

透明視錯視を活用したディスプレイとプロジェクタの複合環境における知覚的連続性の実現

福田 真也^{1,a)} 橋本 直己^{1,b)}

概要: ディスプレイとプロジェクタを組み合わせた複合環境では、光学特性や応答速度が異なるため、輝度・色の不一致や表示遅延による映像の不連続性が生じ、統合的な映像提示を阻害する課題がある。そこで本研究では、物理的なキャリブレーションに依存せず、人間の知覚特性を利用してこの不連続性を解消する手法を提案する。提案手法では、デバイス間にあえて物理的な隙間を設けることで透明視錯視とモーダル補完を誘発し、隙間で映像が連続していると知覚させることで、デバイス間の差異を隠蔽する。評価実験の結果、正二十面体のような複雑な幾何学形状や Bunny や Cat のような有機形状においては、提案手法が動きの連続性や一体感を有意に改善することが確認された。これは、形状の複雑さがモーダル補完を促進し、かつ隙間による分離が同時対比効果を緩和させ、色や輝度の差を知覚的に低減させたためと考えられる。一方で、立方体のような単純な形状では有意差が見られず、補完効果には形状依存性があることが示唆された。本研究は、技術的補正が困難な異種デバイス環境において、知覚的アプローチによる効果の有効性と、その効果が対象物体の形状に依存することを明らかにした。

1. はじめに

近年、デジタルサイネージや没入型メディアアート等 [1] の分野において、空間全体を活用した映像表現への需要が高まっている。これに応えるために、高精細で鮮やかなディスプレイと、投影サイズに制限のないプロジェクションマッピングを組み合わせた複合環境が注目されている。この構成は、ディスプレイが対象物体の質感や実在感を担い、プロジェクタが周辺環境の広がりや奥行きを担うことで、相互に補完し合い没入感を向上できる利点がある。特に、壁面と床面を用いた直交配置は、映像があたかも画面から現実空間へ飛び出すような表現を可能にするため、有効な構成である。

しかし、ディスプレイとプロジェクタは仕組みが異なるため、両者を違和感なく統合することには課題が存在する。その課題の一つとして、明るさと色の不一致が挙げられる。プロジェクタは環境光や投影面の明るさに依存するため、ディスプレイのような色を表現することが困難である。さらに、これらを技術で合わせようとするれば、プロジェクタに合わせ、ディスプレイの明るさやコントラストを合わせる必要があり、ディスプレイの高精細である利点を活かすことが困難となる。また、時間的な不連続性も課題として

挙げられる。デバイス間の応答速度や映像処理にかかる時間の違いは物体が境界を横切る瞬間に、表示位置のずれや動きのばらつきを生じさせる。これも技術的に一方のデバイスに合わせ、システム全体を遅らせることで、解消することが可能だが、インタラクティブ性が悪くなるという問題がある。すなわち、物理的な色や明るさや時間を厳密に合わせようとするアプローチには限界があり、新たな解決策が不可欠である。

そこで本研究は、この課題を従来の技術的アプローチではなく、人間の知覚特性を活用することで解決を試みる。ディスプレイとプロジェクタを組み合わせた環境において、あえて映像間に隙間を設けることによって、連続性を維持し、立体映像表現の実現を目指す。

2. 関連研究

2.1 空間映像提示における物理的な境界の課題と既存アプローチ

広視野かつ高解像度な空間的映像提示を実現する一般的な手法として、複数のディスプレイを連結させるマルチディスプレイ環境が挙げられる。しかし、マルチディスプレイ環境においてベゼルは、映像の連続性を物理的に分断し、ユーザの没入感を阻害する要因となる。この物理的な不連続性に対する解決策として、近年では LED パネルをタイリングする狭額縁ディスプレイや、ベゼルレスディスプ

¹ 電気通信大学 大学院情報理工学研究所

^{a)} fukuta@hashimoto.lab.uec.ac.jp

^{b)} naoki@hashimoto.lab.uec.ac.jp

レイが普及しており、縦じ目のない映像提示が可能となっている。また、光学的なアプローチとして、フレネルレンズを用いた光学的に映像を延伸し、既存のディスプレイのベゼルを視覚的に隠し、映像を連続的に提示する手法や製品 [2] も提案されている。これらのアプローチの中で井阪ら [3] は、直交に配置した2枚のディスプレイに対し、アナモルフォーシスを用いた幾何補正を施すことで、縦じ目を感じさせない裸眼立体映像システムを提案している。この研究は、物理的な境界が存在しても、適切な映像処理を行えば視覚的な連続性を提示可能であることを示している。

しかし、これらのハードウェア的・光学的なアプローチは、本研究が対象とする異種デバイス間や立体配置において以下の限界を有する。第一に、同種のディスプレイ同士を連結する場合とは異なり、ディスプレイとプロジェクタの間には、輝度・コントラスト・色域といった光学特性に根本的な不一致が存在する。第二に、レンズ等を用いた光学的解決策は、映像の幾何学的な歪みや解像度の低下を招くほか、特定の角度や同型デバイス間での使用を前提としており、異種デバイスが混在する環境への適用は困難である。以上のことから、物理的な境界が存在することを前提としつつ、人間の知覚特性を利用して連続性を補完するアプローチが必要になると考える。

2.2 ディスプレイとプロジェクタの複合環境とその特性

一方で、ディスプレイとプロジェクタの強みを組み合わせる試みは、解像度と表示サイズの両立を目指すアプローチとして発展してきた。まず、Baudischら [4] の Focus + Context Screens は高解像度な中心視野をディスプレイで、低解像度な周辺視野をプロジェクタで提示することで、人間の視覚特性に適合した広視野環境を構築した。この手法は、異なる解像度の映像を統合することの有用性を示したが、デバイス間の画質の差は許容されたままであった。

また、エンターテインメントやインタラクションの分野では、Jonesら [5] の IllumiRoom が、テレビ周辺の壁面や床面に映像を拡張投影することで、没入感を高める手法を提案した。Kaneら [6] の Bonfire は、ノートパソコン周辺の卓上を入出力空間として活用するシステムを実現した。これらの研究は、異種デバイス間の連携が空間表現の拡張に有効であることを示したが、依然としてデバイス間の物理的な境界における映像の不連続性は解決すべき課題として残されている。

そして、従来不連続性を解消するために、幾何補正やカラーマッチング等の技術的な補正が試みられてきた。しかし、Bimberら [7] が指摘するように、ディスプレイとプロジェクタでは光学モデルが根本的に異なる。特にブラックレベルに関しては、ディスプレイが発光を遮断できるのに対して、プロジェクタは投影面の反射や環境光の影響を避けられないため、物理的な完全一致は困難とされている。

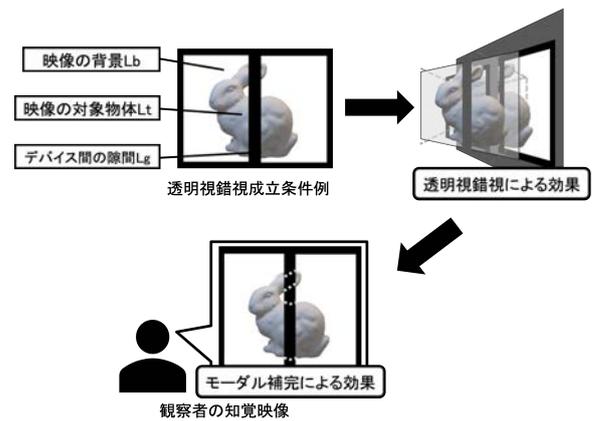


図 1 透明視錯視による欠損補完が生じる輝度条件と原理

2.3 視覚的な補完と錯視を利用した映像提示

複合環境の限界に対して、BrickDisplay[8] は、複数個の汎用ディスプレイを分散配置した環境において、知覚的な補完機能を活用した手法を提案した。この手法では、ディスプレイの枠や隙間によって生じる映像の欠損に対し、映像の輝度を適切に制御することで、透明視錯視を誘発し、物理的な隙間があたかも透明な層（遮蔽物）であるかのように知覚させられることを示した。具体的には、映像の補完効果は、図1のように映像内の背景の明るさ（Lb）、対象物体の明るさ（Lt）、およびデバイス間の隙間の明るさ（Lg）の関係において、 $Lb > Lt > Lg$ または $Lg > Lt > Lb$ を満たす場合に成立すると定式化されている。そして、この条件下で、透明視錯視とモーダル補完が誘発されることで、物理的な隙間や映像の欠損部分があたかも透明な層よりも手前に繋がっているように知覚される。これにより分散配置されたディスプレイ群を連続的に見える一つの巨大な空中像の提示を可能とした。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

本研究では、液晶ディスプレイとプロジェクタを組み合わせた映像提示環境を対象とする。これらの特性の異なるデバイス間に生じる、従来の技術的補正では解決困難な不連続性（色・輝度・遅延の差異）に対し、透明視錯視による知覚的補完を応用することで解消し、物理的な枠を超えたシームレスな立体表現を実現することを目的とする。具体的には、図2のように物理的な接続の厳密さに依存せず、あえて異種デバイス間に物理的な隙間を設ける。これにより、映像間に隙間やデバイス間の差異を残しながらも、知覚的に連続した一体感のある映像提示を実現する、あえて連続させずに繋げるアプローチを採る。

3.2 透明視錯視を用いた異種デバイス間の知覚的統合

本研究の独自性は、透明視錯視による映像補完の知覚的原理を、ディスプレイとプロジェクタという光学特性の異

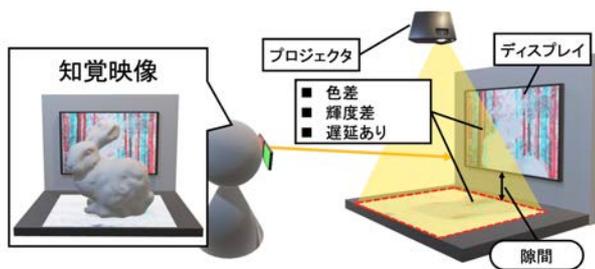


図 2 提案手法

なる複合環境へ適用し、異種デバイス間のシームレスな結合を実現する点にある。具体的には、異種デバイスの境界に物理的な隙間を設け、2.3 節の輝度条件を適用する。この隙間の導入は、本研究において以下の 2 つの役割を果たす。まず、隙間を設けることで光学特性の異なるデバイス同士を空間的に分離する。これにより、画像を密着させた場合に生じる輝度差や色差、応答速度のずれによる直接的な対比が物理的な距離によって緩和され、異種デバイス特有の輝度、色、時間的な不一致が知覚的にマスクされる。その上で、この分離された領域に対し、本研究では新たな仮説として輝度差、色差や遅延を含む異種デバイス間においても、2.3 節の輝度条件を満たすことで透明視錯視を誘発させる。そして、物理的な隙間が手前にある透明な層として解釈されることで、その背後にある映像の不一致は、光学特性や奥行きの特徴として脳内で許容され、結果としてモーダル補完によるシームレスな接続が維持されると考える。

3.3 透明視錯視による欠損補完を誘発するための隙間幅の設定

本提案手法において、ディスプレイとプロジェクタの間に設ける物理的な隙間の幅は、透明視錯視による欠損補完を成立させる上で、重要なパラメータとなる。この隙間幅を決定する上では、物理的要因と知覚的要因の双方を考慮する必要がある。物理的には、ディスプレイやプロジェクタの映像がデバイスの物理的な枠（以下、ベゼル）に照射され、その反射が視覚的なノイズとなることを避ける十分な広さが必要である。一方で知覚的には、観察者の脳内で隙間の手前に透明な遮蔽物が存在し、その奥で映像が連続しているというモーダル補完が強力に作用する視角範囲内に収める必要がある。Kanizsa ら [9] による主観的輪郭や知覚的補完に関する研究をはじめ、視覚心理学の分野では、補完現象が成立するための空間的な距離（視角）には限界が存在することが示唆されている。一般に、欠損領域の視角が大きすぎる場合、脳による補完作用が弱まって知覚される傾向にある。

これら知見に基づき、本研究では最適な隙間幅を決定するための予備的な検証を行った。検証環境として、異種デバイス間の色や解像度の差異による影響を排除するため、

同一型番の液晶ディスプレイを 2 台使用した。また、輝度条件については 2.3 節で述べた調整手法を適用し、均一な表示環境を構築した上で、ディスプレイ間の物理的な隙間幅を 20mm から 150mm まで段階的に変化させた。想定視距離は 1000mm とした。検証の結果、以下の傾向が得られた。まず、隙間が狭い場合（目安：～40mm）は、透明視錯視による欠損補完を確認することができるが、ディスプレイ表面への映像の反射が強く視認され、映像体験を著しく阻害することが確認された。次に隙間が広い場合（目安：80mm～）は、透明視錯視自体は知覚されるものの、補完される映像の強度が薄く感じられる傾向が見られた。また、映像が隙間の背後にあるように知覚されやすく、結果として手前の空間への飛び出し感や没入感が低下することが確認された。

以上の結果より、ベゼルによる反射干渉を回避しつつ、補完強度が十分に維持され、かつ没入感が得られる条件として、本実験では隙間幅を 60mm に設定した。なお、視距離 1m における隙間 60mm の視角は約 3.4° となり、これは先行研究 [10] により推奨される視角範囲（2 度～4 度）と合致する値である。

4. 評価実験

本節では、提案手法の有効性を検証するために実施した評価実験について述べる。本提案手法の最終的なデバイス配置は、図 2 に示したような直交型の複合環境であるが、本実験ではその基礎的な検証段階として、ディスプレイとプロジェクタを同一平面上に配置する構成にした。そして異種デバイス間の不連続性（色・輝度・遅延の差異）に対する提案手法の補償効果を検証した。

4.1 実験概要

ディスプレイとプロジェクタを組み合わせた複合環境において、提案手法がデバイス間の描画遅延や輝度・色の不一致といった不連続性を知覚的に軽減することができるかを検証した。本実験には、12 名（男性 8 名、女性 4 名、年齢範囲：22 歳～25 歳）が参加した。なお、被験者は正常な視力、または矯正視力を有している。

4.2 実験環境

本実験におけるハードウェア構成について述べる。映像提示デバイスとして、ディスプレイには LG 23MP67VQ-P およびプロジェクタには QUMI Q8-BK を使用した。両デバイスの映像出力仕様は、1920 × 1080 の解像度および 60fps のリフレッシュレートを有していた。構築した実験環境は図 3 に示す。さらに、本実験の環境は 4.3 節の比較条件に対応するため、ディスプレイ単体での映像提示や、ディスプレイとプロジェクタを物理的に接触させた配置など、映像提示環境を変更可能な構成とした。

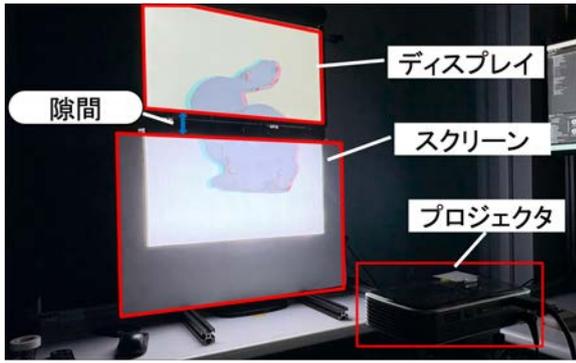


図 3 提案手法の有効性を検証するための実験環境 (平面配置)

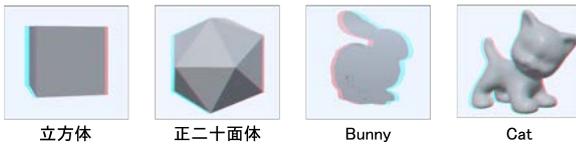


図 4 提示映像オブジェクト

表 1 本実験における提示条件の構成と不連続性

	デバイス構成	配置	不連続性
Ideal	同種	隙間なし	なし
Conv1	同種	隙間 6cm あり	なし
Conv2	異種	隙間なし	あり
Conv3	異種	隙間なし	補正あり
Prop	異種	隙間 6cm あり	あり

4.3 実験条件

本実験では、提案手法の有効性を示すために、デバイスの構成、配置、不連続の有無および隙間の有無に基づく 5 つの条件の提示方法を設定し、実際の提示映像が図 5 (a) の通りになる。まず、評価の基準として、図 5 のように単一プロジェクタを用いてデバイス間の不連続性を排除した理想条件 (Ideal) を設定した。次に比較対象として、図 5 のような先行研究と同様に 2 枚のディスプレイの境界に隙間 (6cm) を設けた従来手法 1 (Conv1) や図 5 のような異種デバイス間の不連続性 (輝度差、色差、遅延) を残しつつ、物理的に接触して配置した従来手法 2 (Conv2) を設定した。さらに、図 5 のような異種デバイス間の不連続性 (輝度差、色差、遅延) を可能な限り消去し、物理的に接触して配置した従来手法 3 (Conv3) を設定した。これに対して、図 5 のような異種デバイスの境界に物理的な隙間 (6cm) を設けて配置した提案手法 (Prop) を設定した。なお、各条件の輝度差、色差、遅延の有無に関しては表 1 に示す。また、提示映像には図 4 のように形状による補完効果の違いを確認するために、幾何学形状として立方体と正二十面体、有機形状として Bunny と Cat の 4 種類を用いた。

4.4 評価項目

各条件の映像を観察後、以下の 5 項目について 7 段階の

リッカート尺度 (1: 全くそう思わない~7: 非常にそう思う) で回答を求めた。

Q1: 映像全体はどれくらい連続して見えますか?

Q2: 映像全体のつながりに自然さを感じますか?

Q3: 表示されている対象物体の色は、全体として均一であると感じますか?

Q4: 表示されている対象物体の明るさは、全体として均一であると感じますか?

Q5: 表示されている対象物体の動きは、全体として滑らかに繋がっていると感じますか?

4.5 結果

まず、各評価項目に対する回答の中央値を用いて、Friedman 検定の後、Holm の多重比較を行った。本節では、対象オブジェクトを Bunny や Cat の有機形状と立方体や正二十面体の幾何学形状の 2 つに分類し、提案手法の有効性を検証する。

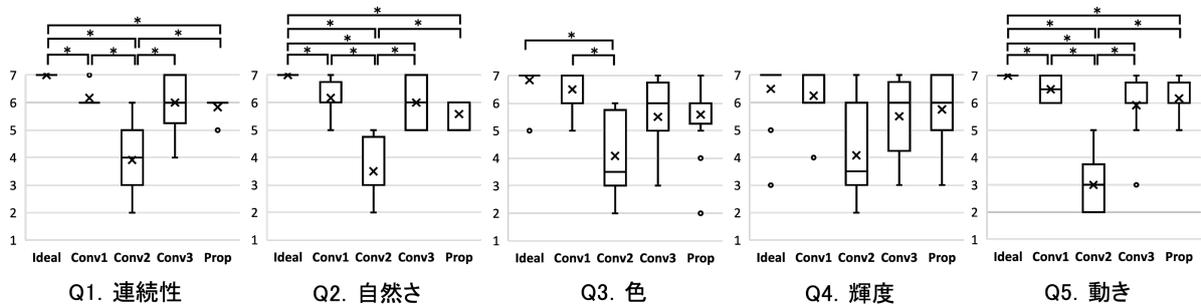
有機形状である Bunny に関する結果を図 5 (b) に示す。図 5 (b) に示す通り、Bunny および Cat において、映像の連続性 (Q1)・自然さ (Q2)・動き (Q5) といった評価項目において、提案手法は不連続が残る従来手法 2 よりも有意に高い評価値を示す (Bunny Q1: $p = 0.022$, Cat Q2: $p = 0.029$)。一方で、色 (Q3) や輝度 (Q4) といった品質に関しては、提案手法は従来手法 2 より高い中央値を示し、改善の傾向 ($p < 0.1$) は見られたものの、有意な差を確認することはできなかった。これは有機形状において、提案手法は映像の遅延や動きといった動的な違和感の軽減には大きく寄与するが、画質の向上効果は限定的であることを示している。

次に、立方体に関する結果を図 5 (c) に示す。幾何学形状において、オブジェクトの面の数や構成といった形状の複雑さによって結果が大きく異なる傾向が見られた。複雑な多面体である正二十面体においては、Q1 から Q5 の全ての評価項目において、提案手法は従来手法 2 よりも有意に高い評価を得た ($p < 0.05$)。有機形状では有意差が出なかった色や輝度の項目でも改善が確認された。対照的に、単純な立方体においては、全ての評価項目において提案手法と従来手法 2 の間に有意差を確認することはできなかった。これは、単純な平面で構成される幾何学形状においては、補正処理による映像の遅延が目立ちやすく、遅延補償の効果が軽減されたためと考えられる。

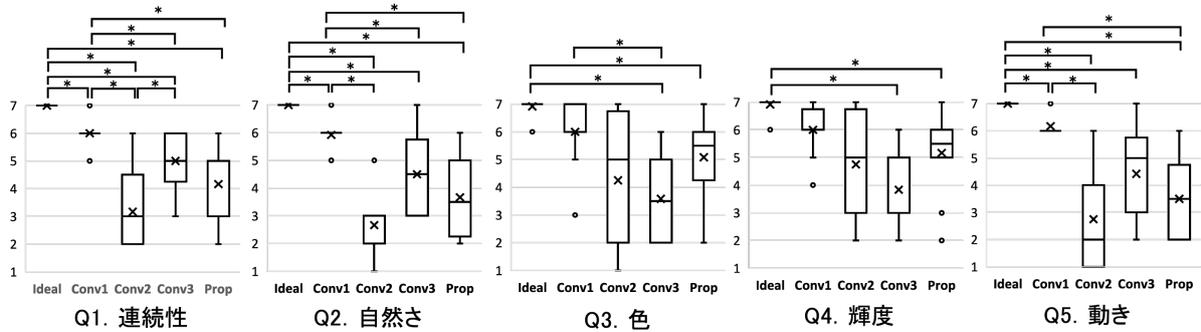
理想提示と提案手法を比較すると、Cat の動き (Q5) や正二十面体の色 (Q3) など一部の項目において、有意差を確認することができなかった。しかし、多くの条件におい



(a) 各提示条件における実際の提示映像



(b) Bunnyの結果



(c) 立方体の結果

図5 (a) 各提示条件における実際の提示映像 (b) Bunny の評価結果 (c) 立方体の評価結果
*は有意差があること ($p < 0.05$), ○は外れ値を表す。

て理想提示は提案手法よりも有意に高かった。これより、提案手法によって遅延による映像の不連続性は軽減されたものの、理想提示のように色差、輝度差、遅延といった不連続がない状態には至っていないと考える。

4.6 考察

4.6.1 形状の複雑さとモーダル補完

結果より、提案手法の効果はオブジェクトの形状に依存することが示唆された。Bunny や Cat のように有機形状、および正二十面体のような多面体においては、提案手法が有意な改善を示した。特に映像の連続性や動きの補償に関しては、対象物体の表面に多くの辺が存在することで、補償の処理によって生じるわずかな映像のずれや色差、輝度差が、視覚的に目立ちにくくなる効果が働いたためと考えられる。これは、オブジェクトに凹凸や辺が多数存在することで、提示映像に生じる輝度差・色差・遅延が、視覚的に目立ちにくくなったためと考える。

正二十面体や有機形状 (Bunny, Cat) において高い評価が得られ、立方体では有意差が出なかった主な要因は、モーダル補完の働きやすさと、形状による位置ズレ検知感度の違いにあると考えられる。正二十面体のような多面体や Bunny のような滑らかな曲面を持つ物体では、脳が隙間の背後にある形状を容易に予測・補完できるため、物理的な隙間があっても情報の欠損として知覚されにくい。特に正二十面体は形状が複雑であるため、補完処理において局所的な情報の欠落が全体形状の認識に影響を与えにくく、これが全項目での有意な改善 ($p < 0.05$) に寄与したと考えられる。

これに対し、立方体のような単純な直線的輪郭を持つ物体の場合、隙間によって直線が分断されることが、補完された「隠れた線」としてではなく、単なる「線の途切れ」として知覚されやすい。さらに、単純な幾何学形状は視覚的な冗長性が低いため、遅延によるわずかな位置ずれや歪みが、複雑な形状よりも顕著に知覚される。実際、立方体

の結果が理想条件と比較して有意に低かったことは、単純形状においては遅延隠蔽によるメリットよりも、形状の不連続性やズレによるデメリットが上回り、補完が十分に機能しなかったことを示唆している。

4.6.2 隙間による対比効果の緩和

色 (Q3) および明るさ (Q4) の結果において、正二十面体では有意な改善が見られ、有機形状では改善傾向 ($p < 0.1$) が確認された。この違和感の軽減には、隙間による同時対比の抑制効果が関与していると考えられる。

人間には、輝度や色が異なる領域が空間的に隣接していると、その境界部分の差異を強調して知覚する特性がある。従来手法のように画面を密着させると、この効果によりわずかな色のズレや明るさの違いが強調され、境界線として強く意識されてしまう。一方で、提案手法のように隙間を設けて画面を空間的に分離することで、直接的な比較が困難となり、対比効果が物理的に緩和されたと考えられる。さらに、脳が隙間の裏側を一つの物体として統合する際、前後の色の違いをディスプレイの個体差としてではなく、照明環境や陰影による自然な変化として解釈する働きが生じる。特に正二十面体において色や明るさでも有意な改善が見られたのは、多面体という形状特性上、面ごとに光の反射特性が異なることが視覚的に自然であり、隙間をまたぐ色の変化が面の違いによる陰影として受容されやすかったためと推察される。有機形状においても同様の傾向が見られたが、滑らかな曲面では急激な色の変化に対する許容度が多面体ほど高くなく、その結果として統計的な有意差には至らず傾向 ($p < 0.1$) に留まったと考えられる。

5. まとめ

本研究は、異種デバイス間の色・輝度・遅延の不一致を、物理的な隙間による知覚的補完を用いて隠蔽する手法を提案し、その有効性を検証した。そして実験の結果、本手法の有効性は対象物体の形状特性に強く依存することが示された。有機形状や複雑な多面体においては、物理的な隙間が隣接領域の輝度・色差を強調する同時対比を緩和させるとともに、脳によるモーダル補完を効果的に誘発することで、デバイス間の不整合や遅延による違和感を有意に低減させた。一方で、立方体のように単純な幾何学形状では、こうした知覚的補完の利点よりも、直線的な輪郭の分断や遅延による位置ズレが顕著に知覚される影響が上回り、十分な改善効果が得られなかった。

また、色や遅延を光学的に補正した条件と提案手法の間には、対象物体の形状に関わらず、統計的な有意差が認められなかった。このことから平面配置においては、提案手法がキャリブレーションを用いた補正手法の代替、または優位性を示すには至らなかったといえる。

しかし、本手法が想定している立体的な配置においては、平面配置とは異なる傾向が期待される。立体配置では、面

と面が交差する構造的な繋ぎ目として解釈されるため、情報の欠損に対する許容度が平面よりも高まり、モーダル補完がより作用する可能性があると考ええる。

今後は、ディスプレイとプロジェクタの複合環境においてデバイスを立体的に配置した場合における提案手法の有効性を検証し、立体配置することによってより飛び出す映像体験の実現を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP25K03165 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] teamLab. teamLab Planets TOKYO DMM. <https://www.teamlab.art/jp/e/tokyo/> (参照 2026-01-15).
- [2] ASUS. ROG Bezel-free Kit ABF01. <https://rog.asus.com/jp/monitors/accessories/rog-bezel-free-kit-abf01-model/> (参照 2026-01-15).
- [3] 井阪 建, 藤代 一成. L字型表示面を用いた錯視による裸眼立体映像生成. 映像情報メディア学会誌, vol. 70, no. 6, pp. J142–J145, 2016.
- [4] P. Baudisch, N. Good, and P. Stewart. Focus plus context screens: combining display technology with visualization techniques. *Proc. UIST '01*, pp. 31–40, ACM, 2001.
- [5] B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek, and A. D. Wilson. IllumiRoom: peripheral projected illusions for interactive experiences. *Proc. CHI '13*, pp. 869–878, ACM, 2013.
- [6] S. K. Kane, D. Avrahami, and J. O. Wobbrock. Bonfire: a nomadic system for hybrid laptop-tabletop interaction. *Proc. UIST '09*, pp. 129–138, ACM, 2009.
- [7] O. Bimber and R. Raskar. *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters/CRC Press, Wellesley, MA, 2005.
- [8] Y. Mikawa and T. Fukiage. BrickDisplay: Large, Protruding 3D Image Presentation From Multiple Non-Aligned Monitors With Perceptual Transparency. *Proc. SIGGRAPH Asia Emerging Technologies '25*, Art. no. 3, pp. 1–2, ACM, 2025.
- [9] G. Kanizsa. *Organization in Vision: Essays on Gestalt Perception*. Praeger, New York, 1979.
- [10] T. F. Shipley and P. J. Kellman. Perception of partly occluded objects and illusory figures: evidence for an identity hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 18, no. 1, pp. 106–120, 1992.