

研究終了報告書

「動的視差バリアの分散配置による広域空中像提示」

研究期間： 2021 年 10 月～ 2024 年 3 月

研究者： 三河 祐梨

1. 研究のねらい

分散配置したモニタ群全体により巨大な空中像を提示することが本研究の狙いである。

従来の巨大・広範囲な空中像提示は、映画館にあるような大型スクリーン(3D シネマ等)や重厚なヘッドセット(HoloLens などの AR グラス)により行われたが、設置場所を限定する、鑑賞者の身体的拘束が強いなどの問題があり、巨大空中像の使用場面を狭めてきた。

そこで本研究提案は、汎用モニタを分散配置することで、モニタ群全体で巨大空中像提示を行うことを目指す。1 個の巨大ディスプレイを複数個の小さなユニットに分割するという新たな視点により、巨大スクリーンと比べて設置が柔軟になる。さらに、装着なし、あるいは軽量の 3D 眼鏡の装着による鑑賞が可能となり、先述の重厚なヘッドセットによる身体的拘束の問題を解決する。なお、Tiled display と呼ばれる同種モニタを敷き詰める手法と本研究は類似するが、本研究では異種のディスプレイを混同利用でき、乱雑に配置することにより生じる多少の隙間をも許すことで、より手軽に利用できる点で異なる。

異種ディスプレイの混同や乱雑な配置は、モニタ間の隙間やモニタ同士の姿勢の違いによる映像の欠損や歪みといった新たな問題を引き起こす。本研究はそれに対し、眼球運動との関連の調査等により解決を試みる。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究成果は、当初課題の分散ディスプレイによる巨大空中像提示(A)を提案したほか、眼球主点位置に着眼した立体知覚向上の研究(B)と、これに関連した眼球トラッキングによるゆがみのない運動視差立体ディスプレイ(C)の3点が挙げられる。

各概要を以下に示す。

(A) 分散モニタ群による巨大空中像提示手法(BrickDisplay)

異なる種類のモニタ群を混ぜこぜにできる巨大空中像提示法の技術提案。ハードウェアのキャリブレーション手法と映像提示アルゴリズムの提案が含まれる。スポーツ選手の身体フォーム

(B) 低遅延なOcular parallax レンダリングによる立体知覚への効果の調査

分散モニタ群による映像提示では、根本的にモニタ間の隙間やモニタの枠による映像の途切れが避けられない。そこで頭部のみならず眼の状態を立体映像へ反映することでBrickDisplayの視認性向上につながると着想し、眼球運動によって起こる視差＝「Ocular parallax」の低遅延レンダリング法を提案し、その立体知覚への効果を調査した。

(C) 眼球主点位置に基づく低遅延運動視差ディスプレイの開発

(B)の派生で、赤外光を用いた高速アイトラッキングにより、眼球主点位置にもとづく運動視差ディスプレイを提案した。顔検出による頭部位置推定にもとづく運動視差ディスプレイとは異なり、立体形状を正確に提示することができる。

当初は課題名にもある動的視差バリア(パララックスバリア)を用いた完全裸眼ディスプレイを目指していたが、単一の動的バリアの開発は前例があるものの、複数個の開発は困難であると判明し、3D眼鏡を利用するアナグリフ映像へ変更したり、高速化を行わなかったりなどマイナーチェンジはあったものの、(B)、(C)に述べたような眼球運動と連動する立体ディスプレイの研究など、本課題を起点とした新たな研究成果が得られ、全体として研究の成果はおおむね得られたと考えられる。

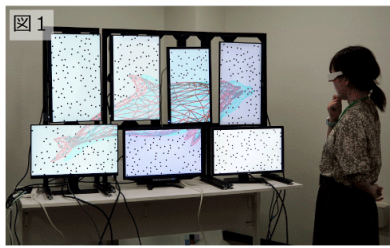


図1 (A) BrickDisplay の様子.

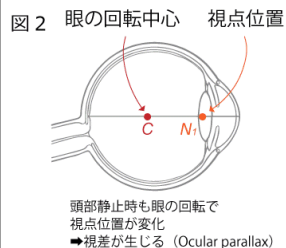


図2 (B) (左) 眼球の模式図. (右)低遅延な Ocular parallax レンダリングシステムの様子.

(2) 詳細

(A) 分散モニタ群による巨大空中像提示手法 (BrickDisplay)

図1に示すような分散モニタ群のシステムを製作し、立体映像提示アルゴリズムとモニタ群全体のキャリブレーション手法を提案した。映像提示アルゴリズムは、空間内で標準的な鑑賞位置を透視投影中心とし、提示するオブジェクトの透視投影を各モニタ面に対し行うものである。モニタ群のキャリブレーション法は、各モニタに ArUco マーカ (QR コードに似た ID 付きマーカ) 付きチェッカーパターンを提示して、カメラで撮影して行う。モニタのピクセルサイズが既知のため (プログラマブルに取得可能である)、パターンの実寸サイズを計算でき、これを用いて各モニタの3次元位置を推定できる。

異なるモニタ群が混ぜこぜで、多少隙間や姿勢にばらつきがあっても、全体として立体像 (空中像) を鑑賞可能であることをデモンストレーションで示した [VR 学会 2023]。個人や小企業の有するモニタの寄せ集めで簡便に巨大立体ディスプレイを製作でき、スポーツの身体のフォームや動物等の大きなものを手軽に等身大で提示できる手法である。一部が壊れても適当なモニタ (別種類でも良い) をもってきて修復可能なため、「壊れてもよい」点も利点であり、バッテリーボックス傍やプールサイドなど破損可能性の高い場所での使用も許される点で新しい。なお、システム全体がレンガのように見えることから「BrickDisplay」と名付けた。

なお当初は課題名にもある視差バリア (パララックスバリア) で、裸眼で鑑賞できるディスプレイによる実施を試みたが、単一のパララックスバリアディスプレイに関しては製作の前例があるものの、多数個の製作・同時稼働は困難であることがわかった。したがって汎用モニタで簡単に 3D 提示のできるアナグリフ方式により、3D 眼鏡の装着を前提に開発した。また、本研究に似た研究として、Tiled display と呼ばれる、本研究と同様にモニタを一平面に敷き詰める巨大ディスプレイが過去に提案されたが、同じ種類のモニタを複数用意し隙間なく敷き詰めることが簡便な利用を妨げると考えられる。本研究はモニタ群を適当に配置することを許すことで手軽な使用を促すものである。

(B) 低遅延な Ocular parallax レンダリングによる立体知覚への効果の調査

BrickDisplay による映像提示は、モニタの枠やモニタ間の隙間によって映像が遮蔽され、映像が途切れることが避けられない。さらにモニタ面より手前に飛び出すように立体映像を提示したい場合、この枠や隙間における映像の遮蔽が矛盾を起こし、映像の奥行感を損ねる原因となる。

そこで本研究では、眼の状態を立体映像に高速リアルタイムフィードバックすることで立体

知覚の改善を試みた。結果としてこれは BrickDisplay のみならず立体ディスプレイ全般にかかわる研究となったものの、眼の情報を取り込んだディスプレイ (Gaze-contingent display) の研究分野において、コンピュータグラフィクス技術の未熟な時代 (主に 20 世紀) から指摘されていた極めて困難な領域を解明し、学術的な発展を遂げることができた。また、私は本 ACT-X 課題でほとんど初めて立体視研究に着手したが、この研究を経て立体視の知見を深め、当初の研究課題 (分散ディスプレイ) を適切に主導する力を身に着けることができた。

図 2 左に示すように、眼の視点位置 (= 眼球の主点位置、角膜節点位置 N_1) は厳密には眼球の回転中心位置 (C) になく、角膜前面に向かって 10mm 程度ずれた位置に存在する。これにより、頭部静止時でも眼球回転によって小さな運動視差 (Ocular parallax) が生じるが、従来の立体ディスプレイはこれを考慮していなかった。Ocular parallax レンダリングを初めて試みた研究 [Konrad et al., 2020] では市販のヘッドマウントディスプレイを用いたため、20ms を超える大きな遅延が避けられず、忠実なレンダリングとは言えなかった。そこで本研究は、図 2 右に示すような 360Hz、遅延 4.8 ms で眼球主点位置をトラッキングし、アナグリフの立体映像にフィードバックを行うシステムを自作で開発した。これを用いて単眼視・両眼視における立体知覚の被験者実験を行い、Ocular parallax レンダリングは両眼融像を促進する働きがあることや、単眼視における深度知覚への Ocular parallax レンダリングの効果は、高遅延時にのみみられることを示した。

この研究は一見 VR/AR の基礎研究に留まるように見えるが、将来的には片目失明者などの単眼視をするユーザにおける Ocular parallax の効果を調査し、透過型ヘッドマウントディスプレイで深度知覚の手がかりとして Ocular parallax を重畳提示する技術を開発するなど、障がい者向けのアプリケーションが期待される。また本研究の眼球情報の高速フィードバックシステム自体はほかの Gaze-contingent display の知覚研究 (視線方向に応じた映像のぼかしによる深度知覚の促進など) にも用いることができる。

本研究は IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (IEEE TVCG) に条件付採録が決定し、IEEE VR 2024 での口頭発表を予定しているほか、日本視覚学会や、電子情報通信学会が母体の国際ワークショップ IMQA2024 で招待講演を行った (行う)。また、日本視覚学会学会誌 VISION の解説論文の依頼をも受けている。したがって、本研究の成果によって一研究者として飛躍を遂げられたと言える。

(C) 低遅延な Ocular parallax レンダリングによる立体知覚への効果の調査

(B) の派生で、赤外光を用いた高速アイトラッキングにより、眼球主点位置にもとづく運動視差ディスプレイを提案した (装置の様子は図 2 右に類似)。顔検出による頭部位置推定にもとづく運動視差ディスプレイとは異なり、ほとんど正確な視点位置をサッカード時含め取得し続けることができるため、これを用いると立体形状を正確に提示することができる。2 人の被験者を用いて頭部位置と眼球位置を同時にトラッキングし、頭部を適当な範囲で自由運動させたときに、両者の位置のグラフには差があることや、眼球主点位置は瞳孔中心位置の推移グラフとほとんど合致し、眼の位置を概ね正確に推定できていることを確認した (眼球主点位置は特に運動時は真値の取得がほとんど不可能のため、これとの比較は実施していない)。

本手法はプロトタイプのため単眼視の提示に限定したが、将来的には (B) と同じ要領でア

ナグリフ等の 3D 映像で両眼立体映像に用いることができ、形状をできるだけ正確に知りた
いアプリケーションに役立てることができると考えられる。

3. 今後の展開

(A)の BrickDisplay の連続感に関して、錯視ベースのアプローチにより連続感や奥行き感
を回復できる可能性がある。また分散ディスプレイのような欠損映像による映像提示のアプ
ローチは他の手法にも適応できる可能性がある。たとえば他の柔らかい布の上へのアナグ
リフ映像の投影時に、両眼視差を適切に対応させるため映像を適応的に欠損させることが
考えられるが、そこでの視認性については本研究の知見が活かされることが考えられる。

(B)の Ocular parallax 研究に関しては、正常視力の両眼視の被験者では、単眼視による
深度知覚における低遅延 Ocular parallax レンダリングの効果はみられなかったが、片目失
明者など日常的に単眼視の被験者においてはこの限りでないと考えられる。将来的には、
こういった片目失明者などの単眼視の人における Ocular parallax の効果を調査し、透過型
ヘッドマウントディスプレイで深度知覚の手がかりとして Ocular parallax を重畳提示する技
術を開発するなど、障がい者向けのアプリケーションが期待される。また本研究の眼球情報
の高速フィードバックシステム自体はほかの Gaze-contingent display の知覚研究(視線方
向に応じた映像のぼかしによる深度知覚の促進など)にも用いることができる。

4. 自己評価

私はこの ACT-X 課題をもって初めて立体ディスプレイの研究に着手したが、そこではハー
ドウェアの製作のみならず、それを鑑賞する人間の知覚評価まで含まれる。私はこれまでハ
ードウェア(映像ロボティクス)に特化して研究をしてきており、知覚研究はそれとは研究の過
程や論文の書き方も異なるため、慣れなかった時期は多くのリジェクトを経験し苦しい時期が
長かった。もともと高速リアルタイムフィードバックの研究者だったこともあり、分散ディス
プレイ研究に資すると思って着想した眼の情報のフィードバック研究(B)も、今思うと的外れだった
と思うなど、失敗もあった。しかしこれ自体が困難かつ新しい研究を開拓したと評価され、受
賞や招待講演・解説論文の依頼を受けるなどで、一人の研究者として認められ、飛躍したと
いう実感があった。研究期間が終わる現在に、最も意を注いだ論文((B) Ocular parallax の内
容)のアクセプトがあり、人間情報科学を研究する身として、ハードウェアだけではなくそれを
視る人間も含めてデザインできる研究者に成長したと実感した。

さらに現在の課題終了頃には、アドバイザーの先生方の熱意あるご指導のおかげもあり、人
類が直面する社会課題(災害時の避難誘導)に結び付ける新たな研究提案ができたことによ
り、社会と密接であるべき本研究において、アカデミアに留まらせず、適切な着地点を作るこ
とができたといえる。ドイツ留学や博士論文審査などの他の大きなイベントにより、本課題に
注力できない期間もあったが、その最中で時間を工面する知恵も得られた。

これらをもって、総じて一研究者として飛躍・前進できたと言える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 8件

1. Yuri Mikawa and Taiki Fukiage: Low-Latency Ocular Parallax Rendering and Investigation of Its Effect on Depth Perception in Virtual Reality, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (IEEE TVCG) [conditionally accepted and presented at IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR) 2024]

(B)低遅延 Ocular parallax レンダリングシステムの提案と、その単眼・両眼視時の奥行き知覚への効果を被験者実験により調査した結果の報告。

2. Yuri Mikawa: Eye-Centered Low-Latency Motion Parallax Displays, 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Jan. 8-11 th, 2024.

(C)眼球主点位置トラッキングにもとづくゆがみのない運動視差ディスプレイの提案の論文。

3. 三河祐梨, 篠田裕之: BrickDisplay: 視差映像ディスプレイの分散配置による欠損を許した巨大空中像提示, 第 28 日本バーチャルリアリティ学会 (VRSJ2023), 1G-24 2023 年 9 月 12 日, 東京

(A) BrickDisplay のシステムの国内学会におけるデモンストレーション発表。

(2)特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 【国際・招待講演】 Yuri Mikawa: Ocular Parallax Rendering for Improving Visual Perception in Virtual/Augmented Reality, Keynote Lecture, The Twelfth International Workshop on Image Media Quality and its Applications (IMQA2024), Osaka, Feb. 27-28th, 2024. [to appear]
- 【国内・招待講演】 三河祐梨: Ocular parallax の基礎と Virtual reality への応用展開, 日本視覚学会 2023 年夏季大会, 徳島, 2023 年 9 月 20 日
- 【国内・デモンストレーション】 三河祐梨, 篠田裕之: BrickDisplay: 視差映像ディスプレイの分散配置による欠損を許した巨大空中像提示, 第 28 日本バーチャルリアリティ学会 (VRSJ2023), 1G-24 2023 年 9 月 12 日, 東京
- 【受賞】 東京大学 総長賞 ノミネート, 2023
- 【受賞】 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会 学術奨励賞, 2024 年 3 月 26 日