



1000volumes/s 高速体積型ディスプレイ用光学系の基礎評価

Fundamental evaluation of optical system
for 1000volumes/s high-speed volumetric display

鈴木康平¹⁾, 春原岳²⁾, 奥寛雅¹⁾

Kohei Suzuki, Gaku Sunohara, 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, t191d047@gunma-u.ac.jp)

2) 群馬大学理工学部 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

概要 : 提案されている 1000volumes/s 高速体積型ディスプレイでは, 液体内部超音波の高速共振により焦点を数 10kHz 以上で振動できる Tunable Acoustic Gradient index (TAG) レンズを利用した光学系の利用が想定されている. 本発表では TAG レンズによる提示像の奥行位置の変化をカメラと人間の目で測定することで提示像奥行位置選択原理の検証実験を行った結果を報告する.

キーワード : 立体・空中像ディスプレイ, オプティクス, HMD, 拡張・複合現実

1. はじめに

近年, Virtual Reality (VR) への関心が高まり, それと同時に視覚情報を提示するデバイスである Head Mounted Display (HMD) も注目を集めている. しかし, 現在まで提案されている HMD は解像度・フレームレート・視野の制約や[1], 輻輳と焦点調節の矛盾[2]など多くの問題を抱え, 理想的なデバイスが実現されているとは言えない. これに対し, 著者らのグループでは, 特にフレームレートと輻輳, 焦点調節間の矛盾を解決するために, 十分なフレームレートで輻輳・焦点調節を整合する三次元情報を提示する原理を提案している[3]. 当該原理は, Tunable Acoustic Gradient index (TAG) レンズと呼ばれる, 数 10kHz 以上の周波数で焦点距離を変調できる高速液体レンズと Digital Micromirror Device (DMD) を組み合わせ, 光源の発光タイミング制御で提示奥行位置を高速に選択するものである.

本発表では, この原理のうち, 照明発光タイミング制御による TAG レンズの焦点距離選択原理について実験系を構築し, 模擬眼となるカメラと人間の眼とでその焦点距離選択原理が有効であること実験的に検証した結果を報告する. 以下では, 最初に模擬眼となるカメラを用いた実験結果を述べ, 次に人間の眼で計測した結果について説明する.

2. カメラによる実験

2.1 実験目的

本実験では, TAG レンズを利用した投影光学系で LED

のストロボ発光タイミングによる焦点距離選択原理の模擬眼カメラに対する有効性を確認する.

2.2 実験システム

暗室中に構築した実験システムの構成を図 1 に示す. スクリーンに提示するパターンがあり, 投影用の光学系を通して模擬眼として利用するカメラでパターンが提示されている奥行位置を計測する. 本実験ではスクリーンとして紙に文字を書いたものを利用した. 投影用の光学系はレンズ L_1 と TAG レンズである L_2 を直列に配置したものを利用した. この系は TAG レンズの焦点距離の変化に応じてスクリーンの奥行位置を異なる場所に変更する機能を果たす.

TAG レンズは円筒形の容器内部に封入された液体粗密波の固有振動に応じて屈折力が変化する液体レンズである. 利用する振動モードに応じて固有振動数が変わり, また振動の振幅は屈折力の振幅に対応し, 一定範囲で調節可能である. 今回利用したのは, 固有振動数 69kHz で屈折力が ± 1 [dpt=1/m] 弱の範囲で変化するモードである. なお, 屈折力は焦点距離の逆数である.

レンズの屈折力は振動し続けるため, スクリーンを照明する LED 光源を振動の周期に同期させて 500ns などの極短時間発光させて特定の屈折力の時のみスクリーンを照明するようにする. TAG レンズから出力される同期信号を FPGA で受け取り, 特定の屈折力のタイミングで LED を点灯するための信号を出力するようにした. FPGA から出

力される信号は自作の駆動回路に入力され、LED をパルス駆動する。

構築した実験系で利用した機材を以下に列挙する。

- ・ 光学系
 - カメラレンズ(L₁):AI AF Nikkor 50mm f/1.4D(Nikon)
 - 可変焦点レンズ(L₂):TAGlens2.5 β (TAG OPTICS)
 - LED:OS5RKA5111P(赤色,75000mcd@60mA)
- ・ カメラ
 - カメラ:MQ022RG-CM(Ximeaa)
 - カメラレンズ:HF25HA-1B(Fujinon)
- ・ 光源:MEGA LIGHT 100(HOYA-SCHOTT)
- ・ FPGA:MAX10(ALTERA)

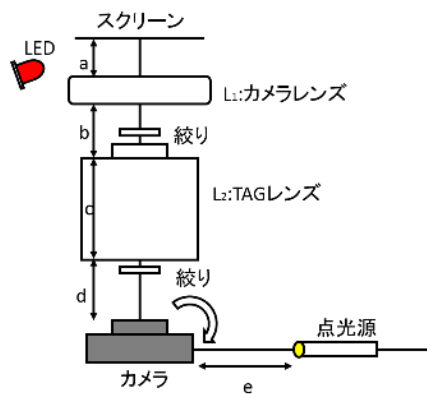


図1: カメラでの実験システムの配置。スクリーンからカメラレンズの後側主点(a):39.45mm, カメラレンズの前側主点からTAGレンズ(b):62.45mm, TAGレンズの長さ(c):80mm, TAGレンズ後ろからカメラの先端(d):53mm, 計測したカメラレンズの先端から点光源の距離(e)。

2.3 実験方法

実験は次の手順で行った。

1. 特定の焦点距離で像を提示するようにLEDの発光タイミングを指定する。今回の実験では異なる5つのタイミングについてそれぞれ測定を行った。
2. TAGレンズにより像の位置が変化するので模擬眼として利用するカメラのフォーカスを像に合わせてる。
3. フォーカスを固定し、点光源方向にカメラを向ける。点光源を左右に移動させ、カメラから取得した画像の点光源のボケが最も小さくなる範囲を記録し、その結果から発光タイミングの変化によるピントの位置と屈折力を求める。

点光源としては、ファイバー光源端面に直径0.3mmの穴をあけたアルミフォイルをかぶせて利用した。この直径はカメラの1画素より小さくなるように選定した。以上の手順を異なる5つの発光タイミングでそれぞれ測定した。

TAGレンズの屈折力が正弦波の振動をしていると仮定して、TAGレンズの同期信号からLEDの発光タイミングを決めることで焦点距離を指定しているが、実際にTAG

レンズの同期信号が出力されるタイミングと波の位相との関係は正確にはわからない。そこで、実測値からTAGレンズの屈折力を逆算した。この屈折力の推定値は次の人間の眼による実験でも利用する。

点光源にフォーカスが合う距離(e)として、測定したボケが最も小さい範囲の中央値を採用した。投影光学系は、この距離に対応する場所にスクリーンの像を結んだと考えられるので、この位置を投影光学系において、スクリーンと共役な位置とし、この位置が共役な点となるTAGレンズの屈折力を光学CAD(ZEMAX)を利用して求めた。

TAGレンズは屈折率が光軸に垂直方向に分布する、GRadient INdex (GRIN) レンズであり、その屈折率分布は式(1)[4]で表される。これと実験環境の数値を用いて光学CAD上で r^2 の係数を最適化により数値的に求める。

$$n(r, t) = n_0 + \left(n_a - \frac{n_a \omega^2}{4v^2} r^2 \right) \sin(\omega t) \quad (1)$$

ここで、 n_0 は静的屈折率で $n_0 = 1.46$ 、 v は液体中の音速で $v = 387.2[\text{ms}^{-1}]$ 、 ω は固有振動数で $\omega = 2\pi \times 69 \times 10^3$ 、 r はレンズ内部の光軸からの距離、 t は時間、 n_a は動的な屈折率振幅 $n_a \approx 10^{-5}$ [5]である。算出された共役関係を満たすような r^2 の係数を光学CADにより求めた。式(1)で屈折率分布が与えられる場合のTAGレンズの屈折力は以下の式(3)[4]で与えられるので、この式を利用して屈折力を求めた。

$$\delta(t) = \frac{1}{f(t)} = \frac{Ln_a \omega^2}{2v^2} \sin(\omega t) \quad (2)$$

ここでLはTAGレンズの大きさであり、 $L = 0.08\text{m}$ である。以上の手順によってカメラのフォーカスの位置から屈折力の算出を行った。

2.4 結果

5つの異なる焦点距離に対して計測された結果を表1に示す。この表ではボケが最も小さくなる範囲のカメラから点光源までの距離とその数値から算出した屈折力をまとめる。また、LEDのストロボ発光のタイミングは図2の波形のように変化するTAGレンズの1周期における、5箇所の位相に対応するタイミングを指定した。なお、TAGレンズのマニュアルによると同期信号は図2の位相0となる

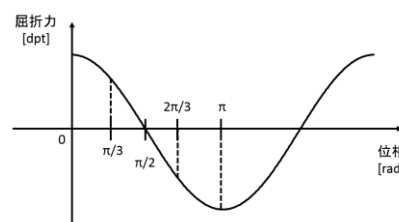


図2: TAGレンズの屈折力変化と発光タイミング

場所で出力されるとなっているが、実際には出力側や受信側の回路の遅延等があり正確に位相 0 の時点で出力されるとは限らないため、ここで指定している位相は目安であり、正確な位相はカメラのフォーカス位置から推定するというのである。

この結果から、物体を提示する位置を概ね 300mm から 500mm まで 200mm 変更することができることが読み取れる。また、提示する位置は LED の発光タイミングを電気的に変更することで制御できるため、TAG レンズの変調周期である 14 μ s 以内に高速に変更できる。

表 1:それぞれの発光タイミングによるカメラから点光源までの距離とそれから算出した屈折力

LED の発光 タイミング [rad]	ボケが最も小さくなる範囲[mm]		算出した屈折力 [dpt]
	最小値	最大値	
π	309.95	316.95	-0.81536
$2/3 \pi$	347.95	356.95	-0.21408
$1/2 \pi$	369.95	384.95	0.009912
$1/3 \pi$	408.95	436.95	0.54352
0	526.95	545.95	1.28576

3. 人間の眼による実験

3.1 実験目的

試作した投影光学系で LED のストロボ発光タイミングによる焦点距離選択原理の人間の眼に対する有効性を確認することを目的として、被験者実験を行った。

3.2 実験システム

利用した実験システムを図 3 に示す。スクリーンから投

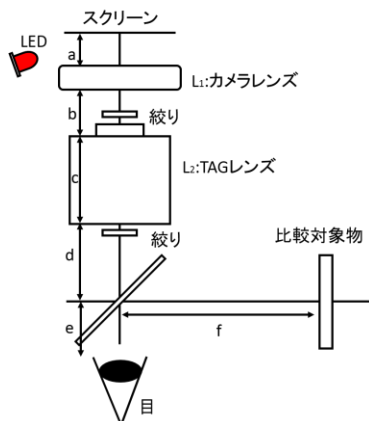


図 3: 人間の眼による実験における実験系の概要図。スクリーンからカメラレンズの後側主点 (a):39.45mm, カメラレンズの前側主点から TAG レンズ (b):62.45mm, TAG レンズの長さ (c):80mm, TAG レンズ後ろからハーフミラーの中心 (d):89.5mm, ハーフミラーの中心から被験者の目の距離 (e), ハーフミラーの中心から比較対象物までの距離 (f)

影光学系までは、2 節のカメラによる実験と同じものを用いた。カメラの代わりに人間が目で光学系を覗きスクリーンの像を観察するが、TAG レンズと目の間にハーフミラー (透過:反射=50:50, Edmund-optics) を設置し、同時に比較対象物も見られるようにした。比較対象物は白地に黒で文字を書いた紙を照明したものを用いた。比較対象物はハーフミラーで分割された左右方向の光軸上で左右に動かすことができるようにしてある。また、光学系の正面には目の位置を固定できるあご置き台を設置した。このシステムの写真を図 4 に、また実際に実験しているときの様子を図 5 に示す。

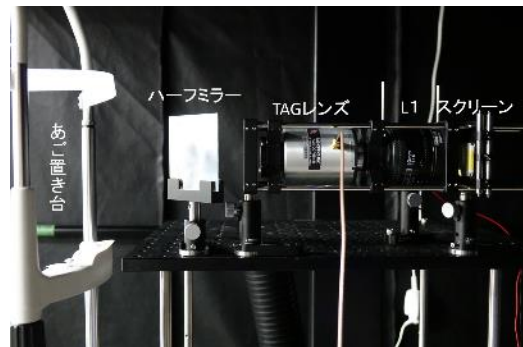


図 4: 実際に使用した光学系

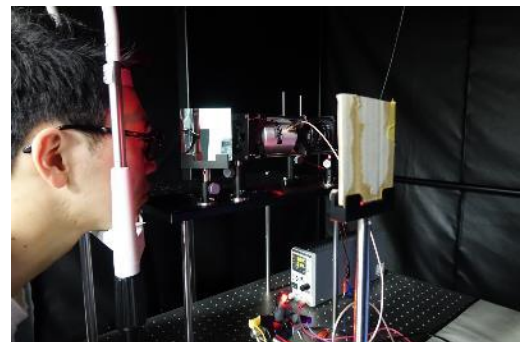


図 5: 実験の様子

3.3 実験方法

実験は暗室で行った。被験者は片目をガーゼで隠し、隠していない目でスクリーンの文字が中心に見えるようあご置き台を調節し頭を固定する。次に特定のタイミングで LED のストロボ発光を行い、スクリーンの像の提示位置を変える。被験者は TAG レンズによって結像する像と比較対象物が同じ位置になるよう、比較対象物を左右に移動して光軸上の奥行位置を変更する。被験者が同じ位置にあると判断した時点で図 3 における (f) の距離の測定を行う。以上の手順で 5 つの異なるストロボ発光のタイミングで (f) の測定を行った。ここでストロボ発光は実験 1 で使用した 5 つのパターンをランダムに行った。同様の方法でもう片方の目の測定を行った。実際の実験の様子を図 5 に示す。

3.4 実験結果

20 代の 7 名について、計測を行った。測定結果のプロッ

トを図6に示す。

測定値のプロットは3種の数値からなる。そのうち2つは右目と左目におけるフォーカスが合う対象までの距離で、図3における(f)の数値をそれぞれプロットした。もう1つは実験1の結果を使用しカメラから点光源までの距離の最小値と最大値の中心値に補正值を加え、今回の実験で比較できるように調整したカメラからフォーカスが合う位置までの距離である。縦軸はハーフミラーを基準とした時のハーフミラーから像までの距離、横軸は屈折力を表している。

被験者の実験についての感想では、目のフォーカスを合わせることの難しさや、合焦の判断の難しさに関するものが多かった。また、実験に対する疲労感を訴える感想もあった。通常的生活で、片目の焦点調節のみで遠近を判断することはあまりないため、難しさや疲労につながったと考えられる。

今回の実験結果では屈折力が大きくなるにつれカメラから見た像の位置も遠くになっている。そのため焦点距離選択原理はカメラで有効であることがわかった。一方、人間の眼の場合は全体の傾向としてカメラと同様の応答が見られるが、カメラと人間の眼の数値で大きくずれている箇所がある。これは、焦点調節のみから遠近感を得ることが人間にとって比較的難しい作業であることが原因であると推測される。

4. おわりに

本発表では、照明発光タイミング制御によるTAGレンズの焦点距離選択原理について実験系を構築し、模擬眼となるカメラと人間の眼とでその焦点距離選択原理が有効であること実験的に検証した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18H03271 の助成を受けたものである。

参考文献,

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 回バーチャルリアリティ学会大会, 2019
- [4] E. McLeod *et al.*, *J. Appl. Phys.* 102, 033104(2007)
- [5] A. M.-Blondin *et al.*, *OPTICS LETTERS*, vol33, No. 18 .September 15 2008 p1

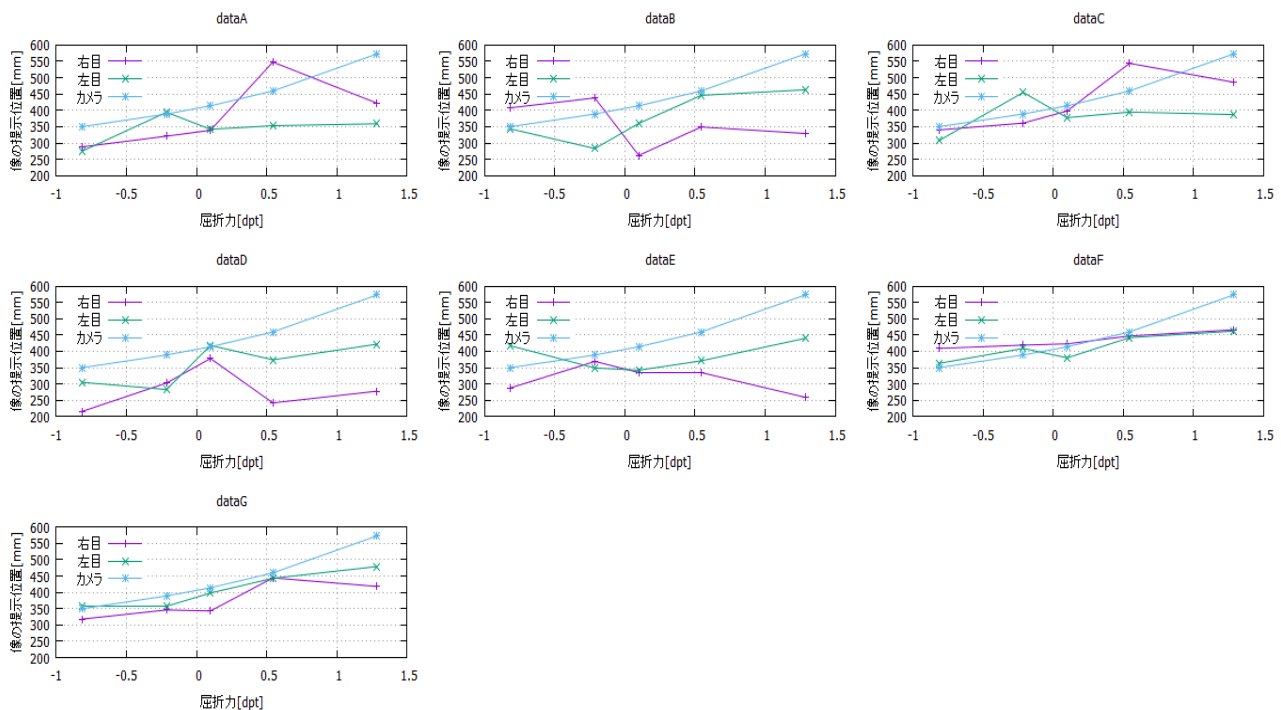


図6:被験者が認知した像提示位置の結果。