

視覚の知覚メカニズムを積極的に活用したモジュール分散協調型裸眼 3D システムの開発

代表研究者
共同研究者

高田 英明
中尾 勇

長崎大学 情報データ科学部 教授
長崎大学 情報データ科学部 客員研究員

1 はじめに

5G ネットワークの普及に伴い、高速かつ低遅延のデータ通信が広く利用可能となり、さまざまな視覚体験が可能になった。メガネ不要の裸眼 3D ディスプレイは、専用のメガネを必要とせずに、奥行きや距離を直感的に認識することを可能にする。これらのディスプレイはインタラクティブで没入感のある視覚体験に適しており、さまざまな分野での応用が期待される。

これまでに、再帰反射と微小拡散を利用した 360 度裸眼 3D ディスプレイが提案されている[1]。再帰反射シートとリニアブレンディングを組み合わせることで、コンパクトかつ高品質な 3D 表示の実現可能性を示している。リニアブレンディングとは、隣接する視差画像間の輝度の重なりに基づく視覚メカニズムを指し[2]、このメカニズムにより、観察位置が変化しても連続的でスムーズな運動視差が可能となる。

2 提案システム

従来の 360 度裸眼 3D ディスプレイでは、多数のプロジェクタと広大な設置スペースが必要となる。システムが複雑になるだけでなく、コストも大幅に増加する。本方式では再帰性反射を用いることから、各投影モジュールからの映像を観察者が直接視認できる範囲は限られるという特徴がある。

3D ディスプレイの適用先を考えると、多くの場合で観察者は 360 度全てを同時に観察することはなく、観察者の周囲だけに 3D 映像が投影されるだけで良いことに気づく。再帰性反射の特徴を活かし、観察者ごとに投影モジュールを個々に配置して、観察者の周辺のみからだけ 3D 映像が観察できる構成とすることで、設置スペース、システムコスト、携帯性の全てにおいて有利になると考える。

本稿では、図 1 に示すような、シンプルで高品質、かつ個人用の新たな裸眼 3D ディスプレイシステムを提案する。



図 1 裸眼 3D ディスプレイシステムのコンセプト

本システムを実現するには、以下の3つの技術的課題を解決する必要がある。

1. プロジェクタを天井方向ではなく机の上に直接設置することによる光学特性の大幅な変化
2. 携帯性を考慮したデスクトップタイプの構成に対応した投影モジュールの設計と構築
3. 複数ユーザによる観察に向けた投影モジュール間の同期通信

本研究では、光学特性とモジュール設計に関連する最初の2つの課題に焦点を当て、検討を進めた。

3 光学特性

3-1 投影環境

投影用プロジェクタの高さが、知覚される3D映像の奥行きや輝度に及ぼす影響を検証するため、プロジェクタの垂直方向の投影位置を変化させる実験を行った。実験レイアウトの概要を図2に示す。この構成は、先行研究で採用された手法に基づき配置を決定している。

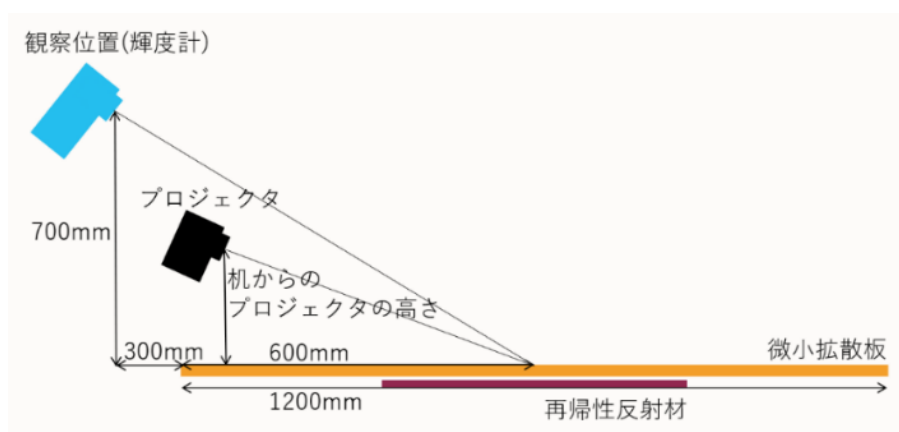


図2 実験レイアウトの概要

本システムでは、単一の物体の異なる視点に対応する5つの視差画像を生成し、各画像を専用のプロジェクタで投影した。各プロジェクタの表示映像は、リアルタイム3D開発プラットフォームである「Unity」を用いて生成・レンダリングされ、各プロジェクタは専用のPCによって制御された。5つの視差画像は、5台の小型プロジェクタ（FUNLOGY X-03）を用いて、机上に設置した再帰性と微小拡散の特性を備えたスクリーン上に重ね合わせて表示した。

図3および図4は、プロジェクタの投影高を変えた場合に観察される映像を比較したものである。



図3 プロジェクタ高が高い場合の映像



図4 プロジェクタ高が低い場合の映像

位置が高い場合、連続的な運動視差が観察された。例えば、球形の顔の形状、前方に突き出た鼻、顔の後ろにあるリボンといった顔の特徴が視覚的に区別でき、正しい奥行きも確認できる。位置が低い場合、中心部と側部の間で輝度に大きなばらつきが見られた。また、画像は歪んで見え、重なりが減少するとともに、物体が二重に知覚され、奥行きが低下した。これは、プロジェクタの位置を下げると、反射光が戻る位置も低くなるためである。その結果、観察位置に到達する光の分布が著しく変化してしまう。

3-2 輝度分配

提案システムの光学特性を定量的に評価するため、観察位置における水平方向の輝度分布を測定した。Unity を用いて白い正方形の画像を生成し、スクリーンに投影した。輝度計を用いて観察位置の輝度を測定し、画像の中心において視角 1 度の円形領域内の平均輝度を計測した。

周囲光の影響を排除するため、すべての測定は暗室で行った。各測定点において、輝度を 5 回測定し、その平均値を当該位置の輝度とした。

図 5 に示すように、中心から ± 225 mm の範囲を 25 の異なる間隔で水平方向に測定することで、隣接するプロジェクタ間の輝度分布を詳細に評価した。

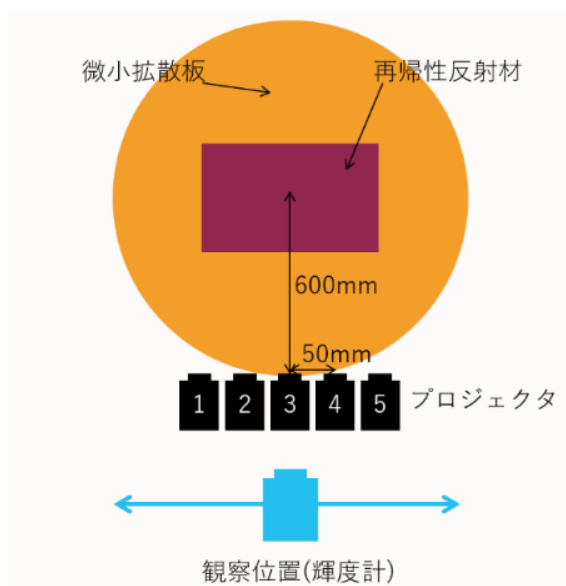


図 5 輝度分布の測定

図 6 は、測定された水平方向の輝度分布を示している。隣接するプロジェクタに対応する位置で輝度の低下が観察された。

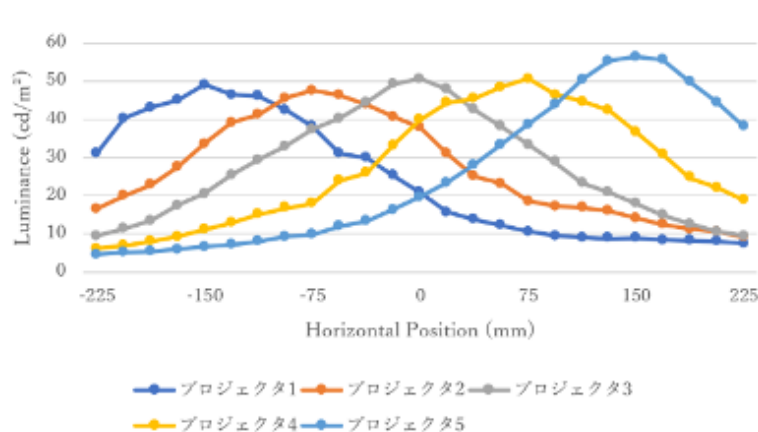


図 6 各プロジェクタの水平方向の輝度分布

プロジェクタ 3 の中心における垂直方向の輝度分布（図 7）は、400 mm から 300 mm の間で急激に低下し、300 mm 以下では徐々に低下した。200 mm 以下の高さでは、輝度はほぼ一定であった。

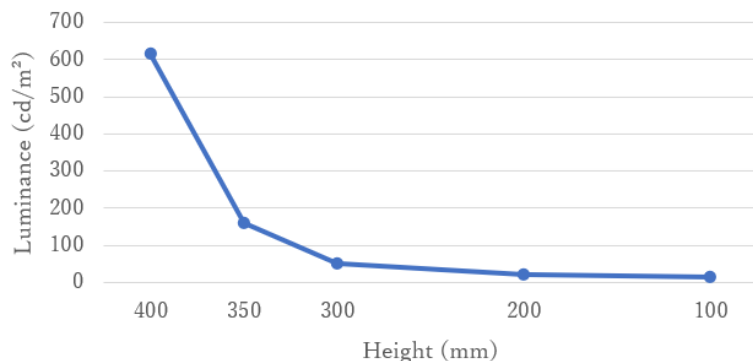


図 7 プロジェクタの垂直位置（高さ）による輝度変化

これらの結果は、デスクトップ配置において十分な輝度を確保するには、プロジェクタの光量を増加させるか、光学構成を改善する必要があることを示唆している。

3-3 微小拡散の効果

微小拡散が輝度の均一性および反射特性に及ぼす影響を評価した。プロジェクタ 3 の輝度分布を、拡散板装着時と非装着時の両方で測定し、同一の実験条件下で得られた投影品質を比較した。図 8 および図 9 は、測定された輝度分布を示しており、図 10 および図 11 は比較のための投影画像の写真である。

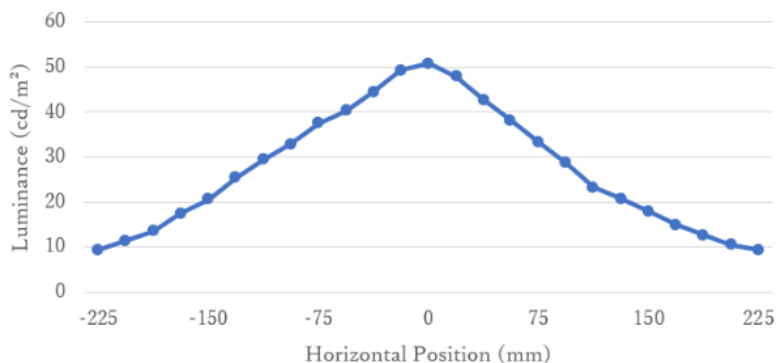


図 8 水平方向の輝度分布（拡散板あり）

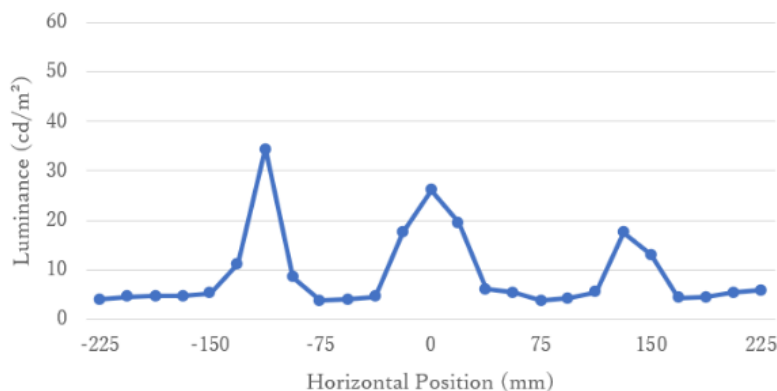


図 9 水平方向の輝度分布（拡散板なし）

拡散板を使用しない場合、全体的な輝度は低く、輝度分布に複数のピークが現れ、光強度の不均一性が確認された。拡散板を使用すると、顕著なピークがなく、より均一な輝度分布が得られた。

図 11 に示すように、拡散板を使用しなかった場合、スクリーン上に迷光や輝度の不均一性が観察された。明るい縦縞が現れ、観察位置の変化に伴いその位置も変化した。この現象は、スクリーン上の 1 点に集中した再帰反射および表面反射によって引き起こされたものと考えられる。輝度測定中、これらの明るい領域が測定領域と重なったため、輝度分布に複数のピークが生じたと考えられる。



図 10 投影画像（拡散板あり）

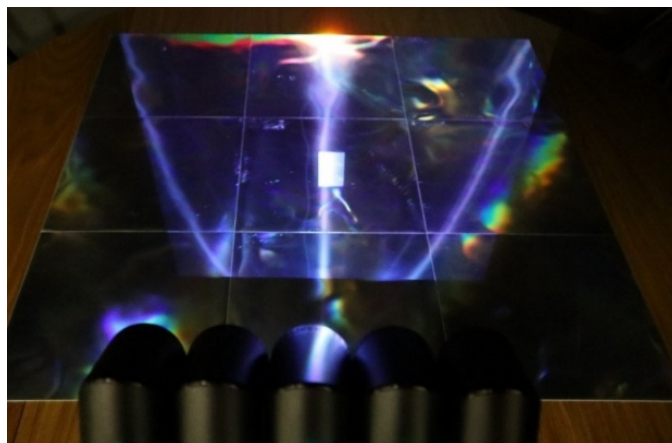


図 11 投影画像（拡散板なし）

4 プロトタイプ構築

4-1 プロトタイプの仕様

前章で述べた光学評価に基づき、拡散板およびプロジェクタの高さの仕様を決定した。拡散板は、均一な再帰反射を実現し、迷光を抑制するために不可欠である。

最適な高さ範囲を定義するため、民生用ディスプレイの仕様を参考にし、理想的な表示輝度である約 250 cd/m^2 を基準値として採用した[3]。また、小型なモバイルプロジェクタ（SONY LSPX-P1）の輝度についても測定し、一般的に用いられる表示装置に必要な輝度は少なくとも 120 cd/m^2 以上であると想定した。

また、図 7 から、250 cd/m^2 は 360 mm の高さ、120 cd/m^2 は 330 mm の高さに相当することも分かり、映像を投影する高さの範囲を 330～360 mm と定めた。

しかし、この構成では、輝度要件を満たすために高めの台の上にプロジェクタを設置するような構成になることが前提となる。システムを机の上に直接設置した場合、同じ光学特性を維持しつつ十分な輝度を確保

することは困難となる。本結果から、今後、さらなるシステム改良の必要性があることが示唆された。

4-2 投影システム

従来の構成では、小型なモバイルプロジェクタ（FUNLOGY X-03）が使用されていた。しかし、その表示輝度はデスクトップでの投影には不十分な明るさであることが今回の検証で明らかになっている。プロトタイプ構築に向けては、今回、同じモバイルプロジェクタの中でも比較的投影輝度の高い超短焦点プロジェクタ（BLUEWIDE BM-USP02）を用いることとした。

例えば光源高 100 mm において、従来のプロジェクタ（FUNLOGY X-03）では約 13 cd/m^2 の低い輝度しか得られなかったのに対し、超短焦点プロジェクタ（BLUEWIDE BM-USP02）は約 30 cd/m^2 を達成した。これらの結果から、導入したプロジェクタはデスクトップ構成に適した、より高い輝度を実現していることがわかる。

しかし、超短焦点プロジェクタの導入により、隣接するプロジェクタユニット間の間隔が 50 mm から 70 mm に拡大し、視差角も同様に大きく広がる問題も生じる結果となった。

従来の構成では、プロジェクタと観察位置との間の視差角は約 7 度であり、この幾何的条件に合わせて、Unity で映像の視差が設定された。この構成下では、観察位置の変化に伴い、隣接する画像が連続的に変化し、複数の視点において、連続した奥行きを持つ単一の物体として知覚された。

今回、プロジェクタをデスクトップ上に直接設置した場合、プロジェクタの高さが低くなり、視差角は約 25 度に大幅に拡大してしまう。この拡大した視差角に合わせて視差画像が生成され、それに応じた視差画像が投影されるが、視差が大きくなったため、隣接する画像間の連続性が不十分となり、連続した奥行きの表現を維持することが困難となった。

デスクトップ配置で観察された画像の不連続な遷移の原因を明らかにするため、隣接するプロジェクタの輝度分布を分析した。リニアブレンディングが効果的に機能するためには、隣接するプロジェクタの輝度分布が十分に重なり合う必要があり、理想的には、それぞれの最大輝度値の約半分の位置で交差することが望ましい。

測定された輝度分布から、この条件に対応する交差位置を検証した。プロジェクタの高さを約 180 mm に設定することで、隣接する投影画像間の十分な重なりが得られることが示された。この考えに基づき、プロジェクタの高さを再調整することで、隣接する視点間の連続性を向上させられると仮定した。

4-3 投影高の評価

前節の仮定を検証するため、プロジェクタの高さを 100 mm と 180 mm に設定して、光学性能を比較する実験を行った。図 12 に示すように、100 mm では輝度が交差する位置は約 30 cd/m^2 （最大値の 19%）であった。

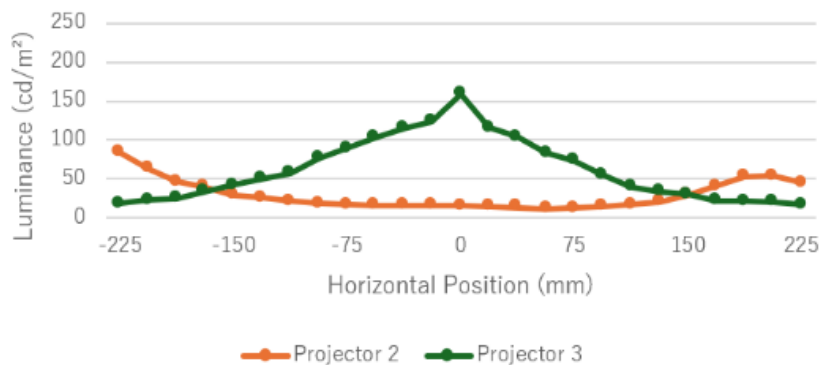


図 12 輝度分布（100mm：プロジェクタ 2・3）

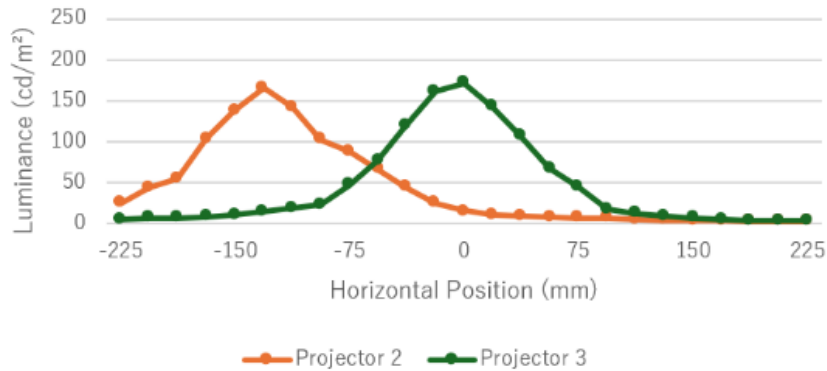


図 13 輝度分布（180mm：プロジェクタ 2・3）

この条件下では、隣接する輝度分布間の重なりが不十分であった。180 mm では、図 13 に示すように、輝度が交差する位置は約 71 cd/m²（最大値の 41 %）に増加した。この構成では、隣接する輝度分布間の十分な重なりが得られ、視点を移動させても映像の遷移が滑らかになった。

これらの結果は、プロジェクタの高さを最適化することで、隣接する視差画像間の連続性が大幅に向上するという仮説を裏付けるものである。

4-4 投影モジュール

プロジェクタの高さを 180 mm に設定することで、視点を移動しても滑らかに遷移し、自然な奥行きが知覚できる 3D 映像表示が実現された。

しかし、これらの再現性を保つためには、機器類の微小なズレの影響が大きく、設置レイアウトを常に一定に正確に保つ必要がある。そこで、プロジェクタを正確に配置できるよう設計された専用のモジュール式スタンドを製作した（図 14）。



図 14 投影モジュール

本モジュールを使用することで、より滑らかな遷移と連続した奥行き知覚が一貫して維持され、提案した投影モジュールの有効性が実証された。

5 同期システム

マルチプロジェクタ構成におけるシステム操作を簡素化するため、デバイス間の同期フレームワークについて検討を行った。具体的には、複数のデバイスが同時に起動、停止でき、インタラクティブコンテンツがリアルタイムにレンダリングされるかを検証する。

これまでの実験で用いた構成では、各プロジェクタの表示コンテンツは Unity を使用して生成・レンダリ

ングされ、各プロジェクトは個別のミニ PC によって個別に独立して駆動されていた。この構成では、個別の Unity プロジェクトが各デバイス上で独立して作成・管理され、コンテンツに変更を加える際には、すべてのデバイスで同一の編集作業を行う必要があり、運用上の負担がかなり大きくなっていた。特にこの構成では静止画像の表示における輝度測定などの実験には十分であったが、インタラクティブコンテンツの管理を極めて困難なものにしていた。

そこで、ここでは新たに同期システムを提案し、インタラクティブコンテンツがリアルタイムに同期してレンダリングされ表示する構成を実現する。同期は、Mirror ネットワークライブラリを使用した。本ライブラリは、Unity ベースのアプリケーションにおけるリアルタイム同期に適したホスト・クライアント型ネットワークフレームワークを提供するものである。システムはホスト・クライアントアーキテクチャで構成され、1 台の PC がホストとして機能し、複数のミニ PC がクライアントとして機能した。すべてのデバイスは同一のローカルエリアネットワーク内に接続する。各クライアントは、ホストから同期された状態の更新情報をリアルタイムで受信する。

同期性能を検証するため、すべてのデバイス上で単純な回転する立方体のアニメーションを表示した。実行および動作はホストによって制御する。図 15 に示すように、すべてのクライアントデバイス上で同じアニメーションが同時にレンダリングされ、5 台のクライアント全体で動作が同期していることが視覚的に確認できる。アニメーションの再生中、クライアント間で目立った遅延や非同期は観察されなかった。

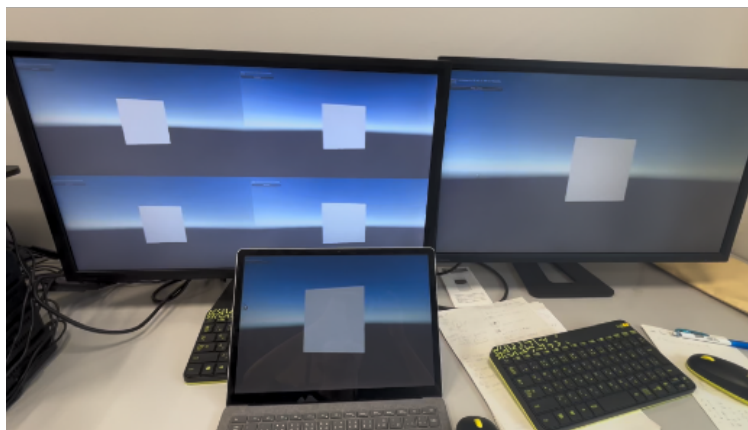


図 15 マルチプロジェクト同期システム

マルチプロジェクト表示システムにおいて、デバイス間の正確な時間同期は極めて重要である。適切な同期が行われない場合、プロジェクト間のわずかなタイミングのずれであっても、映像の動きの不連続を引き起こす。特にこの問題は、観察者の観察位置が動いた場合に顕著であり、3D 映像の視差の連続性や全体的な映像品質を著しく低下させることになる。

本研究における結果は、提案した同期手法が、マルチプロジェクト環境において安定かつ協調的な動作を可能にすることを示した。本手法は、映像編集の効率やシステムの使いやすさを大幅に向上させ、裸眼 3D ディスプレイシステムの実用化に向けた大きな進歩であると考えている。

5 まとめ

本研究では、デスクトップ用途向けのパーソナル裸眼 3D ディスプレイシステムを提案し、その光学特性とシステム化について検討した。最適な光学構成を決定するため、再帰反射および微小拡散の光学特性を定量的に分析し、試行錯誤を繰り返しながらではあるが設計仕様の策定に至った。システムの同期処理は Unity で実装した。これにより、ホストデバイスとクライアントデバイス間の一貫した同期動作が可能となり、インタラクティブコンテンツの管理および動作が大幅に改善された。これらの成果は、パーソナル裸眼 3D ディスプレイの今後の実用化に向けた重要な基盤となるものである。

今後、各視差映像の位置合わせの精度向上、マルチモジュール間の同期の最適化、およびマルチユーザ環境へのシステム拡張に焦点を当てる予定である。

【参考文献】

- [1] M. Makiguchi, D. Sakamoto, H. Takada, K. Honda and T. Ono, “Interactive 360-Degree Glasses-Free Tabletop 3D Display,” UIST2019 Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 625-637, Oct. 2019.
- [2] S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira and S. Sakai, “Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths,” Vision Research, Vol. 44, pp. 785-793, Apr. 2004.
- [3] シャープ株式会社, “液晶テレビの輝度制御技術”, シャープ技報, Vol. 98, pp. 26-28, Nov. 2008.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Optical Characteristics and Systemization of Personal Glasses-Free 3D Display Using Visual Perception and Retroreflective Sheet	IEVC2026 (IEEE International Conference on Image Electronics and Visual Computing)	2026 年 3 月 17 日