



# 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイによる提示奥行位置と提示像のミリ秒同時制御

Simultaneous Millisecond Control of Presentation Depth Position and Presentation Image Using 1000 Volumes/s High-Speed Volumetric Display

深野悠吾<sup>1)</sup>, 鳥羽翔<sup>1)</sup>, 奥寛雅<sup>1)</sup>

Yugo FUKANO, Sho TORIBA, 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き位置に虚像を提示しつつ、外界の状況に応じて提示像をミリ秒で制御する必要がある。本発表では、物体の位置に応じて提示像と提示奥行位置を共にミリ秒の低遅延で制御することを目的とする手法を開発、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], Spatial 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度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。

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]。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 [11] を開発した。このシステムでは、提示像を状況に応じて変えることができない。しかし、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き位置に虚像を提示しつつ、外界の状況に応じて提示像をミリ秒で制御する必要がある。本発表では、物体の位置に応じて提示像と提示奥行位置とを共にミリ秒の低遅延で制御することを目的とする手法を開発、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

本研究は、既に提案されている高速体積型ディスプレイ原理に基づいている。当該原理は TAG レンズというデバイスに基づくため、最初にこのデバイスと原理について簡単に説明しておく。

### 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 [12]。振動の周期は疎密波の固有周波数となる。今回実験で利用したデバイスのパラメーターを仮定し、固有振動周波数 70 kHz で屈折力が  $\pm 1$  [dpt=1/m] 弱の範囲の振動とする。

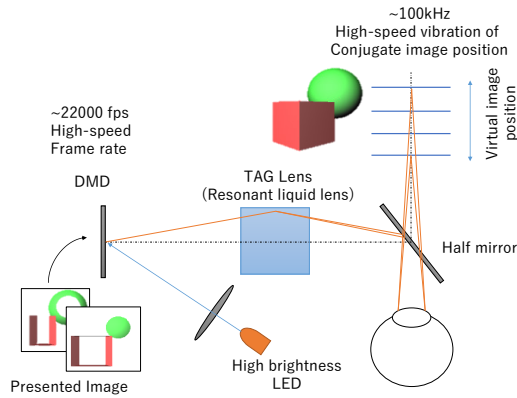


図 1: Schematic diagram of the system configuration.

## 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 70 kHz で動作するため、周期は約  $14.29\mu s$  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  $14.29\mu s$ 、FPGA のクロック周期が 20 ns であるため、ストロボ発光タイミングは 0 から 714 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 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 ns である。また、TAG レンズの屈折力が 1dpt の時に同期信号を出力すると、振動周期は cos 波と考えられるため、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 340、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. 提案する手法

我々のグループでは、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 [11] を構築した。このシステムではあらかじめ設定した順番でしか像を提示できず、実物体の奥行位置といった外界の状況に応じて、提示像を変更することはできなかった。そこで、本発表では数ミリ秒の遅延で提示像を制御可能な DMD に基づく高速体積ディスプレイ

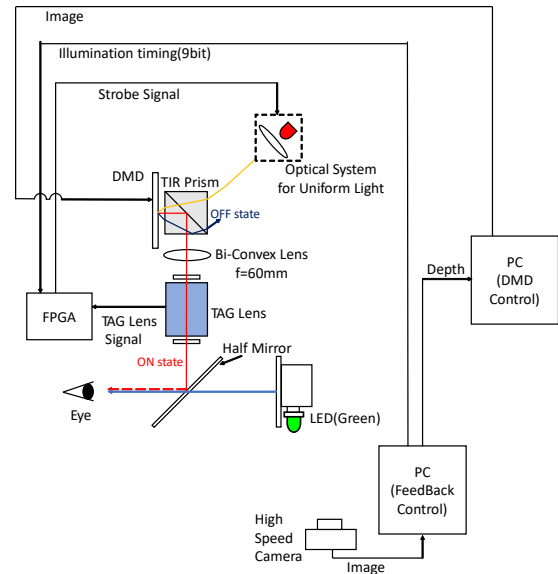


図 2: Schematic diagram of the developed system.

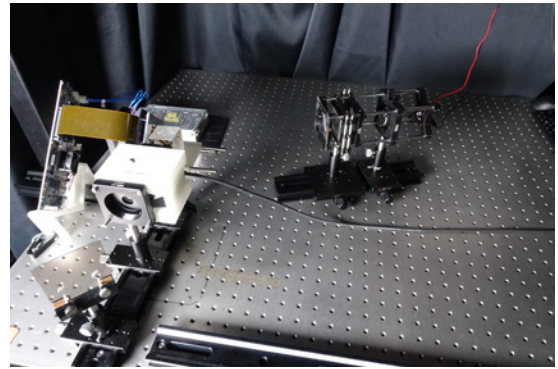


図 3: Photograph of overall system.

を提案する。外界に応じて提示像を変更するため、PC からフレームごとに制御できる DMD(特注品、東京エレクトロニクス)を導入した。フィードバック制御を行い、実物体を追従する PC(フィードバック制御 PC) と実物体の奥行情報をもとに DMD を制御し提示像を変更する PC(DMD 制御 PC) の 2 つを組み合わせる。これにより、実物体の奥行位置と同じ奥行き位置に虚像を提示しつつ、外界の状況に応じて提示像の変更を実現する。

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二つ組み分けて作成した。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、緑色 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

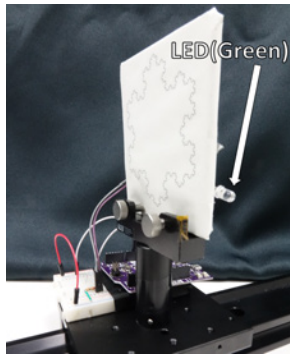


図 4: Photograph of real objects used in experiments.

表 1: Components of the system.

Components	Model number	Manufacturer
DMD	特注品	TOKYO ELECTRON DEVICE LIMITED
TIR Prism	PS912	ThorLabs
TAG Lens	TAGLENS-T1	Mitutoyo Corporation
Camera Lens	HF12.5HA-1B	Fujinon
High Speepd Camera	GX-5 C-Cam	nac
FPGA	MAX10 10M50DDAF484C6GES	Intel
LED(Red)	OS5RKA5111P	OptoSupply
LED(Green)	OSG58A5111A	OptoSupply
MemoLink	LPC-493103	Interface
MemoLink	LPC-49104	Interface
DIO	PEX-292366	Interface

体を横から撮影する。撮影画像はフィードバック制御 PC に送られ、撮影画像を二値化し、画素重心を求める。求めた画素重心を実物体に取り付けられた緑色 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ミングを算出する。フィードバック制御 PC は推定奥行位置を DMD 制御 PC に、ストロボ発光タイミングを FPGA に送信する。DMD 制御 PC は推定奥行位置をもとに提示像を決定し、DMD の提示像を更新する。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いつつ、提示像を制御する。フィードバック制御用 PC と DMD 制御 PC 間の推定奥行位置の送受信は共有メモリによって行っている。

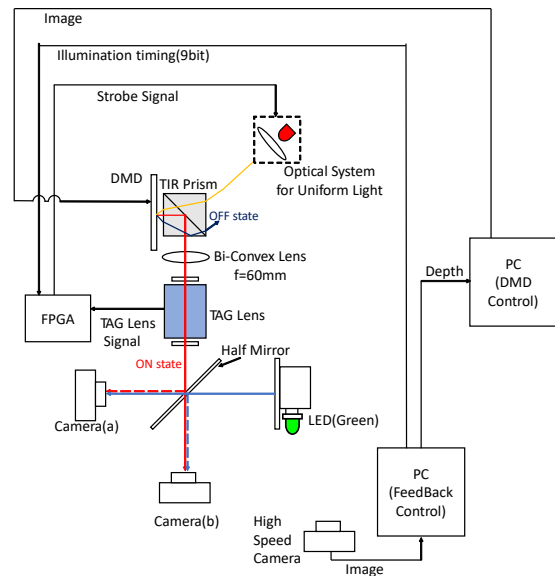


図 5: Schematic diagram of experimental environment.

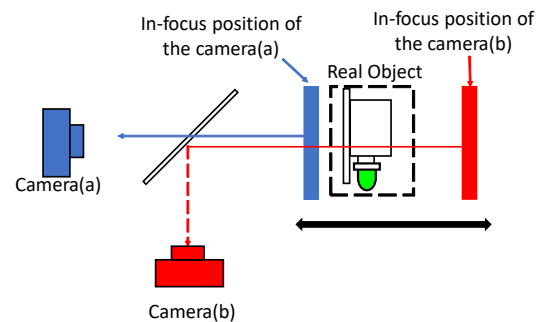


図 6: The focus position of Camera (a) and Camera (b) and its relation to the real object.

#### 4. 提示像ミリ秒制御実験

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を行いつつ、提示像を制御することができ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)(DSC-RX10M2,SONY) とカメラ (b)(NEX-5,SONY) を用いた。提示像は実物体の推定奥行距離に応じて変化するようにしており、ハーフミラーから実物体までの推定奥行距離 (mm) を表す数字を像として提示する。

構築したシステムにおいて追従を行い、実物体を奥行方法に前後させ、虚像の変化をカメラ (a)、カメラ (b) で撮影した。カメラ (a) は提示像が 460 であるときに合焦させ、カメラ (b) は提示像が 999 であるときに合焦させた状態で撮影を行った。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) は提示像が 460 であるときに撮影した画像である。図 7(a-2)、(b-2) は提示像が 999 であるときに撮影した画像である。図 7(a-1) では実物体に印刷された図形と提示された数字 (460) 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



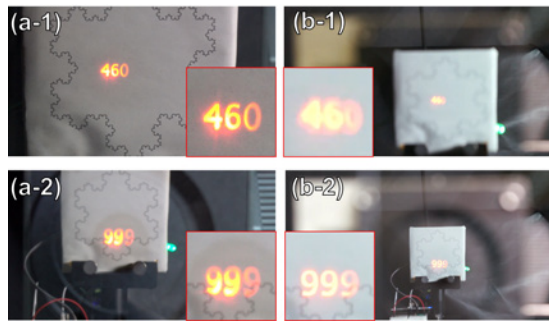


図 7: Photographs of the presented numbers 460 and the real objects (a-1), (b-1), and presented numbers 999 and the real objects (a-2), (b-2). The images on the left were taken by adjusting the focus position of the camera to the number 460 that was presented (a-1), (a-2), and the focus position of the camera to the number 999 that was presented (b-1), (b-2). The images on the right were reversed left and right considering the effect reflected by half mirror. The image surrounded by the red line in the corner is a cropped and enlarged version of the presented image.

提示された数字 (460) 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数字 (999) 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数字 (999) 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を行いつつ、提示像を制御できていることが確認できた。

## 5. 結言

本発表では、物体の位置に応じて提示像と提示奥行位置を共にミリ秒の低遅延で制御することを目的とする手法を提案した。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、実物体の奥行位置に虚像を提示しつつ、その奥行位置に応じて異なる提示像ができていたことが確認できた。今後は低遅延性についての検証を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は科研費 18H03271, 20K20626, 21H03458, 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. Tippetts, 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] 深野, 鈴木, 奥. 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. 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2020.
- [12] 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.