



# 高速 HMD のための 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイ原理の提案

Proposal of 1000-volumes/s high-speed volumetric display principle  
for high-speed HMD

奥寛雅<sup>1)</sup>, 鈴木康平<sup>1)</sup>, 春原岳<sup>2)</sup>

Hiromasa OKU, Kohei SUZUKI and Gaku SUNOHARA

1) 群馬大学大学院理工学府 (〒376-8515, 群馬県桐生市天神町 1-5-1, [h.oku@gunma-u.ac.jp](mailto:h.oku@gunma-u.ac.jp))

2) 群馬大学理工学部 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

**概要**: 本発表では, 動的な現実世界に遅延なく情報を提示でき, かつ人間の焦点調節に整合する三次元像を提示するために, 1000Hz で提示像を更新できる高速体積型ディスプレイ原理を提案する. 提案手法は, 数 10kHz 以上で振動する高速な可変焦点レンズと照明光のサブマイクロ秒制御を組み合わせることでマイクロ秒で奥行き位置を選択する. これと DMD を組み合わせることで高速体積型ディスプレイの原理をなす.

**キーワード**: ヘッドマウントディスプレイ, 体積型ディスプレイ, 高速, 焦点調節

## 1. はじめに

近年の VR/AR への関心の高まりをうけて, 様々なヘッドマウントディスプレイ(HMD)が開発され, 注目を集めている. 中でも透過型の HMD は, 実世界にアノテーションを重畳させてユーザーに提示することが可能となるため, AR 等での応用に特に重要となると考えられる.

特に動的な現実世界へのアノテーションの重畳を考えると, 映像を提示するディスプレイにはミリ秒程度の高速性があることが理想とされる. 例えば, タッチパネルのように遅延による位置ずれが認識しやすい状況では人間が遅延を感じない値として 2.38ms という報告がある[1]. HMD ではないが, プロジェクターを用いて情報を投影する projection based Mixed Reality(MR)もしくはプロジェクションマッピングの分野では, 動的プロジェクションマッピング技術と呼ばれて高速性が重要であることが実証されてきている[2], [3]. HMD においても映像提示の高速性について研究が進められており, 映像提示の遅延をできる限りなくすための研究[4], [5]や, 予測による補正を用いる手法[6]が提案されてきている. これらの研究は, 両目に異なる二次元的な映像を提示するステレオ視による三次元情報提示が前提となっている.

一方, ステレオ視による三次元情報提示では眼の焦点調節と輻輳の矛盾である Vergence Accommodation Conflict (VAC)が存在することが知られており, いわゆる立体酔い

と呼ばれる疲労・酔いの症状の原因と言われている. これを解消するためには視差のみではなく焦点の手がかりも人間に提示することが必要となる. これに対する解決方法として, light field を利用する手法[7], [8]や, 可変焦点レンズ[9]–[11]を利用する手法, 可変ハーフミラー[12]による手法, ホログラムを利用する手法[13], Spatial Light Modulator (SLM)による波面制御を利用する手法[14]などが提案されている. また, light field による手法は eye box が小さくなってしまいうという問題があるが, これに近い構成をとりながら比較的広い eye box を実現する Super multi-view (SMV) technique による手法[15]も提案されている. 人間の焦点調節の影響をなくしてしまうアプローチとして, Maxwell 視による深い Depth of Focus (DOF) と Holographic Optical Element (HOE)によって広い eye box を実現した手法[16]などが存在する.

しかしながら一般に VAC を低減する方式のディスプレイでは焦点調節に整合する光線場を提示するためにフレームレートの高速化が難しくなる傾向にあり, いまのところ VAC の低減と高速性とを両立するディスプレイ方式は存在しない.

そこで本発表では, VAC を解消した三次元光線場を高速に提示することが可能なディスプレイ原理を提案する.

2. 提案する高速体積型ディスプレイ原理

眼の焦点調節に整合するディスプレイ原理について考えると、大きくわけて、3つの方法がある。1つ目はいわゆる体積型ディスプレイ原理であり、光学的にディスプレイ共役像の奥行位置を走査しながら異なる映像を提示する手法である。2つめは Computer Generated Holography (CGH) によって光を位相も含めて波面として生成する手法である。3つめは light field に基づくもので、空間中の各座標と方向の両方について光線場を生成するものである。これらの手法にはそれぞれ得失があるが、高速な映像の生成を目的として考えるとき、2,3の手法は比較的演算量が多いという問題を抱えている。それに比べて体積型ディスプレイ原理は比較的単純な演算で映像の生成が可能であり、高速化に適していると考えられる。

そこで、本研究では体積型ディスプレイ原理を採用し、その高速化を目指した。体積型ディスプレイ原理の高速化を阻む一つの要因は、焦点距離を高速走査するデバイスがないという点である。ところが、近年以下で述べる TAG レンズが登場し、この問題が解決されつつある。

2.1 Tunable Acoustic Gradient index (TAG) レンズ

本発表で提案する手法は Tunable Acoustic Gradient index (TAG) レンズと呼ばれるデバイスに強く依存しているため、まずはこのデバイスを紹介する。

TAG レンズは数 10kHz から数 100kHz で焦点距離を振動させることのできる液体レンズの一種である[17]。このデバイスは、円筒形容器に封入された透明な液体に軸対称な疎密波（超音波）の共振を励起し、それによって生成される軸対称の屈折率分布をレンズとして利用するものである。屈折率分布は物質の屈折率とその密度に依存しているために生成される。適切な振動モードを選ぶと屈折率分布は軸対称のベッセル関数を振幅とする単振動となり、光軸付近では放物面に近い分布となる。屈折率に類似する空間分布を持たせた光学素子は Gradient Index (GRIN) レンズとして知られており、レンズとして振る舞う。TAG レンズはこの屈折率分布の高さが時間とともに振動するため、凸レンズと凹レンズを振動し続けることになる。TAG レンズの写真と焦点距離変調の原理を図 1 に示す。

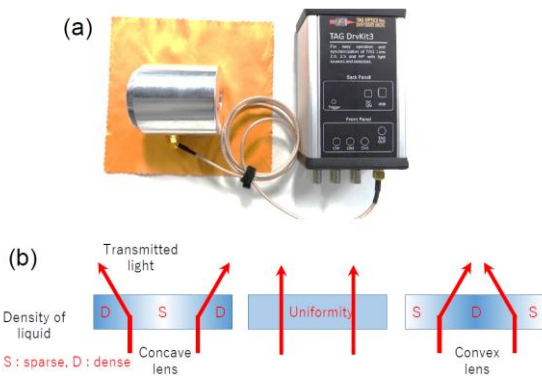


図 1 TAG レンズの写真(a)と焦点距離変調原理図(b)

振動の周期は粗密波の固有周波数となる。レンズのサイズや液体の物性値にも依存するが、手のひらサイズのデバイスで数 10kHz から数 100kHz の固有振動周波数が得られるため、非常に高速な焦点距離の振動を得ることができるものである。本研究では、TAG optics 社から市販されているデバイスのパラメータを仮定し、固有振動周波数 69kHz で屈折力が-1[dpt=1/m]から 1[dpt]の範囲を振動するとする。

2.2 高速体積ディスプレイ原理

高速に変調できる可変焦点レンズが存在するのであれば、適切に光学系を設計すればディスプレイの像を切り替えながら異なる奥行位置に像を形成することで高速な体積ディスプレイが実現できる。図 2 に提案する高速体積ディスプレイ原理の概念図を示す。

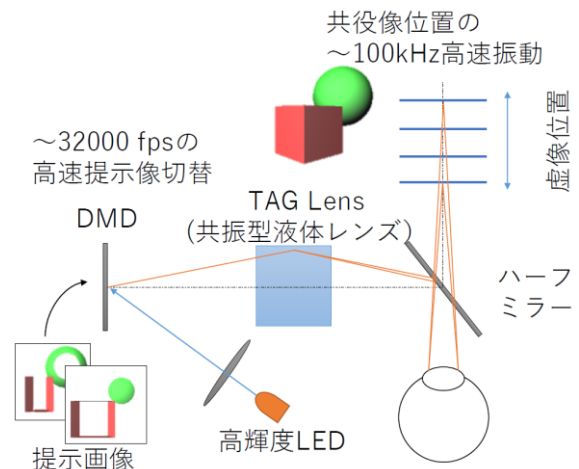


図 2 提案する高速体積ディスプレイ原理の概念図

しかし、TAG レンズの焦点距離の周波数が 69kHz だとすると 1 周期は 14.5us 程度であり、現在入手できるディスプレイのフレーム周期より速い。現在利用できるディスプレイや SLM の中で最も高速な原理の一つである Digital Micromirror Device (DMD) でもそのフレームレートは 32000 fps 程度が限界であり、そのフレーム周期は 31.3us 程度である。TAG レンズはこの 1 フレームの間に焦点が 2 往復することになるので、単純に結合してしまうと、特定の焦点距離に像を提示することができない。

そこで、照明を LED とし、この LED を極短時間発光させることで提示する焦点距離を選択する原理を提案する。これにより、特定の焦点距離の像だけが形成されるようになる。また、提示する奥行位置の変更は単に発光タイミングを変更するだけで実現できる。この原理の説明を図 3 に示す。

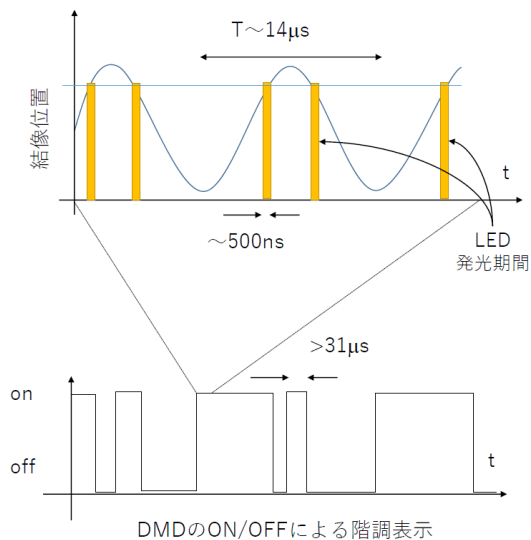


図 3 LED 発光タイミングによる投影奥行位置の選択原理図 (上) と、DMD による階調表示との関係図 (下)

次に、以上の原理に基づきミリ秒の三次元情報提示が可能かを議論する。仮に DMD のフレームレートを 32000fps とし、1000 volumes/s のレートで三次元像を提示することを考えると、1 volume の提示に最大 DMD の 32 フレームを割り当てることができる。例えば、モノクロ 1bit 階調の画像を提示することを考える場合、奥行方向 32 段階に別々の像を提示できる。階調を増やして、モノクロ 3bit 階調の画面表示を考えると、一枚の画像の提示に DMD の 7 フレーム分(=1+2+4)が必要となる。奥行方向 4 段階までであれば  $32 > 7 \times 4 = 28$  であり、1ms 以内に表示が可能である。

提案原理のうち、照明光タイミングによる奥行提示位置変更原理について実験的に検証した結果について、VRSJ2019 で発表予定である[18]。

### 3. 考察

提案したディスプレイ原理は、高速に体積型ディスプレイを実現できるという利点があるが、HMD 応用を考えると光学系が大きすぎる点や、提示可能な階調が少ない点などの欠点も存在する。

光学系のサイズが大きくなっている要因の一つに TAG レンズの容積が大きい点が挙げられる。しかし、容積のサイズと固有振動数とが密接に関係していることを考えると TAG レンズの容積を小さくすることは難しいことが予想される。KTN 単結晶による可変焦点原理[19]の利用などが解決策の一つの可能性として挙げられる。

DMD のフレームレートによる階調の制約については、複数フレームに階調表現を分散させることや、uLED など別のディスプレイ原理の採用により解決される可能性がある。

### 4. おわりに

本発表では、動的な現実世界に遅延なく像を提示可能であり、かつ眼の焦点調節と輻輳の矛盾である Vergence Accomodation Conflict (VAC)を解消できる高速体積型ディスプレイ原理を提案、説明した。

謝辞 本研究は科研費 JP18H03271 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] R. Jota, A. Ng, P. Dietz, and D. Wigdor, "How fast is fast enough?," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '13*, 2013, p. 2291.
- [2] K. Okumura, H. Oku, and M. Ishikawa, "Lumipen: Projection-Based Mixed Reality for Dynamic Objects," *2012 IEEE Int. Conf. Multimed. Expo (ICME 2012)*, pp. 699–704, 2012.
- [3] G. Narita, Y. Watanabe, and M. Ishikawa, "Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 23, no. 3, pp. 1235–1248, Mar. 2017.
- [4] F. Zheng *et al.*, "Minimizing latency for augmented reality displays: Frames considered harmful," in *ISMAR 2014 - IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Science and Technology 2014, Proceedings*, 2014, pp. 195–200.
- [5] P. Lincoln *et al.*, "From Motion to Photons in 80 Microseconds: Towards Minimal Latency for Virtual and Augmented Reality," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 22, no. 4, pp. 1367–1376, 2016.
- [6] Y. Itoh, J. Orlosky, K. Kiyokawa, and G. Klinker, "Laplacian Vision," in *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016 on - AH '16*, 2016, pp. 1–8.
- [7] A. Maimone, D. Lanman, K. Rathinavel, K. Keller, D. Luebke, and H. Fuchs, "Pinlight displays," *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 4, pp. 1–11, Jul. 2014.
- [8] F.-C. Huang, K. Chen, and G. Wetzstein, "The light field stereoscope," *ACM Trans. Graph.*, vol. 34, no. 4, pp. 60:1–60:12, Jul. 2015.
- [9] R. Konrad, N. Padmanaban, E. Cooper, and G. Wetzstein, "Computational focus-tunable near-eye displays," 2016, pp. 1–2.
- [10] J.-H. R. Chang, B. V. K. V. Kumar, and A. C. Sankaranarayanan, "Towards Multifocal Displays with Dense Focal Stacks," vol. 37, no. 6, 2018.
- [11] Sheng Liu, Hong Hua, and Dewen Cheng, "A Novel Prototype for an Optical See-Through Head-Mounted

- Display with Addressable Focus Cues,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 16, no. 3, pp. 381–393, May 2010.
- [12] D. Dunn *et al.*, “Wide Field of View Varifocal Near-Eye Display Using See-Through Deformable Membrane Mirrors,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 23, no. 4, pp. 1275–1284, 2017.
- [13] A. Maimone, A. Georgiou, and J. S. Kollin, “Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 4, pp. 1–16, Jul. 2017.
- [14] N. Matsuda, A. Fix, and D. Lanman, “Focal surface displays,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 36, no. 4, pp. 1–14, 2017.
- [15] T. Ueno and Y. Takaki, “Super multi-view near-eye display to solve vergence–accommodation conflict,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 23, p. 30703, Nov. 2018.
- [16] S.-B. Kim and J.-H. Park, “Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox,” *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 4, p. 767, 2018.
- [17] A. Mermillod-Blondin, E. McLeod, and C. B. Arnold, “High-speed varifocal imaging with a tunable acoustic gradient index of refraction lens,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 18, pp. 2146–2148, 2008.
- [18] 康平鈴木, 岳春原, and 寛雅奥, “1000vlumes/s高速体積型ディスプレイ用光学系の基礎評価,” in *VRSJ2019*, 2019.
- [19] T. Inagaki, T. Imai, J. Miyazu, and J. Kobayashi, “Polarization independent varifocal lens using KTN crystals,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 15, pp. 2673–2675, 2013.