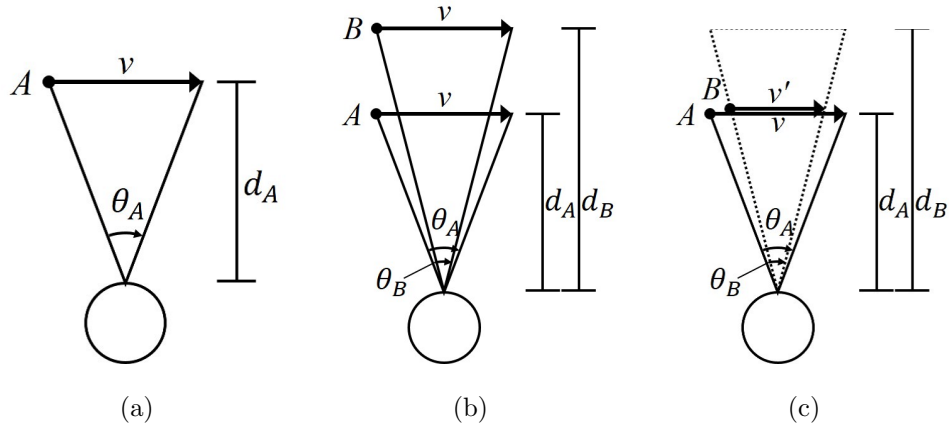


図 18 一般的な運動視差

この関係から、対象 A 及び対象 B に対する運動視差 θ_A , θ_B を与えられた場合、観察者は対象 A までの奥行き d_A に対する対象 B までの相対的な奥行き d_B を知覚することができる。

一方、1 層の提示面しか持たない（対象 A 及び対象 B が同じ奥行きに位置していることに等しい）ディスプレイで対象 B までの奥行き d_B を表現したい場合（図 18(c)）、対象 B を式 (6) で表される速度 v' で運動させることによって、観察者に図 18(a), (b) と同等の奥行き差を知覚させることができると期待される。

$$v' = \theta_B d_A. \quad (6)$$

以上の式より、複数の対象を異なる速度で運動させることにより生じる運動視差を活用することで、観察者が対象間で知覚する奥行きの知覚量を制御することができると考えられる。

5.2 球体ディスプレイにおける運動視差

5.1 節で述べた運動視差は観察者の対象が前額平行面上を運動する場合、すなわち平面ディスプレイでの表現を取り扱ったものであるため、対象が円運動する球体ディスプレイに応用できるかは確かではない。

そこで本節では，特に対象が観察者の頭部からちょうど距離 d_A だけ離れた地点を速度 v で運動する瞬間について取り上げ，その場合に観察者が知覚する浮遊感について考察する．このとき，対象 A は観察者の頭部の前額平行面上を運動していると近似できることから，5.1 節で述べた運動視差の式が適用でき，対象 A に対する対象運動視差 θ_A は，

$$\theta_A \simeq \frac{v}{d_A} \quad (7)$$

で表すことができる．また，式 (7) は円運動における半径 r 及び角速度 ω を用いて

$$\theta_A \simeq \frac{r\omega}{d_A} \quad (8)$$

と書き換えることができることから，式 (5) 及び式 (8) より，球体ディスプレイでの表現では，対象の角速度 ω によって，観察者に対象間の相対的な奥行き差である浮遊感を知覚させることができ，またその度合いは対象の角速度の比に比例すると考えられる．本研究では，これを仮説として設定し，評価実験によってこれを検証する．

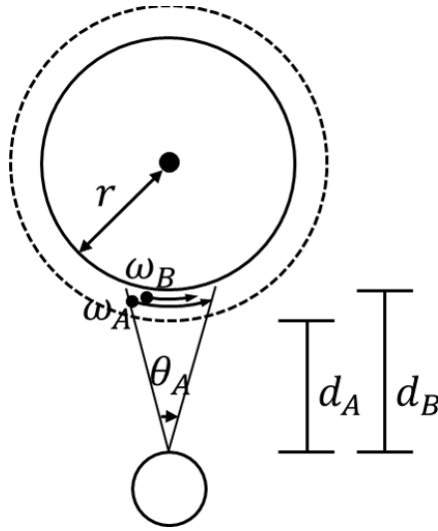


図 19 球体ディスプレイにおける運動視差

6. 実験2：回転速度比と浮遊感知覚の関係性の調査

6.1 実験目的

球体ディスプレイでの浮遊感表現における2レイヤの回転速度比と浮遊感知覚の関係性について調査することを目的に、被験者実験を行う。2レイヤの回転速度比と浮遊感知覚の評価結果の間に線形性が確認できた場合、第5章で設定した仮説は正しいことが証明される。

6.2 実験環境

第4章で述べた実験同様、球体ディスプレイとして日本科学未来館に展示されている大型球体ディスプレイ Geo-Cosmos を使用する。観察者は、半径3 mの球体ディスプレイを距離11 m（観察者に対して一番近い提示面までの距離）の位置から観察することで、浮遊感知覚を評価する（図20）。



図 20 実験2：実験環境

6.3 評価映像の作成

第4章で述べた実験と同様に、2レイヤの重畳表示から構成される映像に対して、浮遊感知覚の評価を行う。本実験では2レイヤの回転速度比と浮遊感知覚の関係性に注目していることから、回転速度パターンとしては、下レイヤは2.5 deg/s から7.5 deg/s まで2.5 deg/s 刻みの3パターン、上レイヤは下レイヤに対する回転速度比として1倍から5倍まで1刻みの5パターンを設定し、それらを組み合わせた計15パターンからなる映像群を評価映像として用意した(表4)。また、本実験において、回転速度比を定義できない0.0 deg/s と、回転速度が速すぎることから浮遊感知覚を正常に評価できないと考えられる10.0 deg/s は、下レイヤの評価パターンから除外している。これらの映像の評価結果から、回転速度比に対する観察者の浮遊感知覚について考察する。

また、球体ディスプレイに表示する映像の種類は、地球映像(図15)1種類のみを用いた。これは、第4章で述べた実験から、運動視差の提示による浮遊感表現で観察者が知覚する浮遊感は、表示映像に依らないという知見が得られているからである。

表 4 実験 2 : 回転速度パターン

映像 No.	下レイヤ回転速度 [deg/s]	上レイヤ回転速度 [deg/s]	回転速度比
1	2.5	2.5	1
2	2.5	5.0	2
3	2.5	7.5	3
4	2.5	10.0	4
5	2.5	12.5	5
6	5.0	5.0	1
7	5.0	10.0	2
8	5.0	15.0	3
9	5.0	20.0	4
10	5.0	25.0	5
11	7.5	7.5	1
12	7.5	15.0	2
13	7.5	22.5	3
14	7.5	30.0	4
15	7.5	37.5	5

6.4 実験方法

第4章で述べた実験と同様の方法で行った。ただし，第4章で述べた実験から浮遊感の5段階評価に対して表現が適切でないという知見が得られたため，本実験では5段階評価の表現を表5のように変更した。

表 5 実験2：評価項目	
浮遊感評価	評価内容
1	全く浮いていない
2	あまり浮いていない
3	少し浮いている
4	まあまあ浮いている
5	とても浮いている

6.5 実験結果

本実験では，23名の被験者から評価映像に対する浮遊感知覚の評価結果を得た。また，第4章で述べた実験同様，得られた5段階の評価結果に対して観察者ごとに標準化を行った。

図21(a)は，評価映像に対する浮遊感知覚の評価結果である。2レイヤの回転速度比に対する浮遊感知覚の推移を確認するために，グラフの横軸に下レイヤに対する上レイヤの回転速度比，縦軸に観察者の浮遊感知覚の評価結果をプロットしている。また，下レイヤの回転速度に対する浮遊感知覚の評価結果の推移を確認するために，凡例として下レイヤの回転速度をプロットしている。さらに，評価結果を仮説と比較するために，第2軸として仮説に基づく回転速度比に対する浮遊感知覚の推移をプロットしている。

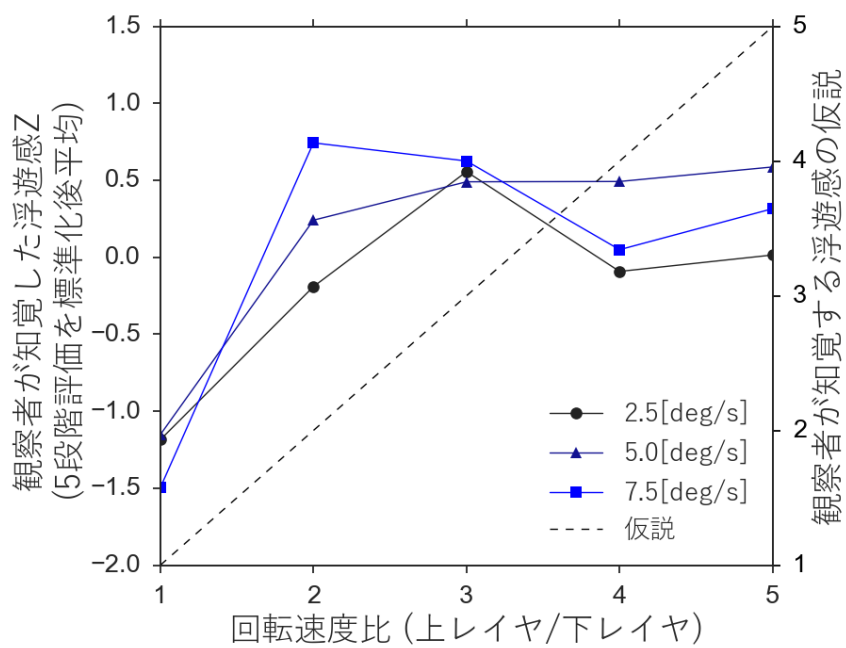
図21(a)から，回転速度比が1から3の場合において，2レイヤの回転速度比に対して浮遊感知覚の評価結果が線形に推移しているように読み取ることができる。一方で，回転速度比が4以上の場合，観察者の浮遊感知覚の増加量が減少し

始め、飽和しているように見える．この結果について深く考察するために，評価結果と仮説の相関関係について確認する．

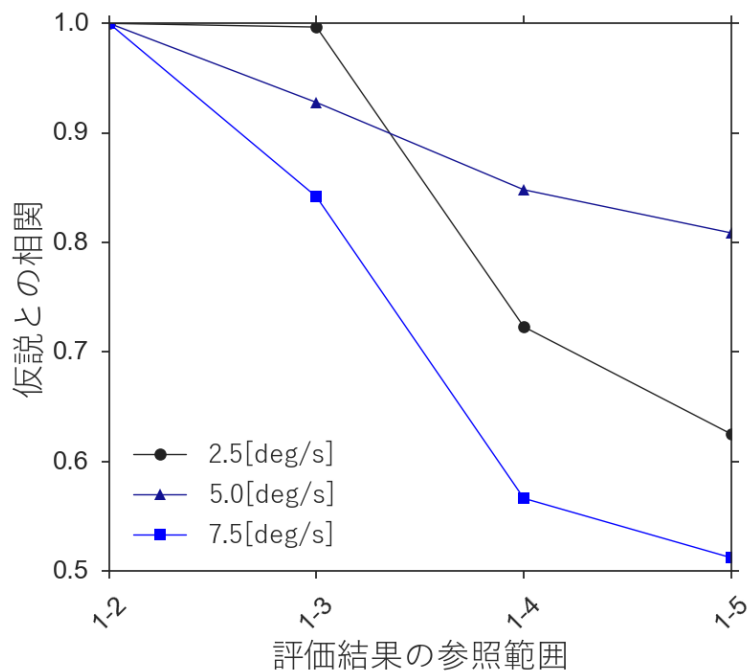
図 21(b) は，本実験の評価結果と仮説の相関関係をプロットしたものである．グラフでは，横軸に回転速度比の参照範囲，縦軸に各回転速度比までの評価結果を参照した場合の仮説との相関係数をプロットしている．例えば，横軸が 1-3 の場合の縦軸の値は，回転速度比が 1 から 3 の評価結果と仮説の相関係数を計算したものである．本実験では，浮遊感知覚は回転速度比に対して線形という仮説を立てているため，評価結果が回転速度比に対して線形に推移している場合，相関係数は 1 となる．相関係数は標準偏差 C_{ii} 及び C_{jj} ，共分散 C_{ij} を用いて以下の式で表される．

$$S_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{ii}C_{jj}}. \quad (9)$$

図 21(b) から，回転速度比が 1 から 3 までの評価結果を用いて仮説との相関を計算した場合，すべての凡例において仮説と約 0.8 以上の相関があることがわかる．一方で，回転速度比が 1 から 5 までの評価結果を用いて仮説との相関を計算した場合，相関係数は大きく下がっている．これらの結果から，観察者の浮遊感知覚は 2 レイヤの回転速度比が 3 までの場合は回転速度比に対してある程度の線形性を持つ一方で，回転速度比がそれ以上大きくなると飽和する傾向にあると考えられる．これは，第 5 章で設定した仮説とは異なる結果である．このような結果が得られた原因として，観察者から得られた「回転速度比が大きすぎることで正しく浮遊感を評価できなかった」「回転速度比が大きすぎることで 2 レイヤが独立した映像であるように知覚した」などの感想と関係していると考えられる．



(a) 実験2：評価結果



(b) 仮説との相関 (縦軸の値が1に近いほど線形)

図 21 実験2：評価結果

7. 実験3：平面ディスプレイと球体ディスプレイの比較

7.1 実験目的

前章まででは，球体ディスプレイでの浮遊感表現における観察者の浮遊感知覚の定量化を目的としてきた．最後に，球体ディスプレイでの観察者の浮遊感知覚が平面ディスプレイでの知覚と異なるものかについて確認することを目的に，球体ディスプレイでの浮遊感知覚と平面ディスプレイでの浮遊感知覚を比較する．

7.2 実験環境

本実験では，球体ディスプレイとして学研から販売されている半径 30 cm の半球ディスプレイ WORLDEYE，平面ディスプレイとして EIZO FlexScan EV2455 を使用する．WORLDEYE は半球ディスプレイだが，ディスプレイの極を観察者方向に向けるように配置することで，球体ディスプレイとほとんど同じ見えを提示できると考えられる．観察者は，半球ディスプレイ及び平面ディスプレイを距離 1.8 m の位置から観察することで，浮遊感知覚を評価する（図 22）．2つのディスプレイの観察条件をできるだけ揃えるために，平面ディスプレイについては映像が表示されない領域は黒のフェルトで覆う．これにより，バックライトによる観察条件の変化を低減することができる．さらに，2つのディスプレイは提示面の形状が異なることから，提示面での照明の反射による影響も異なると考えられる．そこで，ディスプレイ周辺を黒色の箱で覆うことで，直接反射の影響を低減する．

7.3 評価映像の作成

第 6 章で述べた実験と同様に，2レイヤの回転速度比と浮遊感知覚の関係性に着目した評価実験を行っていく．回転速度パターンとしては，下レイヤは 2.5 deg/s から 7.5 deg/s まで 2.5 deg/s 刻みの 3 パターン，上レイヤは下レイヤに対する回転速度比として 1 倍から 5 倍まで 1 刻みの 5 パターンを設定し，それらを組み合



図 22 実験 3：実験環境

わせた計 15 パターンからなる映像群を評価映像として用意した（表 6）．これらの映像の評価結果を比較することで，回転速度比に対する浮遊感知覚について考察する．また，球体ディスプレイ及び平面ディスプレイに表示する映像の種類に関しても，第 6 章で述べた実験と同様，地球映像（図 15）1 種類のみを用いた．平面ディスプレイ用の映像としては，球体ディスプレイでの提示と同じ見えを平面ディスプレイの中心で提示するような映像を作成し，評価映像とした．

表 6 実験 3 : 回転速度パターン

映像 No.	下レイヤ回転速度 [deg/s]	上レイヤ回転速度 [deg/s]	回転速度比
1	2.5	2.5	1
2	2.5	5.0	2
3	2.5	7.5	3
4	2.5	10.0	4
5	2.5	12.5	5
6	5.0	5.0	1
7	5.0	10.0	2
8	5.0	15.0	3
9	5.0	20.0	4
10	5.0	25.0	5
11	7.5	7.5	1
12	7.5	15.0	2
13	7.5	22.5	3
14	7.5	30.0	4
15	7.5	37.5	5

7.4 実験方法

第6章で述べた実験と同様の方法で行う。また、球体ディスプレイの評価終了後は、平面ディスプレイに対しても同様の実験を行う。

7.5 実験結果

本実験では、10名の被験者から評価映像に対する浮遊感知覚の評価結果を得た。また、第4章及び第6章で述べた実験同様、得られた5段階の評価結果に対して観察者ごとに標準化を行った。

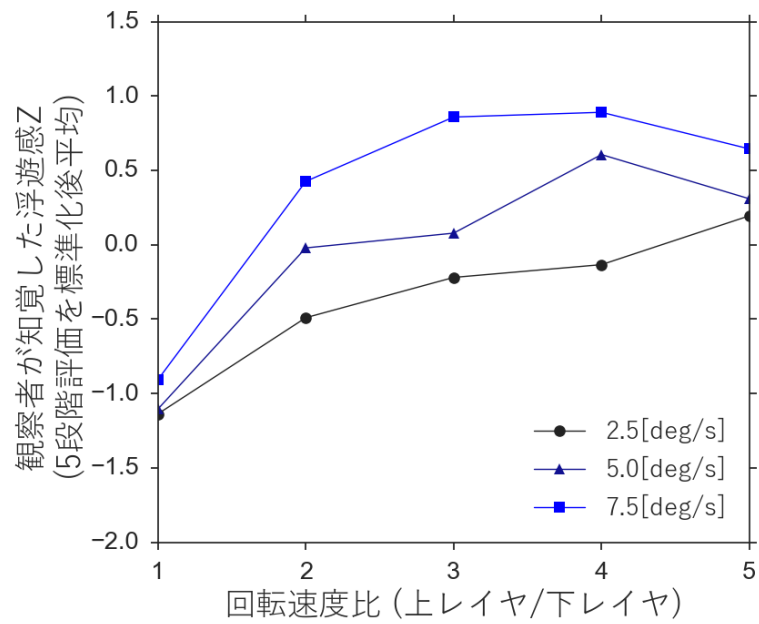
図23は、それぞれのディスプレイに対する浮遊感知覚の評価結果を示したものである。2レイヤの回転速度比に対する浮遊感知覚の推移を確認するために、グラフの横軸に下レイヤに対する上レイヤの回転速度比、縦軸に観察者の浮遊感知覚の評価結果をプロットしている。また、下レイヤの回転速度に対する浮遊感知覚の推移を確認するために、凡例として下レイヤの回転速度をプロットしている。

はじめに、球体ディスプレイでの浮遊感表現における浮遊感知覚の評価結果について確認する。図23(a)から、下レイヤの回転速度が2.5 deg/sの場合の浮遊感知覚の評価結果は、2レイヤの回転速度比に対して単調増加していることがわかる。また、下レイヤの回転速度が5.0 deg/s及び7.5 deg/sの場合の浮遊感知覚の評価結果は、回転速度比に対して飽和曲線のようなグラフを描いている。この結果は、第6章で述べた実験の評価結果と似た傾向の結果である。

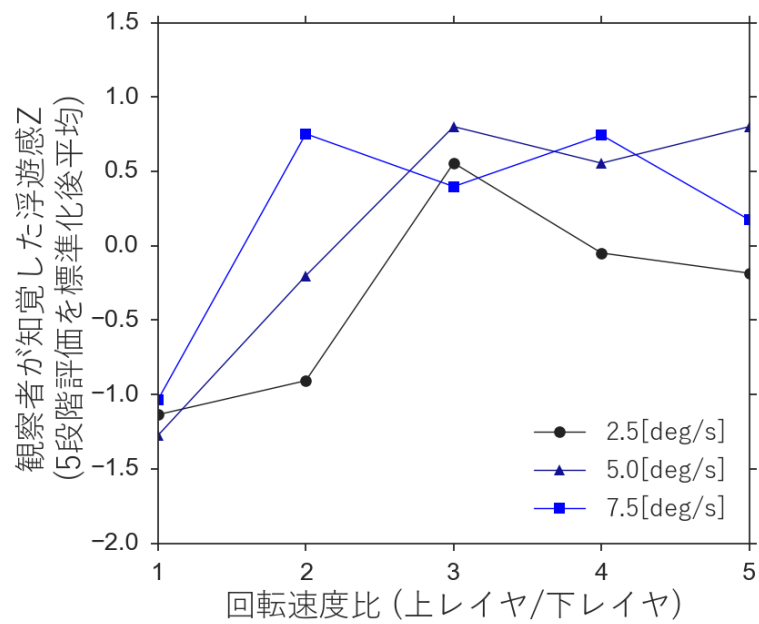
次に、この結果を図23(b)で示されている平面ディスプレイでの浮遊感表現における浮遊感知覚の評価結果と比較するために、球体ディスプレイと平面ディスプレイの評価結果の相関係数を計算する。図24は、球体ディスプレイ及び平面ディスプレイの回転速度比に対する浮遊感知覚の評価結果を各下レイヤの回転速度ごとに重ねてプロットしたものである。本実験では、各下レイヤの回転速度ごとの相関係数の計算結果から、球体ディスプレイと平面ディスプレイの浮遊感知覚の違いについて考察する。相関係数は各評価結果の標準偏差 C_{ii} 及び C_{jj} 、評価データ同士の共分散 C_{ij} を用いて以下の式で表される。

$$S_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{ii}C_{jj}}. \quad (10)$$

図 24 に、各下レイヤの回転速度における球体ディスプレイと平面ディスプレイの浮遊感知覚の評価結果の相関係数を示す。本実験では、各下レイヤの回転速度に対して 0.71～0.90 の高い相関が確認された。つまり、本実験では相関係数という観点からは球体ディスプレイ特有の知覚特性は確認できないという結果となった。一方で、数人の観察者からは「球体ディスプレイでの浮遊感表現は平面ディスプレイでの表現と比較して浮いているように見えた」といった感想が得られた。この知見が球体ディスプレイの特徴である球形状の提示面に起因する物理的なものなのか、もしくは観察者が球体ディスプレイの球形状の提示面を認識することにより知覚が変化するなどの心理的なものなのかについては、今後検証していく必要がある。また、本実験では球体ディスプレイ及び平面ディスプレイともに正面から観察し浮遊感知覚を評価したが、球体ディスプレイは 360 度全ての方向に提示面を持つことが特徴であるため、ディスプレイに対してある程度を付けて観察し、その際の浮遊感知覚を評価することで球体ディスプレイ特有の知覚特性を確認できる可能性がある。

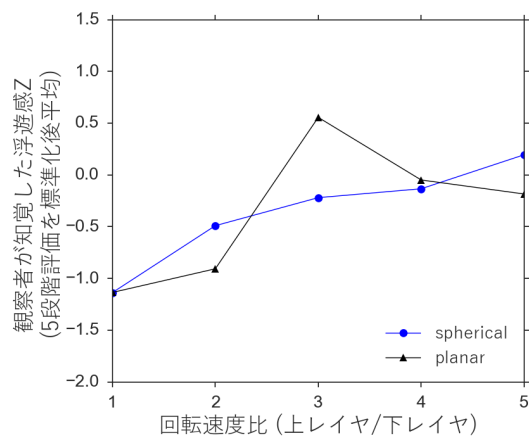


(a) 半球ディスプレイ

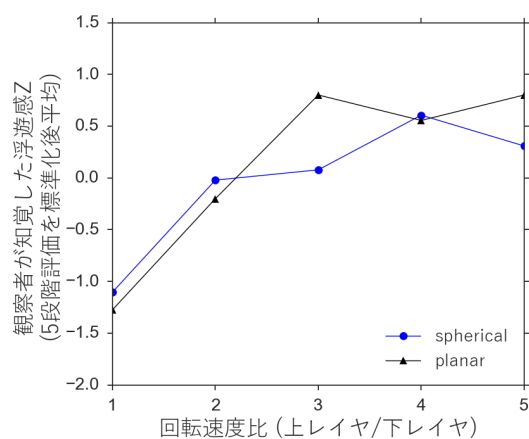


(b) 平面ディスプレイ

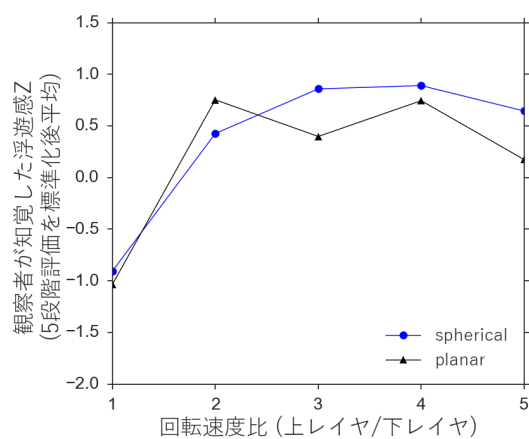
図 23 実験3：評価結果



(a) 下レイヤ回転速度: 2.5 deg/s, 相関係数=0.71



(b) 下レイヤ回転速度: 5.0 deg/s, 相関係数=0.90



(c) 下レイヤ回転速度: 7.5 deg/s, 相関係数=0.90

図 24 実験 3 : 球体ディスプレイと平面ディスプレイの評価結果の相関

8. まとめ

本研究では、非平面ディスプレイの中でも特に球体ディスプレイに着目し、球体ディスプレイを利用した映像表現における観察者の知覚について調査・考察することを目的とした。特に、映像表現として映像内の2層の間に生じる奥行き差から定義される浮遊感の表現に着目し、2層の速度差によって生じる運動視差を活用することで浮遊感表現を実現するとともに、浮遊感知覚の運動視差を用いた定量化を目指した。観察者が球体ディスプレイに表示される2つの映像の間で知覚する浮遊感の度合いは2つの映像の回転速度比に対して線形であるという仮説を立て、実際に球体ディスプレイを使用した被験者実験を行うことで、観察者の浮遊感知覚を評価した。被験者実験の結果、球体ディスプレイでの運動視差の提示による浮遊感表現において観察者が知覚する浮遊感は2つの映像の回転速度比が大きくなるほど増加する傾向にあるが、ある回転速度比に達すると以降の浮遊感知覚は飽和するという知見が得られた。

また、球体ディスプレイのための浮遊感表現についてより詳細な知見を得るために、球体ディスプレイと平面ディスプレイの浮遊感知覚の評価結果を比較した。実験の結果、球体ディスプレイでの浮遊感知覚は平面ディスプレイでの知覚と異なる性質を持つ可能性があることがわかった。一方で、この推察の真偽や、この結果が球体ディスプレイの特徴である球形状の提示面に起因する物理的なものなのか、もしくは観察者が球体ディスプレイの球形状の提示面を認識することにより知覚が変化するなどの心理的なものなのかについては、今後検証していく必要がある。

今後は、知覚心理学の観点からの浮遊感知覚の評価実験の実施や三次元データの可視化などの応用に対する浮遊感表現の有効性の提示、浮遊感表現以外の映像表現に対する観察者知覚の評価を目指す。

謝辞

本修士論文は、筆者が奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程在学中に、光メディアインタフェース研究室において行った研究をまとめたものです。本研究は、指導教員を引き受けてくださった先生方をはじめとする、数多くの方々からのご支援によるものです。この場を借りて御礼申し上げます。主指導教員を務めて頂いた奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の向川康博教授には、研究全般にわたり丁寧にご指導、ご助言をして頂きました。研究内容だけでなく修士学生として研究に取り組む上での考え方など大変貴重なお話もしてくださいました。心より感謝申し上げます。副指導教員を引き受けてくださった奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の加藤博一教授には、学内での発表において貴重なご質問、ご助言を頂きました。加藤教授から頂いたご指摘により、研究活動をより良いものとすることができました。深く感謝いたします。光メディアインタフェース研究室の船富卓哉准教授には、研究に対して多くのご助言、ご指導を頂戴致しました。船富先生に頂いた多くのご指導や数多くの議論がなければ、本論文の完成はありませんでした。厚く御礼申し上げます。光メディアインタフェース研究室の久保尋之助教には、研究活動だけではなく学生生活においても数々のご指導を頂きました。久保先生のご指導があったからこそ、無事に修士論文を完成させることが出来ました。深く御礼申し上げます。三菱電機株式会社先端技術総合研究所の中村芳知様、高柳亜紀様には、共同研究を行う上で大変お世話になりました。企業で働く社会人という観点からのご助言は、実験の実施や研究成果をまとめる上で大変勉強になりました。心より感謝申し上げます。科学技術振興機構日本科学未来館の瀬口慎人様、松岡均様には、被験者実験の実施をはじめとして共同研究を行う上で大変お世話になりました。Geo-Cosmosを使用した共同研究は、研究活動としてだけでなく、私自身にとって貴重な体験となりました。深く御礼申し上げます。物品の購入、旅費の精算などの研究活動を行う上でのご支援はもちろんのこと、私生活を含めた様々な相談事にまで乗っていただいた、光メディアインタフェース研究室事務補佐員である登淑恵、入江由美両女史に厚く御礼申し上げます。研究室の学生の皆様には、ミーティングや発表練習にお付き合い頂くだけでなく、日頃の生活においても多大なご支援をいた

だきましたこと，この場を借りて感謝申し上げます。皆様のおかげで，大変充実した2年間を過ごすことができました。本当に有難うございました。

なお，本研究の一部は JSPS 科研費 JP15H05918（新学術領域研究「多元質感知」）の助成を受けて行われたものです。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- [1] Robert Jacobson. *Information Design*. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [2] Ware C. *Information Visualization: Perception for Design*. Morgan Kaufmann, 1999.
- [3] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. In *IEEE Signal Process.Mag.*, Vol. 20, pp. 21–36, 2003.
- [4] Cobra simulation. <http://www.cobrasimulation.com/>.
- [5] 橋本渉, 岩田洋夫. 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ : Ensphered vision. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 第4巻, pp. 479–486, 1999.
- [6] 筑波大学 バーチャルリアリティ研究室 : ensphered vision. http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/enspheredvision/enspheredvision_j.html.
- [7] Super frontech vision-round signage. <http://www.fujitsu.com/jp/group/frontech/products/peripheral/others/display/sfv-rs/>.
- [8] Miraikan 日本科学未来館 : geo-cosmos. <https://www.miraikan.jst.go.jp/exhibition/tsunagari/geo-cosmos.html>.
- [9] Machida T. Geo-cosmos: world’s first spherical display. In *ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications*, pp. 189–189, 2002.
- [10] 橋本典久, 柳与志嗣, 出口吉春. Panorama ball vision:全天周パノラマ映像表示を可能とする led アレイ回転型小型球体ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 第17巻, pp. 151–160, 2012.
- [11] Arc science simulations. <http://arcscience.com/>.
- [12] Wonder moments. <https://www.nifrel.jp/wm/>.

- [13] 学研ワールドアイ. <http://www.gakkensf.co.jp/worldeye/>.
- [14] デジタル地球儀 触れる地球. <http://www3.jvckenwood.com/t-earth80/jp/>.
- [15] B. J. Rogers and M. Graham. Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, Vol. 8, No. 2, pp. 125–134, 1979.
- [16] Nasa visible earth. <http://visibleearth.nasa.gov/>.

発表リスト

[1] 佐藤大夢，久保尋之，舩富卓哉，高柳亜紀，中村芳知，瀬口慎人，松岡均，向川康博，“非平面ディスプレイのための浮遊感表現に関する考察”，情報処理学会 CVIM, Jan. 2017.

[2] 佐藤大夢，久保尋之，舩富卓哉，高柳亜紀，中村芳知，瀬口慎人，松岡均，向川康博，“球体ディスプレイのための浮遊感表現に関する考察”，画像電子学会 映像表現・芸術科学フォーラム 2017, Mar. 2017.