



# 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイによる 像提示奥行位置の実物体への追従制御

Tracking Control of Image Presentation Depth Position to Real Object Using 1000 volumes/s High Speed Volumetric Display

深野悠吾<sup>1)</sup>, 鈴木康平<sup>1)</sup>, 奥寛雅<sup>1)</sup>

Yugo FUKANO, Kohei SUZUKI, and Hiromasa OKU

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, t201d066@gunma-u.ac.jp)

**概要:** ヘッドマウントディスプレイには、輻輳と焦点調節の矛盾やディスプレイの遅延といった問題がある。この二つの問題点を解決するため、我々のグループでは 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイを開発している。1000volumes/s 高速体積型ディスプレイの AR 等への応用を考えると現実世界への実物体の奥行位置と同じ奥行位置に虚像を提示する必要がある。本発表では像提示位置のフィードバック制御を行うことで、実物体を追従し、その実物体の奥行位置に虚像を提示するシステムを開発、評価した結果を報告する。

**キーワード:** 立体・空中像ディスプレイ, 体積型ディスプレイ, HMD

## 1. 緒言

近年の VR/AR への関心の高まりを受けて、様々なヘッドマウントディスプレイ (HMD) が開発されている。しかし、既存の HMD にはディスプレイの遅延や焦点調節と輻輳の矛盾といった問題点がある。ディスプレイの遅延は、透過型の HMD が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際に問題となる。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度があることが理想とされる。例えばタッチパネルのような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]。しかし、既存の HMD の多くは 120fps 程度の映像更新レートにとどまっており、映像提示速度はまだ理想的とは言えない。また、一般的に用いられているステレオ視による三次元像の提示方法では、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 [2] や、可変焦点レンズを利用する手法 [3], [4], [5], 可変ハーフミラーを利用する手法 [6], ホログラムを利用する手法 [7], Spacial Light Modulator (SLM) による波面制御を利用する手法 [8] などが提案されている。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 の低減と高速度とを両立するディスプレイ方式は存在しない。

この VAC とディスプレイの遅延の両方を解決するために、1000volumes/s 高速体積型ディスプレイ [9] が提案されている。我々のグループでは 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイを試作し、性能評価を行った [10]。その際、性能評価のために虚像の提示位置を固定していたが、AR 等への応用を考えると現実世界の実物体の奥行位置と同じ奥行位置に虚像を提示する必要がある。そこで、本発表では像提示位置のフィードバック制御を行うことで、実物体を追従し、その実物体の奥行位置に虚像を提示するシステムを開発、評価した結果を報告する。

## 2. 提案された高速体積型ディスプレイの原理

### 2.1 Tunable Acoustic Gradient index (TAG) レンズ

TAG レンズは数 10 kHz から数 100 kHz 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 [11]。振動の周期は疎密波の固有周波数となる。TAG optics 社から市販されていたデバイスのパラメーターを仮定し、固有振動周波数 69kHz で屈折力が  $\pm 1$  [dpt=1/m] 弱の範囲の振動とする。

### 2.2 高速体積型ディスプレイの原理

前述した TAG レンズを用いることで高速に焦点距離を変えられることができるため、TAG レンズの焦点距離の振動に同期した形でディスプレイの像を切り替えながら提示することができれば、異なる奥行位置に像を形成することが可能になり高速体積型ディスプレイが実現できる。TAG レンズは 69 kHz で動作するため、周期は  $14.5\mu\text{s}$  となる。TAG レンズに同期させ、ディスプレイの像を切り替えるためには高

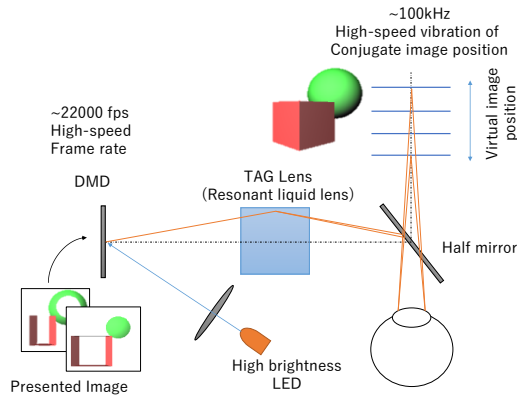


図 1: Schematic diagram of the system configuration.

速なディスプレイが必要になる。そのため、Digital Mirror Device(DMD)をディスプレイとして用いる。以上の内容を踏まえ、図 1 にディスプレイ原理の概略図を示す。LED を照明とし、LED をストロボ発光させることで提示する焦点距離を選択する。これにより、特定の焦点距離にのみ虚像が形成されるようになる。提示する奥行位置は LED のストロボ発光タイミングを変えることで、変更できる。ただし、ストロボ発光タイミングは TAG レンズの同期信号が入力されてから FPGA のクロックが何回立ち上がったを示すものである。TAG レンズの周期が  $14.5\mu s$ 、FPGA のクロック周期が  $20\text{ ns}$  であるため、ストロボ発光タイミングは 0 から 724 までの整数値となる。例えば、ストロボ発光タイミングが 4 であった場合には  $4 \times 20 = 80$  となり、TAG レンズの同期信号から  $80\text{ ns}$  後にストロボ発光を開始することとなる。LED の発光期間は  $500\text{ ns}$  である。また、TAG レンズの振動周期は  $\cos$  波となるため、最も手前に虚像を提示する場合のストロボ発光タイミングは 350、最も後方に虚像を提示する場合のストロボ発光タイミングは 0 となる。

### 3. 開発したシステム

カメラによって実物体の奥行位置を推定し、その奥行位置に虚像を提示できるように像提示位置のフィードバック制御を行うシステムを構築した。図 2 に開発したシステムの構成を示す。図 3 が光学系の全体写真である。試作したシステムの主な構成部品を表 1 に示す。TIR プリズムは市販されている直角三角形プリズムを 2 つ組み合わせ作成した。DMD は TIR プリズムを介して照らされ、DMD によって形成された像は TIR プリズムのエアギャップで反射し、TAG レンズを通して観察される。今回のシステムでは追従対象の実物体として、図形が印刷されたプレートを用いた。ただし、追従のしやすさを考慮し、追従対象の実物体にはマーカーとして白色 LED を取り付けた。実際に用いた実物体を図 4 に示す。

システムの動作としては、高速カメラで追従対象の実物体を横から撮影する。撮影画像は制御用 PC に送られ、撮影画像を二値化し、画素重心を求める。求めた画素重心を

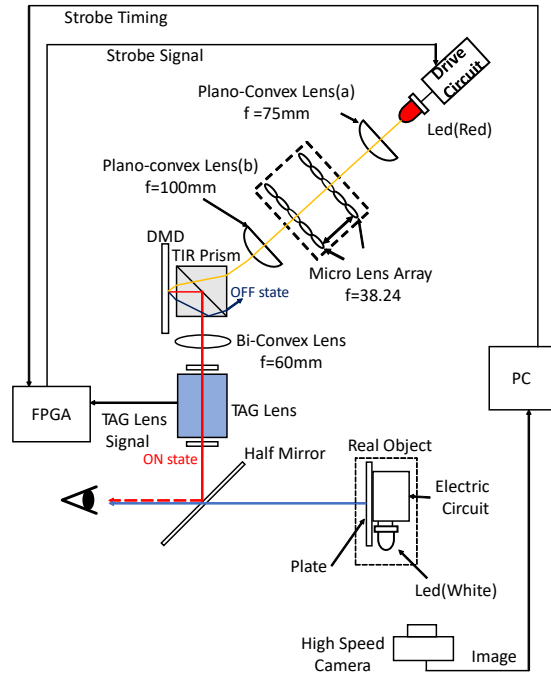


図 2: Schematic diagram of the developed system.

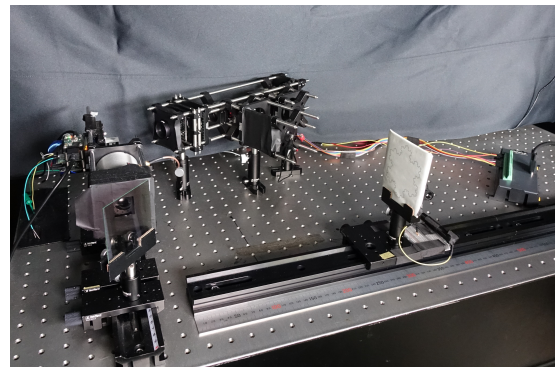


図 3: Photograph of overall system.

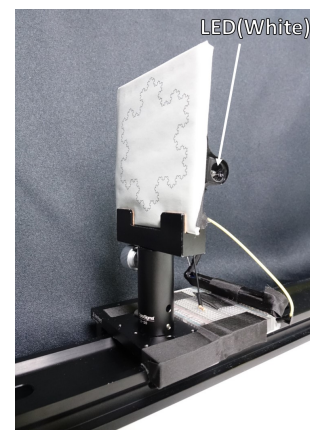


図 4: Photograph of real objects used in experiments.

実物体に取り付けられた白色 LED の位置とし、奥行位置を推定を行う。推定した奥行位置をもとにストロボ発光タイ

表 1: Components of the system.

Components	Model number	Manufacturer
DMD	AJD-4500-UT	Ajile
TIR Prism	PS908L-A	ThorLabs
TAG Lens	TAGlens2.5 $\beta$	TAG OPTICS
Camera Lens	HF12.5HA-1B	Fujinon
High Speed Camera	GX-5 C-Cam	nac
FPGA	MAX10 10M50DDAF484C6GES	Intel
Micro Lens Array	FEL-46S03-38.24PM	Edmund Optics
LED(Red)	OS5RKA5111P	OptoSupply
LED(White)	OSPW3131P	OptoSupply
Plano-Covex Lens(a)	LA168	ThorLabs
Plano-Covex Lens(b)	LA1509-A-ML	ThorLabs

ミングを算出し、FPGA へ入力する。FPGA は入力されたストロボ発光タイミングをもとに赤色 LED をストロボ発光させ、実物体の奥行位置に虚像を提示する。以上を繰り返すことで、実物体の奥行位置に追従した位置に虚像を提示を行う。

### 3.1 ストロボ発光タイミングの推定方法

前提条件として、実物体は虚像の提示可能範囲内を移動することとする。推定を行う前に、撮影画像において1ピクセルが実世界で何 mm であるか、虚像の提示可能範囲は何 mm であるかを求めておく必要がある。提示可能範囲を  $r$ [mm] とし、ストロボ発光タイミングが0の時に提示される虚像の奥行位置を  $d_{max}$ [mm]、ストロボ発光タイミングが350の時に提示される虚像の奥行位置を  $d_{min}$ [mm] とする。虚像の提示可能範囲  $r$  は式(1)で求められる。

$$r = d_{max} - d_{min} \quad (1)$$

次に、撮影画像において1ピクセルが実世界で何 mm であるかを求める。奥行位置  $d_{min}$ [mm] に実物体を置き、高速カメラで撮影を行い、その時の画素重心の  $x$  成分を  $x_{min}$  とする。その後、奥行位置  $d_{min}$ [mm] から 100 mm 後方の位置に実物体を置き、高速カメラで撮影を行い、その時の画素重心の  $x$  成分を  $x_{100}$  とする。1ピクセルの実世界での大きさを  $p$ [mm] とすると、 $p$  は式(2)で表される。

$$p = \frac{100}{x_{100} - x_{min}} \quad (2)$$

次に、追従対象の実物体の奥行位置の推定を行う。 $d_{min} + r/2$  を奥行位置の原点とする。実物体の推定奥行位置を  $d'$ [mm]、

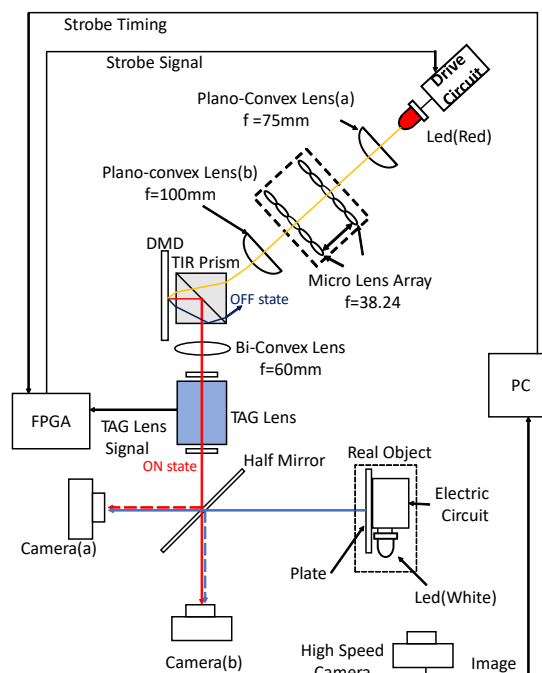


図 5: Schematic diagram of experimental environment.

撮影画像の画素重心の  $x$  成分を  $x'$  とすると  $d'$  は式(3)で表される。

$$d' = p(x' - x_{min}) - \frac{r}{2} \quad (3)$$

次に推定された奥行位置より赤色 LED のストロボ発光タイミングを算出する。ストロボ発光タイミングを  $t$  とすると、 $t$  は、式(4)で求められる。

$$t = \frac{\arccos\left(\frac{2d'}{r}\right)}{\frac{2\pi}{724}} \quad (4)$$

よって、推定された奥行位置よりストロボ発光タイミング  $t$  を求めることができる。以上の手順で、ストロボ発光タイミングの推定を行う。

## 4. 実物体追従実験

本実験は、構築したシステムで実物体に追従しながら虚像を提示できているか確認するために行った。実験環境を図5に示す。撮影を行うカメラとして、カメラ(a)(NEX-5, SONY)とカメラ(b)(DSC-RX10M2, SONY)を用いた。構築したシステムにおいて追従をおこない、実物体を左右に動かし、虚像の提示奥行位置の変化をカメラ(a)、カメラ(b)で撮影した。カメラ(a)はストロボ発光タイミングが350の時に提示される虚像に合焦させ、カメラ(b)はストロボ発光タイミングが162の時に提示される虚像の位置に合焦させた状態で実物体を左右に動かし、その様子を動画で撮影した。図6に2台のカメラの合焦位置と実物体との位置関係を示す。

撮影した動画の一部を切り出したものを図7に示す。図7(a-1), (b-1)はストロボ発光タイミングが350であるときに撮影した画像である。図7(a-2), (b-2)はストロボ発光タイミングが162であるときに撮影した画像である。図7(a-1)



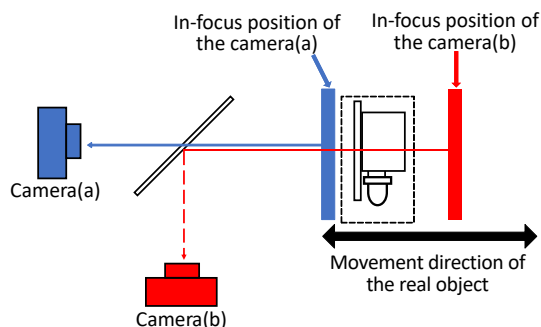


図 6: The focus position of Camera(a) and Camera(b) and its relation to the real object.

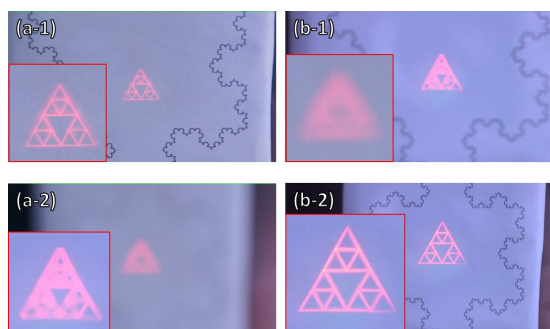


図 7: Photographs of pattern presented at the strobe timing of 350 and the real object (a-1), (b-1), and presented at the strobe timing of 162 and the real object (a-2), (b-2). The images on the left were captured by setting the camera in-focus position on a pattern presented at the strobe timing of 350 (a-1), (a-2), and the in-focus position on a pattern presented at the strobe timing of 162 (b-1), (b-2). The images on the right were reversed left and right considering the effect reflected by half mirror. In the lower left corner of each image, the presented pattern is cropped and magnified twice.

では実物体に印刷された図形と提示された虚像の2つに合焦していることが確認できる。それに対し、(b-1)では、実物体に印刷された図形と提示された虚像の2つに合焦しておらず、ぼやけていることが確認できる。また、(a-2)では、実物体に印刷された図形と提示された虚像の2つに合焦しておらず、ぼやけていることが確認できる。それに対し、(b-2)では実物体に印刷された図形と提示された虚像の2つに合焦していることが確認できる。以上の結果より、構築したシステムで実物体に追従しながら虚像を提示できていることが確認できた。

## 5. 結言

実物体を追従し、その実物体の奥行位置に虚像を提示することができるシステムを構築した。構築したシステムで実物体を追従しながら虚像を提示し、その様子を異なる奥行位置に合焦させた2台のカメラで撮影を行った。その結果、構築したシステムで実物体を追従し、その実物体の奥行位置に虚像を提示できていることが確認できた。

謝辞 本研究は科研費 18H03271, ACCEL JPMJAC1601 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*, p. 2291, New York, New York, USA, 2013. ACM Press.
- [2] F. Huang, K. Chen, and G. Wetzstein. The light field stereoscope. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 4, pp. 60:1—60:12, 2015.
- [3] R. Konrad, N. Padmanaban, E. Cooper, and G. Wetzstein. Computational focus-tunable near-eye displays. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2016*. Association for Computing Machinery, Inc, jul 2016.
- [4] J. Chang, B. Vijaya Kumar, and A. Sankaranarayanan. Towards Multifocal Displays with Dense Focal Stacks. Vol. 37, No. 6, 2018.
- [5] S. Liu, D. Cheng, and H. Hua. An optical see-through head mounted display with addressable focal planes. In *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 33–42. IEEE, 2008.
- [6] D. Dunn, C. Tippets, K. Torell, P. Kellnhofer, K. Aksit, P. Didyk, K. Myszkowski, D. Luebke, and H. Fuchs. Wide Field of View Varifocal Near-Eye Display Using See-Through Deformable Membrane Mirrors. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1275–1284, 2017.
- [7] A. Maimone, A. Georgiou, and J. Kollin. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 36, No. 4, 2017.
- [8] N. Matsuda, A. Fix, and D. Lanman. Focal surface displays. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 36, No. 4, pp. 1–14, 2017.
- [9] 奥, 鈴木, 春原. 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. 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2019.
- [10] 深野, 鈴木, 奥. 透過型 HMD のための 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイの試作と性能評価. *Robomech2020*, Vol. 10, No. 20, pp. 27–30, 2020.
- [11] A. Mermillod-Blondin, E. McLeod, and C. Arnold. High-speed varifocal imaging with a tunable acoustic gradient index of refraction lens. *Optics letters*, Vol. 33, No. 18, pp. 2146–2148, 2008.