

## Suppressed Nonlinearities: The missing piece in holographic display technology

Boaz Jessie Jackin, Naoto Tsutsumi and Kenji Kinashi

Kyoto Institute of Technology, Japan

Holography was considered as the ultimate technology capable of delivering a 3D head up display device once for all. Though being an active area of research for half a century, the promise is yet to be fulfilled. The hologram being '*a single element device*', is the most attractive feature but at the same time, it is also the main reason behind the failure of practical realization. Several techniques that compromise on the simplicity of hologram (scanning, tiling, demagnifying, space-time multiplexing, etc) were proposed but those compromises made the system significantly complex for practical (commercial) realization. In this article we will try to unwrap the reason behind failure from a different perspective and propose a potential solution. (1 ページにつづく)

### 目 次

1. 卷頭言 : Suppressed Nonlinearities: The missing piece in holographic display technology  
Boaz Jessie Jackin, 他 表紙
2. ホログラフィーを用いた偏光伝播の超高速動画像イメージング技術  
井上智好, 他 5
3. 実時間対話型ホログラムの生成と表示 ~写実的な描画による表現力の向上~  
湯浅尚樹, 他 9
4. 放射状点拡がり関数のホログラム高速化手法への適用  
安木大貴, 他 12
5. ウェーブレット変換による3次元シーン圧縮を用いた  
ホログラム高速計算手法 : WASABI2 の提案  
塩見日隆, 他 16
6. 計算機合成ホログラムにおけるフラクタル圧縮を用いた物体光データの圧縮手法  
大井裕貴, 他 20
7. 非干渉マスク転写を用いた全方向視差高解像度 CGH のアーチ形状化  
玉置 翼, 他 24
8. CGH における収束光を用いたスペックルレス再生像の複数視点への表示  
押野見達哉, 他 28
9. 2面コーナーリフレクターアレイとホログラフィック光学素子による  
背景透過空中ディスプレイ  
中尾 勇, 他 32
10. 次回研究会のお知らせ  
巻末

Holography is described as a technique for storing complete light information (amplitude + phase) on a medium and then being able to reproduce the same from the medium later (static) or simultaneously (dynamic). The medium is usually a thin sheet of material in the case of classical holography, while modern holography employs spatial light modulators (SLM) and digital micro mirror devices (DMD), as the medium. The medium used in modern holography are dynamic (written & re-written in real-time) while in the case of classical holography, most of them are static except photorefractive and non-linear optical materials. Considering 3D display application, dynamic images are more pleasing to observe, so modern holographic medium (SLM/DMD) and photorefractive holography are the most preferred devices. Modern holographic medium (SLM/DMD) are electric-writable and hence can directly playback a 3D object when the fringe pattern (representing a digital 3d-object) is displayed on them as shown in Fig.1(a). The best light modulating device available in the market today has  $4K \times 2K$  pixels @ pixel pitch of  $4\mu m$ (Fig.1(a)). But a practical holographic display requires  $\sim 200K \times 100K$  pixels @ pixel pitch of  $0.5\mu m$  for a small display of size  $5cm \times 5cm$  with a viewing angle of 30-degrees (Fig.1(b)). This huge demand is to satisfy the space-bandwidth required to generate the complete set of angular spectrum of plane waves (as defined by diffraction theories), that matches the display requirements. *A very non-technical explanation for such a huge requirement is that, the hologram is a single device (screen) that shoulders all the burden of converting an input (collimated/diverging) light beam into the required 3D light field.* Many ideas were developed to share the burden through addition of demagnifying optics, scanning setups, tiled arrangement, space & time multiplexing etc. But none of them managed to satisfy the requirements of a consumer grade 3D display. Jackin et.al [1], followed the same strategy, to develop an integral imaging-based 3D display by adding a micro-lens array to reduce the workload of light modulator. The micro-lens array was fabricated as a static hologram of size  $200K \times 100K$  pixels and was employed to convert 2D multi-view images from a dynamic 2D display of size  $4K \times 2K$  pixels into 3D light-field reconstructions. This strategy successfully bridges the digital capabilities with 3D-display requirements and 3D images of size  $20cm \times 10cm \times 5cm$  (depth) could be successfully viewed by naked eye for a viewing angle of 10-degrees. But it was soon realized that the system had an inherent limitation that the 3D scene cannot be deeper than  $5cm$  due to limitations imposed by the ‘integral imaging’ technique used. So, it made us turn back to holography again, but as shown in Fig.1, the key issue to be solved is the ‘huge mismatch’ between the specification of digital devices and the requirement of a 3D-display. An efficient solution to bridge the gap does not exist till date.

Let us now take a closer look at the space-bandwidth requirement from a different perspective. The recording and reconstruction process in holography strictly obeys the *principle of linear superposition*, both spatially and temporally. Let us consider a plane beam  $I_a$  (reference) with wave vector  $k_a$  and a diverging beam  $I_b$  (object) with wave vector  $k_b$  interferes to create the grating with grating vector  $K=k_a-k_b$  as shown in Fig.2(a,b). The diverging beam can be decomposed into a

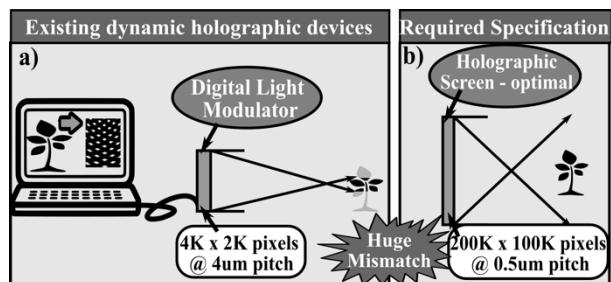


Figure 1. a) Specifications of electro-holography, b) the optimal requirements of practical holography display

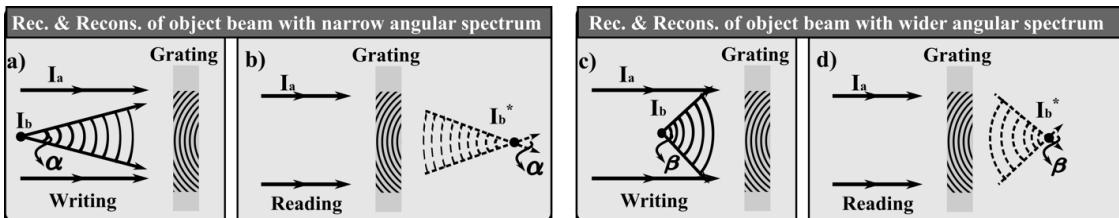


Figure 2. Holographic recording and reconstruction of a) object beam with narrow angular spectrum and, b) object beam of wider angular spectrum, showing reconstructions cannot exceed the input spectral width.

set of plane waves and is represented by the series ( $k_b = k_1 + k_2 + \dots + k_n$ ) known as the angular spectrum of plane waves. A wider angular spectrum of object beam will write a grating with larger spatial frequency (bandwidth) according to the rules of linear dynamics. This means a grating written by the superposition of the object beam  $I_b$  of angular extent  $\alpha$  and a collimated reference beam  $I_a$  will be able to generate a reconstructed beam  $I_b^*$  with an angular spectrum not exceeding  $\alpha$  as shown in Fig.1(a,b). To have a larger angular spectrum reconstructed, it is required to increase the angular extent ( $\beta$ ) of the object beam  $I_b$  as shown in Fig.2(c,d). This will record a grating of larger spatial frequencies compared to earlier one thereby providing a larger angular spectrum during reconstruction. (Though it is also possible to generate different angular spectra by changing the reference beam, it involves additional optics and compromises on the size, and hence is not considered here). Therefore, it can be concluded that, the maximum amount of angular spectrum available during reconstruction is determined by the total amount of spatial frequencies present during recording. In other words, only the amount of information recorded is retrievable and to retrieve more it is necessary to record more, thereby preserving linearity. The largest spatial frequencies delivered by existing digital light modulating devices are far away from ideal angular spectrum requirement of a 3D display (Fig.1). The reported methods to bridge the gap (multiplexing, scanning, de-magnifying, etc) were only an attempt to increase the spatial frequencies during recording so that the angular spectrum during reconstruction can be enlarged. Though this is a right approach to the problem, “another promising approach would be to find out ways to increase the angular spectrum during reconstruction without increasing the spatial frequencies during recording. The only way that this could happen is by overriding the principle of linear superposition, which is to introduce nonlinearities”. The following explains one possible way of achieving this.

Four-wave mixing (FWM) is popularly known as a mechanism that can produce optical phase conjugation, i.e., it reproduces a copy of the input light signal (object) in its phase conjugate form. FWM is defined as the process where a pump beam (reference) and a signal beam (object) interfere to write a grating (hologram) in a material which when illuminated with a third beam (reference) will produce a fourth beam which is the phase conjugate of signal beam (object). This phenomenon is like classical holography except that the recording and reconstruction happens simultaneously. Such holographic reconstructions were reported using photorefractive crystals and polymers

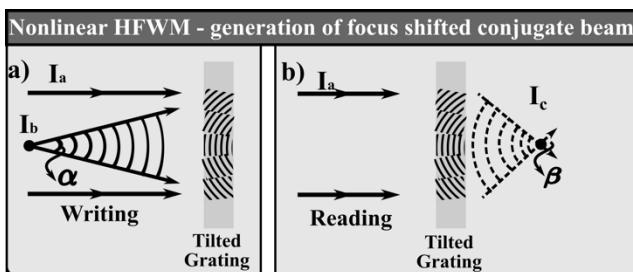


Figure 3. a) HFWM Recording using narrow angle beam and b) Reconstruction of a wide-angle beam

and is also sometimes called as holographic four wave mixing (HFWM). The above can be used as a 3d-display where goal is to achieve a perfect phase conjugation of the input [2]. Any deviation/mis-match is considered as an unwanted effect. In other words, “*the HFWM system was forced to work in the limit of linear dynamics and any other effects, mostly due to its nonlinear dynamics, were discarded or compensated for*”. The notable contributions of photorefractive optics worked within the limits of linear dynamics; eg., i) optical phase conjugation, ii) optical image processing, iii) optical interconnection, iv) optical neural network, v)3D real-time holographic displays etc. A few other contributions like i) Image amplification and ii) spatial amplification, iii) optical resonators etc utilized the nonlinear spatio-temporal dynamics of the photorefractive phenomena. But so far, we have not seen any noteworthy contributions where the spatio-temporal dynamics were utilized to bridge the gap between low-bandwidth digital systems with the high-bandwidth real-world optical requirements (3d-display, 3d-imaging etc). The following explains what happens when the nonlinearities are unleashed.

Though a photorefractive HFWM process involves 4-beams, it can be approximated as a 2-beam setup shown in Fig.3. The presence of additional beams only assists in simultaneous read/write operation (through photorefractivity) and hence can be safely discarded for following discussion on nonlinearity. The grating being written due to beams  $I_a$  and  $I_b$  in a HFWM process (Fig.3(a)) is represented by  $K_{PR} = K + [\varphi_b(z) + K_z]$ , where  $K$  corresponds to the grating written by the linear HFWM process (same as earlier), while the additional term  $[\varphi_b(z) + K_z]$  represents the nonlinearity where,  $\varphi_a$  is the phase profile of the object beam  $I_b$  and  $K_z$  is the component of grating vector along the direction of propagation[3]. What it means is that “*each component in the angular spectrum of the object  $I_b$  will write a normal grating ( $K$ ) plus a tilt in its orientation in accordance with the angle  $\varphi_b(z)$  it makes with the axis*”. The tilt in the orientation is caused by the complex (real & imaginary) coupling-coefficient which possesses a dispersive relation with respect to the angle of the incident beam. The grating tilts shown in Fig.3 are only an imaginary representation. Now, when the grating is read by the reference, the phase conjugate beam will converge even more to reconstruct the point  $I_c$  at a shorter distance as shown in Fig.3(b). In other words, “*an additional phase curvature has been added to the grating vector, without any addition/change to the input beam, only by exploiting the nonlinearity*”. In 3d-display terminology, an output with large viewing angle (wide angular spectrum) beam has been generated from an input with small viewing angle (narrow angular spectrum), which can effectively close the gap shown in Fig.2. But usually, these effects are considered as unwanted and were usually arrested in a HFWM process by setting proper experimental conditions. The above mentioned (angular dispersion) is only one among a plethora of other nonlinear dynamic effects such as sub-harmonic generation, oscillation, chaos, etc., that exists in a photorefractive process [4].

Though these non-linear effects and their interesting features were reported in the late 80’s and early 90’s, the benefits were not harnessed. The main reason is that the materials used back then were photorefractive crystals which were expensive to grow, difficult to optimize and are larger in thickness (making numerical simulations difficult). Then entered a new class of photorefractive materials in the late 90’s called organic photorefractive materials (a.k.a photorefractive polymers) which boasts higher performance compared to their crystal counterparts through a phenomenon called ‘orientational enhancement’. This resulted in a 100 micron thick polymer achieving the same/higher performance than that of a few cm thick crystal, thereby

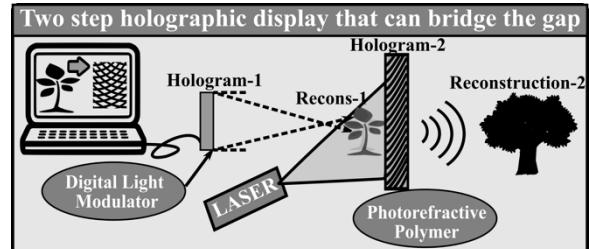
making theoretical/numerical studies feasible. The ease of fabrication and parameter tuning of the polymer material are added advantage[5]. But again most of these benefits were channeled into realizing real-time holographic 3D displays, which means only the linear dynamics of the system was put to good use.

By combining the nonlinearities offered by HFWM, and the ease-of-synthesis offered by photorefractive polymers, a dynamic 3D holographic display that effectively bridges the gap, can be realized as shown in Fig.4. The photorefractive medium is real-time light-writable only and hence needs the assistance of an electric light modulating device (an intermediate component) to first convert the 3d-object data to light signals. So low bandwidth digital light modulators are first used to convert 3d-object data into light signals using computer generated holography (CGH) technique. The reconstructed object is used as the input object beam for HFWM process. Now the nonlinearities of the HFWM can be put to work on the low space-bandwidth object beam so that an object with sufficiently larger space-bandwidth can be reconstructed (Reconstruction-2).

To conclude, “*the photorefractive phenomena possess rich nonlinear dynamics which can be utilized to generate the extra work required to match the gap between digital light modulators and 3d display requirements, without significant increase in complexity*”. These nonlinearities enables the limited input to evolve itself in space and time and generate a variety of output forms, with no additional input required. Moreover, conventional holography is a ‘local’ process where ‘light interacts with material’ while HFWM is ‘nonlocal’ where ‘light interacts with light’, which opens the door to a plethora of nonlinear phenomena. This fundamental difference marks the above mentioned as an unexplored area in holographic display technology. It is required to make close collaborations between polymer science and optics to conduct fundamental and practical studies on the photorefractive nonlinear effects in-order to reap the benefits.

### References:

- [1] Jackin et. al, "Digitally designed holographic optical element for light field displays," Opt. Lett. 43, 3738-3741 (2018)
- [2] Tsutsumi et.al, "Real-time three-dimensional holographic display using a monolithic organic compound dispersed film," Opt. Mater. Express 2, 1003-1010 (2012)
- [3] Papen et.al, "Lateral and focal shifts of phase-conjugated beams in photorefractive materials," Opt. Lett. 14, 745-747 (1989)
- [4] L. Solymar et.al, “The Physics and Applications of Photorefractive Materials”, Clarendon Press, (1996)
- [5] Tsutsumi, N. Molecular design of photorefractive polymers. Polym J 48, 571–588 (2016).



*Figure 4 a) Schematic of a two-step holographic display device using electro-holography & HFWM*

## ホログラフィを用いた偏光伝播の超高速動画像イメージング技術

井上 智好<sup>1,2</sup> 西尾 謙三<sup>3</sup> 久保田 敏弘<sup>4</sup> 栗辻 安浩<sup>5†</sup>

1 京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町

2 日本学術振興会 〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1

3 京都工芸繊維大学 高度技術支援センター 〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町

4 株式会社久保田ホログラム工房 〒611-0042 京都府宇治市小倉町西畑 34-1-609

5 京都工芸繊維大学 電気電子工学系 〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町

E-mail: † awatsuji@kit.ac.jp

**あらまし** 光の伝播を動画像で記録し、観察することはレーザ光による細胞治療やレーザ加工など、レーザ利用技術の発展に有用である。本論文では、光が伝播する様子とその光を構成する複数の直線偏光成分を同時に動画像で記録し、スローモーション観察できる技術について紹介する。提案技術では、光をスローモーション観察する技術として、light-in-flight ホログラフィを用いた。また、直線偏光成分の可視化には、ホログラフィにおいて物体光と参照光とで偏光方向が同じ場合は再生像が明るくなり、物体光と参照光の偏光方向が直交している場合は、再生像が暗くなる性質を利用した。実証実験では、拡散板および複屈折性を有する方解石中を伝播する光を直線偏光成分ごとに記録し、スローモーション観察することに成功した。

**キーワード** ホログラフィ、超高速イメージング、偏光イメージング

## Ultrafast motion picture recording technique for polarized light propagation by using holography

Tomoyoshi Inoue<sup>1,2</sup> Kenzo Nishio<sup>3</sup> Toshihiro Kubota<sup>4</sup> and Yasuhiro Awatsuji<sup>5†</sup>

1 Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki Goshokaido-cho,  
Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

2 Japan Society for the Promotion of Science, Kojimachi Business Center Building, 5-3-1 Kojimachi, Chiyoda-ku,  
Tokyo 102-0083, Japan

3 Advanced Technology Center, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Goshokaido-cho, Sakyo-ku, Kyoto  
606-8585, Japan

4 Kubota Holography Laboratory Corporation, Nishihata 34-1-609, Ogura-cho, Uji, Kyoto 611-0042, Japan

5 Faculty of Electrical Engineering and Electronics, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki Goshokaido-cho,  
Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

E-mail: † awatsuji@kit.ac.jp

**Abstract** Ultrafast optical imaging techniques for light propagation are applied in the various fields such as physics, chemistry, and biomedicine. In this paper, we report an imaging technique to visualize the behavior of the polarization state of light pulse propagation with four different linear polarization components. To obtain the polarization states of light pulse propagation simultaneously, we propose a space-division multiplexing technique for holograms. We recorded motion pictures of light pulse propagation through a diffuser plate and a calcite, respectively.

**Keyword** Holography, Ultrafast imaging, Polarization imaging, light pulse propagation

### 1. はじめに

レーザ光を利用した技術が理化学、工業、医療など様々な分野で利用されている。それらの中でも極めて

短い時間幅で光を照射できる超短パルスレーザ光はその特性を利用した、材料の超微細加工や生細胞治療への応用が期待されている [1,2]。それら超短パルスレーザ光を利用した技術の発展には、超短パルス光の振

る舞いを画像、特に動画像で記録し、観察することは必要不可欠である。しかし、光は真空中を 30 万 km/s で進む光を直接捉えることは、世界最高性能の高速度カメラを以ってしても困難である。

近年、このような超短パルス光の振る舞いを可視化する技術として、様々な技術が提案されている [3-5]。その中でも、light-in-flight ホログラフィは超短パルス光の伝播を記録・観察する技術として有望である [7-17]。Light-in-flight ホログラフィは、ホログラフィの記録光源に低コヒーレンス光源や超短パルスレーザなどの時間コヒーレンスの低い光を用いて、超短パルス光の伝播を動画像で記録・観察する技術である。この技術は逐次記録が不要であり、原理的に 1 度の露光で超短パルス光の伝播を記録できる。これまでに、この技術を利用して超短パルス光の回折・全反射・回折や光学媒質内を伝播する超短パルス光を記録・観察した例が報告されている。また、3 次元情報を粒子画像流速測定法に適用した例も報告されている [10]。しかし、light-in-flight ホログラフィをもってしても光が有する多数の有益な物理量のうち、強度情報のみを記録するという課題があった。著者らは、light-in-flight ホログラフィを応用して、光が伝播する様子をその光を構成する複数の直線偏光成分を同時に動画像記録し、それらをスローモーション観察できる技術を開発した。本論文では、その技術の原理および当該技術を利用して拡散板や複屈折性を有する方解石中を伝播する超短パルス光の伝播を記録・観察した例を紹介する。

## 2. 提案技術

図 1 に、提案技術の原理の概略図を示す。光の偏光情報の可視化には、直線偏光成分の可視化には、ホログラフィにおいて物体光と参照光とで偏光方向が同じ場合は再生像が明るくなり、物体光と参照光の偏光方向が直交している場合は、再生像が暗くなる性質を利用した。すべての直線偏光成分が同じ強度を持つ円偏光に調節した参照光パルスに対して、物体光パルスを干渉させる。得られた干渉縞からの再生像は、物体光パルスの直線偏光方向に応じた強度分布を持つ。つまり、物体光の偏光情報を強度情報に置き換えて観察する。実証実験の際には、ホログラムを空間的に区切り、この干渉の性質を全区画で同時に記録することで、一度の記録で伝播する光を構成する複数の直線偏光成分を観察可能とした。

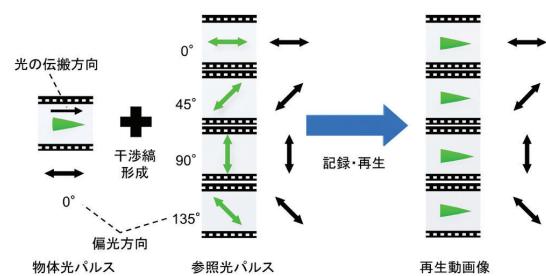


図 1. 提案技術の原理概略図

図 2 に、提案技術の記録光学系の概略図を示す。光源から発された超短パルス光をビームスプリッタで二分する。二分した一方をコリメートし、光の伝播を観察したい物体と拡散板を組み合わせたものあるいは拡散物体に斜入射させる。斜入射させた光パルスは物体を通過した後に拡散板あるいは拡散体によって拡散され、記録対象である物体光パルスが発生する。二分したもう一方を、 $1/4$  波長板を通過させコリメートした後、複数の直線偏光の空間分布を鉛直方向に与える偏光フィルタアレイを通過させ、記録材料に斜入射させる。この偏光フィルタアレイによって、先述した干渉の性質を記録材料全体に適用することで、シングルショットで複数の直線偏光成分を記録できる。

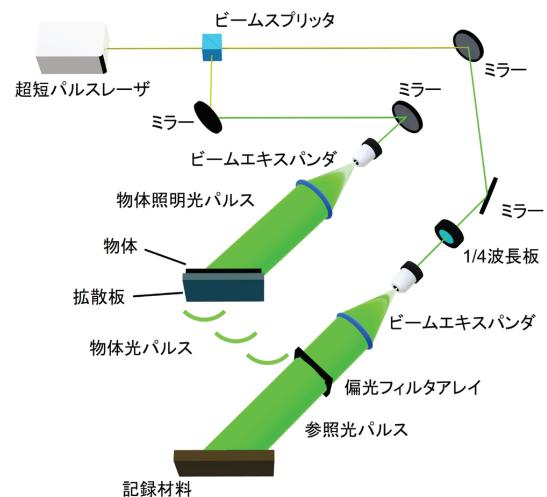


図 2. 記録光学系概略図

図 3 に、提案技術の再生光学系の概略図を示す。再生時には、記録に用いた超短パルス光の中心波長とできるだけ近い波長の連続波レーザを再生照明光として用いる。レーザ光をコリメートし、記録時の参照光パル

スと同じ角度でホログラムに斜入射させる。記録時に使用した偏光フィルタアレイの分割数に応じた数のホログラムが記録されている。これらのホログラムは物体光の異なる直線偏光成分を記録しているため、ホログラムの観察点を鉛直方向に変化させれば、観察したい直線偏光成分に応じた物体光パルスの再生像が得られ、水平方向に観察点を移動させれば、超短パルス光の伝播を時間的・空間的に連続した動画像として観察できる。

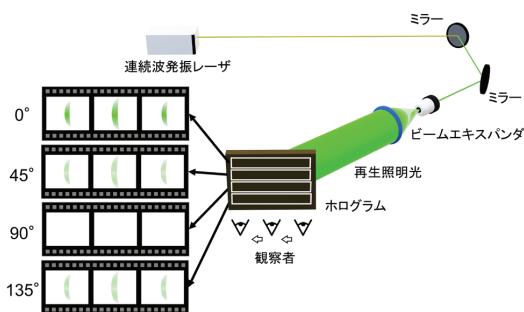


図 3. 再生光学系概略図

### 3. 実証実験

提案技術を用いて、拡散板上を伝播する超短パルス光の伝播を記録・観察した結果を図 4 に示す。実証実験では、図 4(a)に示すように偏光フィルタを組み合わせた物体を円偏光に調節した物体光パルスの光路上に挿入し、物体光パルスへ  $0^\circ$ ~ $135^\circ$  直線偏光成分の空間分布を与えた。図 4(b)には、記録総時間 56.8 ps の動画のうち、一部のフレームを抜き出したものを表示している。図 4(b)の各直線偏光成分の再生像のフレーム間隔は 10.2 ps である。記録した動画像の図 4(b)の左に示す数字は、それぞれの再生像の直線偏光の角度に対応している。図 4(b)を見ると、同一の物体光パルスを記録しているにもかかわらず、再生した像は異なる強度分布を示している。つまり、物体光パルスがもつ直線偏光成分を、強度分布に置き換えて記録できていることが分かる。

提案技術を用いて、方解石中を伝播する超短パルス光の伝播を記録・観察した結果を図 5(a)に示す。実証実験では、物体光パルスの  $0^\circ$ ~ $135^\circ$  直線偏光成分を捉えた。記録総時間 74.4 ps の動画のうち、一部のフレームを抜き出したものを図 5(a)に表示している。図 5(a)の各直線偏光成分の再生像のフレーム間隔は 7.9 ps である。図 5(a)の左に示す数字は、それぞれの再生像の直線偏光の角度に対応している。

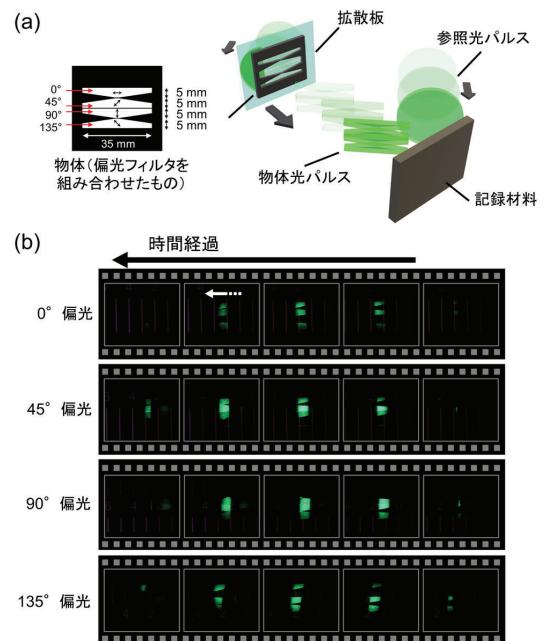


図 4. 拡散板上を伝播する超短パルス光。(a) 記録概略図(b) 伝播する超短パルス光の異なる 4 つの直線偏光成分。

図 5(b)は、図 5(a)内の黄色枠で囲まれたフレームを抜き出したものである。また、図 5(c)は再生像の模式図を示している。図 5(b)から、 $0^\circ$  直線偏光成分の再生像には 2 つの粒上の超短パルス光が観察できる。一方、 $135^\circ$  直線偏光成分の再生像には 1 つだけ超短パルス光が観察できる(図 5(a)下段)。よって、光の伝播の様子とその偏光情報を同時に動画像として観察できていることが分かる。

### 4. まとめ

本論文では、light-in-flight ホログラフィを応用した、超短パルス光が伝播する様子をその超短パルス光を構成する直線偏光成分ごとに同時に動画像で観察できる技術を報告した。偏光成分の可視化には、ホログラフィにおける光の干渉の性質を利用した。本技術は、偏光を利用した超短パルスレーザによる材料加工やメタマテリアルの解析への応用が期待できる。

### 5. 謝辞

本研究の一部は、(独)日本学術振興会 科学研究費助成金 基盤研究(A) 課題番号 17H01062 ならびに学術変革領域研究(A)課題番号 20H05887 によって行われた。

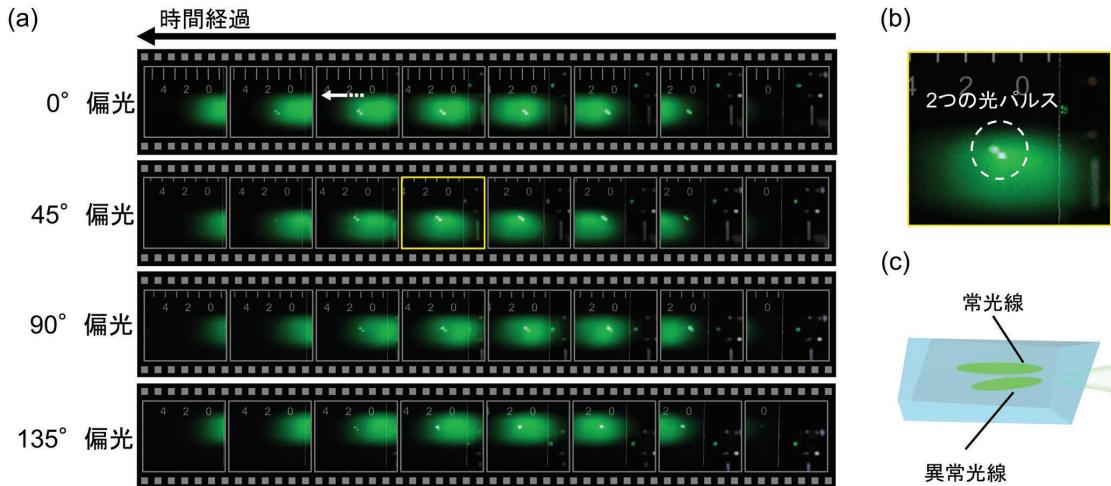


図 5. 方解石中を伝播する超短パルス光. (a)伝播する超短パルス光の異なる 4 つの直線偏光成分. (b)2 つに分裂した伝播する超短パルス光. (c)再生像の概略図.

## 文 献

- [1] L. H. Nicholls, F. J. Rodríguez-Fortuño, M. E. Nasir, R. M. Córdova-Castro, N. Olivier, G. A. Wurtz, and A. V. Zayats, "Ultrafast synthesis and switching of light polarization in nonlinear anisotropic metamaterials," *Nat. Photonics* **11**, 628–633 (2017).
- [2] X. Tsampoula, V. Garcés-Chávez, M. Comrie, D. J. Stevenson, B. Agate, C. T. A. Brown, F. Gunn-Moore, and K. Dholakia, "Femtosecond cellular transfection using a nondiffracting light beam," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 053902 (2007).
- [3] J. Liang and L. V. Wang, "Single-shot ultrafast optical imaging," *Optica* **5**, 1113 (2018).
- [4] G. Gariepy, N. Krstajić, R. Henderson, C. Li, R. R. Thomson, G. S. Buller, B. Heshmat, R. Raskar, J. Leach, and D. Faccio, "Single-photon sensitive light-in-flight imaging," *Nat. Commun.* **6**, 6021 (2015).
- [5] R. Warburton, C. Aniculaesei, M. Clerici, Y. Altmann, G. Gariepy, R. McCracken, D. Reid, S. McLaughlin, M. Petrovich, J. Hayes, R. Henderson, D. Faccio, and J. Leach, "Observation of laser pulse propagation in optical fibers with a SPAD camera," *Sci. Rep.* **7**, 43302 (2017).
- [6] V. V. Tuchin, "Polarized light interaction with tissues," *J. Biomed. Opt.* **21**, 071114 (2016).
- [7] D. I. Staselko, Y. N. Denisyuk, and A. G. Smirnov, "Holographic recording of the time-coherence pattern of a wave train from a pulsed laser source," *Opt. Spectrosc.* **26**, 413–420 (1968).
- [8] N. Abramson and K. G. Spears, "Single pulse light-in-flight recording by holography," *Appl. Opt.* **28**, 1834–1841 (1989).
- [9] B. Nilsson and T. E. Carlsson, "Direct three-dimensional shape measurement by digital light-in-flight holography," *Appl. Opt.* **37**, 7954–7959 (1998).
- [10] H. Hinrichs, K. D. Hinsch, J. Kickstein, and M. Böhmer, "Light-in-flight holography for visualization and velocimetry in three-dimensional flows," *Opt. Lett.* **22**, 828–830 (1997).
- [11] T. Kubota and Y. Awatsuji, "Observation of light propagation by holography with a picosecond pulsed laser," *Opt. Lett.* **27**, 815–817 (2002).
- [12] M. Yamagiwa, A. Komatsu, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Observation of propagating femtosecond light pulse train generated by an integrated array illuminator as a spatially and temporally continuous motion picture," *Opt. Express* **13**, 3296–3302 (2005).
- [13] A. Komatsu, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Dependence of reconstructed image characteristics on the observation condition in light-in-flight recording by holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1678–1682 (2005).
- [14] T. Kubota, K. Komai, M. Yamagiwa, and Y. Awatsuji, "Moving picture recording and observation of three-dimensional image of femtosecond light pulse propagation," *Opt. Express* **15**, 14348–14354 (2007).
- [15] T. Kakue, M. Aihara, T. Takimoto, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, and T. Kubota, "Moving picture recording and observation of visible femtosecond light pulse propagation," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 050205 (2011).
- [16] Y. Sawashima, D. Yamanaka, I. Takamoto, A. Matsunaka, Y. Awatsuji, and K. Nishio, "Extending recordable time of light-in-flight recording by holography with double reference light pulses," *Opt. Lett.* **43**, 5146–5149 (2018).
- [17] T. Inoue, A. Matsunaka, A. Funahashi, T. Okuda, K. Nishio, and Y. Awatsuji, "Spatiotemporal observations of light propagation in multiple polarization states," *Opt. Lett.* **44**, 2069–2072 (2019).
- [18] M. Sasaki, A. Matsunaka, T. Inoue, K. Nishio, and Y. Awatsuji, "Motion-picture recording of ultrafast behavior of polarized light incident at Brewster's angle," *Sci. Rep.* **10**, 7638 (2020).

## 実時間対話型ホログラムの生成と表示 –写実的な描画による表現力の向上–

湯浅 尚樹 † 吉川 浩‡ 山口 健‡

† 日本大学大学院理工学研究科 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

‡ 日本大学理工学部応用情報工学科 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

E-mail: ‡ {yoshikawa.hiroshi, yamaguchi.takeshi89}@nihon-u.ac.jp

あらまし立体動画の再生表示装置である HoloTV は、干渉縞の実時間計算が可能になったことから動画の表示は行われてきた。しかし表示する仮想物体を計算可能なデータとしてリアルタイムで生成する手法はこれまで存在しなかったため、リアルタイムかつインタラクティブなコンテンツの再生は不可能であった。本報告では、Unity 上でリアルタイムに動作する 3DCG のコンテンツをホログラムとして計算可能なデータに変換し、これを HoloTV に表示することで立体インタラクティブコンテンツの再生を可能にした。

**キーワード** Unity, HoloTV, 点群データ, インタラクティブコンテンツ, 立体動画

## Real-time interactive image hologram generation and display – Improving expressiveness of hologram with photo-realistic rendering –

Naoki YUASA † Hiroshi YOSHIKAWA ‡ and Takeshi YAMAGUCHI ‡

† Graduate School, Nihon Univ. 1-8-14 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, 101-8308 Japan

‡ Dept. Computer Science, Nihon Univ. 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, 274-8501 Japan

E-mail: ‡ {yoshikawa.hiroshi, yamaguchi.takeshi89}@nihon-u.ac.jp

**Abstract** HoloTV, a three-dimensional video display system, has been used to display videos since real-time computation of interference fringes became possible. However, there has been no method to generate virtual objects data to compute as a hologram in real-time, so it has been impossible to play real-time and interactive contents. In this paper, we report a method to convert 3DCG contents running on Unity into computable data as a hologram, and display them on HoloTV to enable the playback of three-dimensional interactive contents.

**Keyword** Unity, HoloTV, point cloud data, interactive contents, 3D video

### 1.はじめに

電子ホログラフィックディスプレイ（以下 HoloTV）とは、ホログラフィ技術を用いることで目の錯覚を使用せずに自然な奥行を持つ立体動画像を再生する装置である。2次元画像に比べて情報量の多いフルカラーの3次元画像は動画として実時間表示するには計算時間がかかりすぎてしまうという問題があった。そこで、北山らによって提案された距離参照法を用いたフルカラーイメージホログラムの高速な干渉縞計算手法では、立体動画の実時間における再生と計算が可能になった。この手法では、ホログラムとして記録する仮想物体は点光源データとして記録される。点光源データは、仮想物体の形状と色を点群として記録した点群のデータである。ホログラムとして HoloTV に表示される干渉縞は点光源データに記録された各点と再生光との干渉計算を行うことで生成される。再生光学系では計算した干渉縞を液晶に表示し、計算時の再生光と同じ特性の光を入射する

ことによって仮想物体を観察することができる。これまでには立体動画の各コマとなる仮想物体の点光源データをあらかじめ用意した状態で、回転や拡大・縮小および平行移動をインタラクティブに行い、それぞれの干渉縞を実時間で計算し表示していた。本報告では、この点光源データの生成をリアルタイムに行うことでインタラクティブコンテンツを仮想物体とした立体動画を表示する手法を提案する。また、本手法は Unity を用いて開発することで、写実的な仮想物体を用いてホログラムを記録する。

### 2.再生光学系

HoloTV の再生光学系を図 1 に示す。照明光はレンズを用いて白色 LED の光を平行光にして赤青緑の各 LCOS（空間変調器・液晶）に入射させる。そして各再生光を合成することでフルカラー再生像を表示する。光学系は市販のプロジェクタを改良したもので、内部のレンズなど不要な部品は取り除かれている。

### 3. 点光源データ生成

点光源データは記録する仮想物体の表面から発せられる物体光の光源を記録するためのフォーマットであり、カメラから見た仮想物体の表面入りの3次元座標と色情報を記録する。点光源データは3次元空間内の仮想の視点（カメラ）からのレンダリング画像と深度マップ（デプスマップ）から計算する[1, 2, 3]。点光源データ生成アルゴリズムの概略図を図2に示す。シーンの描画が完了した時点でレンダリング画像とデプスマップを取得する。次に1ピクセルずつレンダリング画像からオブジェクト表面の色を取得し、デプスマップの値からオブジェクト表面の3次元座標を計算する。デプスマップにはカメラ面位置を0、遠方クリップ面位置を1として正規化されたカメラから物体までの距離が保存されている。一般的なCGで使用されるデプスマップは物体の前後関係を強調するため近くの物体ほど値の変化量は大きい。本手法では計算の簡略化のため距離の変化に伴って深度値が線形に変化するリニアデプスマップの描画プログラム（シェーダ）を作成した。リニアデプスマップに書き込まれた深度値と遠方クリップ面までの距離を乗算し、そのピクセルに描画されたオブジェクトの表面までの距離を算出する。Unityにはピクセル座標とカメラからの距離を引数として与えることでカメラかそのピクセルを通る線分上の点の3次元座標を返すScreenToWorldPointがある。この関数に先に求めたカメラからオブジェクト表面までの距離とピクセル座標を渡して点光源の3次元座標を求める。レンダリング画像内の同じピクセルに書き込まれた色は点光源の色として記録する。この計算をすべてのピクセルについて行うことで立体動画の1コマのための点光源データを計算することで点光源データを生成する。

### 4. インタラクティブコンテンツの再生

インタラクティブコンテンツはUnityを用いて実装した。図3に実装した写実的なインタラクティブコンテンツの一例を示す。Unityはリアルタイムコンテンツの開発環境であり、高速ながら写実的な描画システムを内蔵している。これにより、写実的なCGを用いたインタラクティブコンテンツをHoloTVに表示することができる。点光源データが生成されると同時に干渉縞計算が行われる。干渉縞計算が終わると次に表示する新しいコマのための点光源データの計算を始める。これを随時繰り返すことでHoloTVに表示する立体動画をリアルタイムに生成する。点光源データの生成と干渉縞計算はそれぞれ異なるソフトウェアを用いて実装している。両ソフト間ではあるファイルの有無によってそれぞれ点光源データの生成、干渉縞計算のタイミングを通信している。

### 5. イメージホログラムの計算

イメージホログラムの計算[4]をさらに高速化するために距離参照法[5]を用いている。RGBをそれぞれ別に3ス

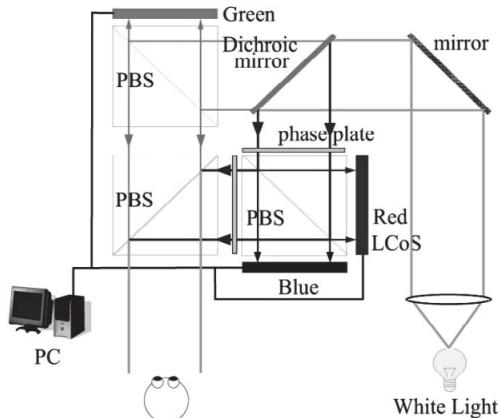


図1 HoloTVのフルカラー再生光学系

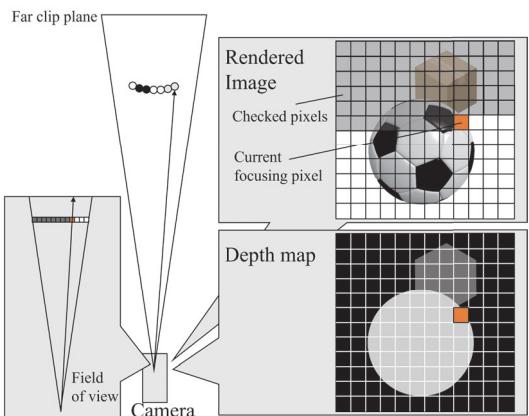


図2 点光源データ生成アルゴリズム

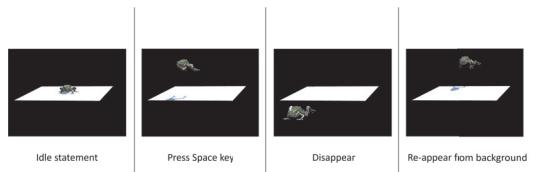


図3 写実的なインタラクティブコンテンツの例

レッドで計算し、さらに高速化するためにRGBの各ホログラムをさらに上下に分割して6スレッドで計算を行った。さらに計算時間の内訳を調べたところ、計算時間の約半分が物体データの読み込みに要していることが判明した。そこでファイルの読み込みをアスキiformで読み込んでいたのを、バイナリでの読み込みに変更したところ、計算時間全体が短縮された。

表 1 使用した PC の性能

項目	スペック
OS	Microsoft Windows 10 Education
言語	Microsoft Visual C++ 2019 Enterprise ed.
CPU	Intel®Core i9-10900KF 3.70GHz 128 GB RAM
GPU	nVIDIA GeForce RTX 3090

表 2 計算機合成ホログラムおよび LCOS のパラメータ

項目	値
波長 (赤)	633 nm
波長 (緑)	532 nm
波長 (青)	473 nm
画素数 [pixel]	3,840 × 2,160
画素ピッチ	4.0 μm

## 6. 干渉縞の計算と表示

本研究で使用した PC のスペックを表 1 に示す。C++ によるプログラミングでは DirectX は使用せず、GPU の機能も明示的には使用していない。CGH の計算及び実験に用いた LCOS のパラメータを表 2 に示す。実効点光源数と計算時間の関係を図 4 に示す。実効点光源数とは、総点光源数ではなく RGB 各成分の点光源数の最大値である。RGB 各成分の点光源数がほぼ等しい時と、ばらつきがある場合では総点光源数が同じでも、計算時間は異なってくる。6 スレッドやバイナリ読み込みでは点光源数が少ない時に計算時間が減少していないが、これは計算結果をディスプレイバッファに転送する時間がネックになっていると考えられる。

## 7. むすび

本報告では、HoloTV にリアルタイムに生成したイメージホログラムを表示することで、錯覚を利用しない自然な奥行のあるインタラクティブコンテンツの表示を可能にした。また、点光源数と干渉縞計算にかかる時間との関係を調べた。これにより、本手法ではリアルタイムインタラクティブコンテンツとして十分実用的な時間内に計算できていることが分かった。しかし、一般的な液晶ディスプレイに比べると、点群データと干渉縞の計算に時間がかかってしまう。本手法はフレームレートが低い。点光源数が 5 万程度のとき 20fps、15 万程度のとき 10fps 程度であった。また、同じ理由からユーザによる入力が HoloTV に出力されるまでの表示遅延も比較的大きい。リアルタイムインタラクティブコンテンツにおいてはフレームレートと表示遅延はユーザ体験を上げるために重要な要素なので、これを改善していく必要がある。今後はこの課題に対して、GPU を用いた並列計算や 2 つのソフトウェアの通信の改善などによるパフォーマンスの改善を検討していきたい。

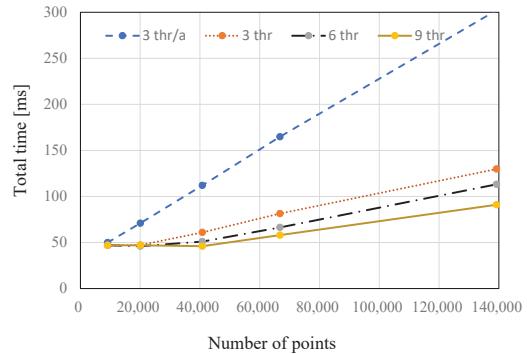


図 4 物体の点光源数に対する合計処理時間。3 thr/a: テキスト形式データで 3 スレッド、3 thr: バイナリ形式データ (以下同様) で 3 スレッド、6 thr: 6 スレッド、9 thr: 9 スレッド

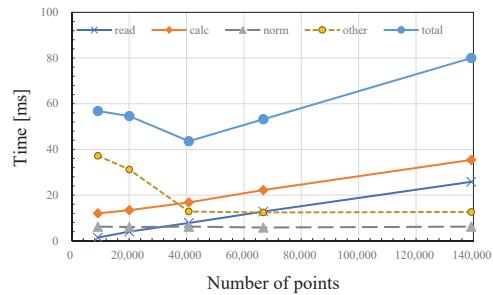


図 5 18 スレッドでの各処理時間。read: バイナリデータ読み込み、calc: 干渉縞計算、norm: 干渉縞正規化、other: 表示を含むその他、total: 1 回のループの合計

## 文献

- [1] 藤井, 山口, 吉川：“CG を利用した CGH の隠面処理改善とディスクホログラムへの応用”, 映像情報メディア学会誌, **62**, 4, pp. 527–532 (2008).
- [2] 湯浅, 山口, 吉川：“Unity を用いた CGH レンダリングソフトウェアの開発”, 3 次元画像コンファレンス 2019, No. 1–1 (2019).
- [3] 湯浅, 山口, 吉川：“写実的なアニメーションホログラムのための点群データ生成手法の提案”, 3 次元画像コンファレンス 2020, No. 8–3 (2020).
- [4] 山口, 吉川：“インタラクティブホログラフィックテレビジョン－イメージ型による高速化とレインボウホログラムを用いたフルカラー化－”, 映像情報メディア学会誌, **60**, 5, pp. 813–818 (2006).
- [5] 北山, 大村, 山口, 吉川：“距離参照法を用いたフルカラーイメージホログラムの高速計算”, 映像情報メディア学会誌, **64**, 11, pp. 1744–1749 (2010).
- [6] 岡部, 山口, 吉川：“リアルタイムフルカラー holotv の諸特性”, 映像情報メディア学会誌, **61**, 8, pp. 1188–1190 (2007).

## 放射状点拡がり関数のホログラム高速化手法への適用

安木 大貴, 下馬場 朋祿, 角江 崇, 伊藤 智義

千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稻毛区弥生町 1-33

E-mail: yasuki1208@chiba-u.jp

**あらまし** ホログラムは、ホログラム平面上の光の分布を表す点拡がり関数 (PSF) を重ね合わせることで計算できる。しかし、ホログラムは計算コストが大きく、高精細なホログラフィックディスプレイにおいて、ビデオレートで計算することは未だ難しい。ホログラフィックヘッドマウントディスプレイ (HMD) に代表される眼の位置が固定されるホログラフィックディスプレイでは、PSF の一部の分布を計算することで、PSF 全体を用いた場合とほぼ同等の画質と焦点深度を持つ再構成画像が得られる。本研究では、HMD への実装を前提とした、ホログラム計算の高速化を目的とする。本研究では、ブロック化放射状 PSF を考案した。この PSF をホログラム計算高速化手法に適用し、更なる高速化を実現した。

**キーワード** PSF, HMD, CGH, ホログラム

## Application of radial point spread function to hologram acceleration method

Daiki YASUKI Tomoyoshi SHIMOBABA Takashi KAKUE and Tomoyoshi ITO

Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan

E-mail: yasuki1208@chiba-u.jp

**Abstract** Holograms can be computed by superimposing a point spread function (PSF), which represents the distribution of light on the hologram plane. However, holograms are computationally expensive and it is still difficult to calculate them at the video rate in high-definition holographic displays. Holographic displays with a fixed eye position, such as holographic head-mounted displays (HMDs), have a reduced spatial bandwidth product because the eye position is fixed. In the case of fixed-eye-position holograms, by calculating the distribution of a portion of the entire PSF, a reconstructed image with almost the same image quality and depth of focus as the one using the entire PSF can be obtained. In this study, we aim to speed up the hologram calculation for implementation in HMDs. In this study, we devised a blocking radial PSF. This PSF is applied to hologram acceleration methods to achieve further speed-up.

**Keyword** PSF, HMD, CGH, Hologram

### 1. 研究背景および目的

ホログラフィは、立体視における生理的要因をすべて満たすことができる理想的な 3 次元映像技術である[1]。電子ホログラフィは光の伝搬や干渉をコンピュータ上で計算し、計算機合成ホログラム (CGH : Computer-Generated Hologram) を作成する[1]。点群法[2-6]では、CGH 面上の光の分布を表す点拡がり関数 (PSF) を重ね合わせることで CGH を計算できる。

裸眼ホログラフィックディスプレイは、空間光変調器 (SLM) に大きな空間帯域幅積が要求されるため、実現は未だに難しい。裸眼ホログラフィックディスプレイで使用される PSF はどの角度からも再生像が観察できるように設計されている。本研究では、この PSF を entire PSF と呼ぶ。一方、観察位置が固定されたホログラフィックディスプレイが研究されている[7-9]。このようなディスプレイにホログラフィックヘッドマ

ウントディスプレイ (HMD) がある[10,11]。HMD は目の位置が固定されているため、大きな空間帯域幅積を持つ SLM を必要としない。また、視点位置が固定されるため entire PSF のように全ての光分布を計算する必要はない。観察に不要な PSF の光分布を削減しスペースにすることで、CGH 計算の高速化が期待できる。このようなアプローチに horizontal parallax only hologram (HPO) がある[12-15]。

本研究では、PSF エンジニアリング[6]を行い、視点位置を固定した場合に entire PSF の再生像に近い画質が得られる PSF を模索した。文献[16]では horizontal parallax only PSF, cross PSF, および, radial PSF を提案した。本研究では、ブロック化 radial PSF を提案する。シミュレーション及び光学実験により、radial PSF の再生像は、entire PSF の再生像の画質および焦点深度とほぼ同等であることが明らかになった。Radial

PSF は entire PSF に比べスパースな光分布を持つため、高速に CGH を計算できる。計算をさらに高速化するため、ルックアップテーブル (LUT : Look-Up Table) 法[3]および波面記録 (WRP: Wavefront Recording Plane) 法[4], sparse CGH 法[5]を適用し、計算速度と画質の評価を行った。

## 2. ブロック化放射状点拡がり関数の提案

CGH は、物体点から放出される球面波のホログラム面上での複素振幅 (PSF) を重ね合わせることで生成できる。CGH 平面上の複素ホログラム  $H$  は以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} H(x_h, y_h) &= \sum_{j=1}^M A_j \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} r_{hj}\right) \\ &= \sum_{j=1}^M A_j u_{z_j}(x_h - x_j, y_h - y_j) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $i$  は虚数単位、 $M$  は物体点数、 $\lambda$  は波長、 $(x_h, y_h)$  は CGH 面の座標、 $(x_j, y_j, z_j)$  は  $j$  番目の物体点の座標、 $A_j$  は  $j$  番目の物体点の振幅、 $u_{z_j}$  は物体点の奥行距離  $z_j$  における entire PSF である。また、 $r_{hj}$  は物体点と CGH のある画素との距離である。entire PSF は次式で表せる。

$$\begin{aligned} u_{zj} &= \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_h - x_j)^2 + (y_h - y_j)^2 + z_j^2}\right) \\ &\approx \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \left(z_j + \frac{(x_h - x_j)^2 + (y_h - y_j)^2}{2z_j}\right)\right) \end{aligned} \quad (2)$$

CGH 計算は計算コストが非常に大きい。計算の中で特に、PSF の重ね合わせに時間を要する。これを解決するために LUT 法や WRP 法などが提案されている。LUT 法は、式(1)における PSF を事前に計算し、LUT に格納することで計算コストを削減できる手法である。WRP 法は物体と CGH の間に仮想面 (WRP) を導入し、物体光を仮想面に記録する。その後、仮想面を CGH まで伝搬させることで CGH を得ることができる。

Sparse CGH は、短時間フーリエ変換 (STFT : Short Time Fourier Transform) を利用して CGH を計算する。STFT を利用すると PSF はスパースになり CGH は少數の係数のみを使用して計算できる。Sparse CGH は、CGH を均等な大きさのブロックに分割し、各ブロックで STFT を実行する。計算した STFT 係数を先に全て足し合わせた後、一度だけ逆 STFT かけば CGH を作成できる。

本研究では、高速化アルゴリズムに radial PSF を適用するために、radial PSF を図 1 中の黄色い枠で囲ったブロックで形成し計算を行った。

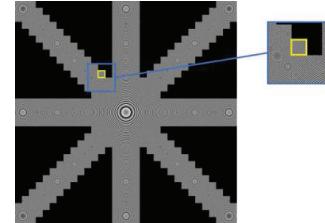
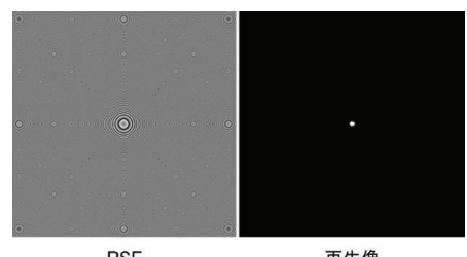
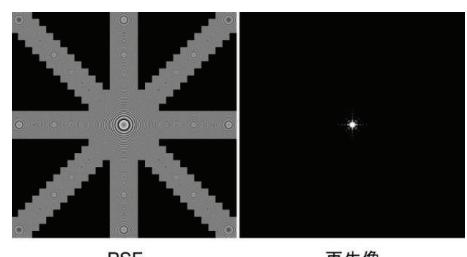


図 1：ブロック化 radial PSF

図 2 に示す各 PSF を用いて CGH を作成し、その集光特性（再生像）を確認した。図の“再生像”は、PSF に平面波を照射し、その焦点位置での強度分布を意味する。図 2 (a) は PSF エンジニアリングを行わない式(2)の entire PSF を描く。



(a) entire PSF



(b) ブロック化radial PSF

図 2 : Entire PSF とブロック化 radial PSF

(a) entire PSF, (b) ブロック化 radial PSF

図 3 に図 2 の各 PSF を用いて作成した CGH の再生像を示す。3 次元物体に恐竜モデルを使用した。この再生像は左上の恐竜の頭部に焦点があつておらず、右上の恐竜の尻尾が手前に位置している。図 3 (a) は entire PSF の再生像である。尻尾がボケているため、焦点深度が浅いことがわかる。

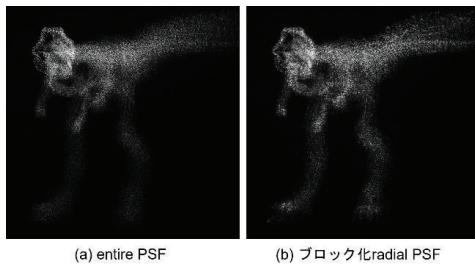


図3：図2のPSFを用いて作成した再生像

ブロック化 radial PSF の場合、entire PSF と似た集光特性を有するため、図3(a)に近い画質と奥行きを持つ再生像を得られることが確認できた。

### 3. 計算速度と画質の比較

前章の結果から、ブロック化 radial PSF を本研究では採用し、計算速度と画質の比較を行う。

計算環境には、OS に Windows 10 Enterprise、CPU に Intel Core i7-6700 @3.40GHz、16.0 GB のメモリ、コンパイラーに Microsoft Visual C++ 2019 を用いた。表1に CGH 計算のパラメータを示す。

表1：計算に用いたパラメータ

CGH の解像度	2,048×2,048 [pixels]
画素ピッチ	3.74 [ $\mu\text{m}$ ]
波長	532 [nm]
物体点数	恐竜 : 11,646 点
物体の厚み	2.0 [cm]
CGHまでの距離	10.0 [cm]
WRPまでの距離	0.5 [cm]
ブロックサイズ	64×64 [pixels]

本研究で用いた物体は 2cm の厚みを持っており、奥行方向のサンプリング間隔は 0.2mm に設定した。ブロックサイズはブロック化 radial PSF を構成するブロックの大きさである。図4に、図2の各 PSF と高速化手法を用いて計算した CGH の再生像を示す。

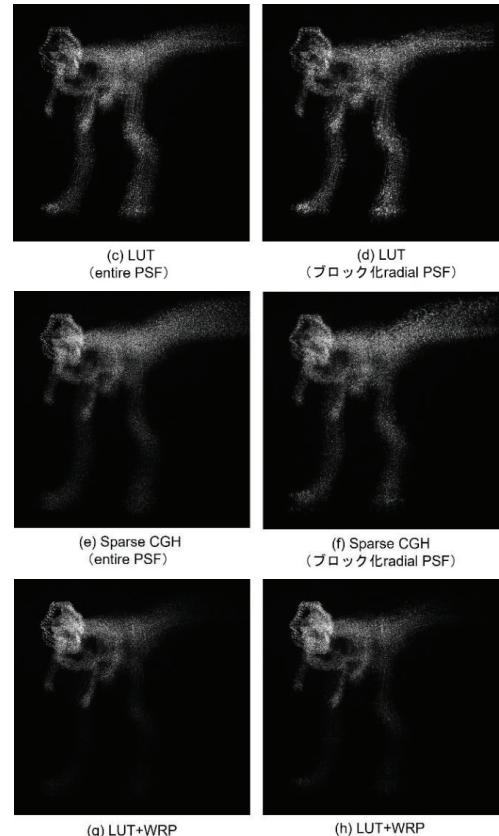
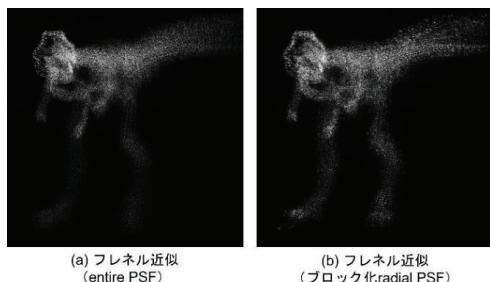


図4：再生像（再生距離 11.76cm）

表2に考案した PSF を用いた場合の計算時間を示す。高速化率は、(フレネル近似の計算時間)/(各計算手法の計算時間)で求めた。

表2：各手法の計算時間

計算手法		計算時間 [s]	高速化率
entire PSF	フレネル近似	163.3	1.0
	LUT	59.7	2.7
	Sparse CGH	15.9	10.3
	LUT+WRP	7.1	22.9
ブロック化 radial PSF	フレネル近似	74.3	2.2
	LUT	27.2	6.0
	Sparse CGH	6.8	24.0
	LUT+WRP	4.0	41.2

また、表3に再生像全体の画質評価の結果を示す。画質評価には、peak signal-to-noise ratio (PSNR) および structural similarity (SSIM) を用いた。PSNR および SSIM

は再生距離 10cm~12cm を 100 層に分けて再生した再生像の PSNR と SSIM の平均を取った。

表 3：画質評価の結果

計算手法	PSNR [dB]	SSIM
entire PSF	フレネル近似	-
	LUT	38.7
	Sparse CGH	36.7
	LUT+WRP	41.4
ブロック化 radial PSF	フレネル近似	37.6
	LUT	35.7
	Sparse CGH	34.5
	LUT+WRP	39.0

表 2 より、本研究ではブロック化 radial PSF を用いて計算することで、従来の高速化アルゴリズムを更に高速化することができた。また、考案した PSF を波面記録法に適用することで 40 倍以上の高速化を実現した。図 4、表 3 より、提案したブロック化 radial PSF を用いた場合、正面からの再生像は劣化が少なく観察できることが分かる。

#### 4.まとめと今後の展望

本研究では、観察位置が固定されたホログラフィックディスプレイ（holographic near eye display や holographic HMD）に有効なブロック化 radial PSF を提案した。提案した PSF を用いて CGH を計算することで、従来の高速化アルゴリズムを更に高速化することができた。今後の展望として GPU (Graphics Processing Unit) や FPGA (Field-Programmable Gate Array) などのハードウェアに実装することで更なる CGH 計算の高速化を目指す。本研究の一部は JSPS 科研費 19H04132, 19H01097 により行われました。ここに深く感謝いたします。

#### 文 献

- [1] T. C. Poon (Ed.), “Digital holography and three-dimensional display: Principles and Applications,” Springer Science & Business Media (2006)
- [2] M. Luente, “Interactive computation of holograms using a look-up table,” *J. Electron. Imag.* **2**, 28-34 (1993)
- [3] S. -C. Kim, and E. -S. Kim, “Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method,” *Appl. Opt.* **47**, D55-D62 (2008)
- [4] T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, “Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane,” *Opt. Lett.* **34**, 3133–3135 (2009)
- [5] D. Blinder, “Direct calculation of computer-generated holograms in sparse bases,” *Opt. Express* **27**, 23124-23137 (2019)
- [6] T. Shimobaba, S. Yamada, T. Kakue, and T. Ito, “Point spread function engineering for wavelet-based hologram calculation,” *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 18882426 (2019)
- [7] K. Wakunami, P. -Y. Hsieh, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. -P. Huang, and K. Yamamoto, “Projection-type see-through holographic three-dimensional display,” *Nat. Commun.* **7**, 12954 (2016)
- [8] E. Murakami, Y. Oguro, and Y. Sakamoto, “Study on compact head-mounted display system using electro-holography for augmented reality.” *IEICE Trans. Electoro.* **100**, 965-971 (2017)
- [9] M. Makowski, R. Trybus, S. Fiderkiewicz, and J. Starobrat, “Overcoming the limitations of spatial light modulators for holographic near-eye displays,” *Optics and Photonics International Congress (OPIC)* (2020)
- [10] E. Moon, M. Kim, J. Roh, H. Kim, and J. Hahn, “Holographic head-mounted display with RGB light emitting diode light source,” *Opt. Express* **22**, 6526–6534 (2014)
- [11] T. Yoneyama, E. Murakami, Y. Oguro, H. Kubo, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, “Holographic head-mounted display with correct accommodation and vergence stimuli,” *Opt. Eng.* **57**, 061619 (2018)
- [12] Z. He, X. Sui, G. Jin, and L. Cao, “Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display,” *Appl. Opt.* **58**, A74-A81 (2019)
- [13] St-Hilaire, P., Benton, S. A., Lucente, M. E., Jepsen, M. L., Kollin, J., Yoshikawa, H., and Underkoffler, J. S., “Electronic display system for computational holography,” In *Practical Holography IV* **1212**, 174-182, International Society for Optics and Photonics (1990)
- [14] Y. Takaki and N. Okada, “Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator,” *Appl. Opt.* **48**, 3255-3260 (2009)
- [15] Y. S. Kim, T. Kim, T. -C. Poon, and J. T. Kim, “Three-dimensional display of a horizontal-parallax-only hologram,” *Appl. Opt.* **50**, B81-B87 (2011)
- [16] 安木大貴, 下馬場朋緑, 角江崇, 伊藤智義, “放射状点拡がり関数を用いたホログラム計算,” *3 次元画像コンファレンス 2021*, 2-3 (2021)

# ウェーブレット変換による3次元シーン圧縮を用いた ホログラム高速計算手法: WASABI-2 の提案

塩見日隆<sup>†</sup> 下馬場朋禄<sup>†</sup> 角江崇<sup>†</sup> 伊藤智義<sup>†</sup>

† 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稻毛区弥生町 1-33

E-mail: <sup>†</sup>{h-shiomi@, shimobaba@faculty., t-kakue@, itot@faculty.}chiba-u.jp

**あらまし** RGBD 画像からホログラムを作成する場合、奥行き毎にスライス画像を生成し、スライス画像に対しホログラム面までの伝搬計算が必要となる。これは高速フーリエ変換によって実行できるが、より高速な手法として点拡がり関数に対し、ウェーブレット変換を用いる WASABI がある。しかし WASABI を用いた場合、点拡がり関数の高周波成分が欠け、焦点深度が深くなるという問題がある。本研究では点拡がり関数ではなく、スライス画像に対しウェーブレット変換を行うことで、焦点深度の変化を抑えたホログラム高速計算手法を提案する。

**キーワード** CGH, ウェーブレット変換, 高速計算

## A high-speed hologram calculation using 3D scene compression by wavelet transform: WASABI-2

Harutaka SHIOMI<sup>†</sup> Tomoyoshi SHIMOBABA<sup>†</sup> Takashi KAKUE<sup>†</sup> and Tomoyoshi ITO<sup>†</sup>

† Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{h-shiomi@, shimobaba@faculty., t-kakue@, itot@faculty.}chiba-u.jp

**Abstract** When creating holograms from RGBD images, it is necessary to generate slice images from the RGBD image and then calculate the propagation to the hologram plane for all the slice images. This calculation can be done using the fast Fourier transform, but a faster method is WASABI, which uses the wavelet transform for the point spread function. However, when using WASABI, the high-frequency component of the point spread function is missing, and the depth of focus becomes deep. This study proposes a fast hologram calculation method that suppresses the change in depth of focus by applying the wavelet transform to the slice images instead of the point spread function.

**Keyword** CGH, Wavelet transform, High-speed calculation

### 1.はじめに

RGBD 画像は Kinect などの RGBD カメラを用いて取得できる、実空間の 3 次元情報である。こうした 3D シーンから高速にホログラムを作成することは、ホログラフィによる 3 次元ディスプレイの実用化などにおいて重要である。

RGBD 画像からホログラムを作成する場合、奥行きに応じてスライス画像を生成し、スライス画像からホログラム面までの伝搬計算が必要となる [1]。これは高速フーリエ変換(FFT)によって計算することができる。しかし FFT によって伝搬計算を行う場合、ゼロパディングが必要となり、特に高解像な RGBD 画像からホログラムを作成する場合、計算時間が長くなるという問題がある。

この問題を解決する手法として奥行きごとに点拡がり関数 (PSF) を Look-up Table (LUT) に記録し、これを用いて、各画素からの伝搬結果を足し合わせる

LUT 法[2]や、PSF をウェーブレット変換し、上位係数のみを選択することで、PSF の足し合わせをウェーブレット空間上の一一部の上位係数の足し合わせによって行い LUT 法の高速化を図る WAvelet ShrinkAge-Based superposition (WASABI) [3]などが提案されている。

WASABI においては計算高速化のために下位のウェーブレット係数が欠落する。これは PSF の特に高周波成分の欠落となり、再生像の焦点深度が深くなり、奥行き感が損なわれるという問題がある。WASABI では選択率を上げることによって下位のウェーブレット係数を扱うことができるが、計算速度は遅くなるというトレードオフがあり、計算速度と再生像の奥行き感を両立させることは難しい。

WASABI の問題は PSF をウェーブレット変換し、その上位係数のみを利用することによって、PSF が劣化していることにある。PSF を劣化させなければ再生像の焦点深度などの見え方に大きな影響を与えない。

WASABI における計算高速化は PSF の足し合わせを高速化することで達成された。そこで PSF のかわりに 3 次元情報（RGBD 画像）の上位係数を利用することで足し合わせの回数を減少させ、高速化を図る手法が考えられる。本研究ではこの手法を WASABI-2 として提案する。

## 2. 提案手法

提案手法である WASABI-2 は以下の 5 つの処理からなる。

1. 事前計算
2. スライス画像の取得
3. スライス画像のウェーブレット変換
4. 上位のウェーブレット係数の選択
5. LUT を用いた各係数の伝搬結果の足し合わせ  
これらの処理のうち、2 以降の処理を全てのスライス画像に対して行うことで、ホログラムを作成する。

### 2.1. 事前計算

事前計算として、伝搬計算が必要な距離ごとに、各ウェーブレット領域の中心の基底に対し伝搬計算を行い、その結果を LUT として保持しておく。ウェーブレット変換をレベル  $L$  まで行う場合、ウェーブレット領域は  $3L + 1$  個ある。 $L = 2$  のときのウェーブレット領域と、伝搬計算を行うウェーブレット基底の位置を以下の図 1 に示す。また図 2 では伝搬計算を行うウェーブレット基底の例と LUT に保持される伝搬結果の例を示す。

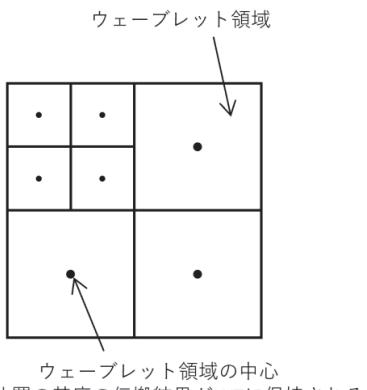


図 1 レベル 2 におけるウェーブレット領域



図 2 ウェーブレット基底の例（左）と  
その伝搬結果の実部（右）

### 2.2. 奥行き画像の取得

RGBD 画像のうち、Depth 画像の画素値が同じ値の RGB 画素だけを抽出した画像をスライス画像と呼ぶ。これはホログラム面からの奥行きが等しい点を画像として表示したものにあたる。以下の図 3 に示す RGBD 画像[4]から奥行き画像を取得した例を図 4 に示す。

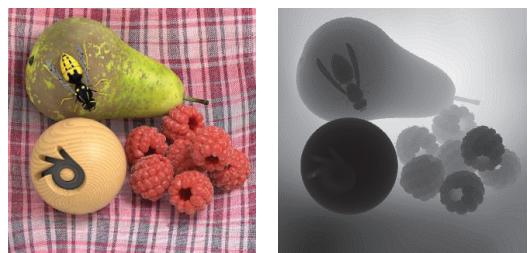


図 3 RGB 画像（左）と Depth 画像（右）[4]



図 4 奥行き画像の例

### 2.3. 奥行き画像のウェーブレット変換

取得した奥行き画像に対し、式(1)-(4)に示すウェーブレット変換を行う。ここでスライス画像はレベル 0 の信号とし、 $s^{(0)}$  で表す。式(1)-(4)を繰り返し行いレベル 2 のウェーブレット係数である  $s^{(2)}, w_{HL}^{(2)}, w_{LH}^{(2)}, w_{HH}^{(2)}$  まで求める。

$$s_{m,n}^{(l+1)} = \sum_{k_2} \sum_{k_1} p_{k_1-2m} p_{k_2-2n} s_{m,n}^{(l)} \quad (1)$$

$$w_{LHm,n}^{(l+1)} = \sum_{k_2} \sum_{k_1} p_{k_1-2m} q_{k_2-2n} s_{m,n}^{(l)} \quad (2)$$

$$w_{HLm,n}^{(l+1)} = \sum_{k_2} \sum_{k_1} q_{k_1-2m} p_{k_2-2n} s_{m,n}^{(l)} \quad (3)$$

$$w_{HHm,n}^{(l+1)} = \sum_{k_2} \sum_{k_1} q_{k_1-2m} q_{k_2-2n} s_{m,n}^{(l)} \quad (4)$$

式(1)-(4)における $p, q$ は2スケール関係と呼ばれるウェーブレット基底を示す係数列である。本研究ではハール基底を用いた。

図4に示すスライス画像の例をウェーブレット変換した結果を以下の図5に示す。

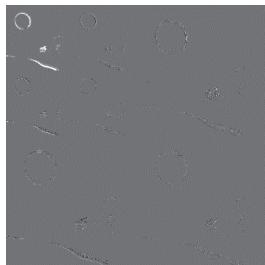


図 5 奥行き画像のウェーブレット変換例

#### 2.4. 上位のウェーブレット係数の選択

ウェーブレット係数のうち、もともとのスライス画像において、0でない値を持っていた画素数に対し、 $r\%$ を絶対値の大きい順に選択し、次の計算に利用する。

ここで $r$ を選択率と呼ぶ。選択率が小さいほど、使用的係数が少なくなり、次に行う伝搬結果の足し合わせの回数が減るため、計算時間が短縮される。ただし選択率が小さくなるほど、元のスライス画像との差分が増加するため、作成されるホログラムの画質は劣化する。このように計算速度と画質のトレードオフがあり、選択率によって決まる。

#### 2.5. LUTを用いた各係数の伝搬結果の足し合わせ

選択した係数に対し、その位置から、どのウェーブレット領域に含まれるのか判定し、LUTに保存してある、その領域の中心の伝搬結果を平行移動することで、そのウェーブレット係数における伝搬結果を求める。

選択した全てのウェーブレット係数について、LUTを用いて伝搬結果を求め足し合わせることで、その奥行き画像における伝搬計算結果を求められる。全てのスライス画像について伝搬計算結果を求め、足し合わせることでホログラムを作成できる。

### 3. 実験

#### 3.1. 計算速度の比較

提案手法であるWASABI-2を用いてRGBD画像からホログラムを作成する際の計算速度を、FFTを用いた手法と、点拡がり関数をLUTに保持し、これを用いて計算を行うLUT法に対し比較を行った。

図3に示す解像度 $512 \times 512$ のRGBD画像を厚さ $16\text{ }\mu\text{m}$ の256枚の奥行き画像からなる3次元モデルとして扱い、2mm離れた地点のホログラムの計算を行った。ホログラムの画素ピッチは $8\text{ }\mu\text{m}$ 、波長は500nmとした。主な位置関係を図6に示す。

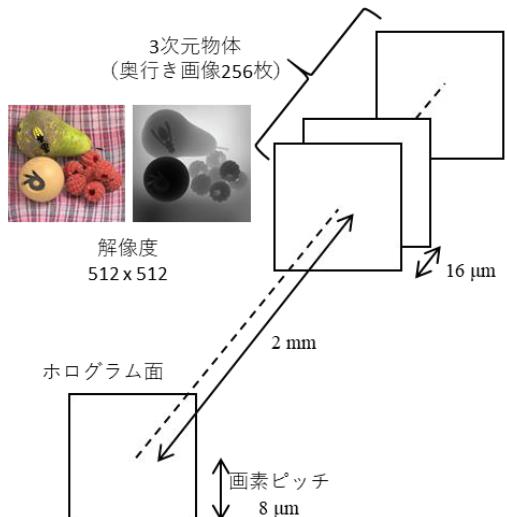


図 6 ホログラム計算における主な位置関係

計算には以下の表1に示す環境を用いた。各計算手法における計算時間とFFTを基準としたときの高速化率を表2に示す。

表 1 計算環境

CPU	Intel core i7-6500U 2.5GHz
RAM	16 GB
OS	Windows 10 home

表 2 計算速度の比較結果

計算手法	計算速度 [s]	高速化率
FFT	243	1.0
LUT	82.1	2.9
WASABI2	r = 80%	90.1
	r = 50%	65.7
	r = 30%	48.0
	r = 15%	36.4
	r = 5%	29.8
	r = 1%	24.8

表 2 より提案手法である WASABI-2 は選択率を 50% 以下にすることで、従来手法よりも高速に計算できることがわかる。またその高速化率は選択率に応じて減少することがわかる。

### 3.2. 作成したホログラムの画質の比較

3.1において作成したホログラムについて、逆伝搬計算によって各距離における再生像を求めた。FFT により再生像を基準とし、再生像の Peak Signal to Noise Ratio(PSNR)と Structural SIMilarity (SSIM)の平均を求めた。結果を以下の表 3 に示す。また図 7 に同じ距離における各手法によるホログラムの再生像の例を示す。

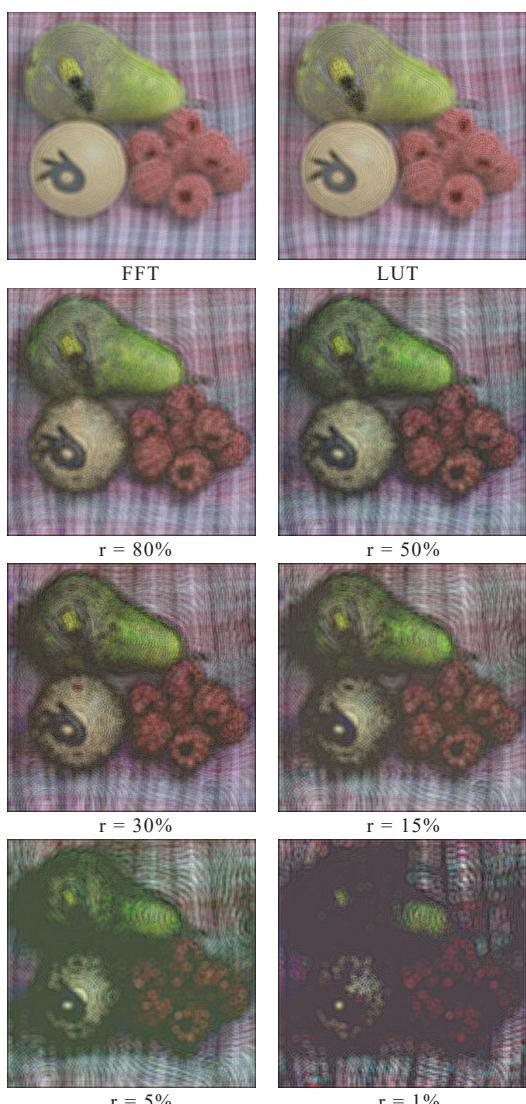


図 7 各手法における再生像

表 3 画質比較結果

計算手法	PSNR[dB]	SSIM
LUT	36.4	0.98
WASABI2	r = 80%	19.5
	r = 50%	17.9
	r = 30%	16.6
	r = 15%	16.4
	r = 5%	14.2
	r = 1%	12.9
		0.26

表 3 より提案手法である WASABI-2 は選択率を下げるごとに画質が劣化することがわかる。図 7 より提案手法による再生像は部分的に暗くなっていること、画質が劣化していることがわかる。

### 4.まとめと今後の展望

3D シーンに対し、ウェーブレット変換を行うことで、RGBD 画像から高速にホログラムを作成する手法である WASABI2 の提案を行った。また提案手法において選択率によってどの程度の高速化が達成され、画質はどの程度劣化するのか定量的に比較を行った。

今後はウェーブレット変換の基底を変更し、低い選択率でも再生像の画質劣化を抑えることができないか検討を行う。また波面記録法[5]などと併用することで、より高速なホログラムの作成ができないか検討を行う。本研究の一部は JSPS 科研費 19H04132, 19H01097 により行われました。ここに深く感謝いたします。

### 文 献

- [1] H. Zhang, L. Cao, and G. Jin, "Computer-generated hologram with occlusion effect using layer-based processing," *Appl. Opt.*, **56**, F138-F143 (2017)
- [2] S.-C. Kim and E.-S. Kim : "Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method.", *Applied Optics*, **47**, 19, D55-D62(2008)
- [3] T. Shimobaba and T. Ito : "Fast Generation of computer-generated holograms using wavelet shrinkage", *Opt. Express*, **25**, 77-87(2017)
- [4] S. Wanner, S. Meister, and B. Goldluecke, "Datasets and benchmarks for densely sampled 4d light fields," In VMV, 225–226 (2013)
- [5] T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, "Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane," *Opt. Lett.* **34**, 3133–3135 (2009)

# 計算機合成ホログラムにおけるフラクタル圧縮を用いた物体光データの圧縮手法

大井 裕貴<sup>†</sup> 坂本 雄児<sup>†</sup>

† 北海道大学大学院情報科学院 〒060-0814 北海道札幌市北区北 14 条西 9 丁目

E-mail: † {h\_oi, yuji}@ist.hokudai.ac.jp

**あらまし** 計算機合成ホログラムの問題点の一つとして、再生像を得るために必要なデータ量が膨大であることが挙げられる。計算機合成ホログラムの実用化のためには、データの保存や伝送のためのデータ圧縮が必要不可欠である。保存・伝送するデータとして物体光データと干渉縞データが考えられるが、物体光データのほうが柔軟に扱うことができる。これらのデータには高周波成分が多く含まれているため、JPEG のような高周波成分を削る圧縮手法を適用すると再生像に著しい劣化が生じる。そこで、高周波成分の損失が小さいフラクタル圧縮を用いて物体光データを圧縮する手法を提案する。提案手法は従来の圧縮手法に比べて高い圧縮性能を示した。

**キーワード** 計算機合成ホログラム、データ圧縮、フラクタル圧縮

## Compression Method of Object Light Data Using Fractal Compression in Computer-Generated Hologram

Hiroki OI<sup>†</sup> and Yuji SAKAMOTO<sup>†</sup>

† Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University N-14, W-9,

Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814 Japan

E-mail: † {h\_oi, yuji}@ist.hokudai.ac.jp

**Abstract** Computer-generated holograms have the problem that the amount of data required to obtain the reconstructed image is enormous. There are two types of data, object light data and hologram data, but object light data can be handled more flexibly. If a compression method that removes high-frequency components, such as JPEG, is applied to these data, the reconstructed image will be degraded. In this paper, we propose a new compression method for object light data using fractal compression, in which high frequency components are not easily lost. The proposed method shows higher compression performance than the conventional compression methods.

**Keyword** Computer-generated hologram, Data compression, Fractal compression

### 1. はじめに

近年、計算機合成ホログラム(Computer-generated hologram, CGH)と呼ばれる 3 次元表示技術が注目されている。CGH の実用化のために解決すべき問題の一つとして、再生像を得るために必要なデータ量が膨大であることが挙げられる。CGH を用いたアプリケーションでは、データの保存や伝送が多く行われることが考えられるため、データ圧縮は必要不可欠である。CGH におけるデータ圧縮に関して、いくつかの研究[1-3]が行われているが、決定的な圧縮手法は未だ存在しない。

保存・伝送するデータとして物体光データと干渉縞データが考えられる。物体光データは物体から伝搬する光波を記録したもので、干渉縞データは物体光と参照光を干渉させて得られる干渉縞を記録したものである。干渉縞データを再生装置に表示して、参照光と同

一の光を照射することで再生像が得られる。物体光データを圧縮して保存や伝送を行う場合、物体光データの解凍後に参照光との干渉の計算を行う必要があるが、再生装置のパラメータに柔軟に対応することができるという利点がある。この利点は放送システムのような配信側から受信側にデータ伝送を行うアプリケーションと相性が良いため、本研究では物体光データを圧縮対象とした。

干渉縞データは 2 次元データであり、物体光データは振幅成分と位相成分に分解することで 2 次元データとして扱える。これらのデータは写真のような自然画像とは異なる画像的特徴があるため、既存の画像圧縮手法が効きにくい[4]。例えば、これらのデータに JPEG のような高周波成分を削る圧縮手法を適用すると再生像に劣化が生じる。また、従来の研究ではベクトル量

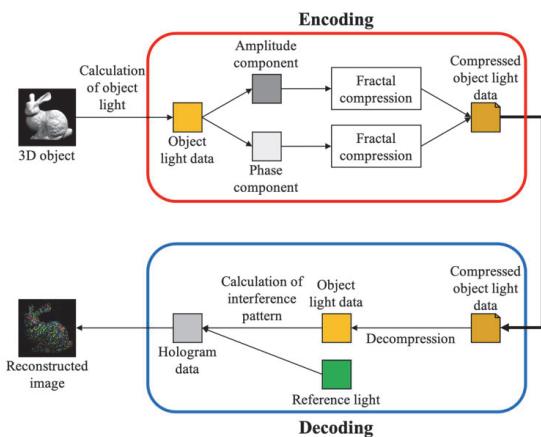


図 1 提案手法の処理手順

子化が効果的であるが[1], まだ充分な圧縮性能とはいえない. そこで, 高周波成分の損失が少ないフラクタル圧縮[5]を用いて物体光データを圧縮する手法を提案する.

## 2. 提案手法

### 2.1. 処理手順

提案手法の処理手順を図 1 に示す. 符号化過程では, 計算された物体光の圧縮を行う. 物体光データは, 1 サンプル点が実部と虚部の 2 つの単精度浮動小数点で表される. 物体光データを振幅成分と位相成分に分解し, それぞれを正規化して図 2 のような 1 サンプル点が 1 バイトの 2 つの画像データを得る. これらの 2 つの画像データに対して, それぞれフラクタル圧縮を適用し, 圧縮データを得る.

復号過程では, 圧縮された物体光データを解凍し, 干渉縞を計算する. 再生装置のパラメータに応じて参照光を計算し, 物体光と干渉させることで, 再生装置に適した干渉縞データが得られる.

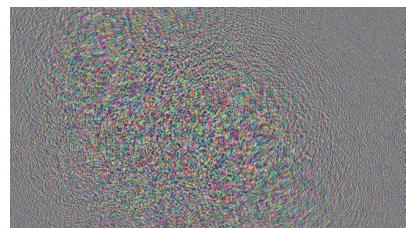
### 2.2. フラクタル圧縮

図 3 に示すように, フラクタル圧縮は, 画像をレンジブロックとそれより大きいドメインブロックにそれぞれ分割し, 各レンジブロックに対して最も近似なアフィン変換を施したドメインブロックを探査する. このドメインブロックの位置とアフィン変換のパラメータを符号化することで圧縮データが得られる. 復号は, 任意の画像を初期値として各レンジブロックにアフィン変換を複数回適用することで行われる.

本研究では, アフィン変換のパラメータとして輝度変換のスケールとオフセットのみを使用した. 回転や対称移動もパラメータとして考えられるが, これらを使用すると圧縮率や画質がほとんど変わらずに計算時



(a) 振幅成分



(b) 位相成分

図 2 振幅成分と位相成分

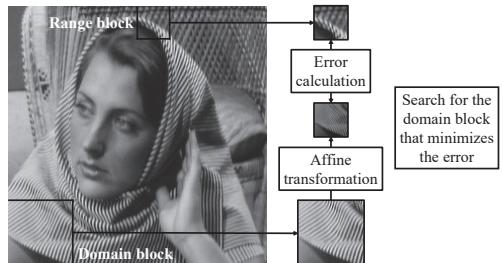


図 3 フラクタル圧縮の符号化アルゴリズム

間が膨大になることがわかったため[6], これらは使用しないことにした. また, 本研究ではレンジブロックとドメインブロックのサイズの初期値をそれぞれ  $32 \times 32$ ,  $64 \times 64$  とし, 最も近似なブロック間の平均二乗誤差(MSE)が閾値を満たさない場合は四分木を用いてブロックサイズを  $1/4$  にして探索を繰り返すことで画質の向上を試みた.

## 3. 実験結果

提案手法を評価するため, 物体光データを圧縮し, 圧縮率と圧縮後の物体光データから得られる干渉縞データの画質を測定した. また, 比較のため, 図 1 のフラクタル圧縮をベクトル量子化と JPEG にそれぞれ置き換えて同様に測定を行なった. ここで, ベクトル量子化とは, 画像を任意のブロックサイズに分割し,  $k$  平均法によりクラスタリングを行い, コードブックを作成して圧縮する手法[7]を指す. ベクトル量子化については, 1 つの符号が割り当てられるブロックサイズを

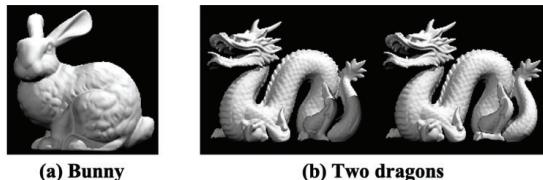


図 4 物体光計算に用いた 3 次元物体

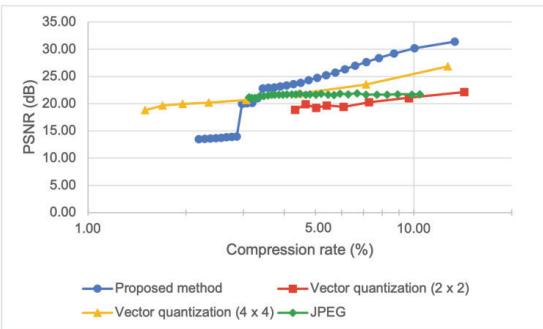


図 5 Bunny(0.5m)の圧縮率と画質

$2 \times 2$  にしたものと  $4 \times 4$  にしたもの 2 種類を用いた。提案手法では四分木分割の閾値を、ベクトル量子化では符号の数を、JPEG では quality を変化させることで圧縮率を変化させた。

物体光計算に用いた 3 次元物体を図 4 に示す。図 4(a) の 3 次元物体をホログラム面からそれぞれ 0.5m, 1.0m の距離に置いて計算した物体光 2 種類と、図 4(b) の 3 次元物体をホログラム面から 0.5m の距離に置いて計算した物体光の合計 3 種類を圧縮対象のデータとした。以降、これらの物体光データをそれぞれ Bunny(0.5m), Bunny(1.0m), Two dragons とする。これらの物体光データは、フルカラーで波長が R:651nm, G:512nm, B:441nm, ピクセル数が  $1920 \times 1080$ , ピクセルピッチが  $6.4\mu\text{m}$  の再生装置を想定して計算されており、そのデータ量は 47.4MB である。また、物体光計算時の点光源数は、Bunny(0.5m) が 17304 点、Bunny(1.0m) が 4362 点、Two dragons が 33898 点である。

Bunny(0.5m)に対する提案手法、ベクトル量子化、JPEG の圧縮率と画質の関係を図 5 に示す。ここで、圧縮率(Compression rate, CR)は以下の式で表され、値が低いほど圧縮性能が高いことを示す。

$$\text{CR}(\%) = \frac{\text{Compressed size}}{\text{Uncompressed size}} \times 100 \quad (1)$$

また、干渉縞データの画質の指標として、PSNR を用いている。PSNR は一般的に値が高いほど高画質であるとされる。図 5 から圧縮率が約 4%以上の部分では

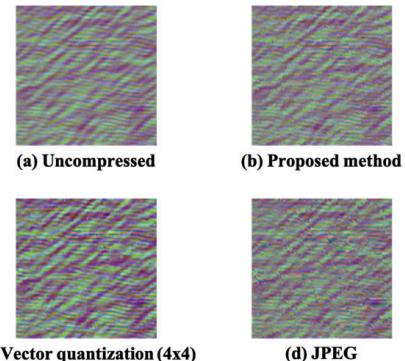


図 6 Bunny(0.5m)の干渉縞データの一部

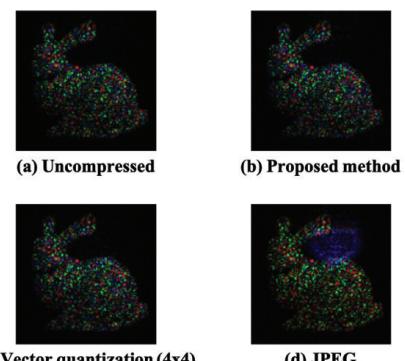


図 7 Bunny(0.5m)のシミュレータによる再生像

提案手法の PSNR が最も高くなっている、ベクトル量子化( $4 \times 4$ )、JPEG、ベクトル量子化( $2 \times 2$ )と続いていることがわかる。それぞれの手法で約 7.1% に圧縮された物体光データから得られる干渉縞データの一部とシミュレータによる再生像を図 6, 7 に示す。図 6 では、(b) の提案手法の劣化が最も少なく見える。また、(c) のベクトル量子化による干渉縞データの一部は無損失に比べて明暗の差が大きくなっている。図 7 では、(d) の JPEG で耳の付近に青い光パターンが発生している。

Bunny(1.0m), Two dragons に対する提案手法、ベクトル量子化、JPEG の圧縮率と画質の関係をそれぞれ図 8, 9 に示す。図 8 では、圧縮率が約 4%以上の部分で提案手法の PSNR が最も高くなっている。このことから、ホログラム面から 3 次元物体の距離が変化しても、提案手法は効率的に物体光データの圧縮を行えると考えられる。図 9 では、圧縮率が約 6%以上の部分で提案手法の PSNR が最も高くなっている。このことから、記録する 3 次元物体の大きさや形状が変化しても、提案手法は有効であると考えられる。

提案手法とベクトル量子化( $4 \times 4$ )の物体光データの

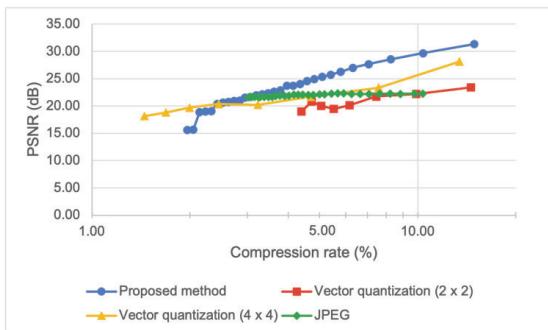


図 8 Bunny(1.0m)の圧縮率と画質

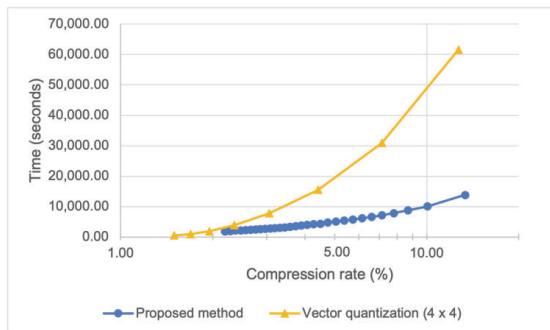


図 10 符号化の計算時間

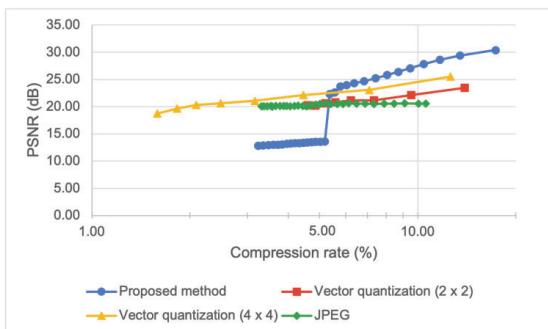


図 9 Two dragons の圧縮率と画質

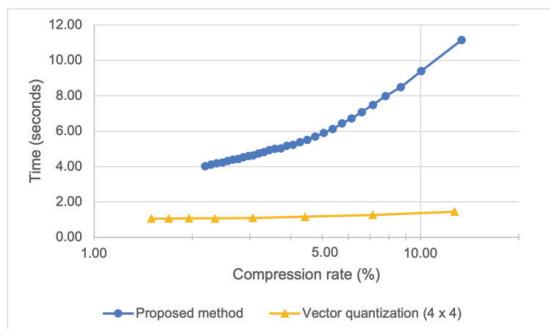


図 11 復号の計算時間

符号化と復号の計算時間を図 10, 11 に示す。ここで、CPU は Intel Core i7 9700F 3.00GHz, RAM は DDR4 16GB (2×8GB) を用いている。図 10 から、圧縮率が約 2%以上の部分で提案手法の符号化の計算時間がベクトル量子化よりも短くなっているが、提案手法も膨大な計算時間がかかっていることがわかる。これは、フラクタル圧縮の符号化における探索範囲が膨大であるためであると考えられる。図 11 から、提案手法の復号の計算時間は符号化に比べて短いことがわかるが、ベクトル量子化が圧縮率に関わらず 2 秒以内で復号できているのに対し、提案手法は 4 秒から 12 秒の間で圧縮率に関連して増加していることがわかる。

#### 4. 結論

本論文では、フラクタル圧縮を用いて物体光データを圧縮する手法を提案した。実験の結果、圧縮率がある一定以上の部分ではベクトル量子化や JPEG に比べて干渉縞データの画質が高くなることがわかった。一方で、提案手法の符号化や復号にかかる計算時間が膨大であるという問題点が存在することも明らかになった。今後は、物体光データの特徴に基づいたフラクタル圧縮の高速化を検討する必要がある。

- 文 献
- [1] P. Tsang, K.W.K. Cheung, and T.-C. Poon : “Low-bit-rate computer-generated color Fresnel holography with compression ratio of over 1600 times using vector quantization [Invited]”, Appl. Opt., 50, 34, pp.H42-H49(October 2011)
  - [2] H. Gu and G. Jin : “Phase-difference-based compression of phase-only holograms for holographic three-dimensional display”, Opt. Express, 26, 26, pp.33592-33603(December 2018)
  - [3] T. Shimobaba, D. Blinder, M. Makowski, P. Schelkens, Y. Yamamoto, I. Hoshi, T. Nishitsuiji, Y. Endo, T. Kakue, and T. Ito : “Dynamic-range compression scheme for digital hologram using a deep neural network”, Opt. Letters, 44, 12, pp.3038-3041(June 2019)
  - [4] D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H. Ottevaere, C. Schretter, and P. Schelkens : “Signal processing challenges for digital holographic video display systems”, Signal Process. Image Commun., 70, pp.114-130(February 2019)
  - [5] Y. Fisher : “Fractal Image Compression: Theory and Application”, Springer-Verlag, New York(1995)
  - [6] H. Oi and Y. Sakamoto : “Data transmission based on fractal compression of object light data in computer-generated hologram”, IWAIT2021, 7A-1(January 2021)
  - [7] 中易洋介, 鈴木幸司, 前田純治 : “画像の顕著性に基づくベクトル量子化”, 情報処理学会全国大会講演論文集, 76, 2, pp.2.333-2.334(March 2014)

# 非干渉マスク転写を用いた全方向視差高解像度 CGH のアーチ形状化

玉置 翼<sup>†</sup> 松島恭治<sup>‡</sup>

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: <sup>†</sup>k884262@kansai-u.ac.jp, <sup>‡</sup>matsu@kansai-u.ac.jp

**あらまし** レーザリソグラフィで高品質なプレート型全方向視差高解像度 CGH を作製することができるが、その視域角は描画した干渉縞の画素ピッチによって制限される。そこで本研究では、レーザリソグラフィの解像度の限界を超えて視域を広げるため、干渉縞を振幅マスクパターンとして描画し、それを非干渉転写法によってフォトポリマーにコピーしてアーチ形状化することにより水平方向視域の増大を試みた。

**キーワード** 計算機合成ホログラム、非干渉マスク転写法

## Arch shaping of full-parallax high-definition CGH using noninterference mask-transfer method

Tsubasa Tamaki<sup>†</sup> Kyoji Matsushima<sup>‡</sup>

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: <sup>†</sup>k884262@kansai-u.ac.jp, <sup>‡</sup>matsu@kansai-u.ac.jp

**Abstract** High-quality plate-type full-parallax high-definition CGH can be printed by laser lithography, but its viewing angle is limited by the pixel pitch of the printed interference fringes. In this study, to enhance the viewing angle beyond the value determined by the spatial resolution of the laser lithography, arching the CGH is attempted to increase the horizontal viewing angle. To curve the CGH, the planar hard amplitude mask, fabricated by laser lithography, is transferred to photopolymer using the noninterference mask-transfer method.

**Keyword** Computer-generated hologram, Noninterference mask-transfer method

### 1. はじめに

近年、計算機技術とコンピュータホログラフィの進歩により、“Sailing Warship II”や“Toy Train”などの数100～1000億画素規模の全方向視差高解像度 CGH が作製されるようになった[1]。このような全方向視差高解像度 CGH では、水平方向のみならず垂直方向の視差も再生成れるため、知覚矛盾が全く生じない。そのため、これらの CGH は驚くほど奥行きの深い像を再生できる。この干渉縞を描画する手法として、計算機上で数値合成した干渉縞パターンをクロム等の金属膜による二値振幅画像として描画するレーザリソグラフィ技術がある。この技術で作製した干渉縞はコントラストが非常に高いため、高品質なプレート型 CGH となる。このようなプレート型 CGH の水平垂直方向視域は干渉縞の画素ピッチによって決定される。例えば、“Toy Train”的水平方向画素ピッチは  $0.8\mu\text{m}$  であり赤色波長で再生した場合、両側視域は約 45 度となる。しか

し、画素ピッチの縮小による大幅な視域拡大はレーザリソグラフィ装置の性能上困難である。

そこで本研究では干渉縞面をアーチ形状化することによる水平方向視域の増大を試みた。このような曲面を用いた CGH としては、プリンジプリンタでフィルムに干渉縞を描画した円筒型 CGH が報告されている[2]。一方我々は、曲面を 16 平面で近似計算し、レーザリソグラフィで作製した高精度の振幅マスクパターンを可塑性のあるフォトポリマーに転写して作製した滑らかなアーチ形状 CGH を報告している[3]。このアーチ型 CGH の大きさは  $10.4 \times 5.2 \text{ cm}^2$  で、水平方向視域 115 度の自然な像を再生できたが、高次回折像と思われる多重像が確認された。本論文では同様の手法を用いて、さらに大きな  $15.7 \times 5.2 \text{ cm}^2$  のアーチ型 CGH を作製し、多重像が映らない自然な再生像が得られるアーチ型 CGH を報告する。

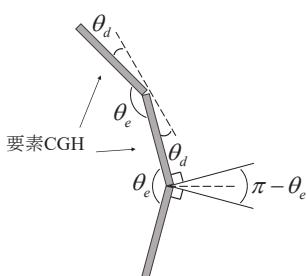


Fig.1 要素 CGH の角度

Table 1 アーチ型 CGH の視域角

	16 面近似 CGH[3]	32 面近似 CGH(本研究)
$n$	16	32
$\theta_d$ [°]	2.5	1.6
$\theta_t$ [°]	57.5	80.0

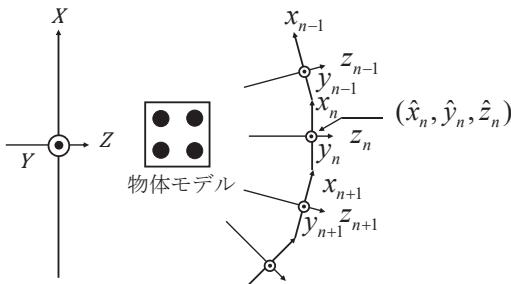


Fig.2 要素平面の定義

## 2. アーチ型 CGH

### 2.1. アーチ型 CGH の作製手順

本研究では、全方向視差高解像度 CGH の物体光波計算にポリゴン法を用いている[4]。この計算法では、ポリゴンモデルの物体から全方向視差で大規模な物体光波を計算することができる。しかし、計算された物体光波は平面上の複素振幅分布となる。そのため、物体光波を求める曲面を要素平面と呼ぶ多数の平面で近似する。要素平面上で求めた物体光波から求めた干渉縞パターンを单一平面上に展開し、レーザリソグラフィを用いて、ガラス基板上で金属膜として振幅マスクを作製する。

さらに、本研究では、この振幅マスクのパターンを非干渉マスク転写法によりフォトポリマーに転写して 2 次元的な屈折率分布を形成し、この位相ホログラムを曲げることでアーチ型 CGH を作製した。

### 2.2. 要素 CGH の角度

各要素平面から作成する CGH を要素 CGH とし、Fig.1 に示すように、隣接する要素 CGH が為す角度を

$\theta_e$  とする。この時、要素 CGH の法線が為す角度は、図中に示したとおり、 $\pi - \theta_e$  となる。この角度が要素 CGH の最大回折角  $\theta_{\max}$  の 2 倍を超えた場合、隣り合ったどちらの要素 CGH を通しても像を見ることができない死角が発生する。そのため、図中に示した設計角度  $\theta_d$  には、 $\theta_d = (\pi - \theta_e)/2 \leq \theta_{\max}$  の条件があり、 $\theta_e$  は

$$\pi - 2\theta_{\max} < \theta_e \quad (1)$$

の条件を満たす必要がある。

### 2.3. アーチ型 CGH の視域角

アーチ型 CGH の片側視域角  $\theta_t$  は要素 CGH 自体の最大回折角  $\theta_{\max}$  と設計角度  $\theta_d$  によって

$$\theta_t = \theta_{\max} + 2(n-1)\theta_d \quad (2)$$

と表される。ここで  $2n$  は要素 CGH の枚数である。干涉縞パターンの画素ピッチを  $0.8\mu\text{m}$  とすると、波長  $532\text{nm}$  では、 $\theta_{\max} = 19.4^\circ$  となる。前回報告した 16 面近似のアーチ型 CGH と本研究の 32 面近似 CGH の片側視域角  $\theta_t$  を  $\theta_{\max}$  から求めた結果を Table 1 に示す。

## 3. 振幅マスクの作製

### 3.1. マスクパターンの計算

本研究では、Fig.2 に示すように、要素平面  $n$  のローカル座標系  $(x_n, y_n, z_n)$  上で物体光波  $g_n(x_n, y_n)$  を計算した。同様に、参照光波  $r_n(x_n, y_n)$  も要素平面毎に求めた。

干渉縞強度分布  $I_n(x_n, y_n)$  を物体光波と参照光波の数値的干渉で求めるが、この時、レーザリソグラフィで描画するのはバイナリパターンであるため、双極性干渉縞強度として求めた  $I_n(x_n, y_n)$  をゼロ閾値で 2 値化して单一の平面上に展開することで、描画する振幅パターンのデータを求めている。

ここで、要素平面上における物体光波  $g_n(x_n, y_n)$  は、グローバル座標  $(X, Y, Z)$  で与えた物体モデルの頂点座標を座標変換

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_n & 0 & -\sin\theta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_n & 0 & \cos\theta_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - \hat{x}_n \\ Y - \hat{y}_n \\ Z - \hat{z}_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

を用いて要素平面毎に変換し、ローカル座標系毎に異なった向きの物体モデルとして求めている。ここで、 $(\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n)$  は要素平面  $n$  のローカル座標系の原点をグローバル座標で表した座標であり、 $\theta_n$  はグローバル座標の  $(X, Y, 0)$  平面と要素平面  $(x_n, y_n, 0)$  のなす角である。同様に、グローバル座標で与えた参照光波  $r(X, Y, Z)$  をローカル座標に変換して  $r_n(x_n, y_n)$  を求めている。

### 3.2. 物体位置の制約と不要像の抑制

Fig.3(a)に示すように、曲面を平面に近似した場合、一つの要素 CGH の幅は小さくなる。そのため、物体モデルのサイズが要素 CGH より大きくなるケースがある。このような場合、物体光波の計算範囲を拡大し

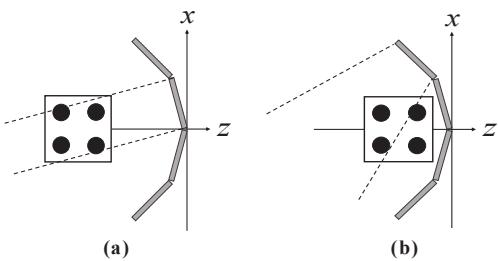


Fig.3 物体位置の制約

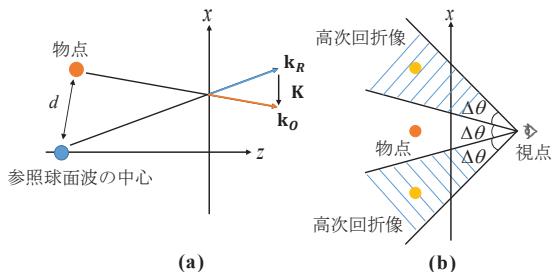


Fig.4 干渉縞の空間周波数(a)と高次回折像(b)

て干渉縞を計算し、その後干渉縞を適正な大きさにトリミングする必要がある。

しかし、Fig.4(a)に示すように、要素 CGH の干渉縞ベクトルは  $\mathbf{K} = \mathbf{k}_o - \mathbf{k}_R$  として、物体光の波動ベクトル  $\mathbf{k}_o$  と参照光の波動ベクトル  $\mathbf{k}_R$  の差分で与えられ、 $\mathbf{K}/(2\pi)$  の要素 CGH 面方向成分の大きさが干渉縞周波数となる。従って、物点と参照光の中心との距離  $d$  が大きくなると干渉縞周波数が増大する。また、Fig.4(b)に示す通り、矩形の干渉縞画素では、その空間スペクトルは画素ピッチ  $\Delta x$  で決まる周期性を有するため([1], Sec.8.9.1)，概ね

$$\Delta\theta \approx \sin^{-1}(\lambda / \Delta x) \quad (4)$$

の外側を見込むと高次回折像が見える。

そのため、アーチ型ホログラムでは、エイリアシングや高次回折による不要像を避けるためには、Fig.3(b)のような配置を避け、アーチの中心に物体を配置することが必要である。本研究では、さらに水平方向画素ピッチを従来より小さな  $\Delta x = 0.6 [\mu\text{m}]$  とすることで、不要像の発生を防いでいる。

#### 4. 透過型位相ホログラムの作製

##### 4.1. 非干渉マスク転写法の原理

透過照明で再生するために、Fig.5 に示す非干渉マスク転写法を用いて、透過型位相ホログラムを作製した[5]。この手法では、レザリソグラフィによって作製した振幅マスクとフォトポリマーを密着して平行光で露光することでマスクの振幅透過率分布と一致した 2 次元屈折率分布を形成するため、透過型の位相 CGH

が作製できる。この転写は光の干渉によるものではないため、極めて振動に強い特長がある。

#### 4.2. タイリングによる大型化

本研究では弧の長さが 15.7cm で高さ 5.2cm のアーチ型 CGH を作製するため、一度の露光で転写ができない。そこで、Fig.6 に示すタイリング転写を行った。この手法では、従来のワンショットの転写のようにホログラムのサイズに合わせてビーム径を広げるのではなく、開口を通した平行光で露光し、2 軸ステージを用いてホログラム全体を数回に分けて非干渉マスク転写を行う。この手法では、タイリング数を増やすだけで転写面積を大型化できるため、転写レーザー光源の出力が低くても大型の転写 CGH を作製することができる。実際に転写した際のパラメータを Table 2 に示す。

#### 5. アーチ型 CGH の作製結果

##### 5.1. CGH の設計

本研究で作製した 32 平面近似のアーチ型 CGH では、1 枚の要素 CGH の大きさを  $4.9 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$  とした。また、アーチ形状の曲率半径を 75mm として外角  $3.2^\circ$  の 96 角柱で近似し、 $\theta_e = 176.8^\circ$  とした。作製したアーチ型 CGH の 3D シーンを Fig.7 に、また振幅マスク計算に用いたパラメータを Table 3 に示す。

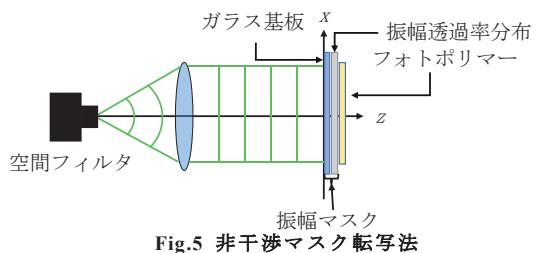


Fig.5 非干渉マスク転写法

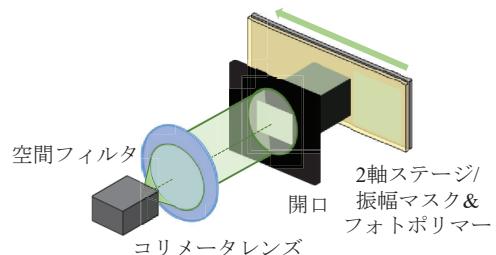


Fig.6 タイリング転写

Table 2 非干渉マスク転写のパラメータ

露光強度 [mW/cm <sup>2</sup> ]	0.6
1 タイルの露光時間 [s]	50
露光量 [mJ/cm <sup>2</sup> ]	30
開口サイズ [cm <sup>2</sup> ]	5.5×5.5
タイル数	3×1

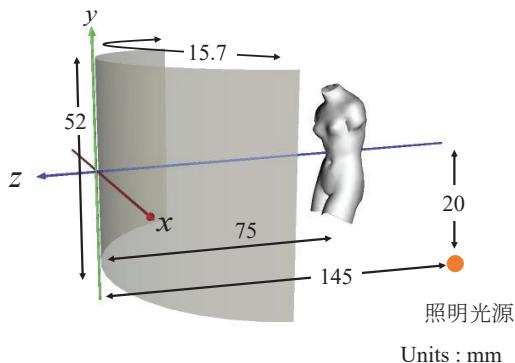


Fig.7 アーチ型 CGH の 3D シーン

Table 3 アーチ型 CGH のパラメータ

画素数	$262,144 \times 65,536$
画素ピッチ [μm]	$0.6 \times 0.8$
干渉縞面積 [cm <sup>2</sup> ]	$15.7 \times 5.2$
両側視域角(水平×垂直) [°]	$160.0 \times 45.0$
設計波長 [nm]	630
曲率半径 [mm]	75

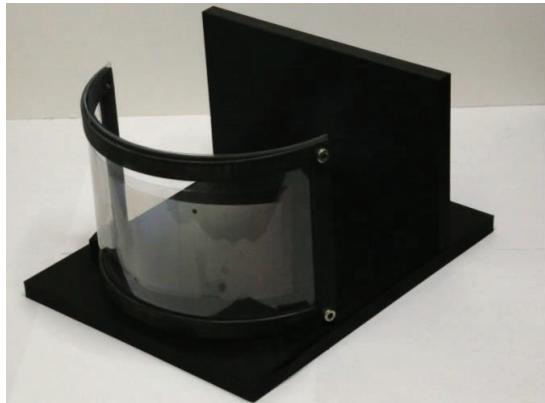


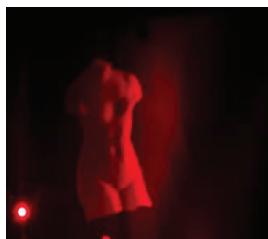
Fig.8 アーチ型 CGH の外観

## 5.2. アーチ型 CGH の再生像

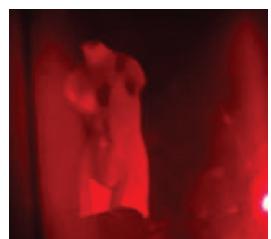
振幅マスクを 32 面の角柱型アーチとして実際に作製し、フォトポリマー Bayfol® HX200 に転写を行なった。漂白したフォトポリマーを曲率半径 75mm の円筒面に貼りつけた状態で背面より照明して、光学再生像を確認した。作製したアーチ形 CGH の外観を Fig.8 に示す。また、照明光源として THORLABS 社製光ファイバー出力赤色 LED を用いた時の光学再生像を Fig.9 に示す。32 平面で近似計算して滑らかな曲面として再生したが、再生像には全く違和感はなかった。また、多重像が生じない再生像を得ることができた。



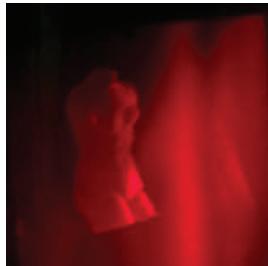
(a)正面視点



(b)左視点(-20°)



(c)右視点(20°)



(d)左視点(-50°)



(e)右視点(50°)

Fig.9 アーチ型 CGH の光学再生像

## 6.まとめ

滑らかなアーチ形状を持った CGH を作製するため、32 面で近似計算し、非干渉マスク転写法でタイリング転写したフォトポリマーで滑らかなアーチ型 CGH を作製した。その結果、違和感のない再生像を確認することができた。今後の展望としては、半円筒型 CGH の作製を試みる予定である。

## 文 献

- [1] K. Matsushima: *Introduction to Computer Holography*, (Springer, 2020).
- [2] T. Yamaguchi, T. Fujii, H. Yoshikawa: Fast calculation method for computer-generated cylindrical holograms, *Appl. Opt.* **47**, D63-D70 (2008).
- [3] 玉置, 松島: 全方向視差高解像度 CGH の滑らかなアーチ形状化による水平方向視差の増大, 3 次元画像コンファレンス 2021, 5-4(2021).
- [4] K. Matsushima, S. Nakahara: Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method, *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [5] 松島, 横山, 松尾, 雜賀: 位相変調型ホログラムの作製方法, 特許第 4535422 号.

## CGHにおける収束光を用いたスペックルレス再生像の複数視点への表示

押野見 達哉<sup>1</sup> 水戸部 将也<sup>1</sup> 坂本 雄児<sup>2</sup>

1. 北海道大学情報科学院 〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目

2. 北海道大学情報科学研究院 〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目

E-mail: 1. rarara12374@eis.hokudai.ac.jp 1, 2. {m\_mitobe, yuji}@ist.hokudai.ac.jp

**あらまし** 計算機合成ホログラムのスペックル削減に関する研究の一つに、位相乱数を用いる代わりに観察者の視点へ収束するように物体光を記録するという手法がある。しかし、この手法では物体光が収束するように記録するため、観察者の視点位置が制限されるという問題点があった。そこで本研究では、一つのホログラムに複数位置へ収束させた物体光を記録することで、複数視点にスペックルの影響が少ない再生像を表示する手法を提案し、実際の光学再生による実験からその有効性を確認した。

**キーワード** CGH, スペックル, 収束光, 複数視点

## Speckleless reconstructed image display at multi-viewpoints using convergent light in CGH

Tatsuya OSHINOMI<sup>1</sup> Masaya MITOBE<sup>1</sup> and Yuji SAKAMOTO<sup>2</sup>

1, 2. Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido University

Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0814, Japan

E-mail: 1. rarara12374@eis.hokudai.ac.jp 1, 2. {m\_mitobe, yuji}@ist.hokudai.ac.jp

**Abstract** There is a method to suppress the influence of speckle by converging the object light to a viewpoint in Computer-generated hologram. However, there is a problem that the viewing-zone is limited because the object light is converged. In this study, we proposed a method to display reconstruction image that reduces the influence of speckle by increasing the number of convergence points on one hologram, and confirmed its effectiveness from actual optical reconstruction experiments

**Keyword** CGH, speckle, converging light, multiple viewpoints

### 1.はじめに

近年、注目を浴びている立体表示技術として計算機合成ホログラム(Computer-generated hologram:CGH)があるが、像の再生にあたり様々な問題点が存在する。その問題点の一つとして、再生像がスペックルノイズにより劣化するというものが挙げられる。

スペックルノイズとは、レーザーのようなコヒーレント性の高い光をスクリーンのような物体表面が粗い部分に照射するときに、反射した光波が互いに干渉することで生じる粒状ノイズのことを示す。CGHにおいては、物体光の記録を行うために、物体光の位相部分に付与する乱数である、位相乱数を付与することで物体表面の拡散性を再現している。しかし、位相乱数を付与する点と、ホログラムの再生時にレーザーを用いる点からスペックルノイズが生じてしまう。

以上のような、スペックルによる問題に対して様々な解決法が提案されてきた。尼子らの研究[1]では、一つの静止画を再生するために、異なる位相乱数でホロ

グラムを複数枚生成し時分割で多重化して再生することで、残像効果によりスペックルノイズの影響を抑制している。しかし、この手法では作成したホログラムの枚数の平方根を取った分がスペックルの影響の抑制度合いとなることから、多くのホログラムを生成するため計算コストが高くなるという問題点がある。また再生するにあたっても高フレームレートな空間光変調器を用いないといけないという問題点がある。

また、マコースキーらの研究[2]では理想的な物体光の位相分布に近づけるために、反復計算を行うことでスペックルノイズの影響を抑制している。しかし、この手法ではノイズの影響を抑制するために膨大な回数の反復計算が必要となるため、計算コストが高くなるという問題点がある。

下馬場らの研究[3]では、ホログラフィックプロジェクトとして CGH の技術を利用する上で、スクリー

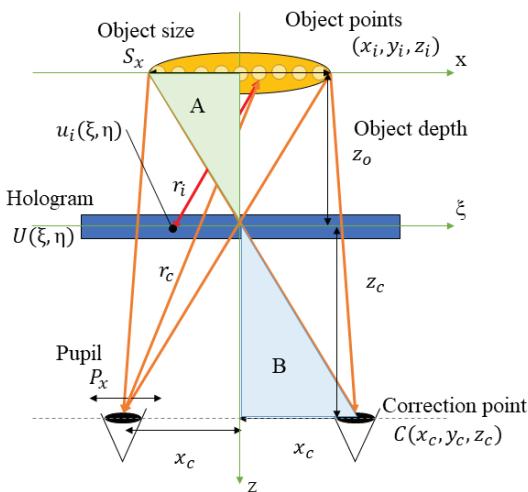


図 1. 物体光の計算概要

ン面に収束するように物体光を記録することで、スペックルノイズの影響が小さい再生像を得ている。しかし、この手法はプロジェクターとしてスクリーン上に結像することを考えており、観察者が立体の虚像を直接観察することは考えられていない。

また、押野見らの研究[4]において、スクリーンではなく観察者の視点位置に直接再生像が収束するように物体光の記録を行うことで、スペックルノイズの影響が小さい再生像を得ている。しかし、この手法では物体光を視点位置へ収束させているため、収束位置から少しでも観察者の視点が移動すると物体が観察できなくなるという問題点がある。

そこで本研究では、物体光の収束位置を複数位置に増加することで、疑似的な視域の拡大を行った。また、複数位置に収束させる場合に満たすべき記録条件に関しての理論的な導出を行った。本研究でのホログラムの計算方法は点充填法[5]を用いた。

以上の研究により、将来的には一つのホログラムから両眼でスペックルノイズの影響が小さい再生像の観察が可能になると考えられる。

## 2. 提案手法

本章では、提案手法のもととなる押野見らの研究[2]の物体光の計算方法の説明を行い、そこから収束位置を複数位置に増加する方法を説明する。また、収束位置を複数にする場合によって生じる再生像の劣化を防ぐ記録条件を説明する。

物体光の計算方法は点充填法[5]をもとに、物体光に付与する位相乱数に代わり、図1に示すような視点位置  $C(x_c, y_c, z_c)$ へ収束するような位相分布の計算を行う。その計算式は、

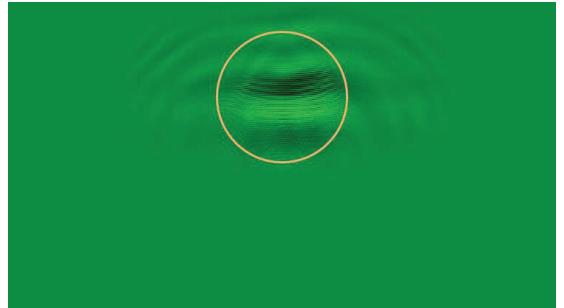


図 2. 収束光を記録したホログラムデータ例

$$U(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^N |g_j| \exp[-ik\{r_j(\xi, \eta) - r_c\}], \quad (1)$$

$$r_c = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2}, \quad (2)$$

となる。ここで、 $|g_j|$ は物体光の振幅を、 $k$ は波数を、 $r_j$ は物体光からホログラム上のある位置  $(\xi, \eta)$ までの距離を表している。また、 $r_c$ は点光源から収束位置までの距離を表している。これにより位相乱数を付与せずに物体光の記録を行う。物体光を記録するときには、シングルサイドバンド法に基づいた共役像除去の手法[6]を用いている。そのため、実際に記録する物体光の範囲は空間周波数  $f_\eta$  を用いて、

$$f_\eta < -\frac{\eta}{\lambda\sqrt{\eta^2 + z_i^2}}, \quad (3)$$

の範囲で記録を行っている。

ここから、物体光の収束位置を複数位置に増加する方法について説明を行う。本研究では、物体光から各収束位置までの物体光計算を行い、それらを足し合わせたものを複数位置に収束する物体光とした。これにより複数位置へ収束する物体光の計算が実現できる。

次に、複数位置へ物体光を収束させる場合に満たすべき条件は、物体光を収束する場合に図2に示したような、ホログラム面上で生じる物体が投影されたような像が重複しないことである。このような投影像が重複してしまうと、位相乱数を用いていないためホログラム上の干渉縞同士が干渉し、スペックルとは違う規則的なノイズが生じる可能性がある。

そのため、干渉縞同士の干渉を解決するために満たすべき  $|x_c|$  の条件を考える。図1の三角形A,Bが相似のため、ホログラム面上で生じる物体の投影像が重複しないための間隔  $|x_c|$  が求められる。物体の大きさ  $S_x$  および、ホログラム面から物体までの奥行き  $z_o$ 、そしてホログラム面から収束位置までの奥行き  $z_c$  を用いて、

$$|x_c| \geq \frac{1}{2} S_x \frac{z_c}{z_o}, \quad (4)$$

となる。条件式(4)を満たす間隔  $|x_c|$  に収束位置を設定することで、ホログラム面上で生じる投影像が重なることで生じる再生像の劣化を防ぐことができる。

表 1. 光学系のパラメータおよび記録条件

LCD	Pixel pitch	8.0[μm]
	Number of pixels	1920×1080[px]
	Wavelength of laser	512[nm]
	$S_x$	4[mm]
	$z_0$	100[mm]
	$z_c$	800[mm]

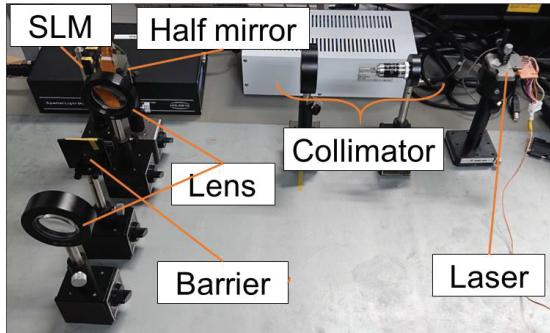


図 3. 実際の光学装置

### 3. 実験および議論

本章では、複数位置に収束していることの確認および、スペックルノイズの影響の評価を行った。また、提案手法で述べた収束位置の設定に関する実験を行った。

それぞれの実験では、表 1 のようなデバイスのパラメータおよび記録条件で行い、実験により  $x_c$  の値を変更して行った。図 3 はホログラムの再生に用いた光学装置を示しており、フーリエ変換を利用することでゼロ次光などの不要光の除去を行っている。図 4 は実験の元となる CG データ、表 1 の記録条件で点充填法を用いた再生像、そして先行研究で行われた収束位置が一つの時の再生像である。

#### 3.1 複数位置への収束の確認およびスペックルコントラストの測定

本節では、物体光が複数位置へ収束していることを確認するために実験を行った。このときの  $x_c$  の値は、 $x_c = 16$ とした。このときの再生像を図 5 に示す。カメラの位置は光軸を中心として左から順番に  $-16[\text{mm}]$ ,  $0[\text{mm}]$ ,  $16[\text{mm}]$  の位置で撮影を行った。実験結果から、物体光を収束させた位置でのみ再生像が観察でき、収束させていない位置では再生像が観察できないことが確認された。これにより、物体光が複数位置で収束していることが確認できた。

また、これらの再生像に対してスペックルコントラストの測定を行った。スペックルコントラストの測定

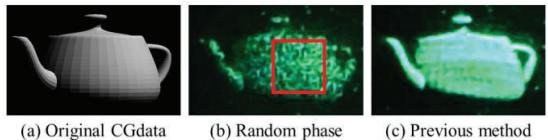


図 4. CG データおよび点充填法の再生像

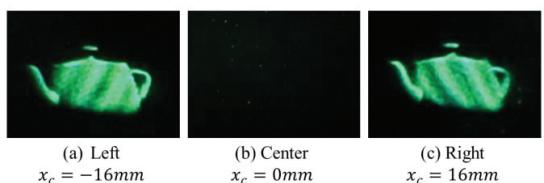


図 5. 2 視点の再生像

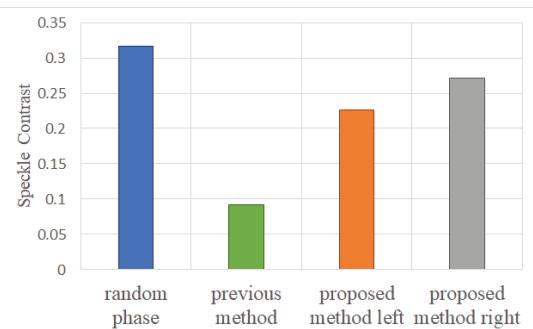


図 6. スペックルコントラスト

箇所は図 4(b)に示した赤枠内の部分  $35 \times 35[\text{px}]$  を図の 4(b), (c) および図の 5(a), (c) それぞれで測定を行った。その結果を図 6 に示す。これにより、スペックルコントラストは位相乱数を用いた場合に対して、左側に収束させた場合では約 29% の削減、右側に収束させた場合では約 14% 削減していることがわかる。しかし、1 視点に収束させた場合では、位相乱数を用いた場合に対して約 71% 削減していることから、削減率は複数視点の方が劣っている。

#### 3.2 条件に関する再生像の劣化の実験

本節では、条件式(4)に関する実験を行った。今回の記録条件においては  $x_c = 16[\text{mm}]$  以上の位置に物体光の収束位置を設定することで劣化が生じない。そこで、 $x_c$  の値が小さい場合と、理論式近辺での値の場合との二種類の記録条件で実験を行った。図 7 は条件式(4)を満たさない場合(a)と満たす場合(b)で生成したホログラムを示し、図中の丸印はホログラム面上で生じる投影像を示している。ここで、図 7(a)では、丸印で示したように投影像が重なり、干渉していることがわかり、図 7(b)では、投影像は重なっておらず、干渉していないことがわかる。図 8 は  $x_c$  の値をそれぞれ、 $x_c = 2[\text{mm}]$ ,  $3[\text{mm}]$ ,  $4[\text{mm}]$ ,  $5[\text{mm}]$ とした場合の再生像を、図 9 は、 $x_c = 14[\text{mm}]$ ,  $16[\text{mm}]$ ,  $18[\text{mm}]$ とした場合の再生像を

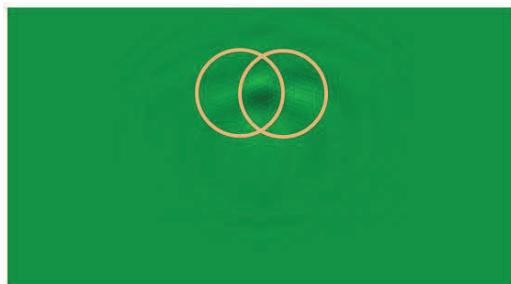
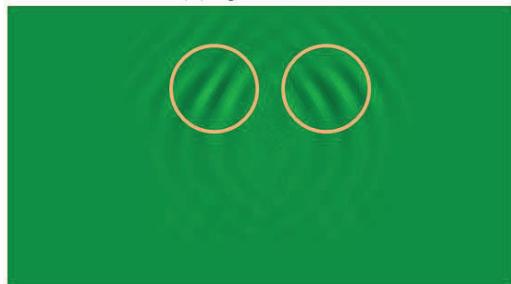
(a)  $x_c = 4\text{mm}$ (b)  $x_c = 16\text{mm}$ 

図 7. 提案手法のホログラムデータ

示す。図 8(a)のような、間隔が狭い場合には、特徴的な縦縞パターンが発生するが、そこから  $x_c$  の値を大きくすると縦縞パターンが消えることがわかる。また、図 9 のような理論式近傍でも、特徴的な縦縞パターンが発生していない。このことから、式 4 の干渉縞同士の干渉を考える必要はなく、狭い間隔で収束位置を設定できる。

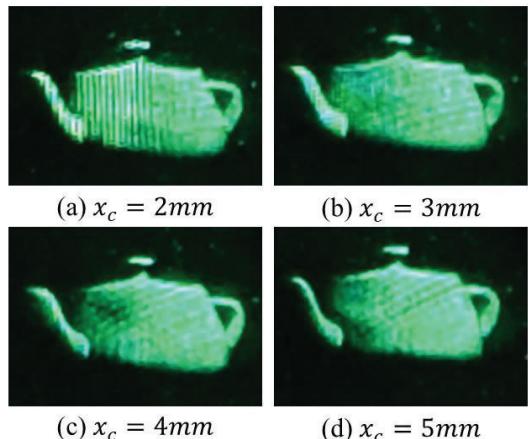
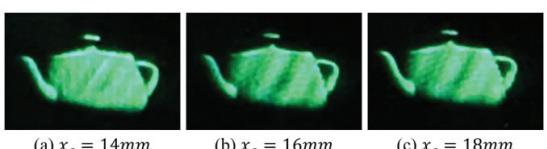
### 3.3 議論

図 4, 8 にみられるように既存の手法を用いて複数位置に収束させる場合には、再生像に特徴的な明暗パターンが生じてしまう。これにより図 4, 5 からわかるように、一つの位置に収束する場合に比べてスペックルの影響が抑えられていない。また、実験 2 から明暗パターンの間隔がなくなるほど目立たないということがわかる。

### 4.おわりに

本研究では、物体光を収束する位置を複数点に増加することでスペックルノイズの影響が小さい再生像の観察位置を増加することで、疑似的な視域の増加を行った。また、収束位置の増加に伴って生じる、収束位置の設定において満たすべき条件に関する研究を行い、それらの有効性を実際の光学再生実験を行い評価した。

以上の実験結果から、複数位置でスペックルの影響が小さい再生像が確認でき、物体の大きさと収束位置との関係から再生像が劣化する条件が正しいことを確認した。

図 8.  $x_c$  が小さい場合の再生像図 9.  $x_c$  が大きい場合の再生像

しかし、既存の手法を用いて複数位置に収束させる場合には再生像に特徴的な明暗パターンが生じてしまうという問題点も確認した。

今後の課題としては、明暗パターンが発生する原因を究明し、一つの位置に収束する場合と同程度になるほどスペックルの影響を抑制することが挙げられる。

### 文 献

- [1] J. Amako, H. Miura, and T. Sonchara : "Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator", Appl. Opt. 34, pp. 3165–3171 (Jun 1995).
- [2] M. Makowski, M. Sypek, A. Kolodziejczyk, and G. Mikula : "Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative Fresnel algorithm," Opt. Eng. 44, 1 – 7 (Dec 2005).
- [3] T. Shimobaba, and T. Ito : "Random phase-free computer-generated hologram", Opt. Express, 23 (7), pp. 9549-9554 (Feb.2015).
- [4] T. Oshinomi, M. Mitobe, and Y. Sakamoto : "Speckleless reconstructed image display using convergent light in CGH", IWAIT2021, Poster Session 1 (Jan 2021).
- [5] J. P. Waters : "Holographic image synthesis utilizing theoretical methods", Appl. Phys. Lett. 9, pp. 405–407 (Oct 1966).
- [6] 坂本雄児 : "空間周波数フィルタリング法による計算機合成ホログラムの共役像除去", 映像情報メディア学会誌, Vol. 59, No. 4, pp. 588-591 (Apr 2005).

## 2面コーナーリフレクター陣とホログラフィック光学素子による 背景透過空中ディスプレイ

中尾 勇・坂本 匠・山口雅浩

東京工業大学 工学院 情報通信系 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259-G2-28

E-mail: nakao.i.aa@m.titech.ac.jp

あらまし 我々は DCRA (2面直交コーナーリフレクター陣) とホログラフィック回折素子を組み合わせた、背景透過（シースルー）空中ディスプレイを提案する。この方式は、二つの表示技術を組み合わせたものであるが、それぞれの課題である虚像の抑制と波長分散の補正も同時に実現する。

**キーワード** aerial display, DCRA, HOE, color dispersion compensation, virtual image

## See-through aerial display by a dihedral corner reflector array and holographic optical elements

Isamu Nakao, Takumi Sakamoto, Masahiro Yamaguchi

Tokyo Institute of Technology, School of Engineering,  
Department of Information and Communications Engineering

4259 Nagatsuta cho, Midori-ku, Yokohama city, Kanagawa 226-0026, Japan

E-mail: nakao.i.aa@m.titech.ac.jp

**Abstract** We propose a novel aerial display system combining hologram mirrors and a dihedral corner reflector array (DCRA). And it has the see-through capability. In addition, the virtual image, which often disturbs the observation of aerial images, can be suppressed. The color dispersion in the holograms is effectively compensated, too.

**Keyword** aerial display, DCRA, HOE, color dispersion compensation, virtual image

### 1. 緒言

空中ディスプレイとジェスチャー認識を組み合わせたユーザーインターフェイス(UI)が注目を集めている。これは、ユーザーエクスペリエンス(UX)の斬新さだけでなく、2021年夏季現在世界的に収まっている新型コロナ感染症の公共タッチセンターにおける接触感染防止への期待という側面もある。

単純な空中ディスプレイの実現方法としては、結像レンズやフレネルレンズを用いて、FPD（フラットパネルディスプレイ）の実像を投影する方法がある[1]。この方法には、歪像や色収差が発生するため補正手段が必要になる。解決する方法として、ハーフミラーと再帰反射ミラーを用いる方式[2]、DCRA[3,4]、GRINレンズアレイ[5]を用いて結像する方法などが提案されている。

一方で、空中に投影するディスプレイとしては、SF映画で登場するような、背景と一緒に2次元や3次元の像を観察するようなものが一般ユーザーの期待と思われる。また、背景との同時観察は、UIに応用

した場合、操作対象とタッチ物体と一緒に観察しながら操作できるといったことが可能になる。例えば、自動車のドライバーが、前方車両や歩行者から目をそらさずに、フロントウインドウを介して投影された空中像に触って操作できるようになる。また手術中の医師が、患部から視線をそらすことなく、手術用機器の操作に利用できる可能性がある。さらに、シースルー機能は、既存の接触タッチセンサー上に搭載することで、ソフト等の部分変更追加のみで、空中像操作が実現できると考えられる。これにより、鉄道等の事業者の投資を抑制することも期待できる。これは早期市場投入による感染拡大防止につながるものである。

これまで提案されている空中ディスプレイは、背景が黒色あるいは投影光学系が見えるものがほとんどである。シースルー空中ディスプレイの提案は、ハーフミラーと再帰反射ミラーを用いた方式の一つが唯一と思われる[6]。

今回の提案は、シースルーと同時に用いられる二つの技術要素の課題も相補的に改善する。

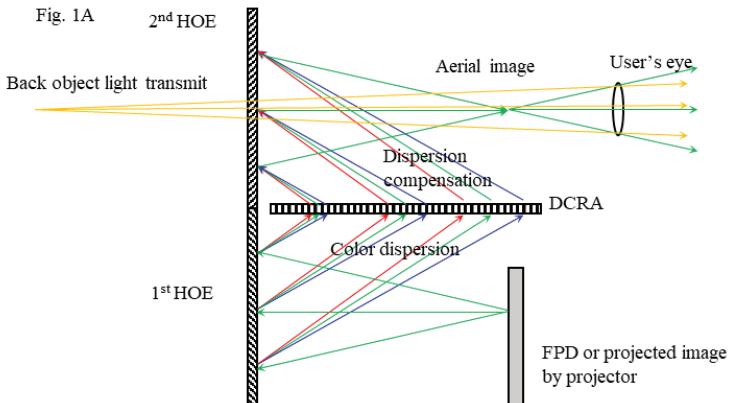


Fig. 1B

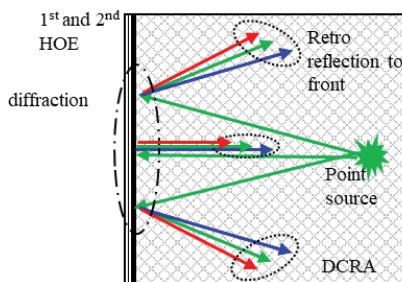


Fig. 1C

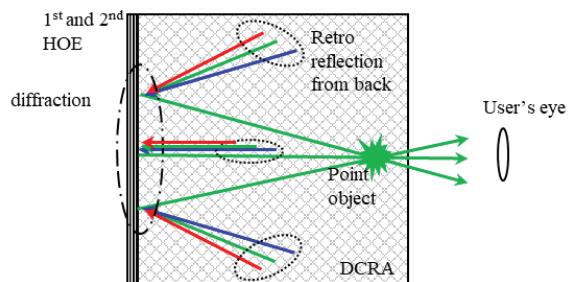


Fig. 1, Schematic illustration of the proposed see-through aerial display system. Fig. 1A, 1B, and 1C show the side view, the top view of lower part than DCRA, the top view of upper part than DCRA. The original display is an FPD or a projected image by a projector. DCRA plays roles of the color dispersion compensation and the imaging. The 2<sup>nd</sup> hologram mirror is in the symmetrical configuration to DCRA plane. Broken ellipses show the part of in-plane retro-reflection parts. Dashed-dotted ellipses show diffraction parts

## 2. 提案方式

### 2.1. 光路及び空中像

図 1 に本提案の光路図を示す。水平に配置された DCRA に対しユーザーの対向側に垂直に、同等な二つの体積ホログラムミラー(1<sup>st</sup> HOE、2<sup>nd</sup> HOE)を置く(図 1A)。これらは入射及び回折角がそれぞれ HOE 面に対し垂直及び斜めになるよう設計されている。1<sup>st</sup> HOE と 2<sup>nd</sup> HOE は上下に回折方向が対向して DCRA に向かうように配置される。FPD 上の一点から放出された拡散光は 1<sup>st</sup> HOE で回折され、波長分散を伴い DCRA に入射する。DCRA の特性[5]により、側面図(図 1A) DCRA より上部光路は、下部の光路と対称になる。これによって、点光源の対称な位置に点像が結像する。上面図は DCRA の上部下部に対し、図 1A,B のような光路となる。

空中像実験のため次のようなセットアップを用意

した。1<sup>st</sup> HOE、2<sup>nd</sup> HOE は物体光と参照光を垂直及び 45° 入射の平面波でフォトポリマーに露光した反射型カラー ホログラム、DCRA はパリティイノベーションズ製デバイス、光源画像にはプロジェクターによる透過スクリーン投影画像を用い、図 1 に示す光路を構成した。これにより投影した空中像を図 2 に示す。図 2A~C は、カメラのフォーカスを空中像(アルファベット)、2<sup>nd</sup> HOE、背景に合わせて撮影したときの写真である。奥行によりフォーカス位置が異なっており、空中像が生成されていることが確認できる。

### 2.2. 波長分散補正

虚像観察系ではホログラムに回折格子と拡散板を用いて分散補正する方法が提案されている[7]。実像投影系にホログラムを用い、その波長分散補正する方法は本提案が初めてと思われる。波長分散は 1<sup>st</sup> HOE で生ずるが、2.1 で説明した DCRA より後の対称光路により補正される。



Fig. 2. Fig.2A to C were focused on the aerial images, the hologram mirror, and the background image.

Fig. 3B

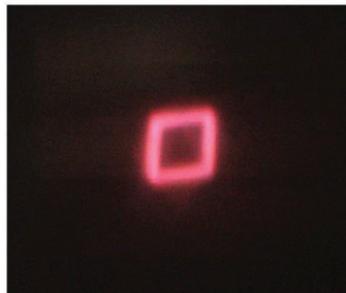


Fig. 3C

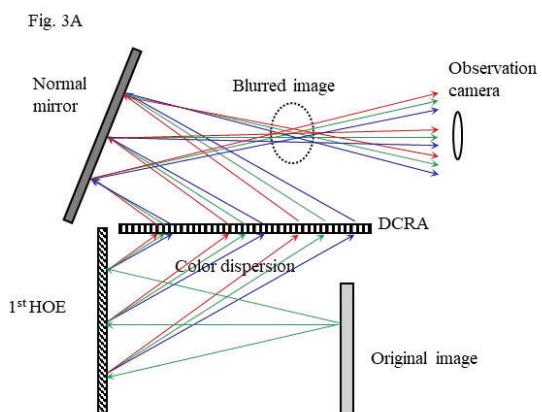


Fig. 3. Fig. 3A shows the 2<sup>nd</sup> HOE replaced configurations by the normal mirrors Fig. 3B and C show the aerial image of framework square shape projected by the proposed configuration and the replacement configuration. In Fig. 3C, the image has the blur in diffraction (vertical) direction. But the image in Fig. 3B does not have blur. This shows the spectral dispersion compensation works effectively

このような補正の効果を確認するために、2<sup>nd</sup> HOE を通常ミラーに置換えた比較光路（図 3A）で比較画像を撮影した。図 3B、C は、それぞれ提案方式及び比較光路で投影した正方形フレームパターンの空中像である。提案方式では縦横方向のボケは同程度であるが、比較光路での空中像では回折方向（縦方向）に大きなボケが発生していることがわかる。

### 2.3. 虚像抑制

図 4A の上面図に示すように、虚像は部分的に抑制されると考えられる。虚像は DCRA にアレイ状に形成された正方貫通穴の内壁面ミラーで一回だけ反射される場合に生ずる[3]。この図の緑色点線のように、下部点光源から放射された光線は、1<sup>st</sup> HOE にて Bragg 条件下で回折した後 DCRA に下部より入射する。正方貫通穴は各内壁面がホログラム面に対し 45° で配置されているため、水平角 45° で 1<sup>st</sup> HOE



を回折する光線以外は、DCRA での 1 回反射により、上部 2<sup>nd</sup> HOE へ入射する角度が変化し、Bragg 条件を満たさなくなる。このため、これらの光線は 2<sup>nd</sup> HOE を透過し、ユーザー側から虚像は観察されなくなる。1<sup>st</sup> HOE で水平角 45° で回折する光線のみが虚像として観測される（緑色実線）。またホログラムミラーの回折角が、水平入射角 45° の光線を生成しない場合は、このような虚像も抑制される。

これを確認するために、図 4B に示す二つの HOE を通常のミラーに置換えた比較光路を用いて虚像抑制の比較を行った。使用したホログラムミラーは 2.1. と同じものである。図 4C は比較光路による投影像である。中央の空中像の左右斜め下方に二つの虚像が確認できる（黄色点線内）。図 4D は提案光路による像であるが、観察カメラを含めミラーをホログラムに戻したこと以外は全く同じ条件で撮影した結果である。

虚像は観察されず、カメラ感度を100倍上げても同様であった。この実験では、ホログラムの回折角は垂直方向に45°である。このため水平方向の回折角は最大±22.5°となる。この角度制限により、1<sup>st</sup> HOEでは水平角45°でDCRAに入射する光線を生成しないため、虚像が観測されないと考えられる。

### 3.まとめ

DCRAとHOEを用いた背景透過空中ディスプレイ投影方式を提案した。また同時に、これらの課題となっている波長分散と虚像を解決あるいは改善することを示した。背景透過空中ディスプレイは、ジェスチャーと一緒に組み合わせたときに操作物体から視線を逸らす必要がないなどのUI、UX的操作性の良さだけでなく、感染症拡大防止の点からも早期の実用化が望まれる。

### 文献

- [1] I. Nakao, et al., A Psychometric Evaluation of

Fig. 4A

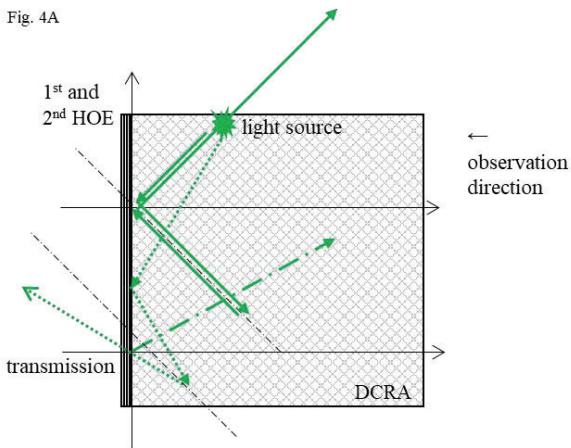
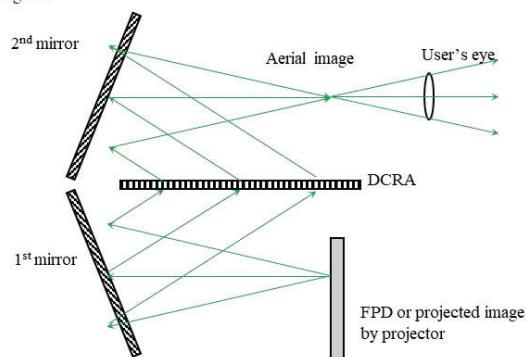


Fig. 4B



the User Interaction System Combining an Aerial Display with Gesture Recognition, ITE Trans. on MTA Vol. 6, No. 3, pp. 217-225 (2018),

- [2] Yamamoto, H., Suyama, S.: Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR). SID 2013 DIGEST, 895 (2013)
- [3] S. Maekawa, et al., "Transmissive optical imaging device with micromirror array," Proc. SPIE 6392, 63920E (2006).
- [4] AERIAL IMAGING, <http://aerialimaging.tv/>. Accessed 5 Nov. 2016
- [5] J. Arai, et al., Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images, Appl. Opt., Vol. 37, No. 11, 1998, p. 2034
- [6] D. Nishimura, et al., Aerial Signage Formed with AIRR and DS3D Display, SID 2020 DIGEST • 1623, P-74
- [7] F. Watanabea, et al., Dispersion compensation for fullcolor virtual-imaging systems with a holographic off-axis mirror, Proc. of SPIE Vol. 11306 1130604

Fig. 4C



Fig. 4D

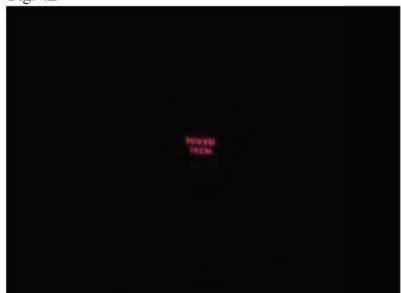


Fig. 4. Fig. 4A is the top view of the virtual image optical path. Solid and broken lines show the cases the virtual images are observed and not observed, respectively. Fig. 4B shows the side view of the replaced configuration by the normal mirrors for reference. Fig. 4C and D are the photos of the aerial images and the virtual images (inside of yellow broken line circles) projected by the reference configuration and the proposed configuration, respectively.

## 令和3年第3回

# ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■開催日： 2021年9月3日(金) 13:00～17:00

■場 所： Zoomによるオンライン開催

■テーマ： 立体映像およびホログラフィー

■共 催： 映像情報メディア学会

映像表現&コンピュータグラフィックス研究会  
立体映像技術研究会

■プログラム：

(1) ホログラフィーを用いた偏光伝播の超高速動画像イメージング技術

井上智好（京都工織大/学振），西尾謙三（京都工織大），  
久保田敏弘（久保田ホログラム工房），栗辻安浩（京都工織大）

(2) 実時間対話型ホログラムの生成と表示～写実的な描画による表現力の向上～

湯浅尚樹，吉川 浩，山口 健（日大）

(3) 放射状点拡がり関数のホログラム高速化手法への適用

安木大貴，下馬場朋祿，角江 崇，伊藤智義（千葉大）

(4) ウェーブレット変換による3次元シーン圧縮を用いたホログラム高速計算手法：  
WASABI2の提案

塩見日隆，下馬場朋祿，角江 崇，伊藤智義（千葉大）

(5) 計算機合成ホログラムにおけるフラクタル圧縮を用いた物体光データの圧縮手法  
大井裕貴，坂本雄児（北大）

(6) 非干渉マスク転写を用いた全方向視差高解像度 CGH のアーチ形状化

玉置 翼，松島恭治（関大）

(7) CGHにおける収束光を用いたスペックルレス再生像の複数視点への表示  
押野見達哉，水戸部将也，坂本雄児（北大）

(8) 2面コーナーリフレクターアレイとホログラフィック光学素子による  
背景透過空中ディスプレイ

中尾 勇，坂本 匠，山口雅浩（東工大）

■参加費： 会員，非会員，ともに無料

■問合せ先

・研究会について： e-mail [meeting@hodic.org](mailto:meeting@hodic.org)

・その他全般: HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)

## 令和3年第4回 ホログラフィック・ディスプレイ 研究会のお知らせ

- 開催日： 2021年11月下旬から12月上旬ころを予定
- 場 所： Zoomによるオンライン開催の予定
- テーマ： 未定
- プログラム： 未定
- 研究会参加申込 事前申込
- 参加費： 会員、非会員、ともに無料
- 問合せ先
  - ・研究会について: e-mail [meeting@hodic.org](mailto:meeting@hodic.org)
  - ・その他全般: HODIC 事務局  
日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛  
TEL/FAX 047-469-5391  
e-mail [office@hodic.org](mailto:office@hodic.org)

### HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では、独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております。WEB ページのアドレス（URL）は

<https://www.hodic.org/>

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。HODIC からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からぬことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから [maillist-req@hodic.org](mailto:maillist-req@hodic.org) あてに、本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください。ご質問は、[w3@hodic.org](mailto:w3@hodic.org) までお知らせください。

## ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻 内 順平	会 長	伊藤 智義（千葉大学）
副 会 長	山本 健詞（徳島大学）	前 会 長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（東京都立大学）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編 集 長	吉川 浩（日本大学）		

### 幹 事（50音順）

石井勢津子（美術家）	石川 淳（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
鎌田 康昌（凸版印刷）	坂本 雄児（北海道大学）	下馬場朋禄（千葉大学）
白木 厚司（千葉大学）	白倉 明（アーティエヌ・ヲボ）	高橋 進（凸版印刷）
松島 恭治（関西大学）	山口 健（日本大学）	山口 雅浩（東京工業大学）
渡邊恵理子（電気通信大学）		

### 相 談 役（50音順）

上田 裕昭（ヨコハマシルク・ラネタリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田ホグ・ラム工房）	酒井 朋子（千葉大学）
佐藤 甲癸	永田 忠昭（arts-unis）	三田村駿右
堀内 道夫（光と風の研究所）	本田 捷夫（本田ひかり技研）	

### 編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。  
なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の1ヶ月前が締切となります。

## HODIC Circular, Vol. 41, No. 3 (Sep. 2021)

2021年9月3日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたはFAXにてお願いいいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: [yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp](mailto:yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp)

**HODIC**