

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京都市大学

氏 名 : 圓道 知博

研究課題名 : ICT 建機のための広視野 AR ヘッドアップディスプレイの研究

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

ICT 建機のための広視野 AR ヘッドアップディスプレイの研究

Wide field AR heads-up display for ICT construction machinery

東京都市大学 教授 圓道 知博

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 背景と研究目的

ICT 建機は i-construction の代表例として作業効率化に効果を発揮しているが、オペレータへの情報提示はスマートフォン等の画面で見える形であるため、オペレータは表示された情報と現実との空間的な対応をとる負担がかかる。拡張現実(AR)による表示であれば、実際の視界に重ね合わせて表示ができるためより直感的に分かりやすい情報提示が可能となり、作業の更なる効率化が期待できる。そこで本研究では ICT 建機向けのヘッドアップディスプレイ(HUD)の実現を目指し、広視野かつ 3D 表示可能な HUD の研究を行う。現状ほとんどの HUD は車両走行時に使用するものであるため視野角は数度程度と狭い。これに対し作業用車両向け HUD では数十度程度の広い視野角と正確な立体感の提示が必要という課題があり、本研究ではホログラフィック光学素子(Holographic Optical Element: HOE)を活用した光学系の提案とその実現性の検討を行う。

ホログラフィは光の波面を記録する技術であり、HOE はこの技術を利用した光学素子である。特に、体積型 HOE は特定の波長や入射角の光に強く反応し、他の光を透過する透明な光学素子である。この特性により、現実の光景とデジタル画像とを重ねて見ることができる「AR3D ディスプレイ」への活用が期待されている。

透明 HOE スクリーンを用いた AR3D ディスプレイとして、これまでに主に二つのアプローチによる提案がなされてきた。一つ目は、レンチキュラーレンズやレンズアレイの機能を付与し、インテグラルイメージングによる透明 3D ディスプレイを実現する手法である[1, 2]。しかし、視点数と視野角の間にトレードオフが存在する。二つ目は、このトレードオフを解決するマルチプロジェクター方式である[3]。透明 HOE スクリーンに凸レンズまたは凹面ミラーの効果を持たせ、映像を観察者位置に集中させることで広い視野角を実現している。ただし、プロジェクター台数が視点数となるため、広い視域確保には多数のプロジェクター設置が必要であり、システム構築が困難であった。

この問題を解決するため、我々は 3 層構造の視点複製 HOE スクリーンと 3 台のプロジェクター、ヘッドトラッキングを組み合わせた透明 3D ディスプレイを提案した[4]。このシステムでは、HOE スクリーンにより一つのプロジェクター映像を複数視点に複製することができる。これにより、少数のプロジェクターで多数の視点を作ることができ、ヘッドトラッキングと組み合わせることで、広い視域における両眼視差の提示を実現した。しかし、この手法では視差画像を HOE スクリーン面に表示するため、両眼視差によって知覚される 3D 画像の奥行位置が眼の調節刺激と一致せず、輻輳調節矛盾が生じていた。

本研究では、視差画像を虚像として表示することで立体像と視差画像の奥行位置のギャップを減らし、輻輳調節矛盾の低減を目的とする。そのために、HOE の角度選択性を利用し、従来手法と同様の視点切り替えが虚像を用いて可能な新しい HOE スクリーンを作成する。Kogelnik の結合波理論により、虚像表示を実現しつつ最適な視域切り替えが可能な光学配

置を検討し、シミュレーションによってその有効性を実証する。

2. 従来手法

図 1 に従来手法のヘッドトラッキングを用いた透明 3D ディスプレイの構成図を示す。このシステムは、3 台のプロジェクター、3 層構造の視点複製 HOE スクリーン、トラッキングカメラで構成される。HOE スクリーンは 2 つの重要な機能を有する。第一に、1 台のプロジェクター映像を視認可能な視点を 3 つ生成する機能である。第二に、3 台のプロジェクター映像をそれぞれ異なる位置で結像させ、各プロジェクターに対応する視点を生成する機能である。この機能は HOE の角度選択性により実現される。本システムでは、3 層の HOE と 3 台のプロジェクターを組み合わせることで、3 種類の視差映像を表示する。トラッキングカメラにより観察者の視点位置を追跡し、位置に応じて適切な視差画像に切り替える。この際、視差画像の切り替わりが片目ずつ交互に起こるため、両眼の映像が逆転することなく自然な立体視を実現できる。結像面の設計において、人間の瞳孔間距離(60~70mm)を考慮し、両眼に適切に映像を分離するため横幅を 40mm とした(図 2)。また、観察者の上下方向の移動にも対応できるよう、縦幅も 40mm とした。

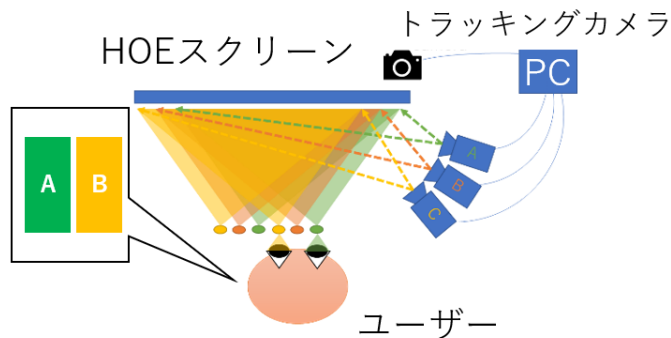


図 1 従来手法のディスプレイ構成

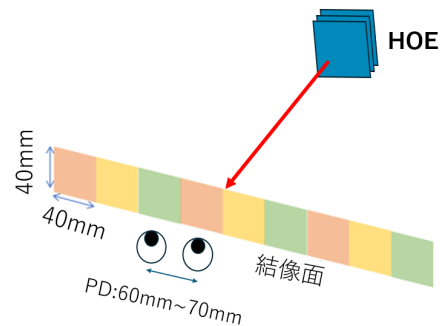


図 2 適切な集光面の設計と両眼視差の提示

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 提案手法

3.1 従来手法の問題点

従来手法のディスプレイは立体映像を広範囲で視認できるが、立体像をスクリーンから遠くに表示する場合に輻輳調節矛盾が生じるという問題があった。この問題の原因は、視差画像の表示面が HOE スクリーンであるためである。そのため、両眼視差や運動視差によって知覚される立体像の奥行位置と、実際の表示面である HOE スクリーンの物理的位置との間に乖離が生じてしまっていた(図 3)。

3.2 提案ディスプレイの原理

従来手法の問題を解消するため、本研究では、図 4 に示すように HOE スクリーンの奥に虚像を形成する手法を提案する。虚像表示により輻輳距離と調節距離のギャップを縮小し、輻輳調節矛盾を軽減できる。提案する HOE スクリーンは、軸外からの投影映像を入射させ、特定の視点位置に集光させることで HOE スクリーンの奥に虚像を形成する。また、HOE の角度選択性により、設計された視点位置から離れた位置では回折効率が低下し、虚像が非表示となる。この特性を利用することで、従来手法と同様に観察者の移動に応じた視差映像の切り替えを実現しつつ、輻輳調節矛盾を軽減した透明 3D ディスプレイを実現できる。

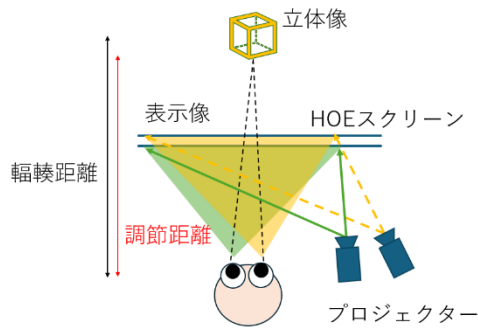


図 3 従来手法の問題点

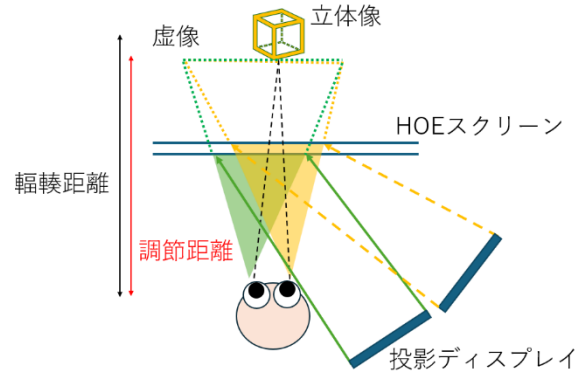


図 4 提案する HOE スクリーンの原理

3.3 角度選択性を用いた虚像の視域設計

提案手法を実現するためには、HOE スクリーンが形成する一つの虚像に対して、従来手法と同様の大きさと間隔で配置された視域を確保する必要がある。本研究では、体積型 HOE の角度選択性を利用してこの機能を実現する。図 5 に示すように、体積型 HOE は設計した集光点において理想的な虚像を視認できる特性を有する。集光点から離れるほど回折効率は低下し、一定距離以上離れると虚像は非表示となる。この回折効率の減衰特性は、集光点を中心とした左右移動において対称的に現れる。従来手法では 40mm の視域幅が確保されていた。同様の機能を実現するため、本研究では集光点から $\pm 20\text{mm}$ の範囲で虚像が視認できるよう設計する。この $\pm 20\text{mm}$ の位置を隣接視点との境界とし、それ以降の領域では回折効率を急激に減衰させる。これにより、隣接する集光点の虚像との過度なクロストークを防ぎ、適切な視点切り替えを実現する。最終的に、この 40mm 幅の視域を持つ集光点を、3 層の HOE を用いて 40mm 間隔で配置することで、従来手法と同等の視差切り替え機能を実現できる。

この現象は、Kogelnik の結合波理論によって定量的に説明できる [5, 6]。体積ホログラムにおける格子ベクトル $\mathbf{K}$ は、以下の式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\rho} - \mathbf{K} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ は回折ベクトル、 $\boldsymbol{\rho}$ は入射ベクトル、 $\mathbf{K}$ は格子ベクトルである。格子ベクトルは、HOE 記録時の入射ベクトルと回折ベクトルによって決定される。

反射型体積ホログラムの回折効率 η は、以下の式で表される。

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1 - \frac{\xi^2}{v^2}}{\sinh^2 \sqrt{v^2 - \xi^2}}} \quad (2)$$

ここで、カップリングパラメータ v とブラッグ条件からの逸脱パラメータ ξ は、それぞれ以下で定義される。

$$v = i \frac{\pi n_1 t}{\lambda \sqrt{C_R C_S}} \quad (3)$$

ここで、 C_r 、 C_s はそれぞれ入射光と回折光の方向余弦、 t はホログラムの厚さ、 n_1 は平均屈折率、 λ は波長、 Γ はブラッグ条件からの逸脱量である。 v の値は記録時の入射ベクトルと回折ベクトルによって大きく変わる。 v が変化すると、図 6 で示すように回折効率の減衰の仕方が大きく変わる。また、回折効率は一つの格子ベクトルごとに考える必要があり、ホログラム面上の格子位置によっても回折効率特性が変化する。以上のことから、最適に視差画像を切り替えるための光学系配置が重要となる。

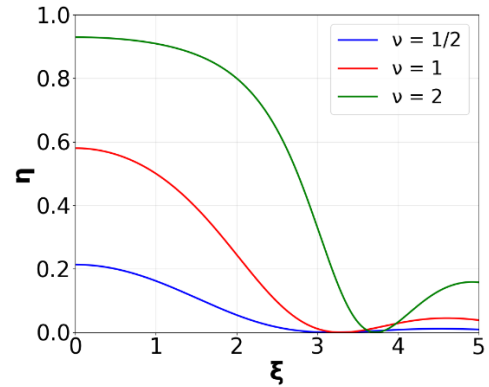


図 6 ブラッグ条件から外れた場合の回折効率

図 7 シミュレーションの全体像

5. 結論

本研究では、従来の透明 3D ディスプレイシステムにおける輻輳調節矛盾の問題を解決するため、視差画像を虚像として表示する手法を提案し、視域を制限した虚像を表示できる HOE スクリーンを設計した。Kogelnik 理論に基づく、HOE の角度選択制の計算により、光学配置を調整して、各視点位置で適切な虚像制御が行えたことをシミュレーションで確認した。提案システムは輻輳調節矛盾を軽減した透明 3D ディスプレイの実現可能性を示せた。今後は実機による検証実験が課題である。

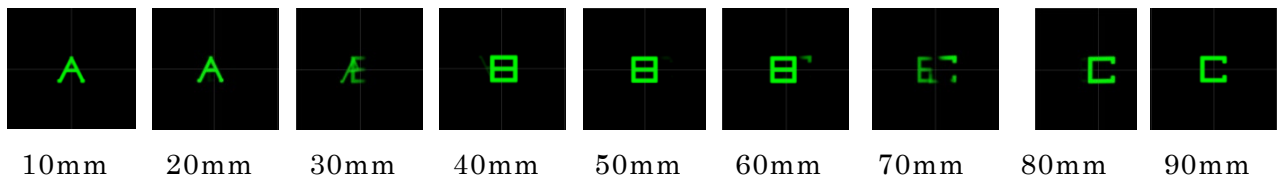


図 8 シミュレーション結果

参考文献

- [1] H. Deng, C. Chen, M. He, J. Li, H. Zhang and Q. Wang: "High-resolution augmented reality 3D display with use of a lenticular lens array holographic optical element," J. Opt. Soc. Am. A, 36, 4, pp.588–593(2019).
- [2] H. Zhang, H. Deng, W. Yu, M. He, D. Li, and Q. Wang: "Tabletop augmented reality 3D display system based on integral imaging," J. Opt. Soc. Am. B, 34, 5, pp.B16–B21 (2017).
- [3] K.Wakunami, PY. Hsieh, R. Oi,et al.: "Projection-type see-through holographic three-dimensional display." Nat Commun 7, 12954 (2016).
- [4] N. Murakoshi, K. Fujii, and T. Yendo: "Transparent 3D display using viewpoint replication for viewing area expansion and tracking," Proc. IDW, 30, pp.678–681(2023).
- [5] H. Kogelnik:"Coupled-wave theory for thick hologram grating," Bell Syst. Tech. J., 48, 9, pp. 2909–2947(1969)
- [6] 辻内順平著, "第 4 章 厚いホログラム", 『ホログラフィー』. 東京: 裳華房, pp. 49–90(1997).

(発 表 論 文)

琴寄充人, 藤井賢吾, 圓道 知博, 岩橋政宏, 虚像表示する HOE を用いた輻輳調節矛盾の小さい透明 3D ディスプレイの設計, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 49, No. 29, 3DMT2025-38, pp. 21–24(2025)