

ホログラムカレンダー

2022年10月21日（金）～23日（日）SPIE/COS Photonics Asia 2022, Jiangsu, China + Online

<https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-asia?SSO=1>

2022年11月24日（水）～25日（金）3DSA 2022, Taipei, Taiwan + Online

<https://3dsa2022.ntu.edu.tw/>

2022年12月14日（水）～16日（金）International Display Workshops, 福岡国際会議場

<https://www.idw.or.jp/>

2023年1月28日（土）～2月2日（木）SPIE Photonics West, San Francisco, California, United States <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west/>

2023年6月26日（月）～7月1日（土）12th International Symposium on Display Holography,

Seoul, Korea <http://isdh2023.kr/>

目 次

1. ホログラムカレンダー	表紙
2. 二重位相ホログラムを用いたハイブリッドポアンカレ球の赤道上の ラゲール・ガウシアンビーム生成	中村悠人, 他 1
3. インコヒーレントデジタルホログラフィにおけるホログラム補間処理を 用いた合成開口の検討	後藤正英, 他 5
4. インコヒーレントディジタルホログラフィのためのフレネル回折 計算回路の設計と実装	原 貴之, 他 9
5. フルカラ一体積型 HOE を用いた透明スクリーンカメラ	小原一真, 他 13
6. 多項式近似を用いたホログラムにおける多重像除去	塩見日隆, 他 17
7. Evaluation of the effectiveness of registration between the user's hand and reconstructed image in a holographic 3D-touch light field display	Ivan Alexis Sanchez Salazar Chavarria, et al. 21
8. 次回研究会のお知らせ	巻末

二重位相ホログラムを利用したハイブリッドポアンカレ球の赤道上の ラグール・ガウシアンビーム生成

中村 悠人[†] 角江 崇[†] 森田 健[†] 下馬場 朋祿[†] 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: yuto.nakamura@chiba-u.jp

あらまし ハイブリッドポアンカレ球上に分布される複雑な偏光状態の光は、ラグール・ガウシアン (LG) ビームの重ね合わせで生成できる。しかし、軌道角運動量に応じて LG ビームにおける動径方向の強度分布が異なるため、位相変調のみを利用して軌道角運動量の異なる 2 つの LG ビームを重ね合わせることは難しい。本研究では、位相変調型 SLM で複素振幅変調を可能にする二重位相ホログラムを利用することにより、LG ビームの動径方向の強度分布を動的に制御し、ハイブリッドポアンカレ球の赤道上に分布する LG ビームの生成を試みた。

キーワード 二重位相ホログラム, CGH, 空間光変調器, ラグール・ガウシアンビーム, 光渦, ハイブリッドポアンカレ球

Generation of Laguerre-Gaussian Beam on Equator of Hybrid-order Poincare Sphere by Double-phase Hologram

Yuto NAKAMURA[†] Takashi KAKUE[†] Ken MORITA[†] Tomoyoshi SHIMOBABA[†] and Tomoyoshi ITO[†]

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

E-mail: yuto.nakamura@chiba-u.jp

Abstract Light of a complex polarization state which is mapped on hybrid-order Poincare sphere can be generated by superposition of Laguerre-Gaussian (LG) beams. However, intensity distribution of a LG beam along the radius direction depends on its orbital angular momentum. Then, it is difficult to superpose two LG beams with different orbital angular momenta by a phase-modulation-type spatial-light modulator (SLM). In this study, we control the intensity distribution of LG beams along the radius direction using a double-phase hologram which can modulate the complex amplitude of light reconstructed from a hologram by the phase-modulation-type SLM, and generate LG beams mapped on the equator of hybrid-order Poincare sphere.

Keyword Double-phase hologram, CGH, Spatial-light modulator, Laguerre-Gaussian beam, Optical vortex, Hybrid-order Poincare sphere

1. はじめに

ラグール・ガウシアンビーム (LG) ビームとは、軌道角運動量を持つ光 (光渦) の一種である。通常の光の波面が光軸に対して垂直であるのに対して、LG ビームの波面はらせん状である[1]。また断面位相分布が方位角によって異なり、この位相分布と一光子当たりの軌道角運動量に関係性がある[2]。このような特徴から、方位角によって偏光が異なる光(ベクトルビーム)を生成できる。軌道角運動量を持たない通常の光の偏光状態を視覚的に表現する方法としてポアンカレ球があるが、通常のポアンカレ球だけではベクトルビームの偏光状態を表すのに不十分である。ベクトルビームの偏光状態を表現する方法として、高次ポアンカレ球[3]やハイブリッドポアンカレ球[4]が提案されている。

高次ポアンカレ球とは、軌道角運動量の絶対値が等しい右回り円偏光渦と左回り円偏光渦を重ね合わせることによって得られる偏光分布を、球上に分布したものである。ハイブリッドポアンカレ球は高次ポアンカレ球をより一般化したもので、異なる軌道角運動量の右回り円偏光渦と左回り円偏光渦を重ね合わせる場合にも対応している。

ハイブリッドポアンカレ球上に分布する任意のベクトルビームを自在に生成できるようになれば、ベクトルビームを用いた様々な応用事例[5]において極めて有用であると考えられる。ハイブリッドポアンカレ球上に分布する偏光状態を有したベクトルビームを生成する方法として、異なる 2 つの LG ビームを重ね合わせる手法が提案されている。LG ビームの生成方法

としては主に、高次エルミート・ガウシアンモードから変換する方法[6]、らせん位相板を用いる方法[7]、q-plate を用いる方法[8]、ホログラムを利用する方法[9,10]の4つがある。特に、ホログラムを利用する方法は空間光変調器(SLM)に描画するパターンを変更するだけで LG ビームのパターンを容易に変更できる利点がある。しかし、LG ビームは軌道角運動量によって動径方向の光の強度分布が異なる。ホログラム描画装置として位相変調型の SLM を使用する場合、得られる偏光分布が限られてしまう課題がある。そこで本研究では、位相変調型 SLM でも複素振幅変調を可能にする二重位相ホログラム[11]を用いて、再生される LG ビームの動径方向の強度分布を制御し、光強度の極大値同士の重ね合わせを実現することで、ハイブリッドポアンカレ球の赤道上に分布する LG ビームの生成を試みた。

2. 理論

2.1. ラグール・ガウシアン(LG)ビーム

LG ビームは伝搬する電磁波であるため、通常の光と同様に波動方程式を満たす。自由空間における単色光の電場ベクトルの波動方程式について考え、かつ偏光を無視するとスカラーハルムホルツ方程式が得られる。この方程式に対して近軸近似を用いた後、円柱対称な解を仮定して円柱座標で解くと(1)式で与えられる LG モードが得られる[2]。

$$\begin{aligned} u_{pl}^{LG}(r, \varphi, z) = & \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)}\right)^{|l|} L_p^{|l|} \left[\frac{2r^2}{w(z)^2}\right] \\ & \times \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w(z)^2}\right] \exp[i l \varphi] \\ & \times \exp\left[-i(1+2p+|l|)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right] \\ & \times \exp\left[-i\frac{kr^2}{2R(z)}\right] \end{aligned} \quad (1)$$

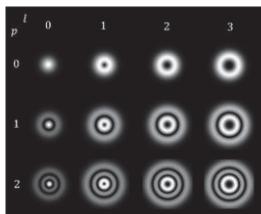


図 1：ラグール・ガウシアンビーム



図 2 : $l=1$ (左), $l=2$ (右) における LG ビームの断面位相分布

また、(1)式で表される LG ビームの強度分布や位相分布はそれぞれ図 1、図 2 のようになる。ここで、 p は動径方向のモード指標、 l は方位角方向のモード指標、 w_0 はビームウェスト位置でのビーム径、 $w(z)$ は距離 z でのビーム径、 $L_p^{|l|}$ はラグール陪多項式、 z_R はレイリー長、 $R(z)$ は距離 z での波面の曲率半径を表す。ラグール陪多項式 $L_p^{|l|}$ は次のように表される。

$$L_p^{|l|}(x) = \sum_{m=0}^p (-1)^m \frac{(p+|l|)!}{m!(p-m)!(|l|+m)!} x^m \quad (2)$$

一光子あたりの軌道角運動量はディラック定数 \hbar を用いて $\hbar l$ で表されるため、 l の変化は軌道角運動量の変化にも相当する。図 1を見てわかるように、 l すなわち軌道角運動量が異なると動径方向の強度分布が異なることが確認できる。

2.2. ハイブリッドポアンカレ球

ハイブリッドポアンカレ球上の LG ビームは係数 Ψ_R^l, Ψ_L^m と、異なる軌道角運動量をもつ左右の円偏光渦を表す直交偏光基底を用いて、(3)式で定義される。

$$|\Psi_{l,m}\rangle = \Psi_R^l |R_l\rangle + \Psi_L^m |L_m\rangle \quad (3)$$

ただし、

$$|R_l\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \exp(il\varphi) \quad (4a)$$

$$|L_m\rangle = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \exp(im\varphi) \quad (4b)$$

であり、 φ は方位角を表す。そして、次の(5)式から(8)式で定義されるストークスパラメータを図 3 の直交座標系に割り当てることで、ハイブリッドポアンカレ球上の偏光状態を表現できる。ただし、 Φ は図 3 中の $S_1^{l,m} S_2^{l,m}$ 平面における方位角を表す。

$$S_0^{l,m} = |\Psi_R^l|^2 + |\Psi_L^m|^2 \quad (5)$$

$$S_1^{l,m} = 2|\Psi_R^l||\Psi_L^m|\cos\Phi \quad (6)$$

$$S_2^{l,m} = 2|\Psi_R^l||\Psi_L^m|\sin\Phi \quad (7)$$

$$S_3^{l,m} = |\Psi_R^l|^2 - |\Psi_L^m|^2 \quad (8)$$

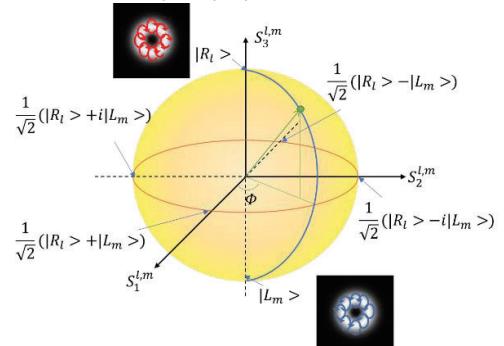


図 3 : ハイブリッドポアンカレ球

特に、ハイブリッドポアンカレ球の赤道上に分布する偏光状態は、(9)式で表せる。

$$\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{m-l}{2}\varphi + \frac{\phi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{m-l}{2}\varphi + \frac{\phi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. 提案手法

LG ビームは軌道角運動量によって動径方向の光強度分布が異なる。そのため LG ビームに対する位相変調だけでは、得られるハイブリッドポアンカレ球上の LG ビームが限られてしまう。本章では二重位相ホログラムについて説明した後、それを利用した LG ビームの光強度分布の制御方法について述べる。

3.1. 二重位相ホログラム

二重位相ホログラム[11]の概要を示す。ホログラムから再生したい光の振幅成分を A 、位相成分を φ としたとき、 A を $-1 \leq A \leq 1$ になるよう規格化したのち、ホログラム面上の隣り合う 2 ピクセルにて一方には

$$\theta_1 = \varphi + \cos^{-1}(A) \quad (10a)$$

を、もう片方に

$$\theta_2 = \varphi - \cos^{-1}(A) \quad (10b)$$

の位相変調量を与えることで、位相変調型の SLM において複素振幅変調を可能にする。

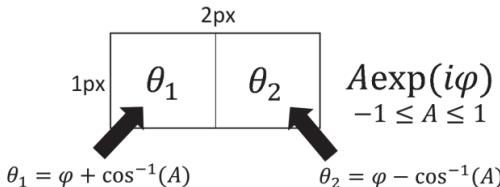


図 4：二重位相ホログラムの原理

3.2. LG ビームの動径方向における強度分布の制御

まず、同距離での LG ビームの重ね合わせを考える上で、(1)式におけるどの要素が動径方向における強度の極大値の位置を決定するかを解析する。簡単のため、(1)式の振幅成分のうち伝搬距離 z を一定として、 z に関するパラメータを定数として無視する。また、 $p = 0$ の場合に限定して考える。このとき、ラグール陪多項式の値は l の値によらず定数となることが(2)式からわかる。これらの点を踏まえると、(1)式は次のような r のみの関数 $u_0^{LG}(r)$ となる。

$$u_0^{LG}(r) = r^{|l|} \exp\left\{-\frac{r^2}{w(z)}\right\} \quad (11)$$

この関数を r に関して微分し、極大値となる位置を求めると、

$$r_{max} = w(z) \sqrt{\frac{l}{2}} = w_0 \sqrt{\frac{l}{2} \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}} \quad (12)$$

が得られる。(12)式から極大値の位置 r_{max} は、ビームウェスト位置でのビーム径 w_0 と \sqrt{l} に比例することが分か

る。

次に、二重位相ホログラムを利用して、LG ビームの極大値の位置をどのように制御してハイブリッドポアンカレ球の赤道上の LG ビームを生成したかについて述べる。本研究では方位角方向のモード指数が l と $m (l < m)$ で異なる 2 つの LG ビームを重ね合わせる。モード指数 m の LG ビームのビームウェスト位置でのビーム径を w_{0m} としたとき、(12)式より、モード指数 l の LG ビームのビームウェスト位置でのビーム径 w_{0l} を

$$w_{0l} = w_{0m} \sqrt{\frac{m}{l}} \quad (13)$$

と設定すれば、両者の光強度分布の極大値位置を等しくできる。

4. 光学実験

図 6 に今回行った実験の光学系を示す。また表 1 に光学実験における条件を示す。

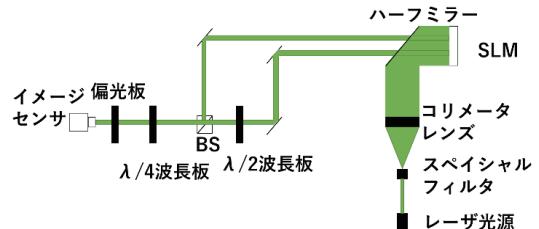
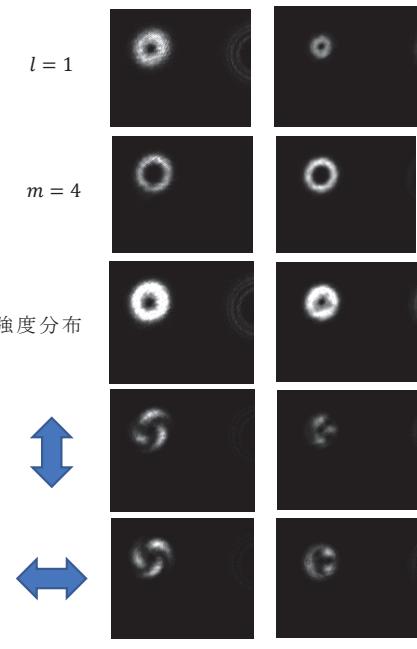


図 6：LG ビーム生成光学系

表 1：光学実験条件

ホログラムのピクセル数	3840×2160
ビームウェスト位置でのビーム径 w_{0m}	$4.0 \times 10^{-4} [\text{m}]$
ホログラムのサンプリング間隔	$3.74 \times 10^{-6} [\text{m}]$
レーザ波長	532[nm]
伝搬距離	$8.0 \times 10^{-1} [\text{m}]$

位相変調型の SLM として、HOLOEYE 社の GAEA2 を使用し、イメージセンサには Baumer 社の TXG50 を使用した。二重位相ホログラムを計算する際に必要となる物体光の複素振幅には、(1)式において $z = 0$ として得られる値を用いた。SLM からの 0 次光と LG ビームとなるホログラムからの再生光とを分離できるように、角度 2 度のオフアキシスホログラムとした。2 つの LG ビームを 1 つの SLM で同時に生成するため、2 種類の二重位相ホログラムを空間分割多重したホログラムを SLM に描画した。SLM に平面波を照射してホログラムを再生すると、方位角方向のモード指数が l と $m (l < m)$ の 2 つの LG ビームが別々に生成される。それぞれを、右回り円偏光渦と左回り円偏光渦となるように波長板を配置して重ね合わせ、イメージセンサへ入射させた。イメージセンサの手前に配置した偏光板により、重ね合わせた LG ビームの偏光分布を調べた。



(a)提案手法（制御有） (b)従来手法（制御無し）

図 7 : $l = 1, m = 4$ の LG ビームの重ね合わせ結果

図 7 に $l = 1, m = 4$ の場合において、提案手法を利用せずに生成した円偏光渦を重ね合わせた結果と、提案手法を用いて生成した円偏光渦を重ね合わせた結果を示す。図 7 左端の両矢印は、強度分布中における偏光方向の成分を表す。両者とも方位角によって異なる偏光分布を持っていることが確認できるためハイブリッドポアンカレ球の赤道上の偏光分布を持つことがわかる。ただし、制御なしの場合は、垂直偏光成分は内側に、水平偏光成分は外側に一様な偏光分布を持ってしまっていることからハイブリッドポアンカレ球の赤道上の偏光分布は部分的である。

また、制御なしで重ね合わせた場合は強度分布の極大値の位置が異なるため、垂直偏光や水平偏光成分における極大値の位置が強度分布の極大値より少し内側にある。また、極大値同士で得たい偏光成分が得られないため偏光板を通す前の強度分布と比較して偏光板を通した後の強度が小さくなっていることがわかる。

一方調節ありの場合の重ね合わせでは、強度分布の最大値の位置が一致していることから垂直偏光成分や水平偏光成分が強度分布の位置と一致しており、偏光板を通した後の強度分布も調節なしの場合と比較して大きいことがわかる。

5.まとめと今後の展望

本研究では、複素振幅変調を可能にする二重位相ホログラムを用い、LG ビームの動径方向の強度分布を制御することによって、ハイブリッドポアンカレ球の

赤道上の偏光状態を生成する手法を提案、実証した。提案手法により、軌道角運動量が異なる LG ビーム同士であっても、極大値の位置が等しくなるように重ね合わせることに成功した。今後は、ハイブリッドポアンカレ球上の、赤道上だけでなく任意の位置に分布する LG ビームの生成や、ハイブリッドポアンカレ球上の偏光状態の多重生産を目指す。本研究の一部は JSPS 科研費 20H05887, 22H01981 により行われた。

文献

- [1] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, “Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes” Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992).
- [2] 戸田泰則，“光のトポロジーを使った物性探索”，物性研究・電子版 **4**, 041205 (2015).
- [3] M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. E. L. O. van der Veen, and J. P. Woerdman, “Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum”, Opt. Commun. **96**, pp. 123-132 (1993).
- [4] M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen, and J. P. Woerdman, “Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate”, Opt. Commun. **112**, pp. 321-327 (1994).
- [5] 佐藤壯太, 中野裕一郎, 宮本克彦, 尾松孝茂, 森田健, “高次またはハイブリッドプロップホ球上の電子スピノン渦”, 2021 年日本光学会年次学術講演会, 27aD5 (2021).
- [6] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, “Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media”, Phys. Rev. Lett. **96**, 163905 (2006).
- [7] N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, and A. G. White, “Generation of optical phase singularities computer-generated holograms”, Opt. Lett. **17**, pp. 221-223 (1992).
- [8] A. V. Carpenter, H. Michinel, and J. R. Salgueiro, “Making optical vortices with computer-generated holograms”, Am. J. Phys. **76**, 916 (2008).
- [9] Giovanni Milione, H. I. Sztul, D. A. Nolan, and R. R. Alfano, “Higher-Order Poincare Sphere, Stokes Parameters, and the Angular Momentum of Light”, Phys. Rev. Lett. **107**, 053601 (2011).
- [10] Xunong Yi, Yachao Liu, Xiaohui Ling, Xinxing Zhou, Yougang Ke, Hailu Luo, Shuangchun Wen, and Dianyuan Fan, “Hybrid-order Poincare sphere”, Phys. Rev. A **91**, 023801 (2015).
- [11] C. K. Hsueh and A. A. Sawchuk, “Computer-generated double-phase holograms”, Appl. Opt. **17**, pp. 3875-3883 (1978).

インコヒーレントデジタルホログラフィにおける ホログラム補間処理を用いた合成開口の検討

後藤 正英[†] 信川 輝吉[†] 片野 祐太郎[†] 萩原 啓[†] 室井 哲彦[†]

† NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

E-mail: [†] goto.m-fk@nhk.or.jp

あらまし 自然光下での高精細な 3 次元情報の取得を目指して、インコヒーレントデジタルホログラフィ (incoherent digital holography, IDH) の研究を進めている。今回、被写体サイズの拡大に向けて、複数のイメージセンサチップをアレイ配置して大面积のホログラムを取得することを目指して、合成開口の適用を検討した。この合成開口ではイメージセンサチップ間の非露光領域により、ホログラムに格子状の欠損が生じ、再構成像の画質が劣化する。これを解決するために、バイリニア補間を応用したホログラム補間処理を考案した。シミュレーションおよび撮像実験で得られたホログラムに本手法を適用した結果、視野拡大と画質向上の効果を確認することができ、合成開口による IDH の性能向上に見通しを得たので報告する。

キーワード インコヒーレントデジタルホログラフィ (IDH), 合成開口, 補間, イメージセンサ

Synthetic Aperture Using Image Interpolation of Hologram for Incoherent Digital Holography

Masahide GOTO[†] Teruyoshi NOBUKAWA[†] Yutaro KATANO[†]

Kei HAGIWARA[†] and Tetsuhiko MUROI[†]

† NHK Science & Technology Research Laboratories 1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

E-mail: [†] goto.m-fk@nhk.or.jp

Abstract We present a method for creating a synthetic aperture (SA) with image interpolation for an incoherent digital holography (IDH) system. We explore the SA method that employs multiple image sensor chips arranged side by side, in which holograms generated across multiple sensor chips are captured at the same time. The pixel values in the blind areas between the image sensor chips are compensated using the neighborhood pixel values based on bilinear interpolation. We apply the proposed method to simulation and experimentally captured holograms in the designed IDH and observe wide field of view and an improvement in the image quality of the reconstructed images, demonstrating that this type of SA promises high-quality three-dimensional image acquisition.

Keyword incoherent digital holography (IDH), synthetic aperture, interpolation, image sensor

1.はじめに

インコヒーレントデジタルホログラフィ (incoherent digital holography, IDH) は、レーザーなどの特別な光源を使用せずに被写体の 3 次元情報を取得できる技術である。IDH では被写体からの光を自己干渉させてホログラムをイメージセンサ上に生成・撮影し、計算機によって像を再構成することで 3 次元情報を得る[1]。我々は、これまでに IDH を用いて手のひら大の物体の 3 次元情報を取得している[2]。IDH の性能向上に対する要求は、感度・フレームレートなど様々な要素があるが、その一つに被写体サイズの拡大（視野の拡大）がある。イメージセンサの受光面積を変えずに視野を拡大する方法として、光学系でホログ

ラムを縮小投影して撮影する構成が考えられるが、イメージセンサの画素数(解像度)は限られているため、再構成像の解像度が劣化してしまう。一方、イメージセンサの受光面積を拡大する手段である合成開口では、ホログラムを大きく生成して撮影できるため、視野と解像度の両立が可能となる。しかし、従来の合成開口はイメージセンサや光学部品をシフトさせながら複数回撮影していたため[3,4]、撮影に時間を要するという問題があった。

これに対し、我々は複数のイメージセンサチップを並べて配置する合成開口を検討している[5]。イメージセンサチップアレイ上に生成されたホログラムを一括で撮影する（図 1）。

本稿では、提案する合成開口の特徴と、生成されるホログラムの欠損を補うために考案した補間処理、および、それらをシミュレーションと、IDH の撮像実験により得られたホログラムに適用した結果について、報告する。

2. 提案する合成開口のホログラム補間処理

提案する合成開口では、イメージセンサチップ間に非露光領域が発生するため、ホログラムに格子状の欠損が生じる。この非露光領域は、チッピングによるイメージセンサチップ間のギャップや、各イメージセンサチップの読み出し回路・入出力配線の領域などにより発生し、再構成像を劣化させる。この問題に対処するために、図 2 に示すホログラム補間処理を考案した。バイリニア法を応用し、欠損ライン内にある画素の値を、同じ行または列の最近傍画素の距離による重み付け平均値で置き換える。横方向に処理した後、縦方向に処理することで、ラインが交差している部分もすべて補間される。

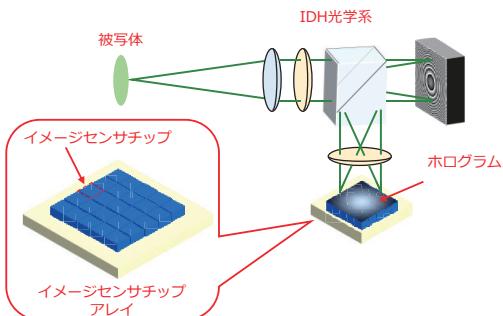


図 1 提案する合成開口

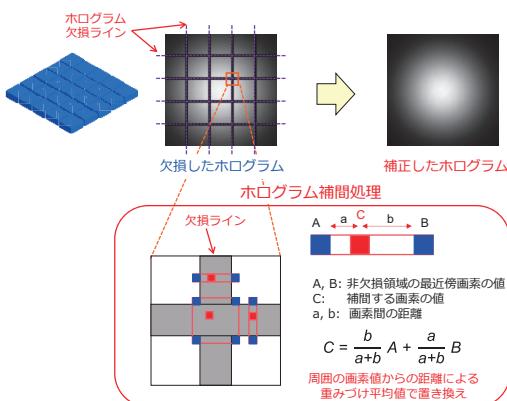


図 2 ホログラム補間処理

3. シミュレーションによる効果確認

提案する合成開口と補間処理について、シミュレーションによって効果を確認した。このシミュレーションは、被写体として入力画像を与えると、そこから IDH で撮影して得られるホログラムを生成し、演算により再構成像を得るプログラムである[6]。ここでは合成開口を想定して、このホログラムを分割や欠損させた際に再構成像がどう変化するかを調べた（図 3）。

最大で 5×5 個のイメージセンサチップがあり、10 画素分の欠損ライン幅がある想定とした。図 4 にホログラムと再構成像を示す。図 4 (a) は開口数による違いで、イメージセンサチップ数の増加に応じて視野が拡大しており、合成開口の効果を示している。ただし、ホログラムの欠損により画質は劣化している。図 4 (b) は図 2 に示す手法を用いてホログラムを補間した結果で、再構成像の画質が向上していることを確認できた。

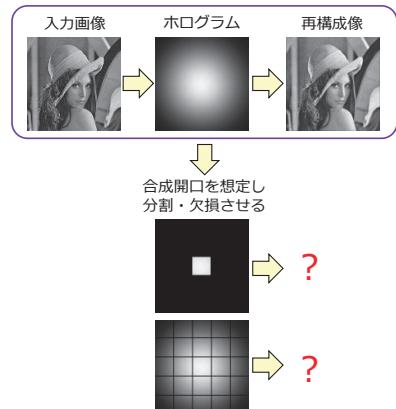


図 3 合成開口シミュレーションの流れ

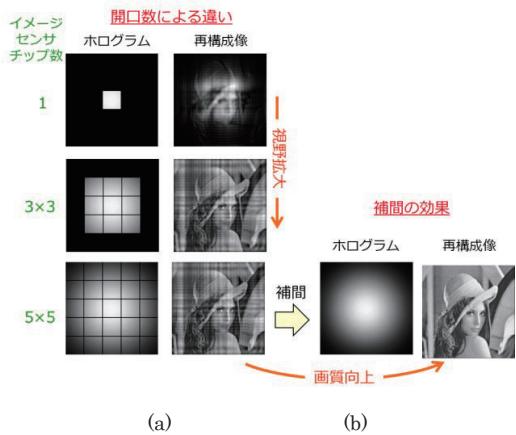


図 4 合成開口シミュレーション結果
(a) 開口数による違い (b) 補間の効果

次に、ホログラムの欠損ライン幅を変化させた時の再構成像の画質を調べた。図 5 に 5×5 個のイメージセンサチップに対する再構成像を示す。欠損ライン幅を 10 画素からさらに増やすにつれて、再構成像の画質はさらに劣化するが、ホログラムの補間により、改善することが示された。それぞれの再構成像の画質を、ホログラムに欠損がない場合の再構成像と比較し、画像評価指標である Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) および Structural Similarity (SSIM) をプロットした結果を図 6 に示す。いずれも補間後に値が向上しており、評価指標における画質改善の効果を確認した。

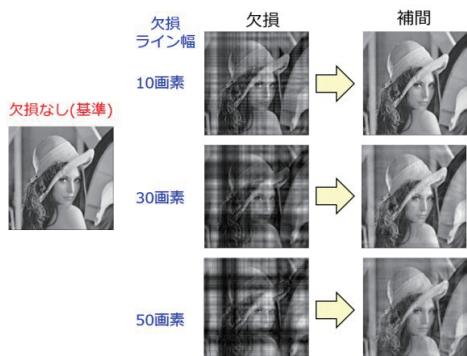


図 5 欠損ライン幅を変化させた時の再構成像

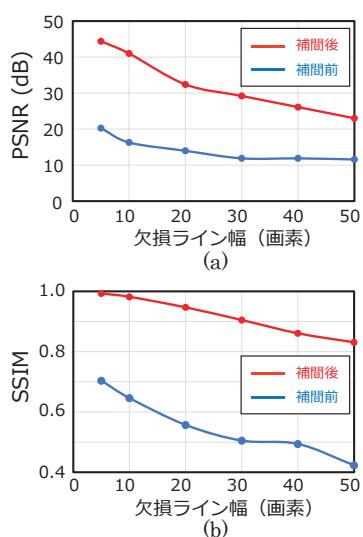


図 6 計算による各評価値の欠損ライン幅依存性

(a) PSNR (b) SSIM

4. 実験による効果確認

図 7 に示す IDH の実験系で実物体を撮影し、生成したホログラムに合成開口を適用した。被写体として透過型のチャートを用い、530 nm の中心波長を持つ発光ダイオード (light-emitting diode, LED) を光源とした。レンズを透過した光は斜め 45° の直線偏光を透過させる偏光子を経由し、空間光変調器 (spatial light modulator, SLM) により水平直線偏光成分には球面波の位相が、垂直直線偏光成分には平面波の位相が与えられる。2 つの光がビームスプリッタによって反射され、斜め 45° の直線偏光を透過させる偏光子を経由すると、2 つの直線偏光が干渉してイメージセンサ面にホログラムが生成される。SLM に 4 種類 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) の位相パターンを順次表示してホログラムを取得し、4 ステップ位相シフト法[7]により複素振幅分布を計算する。最後に、逆伝播計算により、目的の距離にある被写体の像を再構成する。今回は、イメージセンサチップアレイを用いておらず、1 つのイメージセンサで取得したホログラムを、前述のシミュレーションと同様に計算で分割・欠損させて、再構成像の様子を調べた。

図 8 に結果を示す。最大で 5×5 個のイメージセンサチップがあり、10 画素分の欠損ライン幅がある想定とした。開口数の増加につれて視野拡大と解像度の向上が見られ、合成開口の効果を確認するとともに、ホログラムの補間処理により再構成像の画質が向上することを示した。

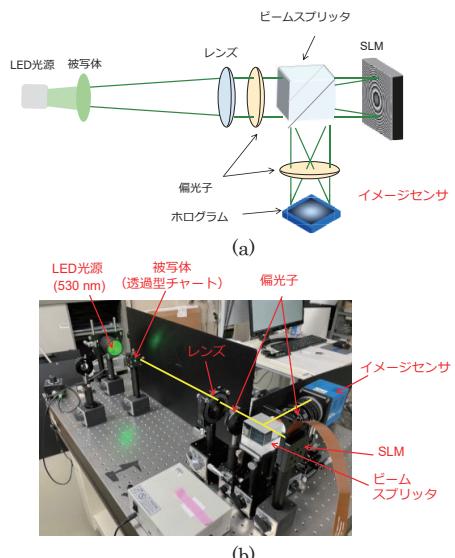


図 7 IDH の実験系

(a) 構成 (b) 実験系の写真

この実験結果についても欠損ライン幅の依存性を調べた(図9).ここでは 150×150 画素のRegion of Interest (ROI)を評価している.前述のシミュレーション同様、欠損ライン幅の増加につれて、再構成像の画質はさらに劣化するが、ホログラムの補間ににより、改善している.図10のPSNR, SSIMにおいても、補間による値の向上が示された.シミュレーションに比べて補間前後の差分が小さいのは、実験で用いた被写体には黒の画素が多く含まれており、劣化の有無による画素値の違いが出にくいためと考えられる.

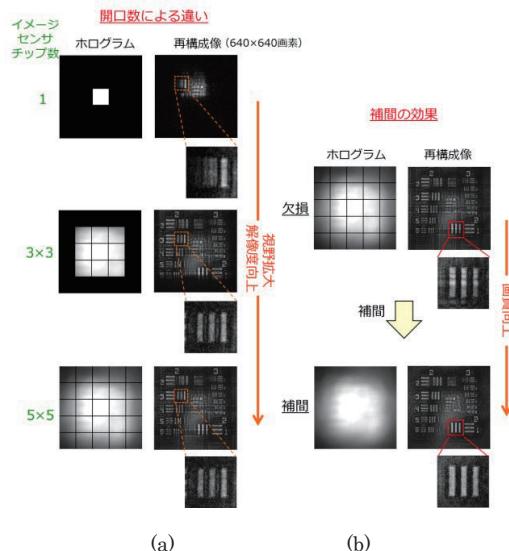


図8 実験による合成開口の結果
(a) 開口数による違い (b) 補間の効果

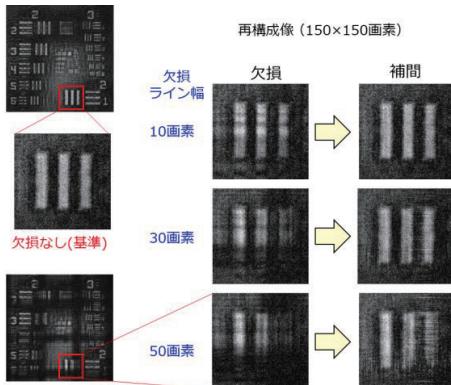


図9 欠損ライン幅を変化させた時の再構成像

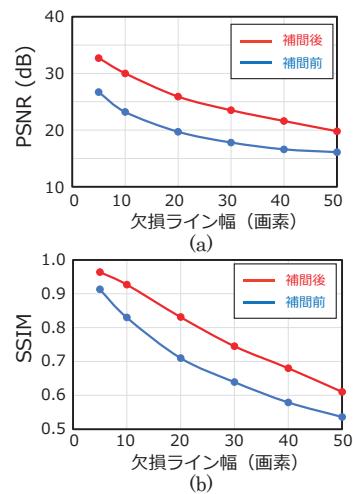


図10 実験による各評価値の欠損ライン幅依存性

(a) PSNR (b) SSIM

5.まとめ

IDHの性能向上に向けて、ホログラムの補間処理を伴う合成開口を提案した。シミュレーションおよび実験で生成したホログラムに対して本手法を適用し、合成開口による視野拡大の効果や、補間処理による画質改善の効果を示した。提案した合成開口は、従来のIDHの性能限界を超えて、視野拡大や画像の高品質化に寄与することが期待できる。今後は、イメージセンサチップアレイを適用し、被写体サイズを拡大した3次元情報の取得を進める。

文献

- [1] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," Opt. Lett. 32, pp. 912–914, 2007.
- [2] T. Muroi *et al.*, "Compensation of Distortion Aberration and Defocus Blur in Depth Images," Proc. Int. Symp. Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM), Tu-C-02, 2021.
- [3] B. Katz and J. Rosen, "Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements," Opt. Exp. 18, pp. 962–972, 2010.
- [4] T. Nakatsuji and K. Matsushima, "Free-viewpoint images captured using phase-shifting synthetic aperture digital holography," Appl. Opt. 47, pp. 136–143, 2008.
- [5] M. Goto *et al.*, "Synthetic Aperture with Image Interpolation for Incoherent Digital Holography," Proc. Int. Symp. Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM), ITuPI-03, 2022.
- [6] T. Nobukawa, *et al.*, "Incoherent digital holography simulation based on scalar diffraction theory," J. Opt. Soc. Am. A 38, pp. 924–932, 2021.
- [7] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," Opt. Lett. 22, pp. 1268–1270, 1997.

インコヒーレントディジタルホログラフィのための フレネル回折計算回路の設計と実装

原 貴之^{1,2} 角江 崇¹ 下馬場 朋祿¹ 伊藤 智義¹

1 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

2 国立長野工業高等専門学校工学科 〒381-8550 長野県長野市徳間 716

E-mail: takayuki-330@chiba-u.jp / t_hara@nagano-nct.ac.jp

あらまし インコヒーレントディジタルホログラフィのための像再生計算回路の設計と実装を行った。3次元再生像の取得方法として、波長多重位相シフトインコヒーレントカラーディジタルホログラフィに注目した。当該技術の像再生計算処理において、繰り返し計算が必要なフレネル回折計算に着目し、回路設計を行った。ソフトウェア上で固定小数点演算による再生像の画質検証を行い、各演算に必要なビット幅を決定した。設計回路を FPGA に実装して評価を行い、再生像の画質を維持しながら、CPU と比較して約 2.6 倍高速に計算できることを確認した。

キーワード インコヒーレントディジタルホログラフィ, FPGA, フレネル回折

Design and Implementation of Fresnel Diffraction Circuit for Incoherent Digital Holography

Takayuki HARA^{1,2} Takashi KAKUE¹ Tomoyoshi SHIMOBABA¹ and Tomoyoshi ITO¹

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

2 Department of Engineering, National Institute of Technology (KOSEN), Nagano College 716 Tokuma,
Nagano-shi, Nagano, 381-8550 Japan

E-mail: takayuki-330@chiba-u.jp / t_hara@nagano-nct.ac.jp

Abstract We designed and implemented a Fresnel diffraction circuit for incoherent digital holography. We focused on multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography (MP-ICDH) as a method of obtaining 3D reconstructed images. In the reconstruction calculation of this method, we designed on a Fresnel diffraction circuit, which requires repetitive calculations. We verified accuracy of Fresnel diffraction on a software and determined the bit width for implementation by fixed-point arithmetic. We implemented the circuit on a field-programmable gate array (FPGA) and calculated approximately 2.6 times faster than that of the CPU, maintaining the image quality.

Keyword Incoherent digital holography, FPGA, Fresnel diffraction

1. 研究背景および目的

インコヒーレントディジタルホログラフィ[1]は、三次元撮像技術の一つである。被写体の三次元情報を、ホログラムの干渉縞としてイメージセンサで記録する。記録したホログラムからの光波の回折を、計算機上でシミュレートすることで、被写体の三次元像を観察できる。レーザが不要となるため、再生像に重畳するスペックルノイズを低減でき、屋外での三次元像の撮影手法としても期待されている。

また、複数波長の情報を記録することにより、三次元カラー再生像も取得できる[2, 3]。その中でも、波長多重位相シフトインコヒーレントカラーディジタルホ

ログラフィ MP-ICDH (Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography) [4, 5] は、波長選択位相シフト法[6]の採用により、従来の時分割位相シフト法[2]と比較して、ホログラムの記録枚数を約半分に削減できる。

当該手法によりホログラムの撮影時間は短縮できるものの、計算機での像再生計算には、従来手法と同様に多くの時間がかかる。本稿では、これまで我々の研究グループが取り組んできた、ディジタルホログラフィ専用計算システム FFT-HORN (Fast Fourier transform holographic reconstruction) [7, 8] の知見を活かし、FPGA (Field programmable gate array) を用いた、

インコヒーレントディジタルホログラフィにおける像再生計算回路の設計と実装を行ったため報告する[9].

2. 像再生計算回路の設計

2.1. MP-ICDH の概要

図 1 に MP-ICDH の概略を示す. 偏光を利用して自己干渉光学系を構築する. RGB3 波長の LED 光源によって同時に照射された物体光波を, 偏光子によって斜め 45 度の直線偏光に変換する. 水平偏光成分に対して, 空間光変調器でフレネルレンズの位相分布を与えることで, 垂直偏波との間に光路長差が生じ, 曲率半径の異なる二つの光波が生成される. その後, 偏光子によって偏光方向が再び揃えられることで, 二光波は干渉し, 波長多重ホログラムが形成される. この状態で, 空間光変調器で与える一様な位相分布を変化させながらホログラムを 7 枚記録する.

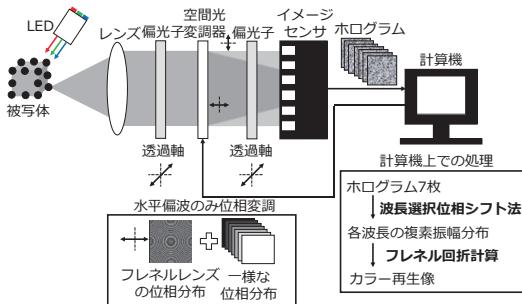


図 1 光学システムの概略.

像再生計算の流れを以下に示す. まず, 記録した 7 枚のホログラムに対して, 波長選択位相シフト法を適用する. その計算アルゴリズムは, N 波長に対して記録した $2N+1$ 枚 (RGB3 波長の場合は 7 枚) のホログラムを $I(x, y; 0, \dots, 0) \sim I(x, y; \theta_{1(2N)}, \dots, \theta_{N(2N)})$, 0 次回折光の総和を I_{0th} およびホログラム面 ($z = 0$) における座標 (x, y) に対する, N 波長の物体光の複素振幅分布を $u_1(x, y; 0) \sim u_N(x, y; 0)$ とすると,

$$\begin{pmatrix} I_{0th}(x, y) \\ \operatorname{Re}(u_1(x, y; 0)) \\ \operatorname{Im}(u_1(x, y; 0)) \\ \vdots \\ \operatorname{Re}(u_N(x, y; 0)) \\ \operatorname{Im}(u_N(x, y; 0)) \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} I(x, y; 0, \dots, 0) \\ I(x, y; \theta_{11}, \dots, \theta_{N1}) \\ I(x, y; \theta_{12}, \dots, \theta_{N2}) \\ \vdots \\ I(x, y; \theta_{1(N-1)}, \dots, \theta_{N(N-1)}) \\ I(x, y; \theta_{1(2N)}, \dots, \theta_{N(2N)}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる. ただし, $\operatorname{Re}[\cdot]$ は複素振幅の実部, $\operatorname{Im}[\cdot]$ は虚部であることを示す. また, θ_{ij} は中心波長 λ_i に対する j 番目の位相シフト量であり, P は位相シフト量によって決まる $(2N+1) \times (2N+1)$ の行列である. 式(1)により, 波長多重ホログラムから, 各波長の被写体の複素振幅

分布を抽出できる. その後は, 各波長に対して高速フーリエ変換 FFT を用いたフレネル回折計算を適用する. 回折計算では, 循環畳み込みによる光波の回り込みを防ぐため, 取得した物体光に対してゼロパディングを行って画素を 4 倍に拡張する. ホログラム面から距離 z 伝搬した物体光の複素振幅分布 $u(x, y; z)$ は, $U(f_x, f_y) = \text{FFT}[u(x, y; 0)]$ とすると, 高速逆フーリエ変換 IFFT (Inverse FFT) を用いて

$$u(x, y; z) = \text{IFFT}[U(f_x, f_y)H(f_x, f_y; z)] \quad (2)$$

と計算できる. ただし, f_x, f_y は空間周波数, H はフレネル回折の伝達関数で,

$$H(f_x, f_y; z) = \exp(-i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)) \quad (3)$$

と表される. 式(2)により, 任意の奥行に合焦した再生像を得ることができる. 三次元像を取得する場合は, 図 2 のように, 伝搬距離を更新して, 各再生面における被写体の平面画像を取得する. このように, 回折計算は繰り返し計算が必要であるため, こちらをハードウェアに実装, 計算の高速化を図る.

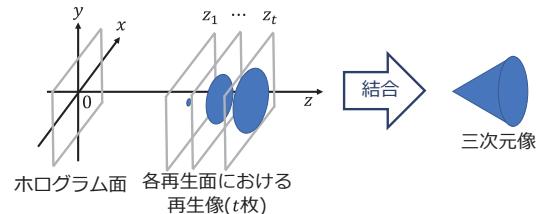


図 2 三次元像の取得方法.

2.2. フレネル回折計算回路の設計

三次元カラー再生像を取得するためには, RGB の 3 波長について回折計算を行う必要がある. しかし, 計算アルゴリズム自体は共通のため, 本稿では 1 波長の回折計算回路について検討する.

フレネル回折の伝達関数 H は式(3)で表せるが, 画素ピッチを p , 画素数を n とすると, 空間周波数は, 整数 m, l を用いて $f_x = m/np, f_y = l/np$ と表現できるため,

$$H(f_x, f_y; z) = \exp(-i2\pi Z(m^2 + l^2)) \quad (3)$$

$$Z = \frac{\lambda z}{2n^2 p^2} \quad (4)$$

と計算できる. Z は波長 λ と伝搬距離 z に関する定数であるため, 初期値 Z_0 と間隔 ΔZ をホスト PC で計算し, 更新回数 T_z とともに, 回路へ送信する. 回路内で

$$Z = Z_0 + t\Delta Z \quad (t = 0, \dots, T_z - 1) \quad (5)$$

を計算し, 各伝搬距離における Z を求める. また, 式(3)は三角関数で展開できる. 三角関数は周期 2π の周期関数であるため, 1 周期分のテーブルを回路内にあらか

じめ用意する。 2π の係数である $Z(m^2 + l^2)$ の演算結果の小数部を入力アドレスとして、テーブルを参照することにより、伝達関数 H を計算する。

以上の計算を固定小数点数で実装するため、ソフトウェア上でエミュレータを作成し、フレネル回折計算の精度検証を行った。式(2)の計算のパラメータである、物体光の空間周波数スペクトル U と伝達関数 H を固定小数点数化し、再生像の画質について検証した。入力の複素振幅分布としては、図3に示す、 512×512 画素の振幅画像と位相画像の組4パターンを使用した。固定小数点演算で計算して得られた再生像と、浮動小数点演算で計算して得られた再生像とのPSNR (Peak signal-to-noise ratio) を算出し評価した。

各ビット幅において、4パターンの平均のPSNRを算出した結果を図4に示す。ただし、画素ピッチ $p = 6.5 \mu\text{m}$ 、波長 $\lambda = 530 \text{ nm}$ 、伝搬距離 $z = 0.08 \text{ m}$ として検証を行った。また、三角関数のテーブルは1周期を256分割している。一般に、PSNRが30dB以上であれば比較元の画像と区別がつきにくいとされるため、全ての検証パターンに対して30dB以上となるように、 U は15bit、 H は5bitと決定した。

以上の検討により、設計した回路を図5に示す。回路の入出力は、AMD-Xilinx社製のFPGAにおける回路内の通信プロトコルであるAXI4通信に対応するため、32bitとした。ホストPCから、空間周波数スペクトル U 、そして伝達関数 H の計算に必要なパラメータである Z_0 や ΔZ 、 n_2 が入力されると、伝達関数 H の計算が開始する。伝達関数 H の計算後は、空間周波数スペクトル U と複素乗算を行い、その結果に対して2次元IFFTを適用する。IFFTは、AMD-Xilinx社が提供しているIPコア(Intellectual Property Core)であるIFFTコアを利用する。このIFFTコアは、1次元IFFTを計算できるため、まず横方向の1次元IFFTを1行ずつ計算し、結果を一度RAMに全て保存する。その後、縦方向に値を読み出し、1列ずつ1次元IFFTを計算することで、2次元IFFTを計算する。計算結果は出力用のRAMに保存される。

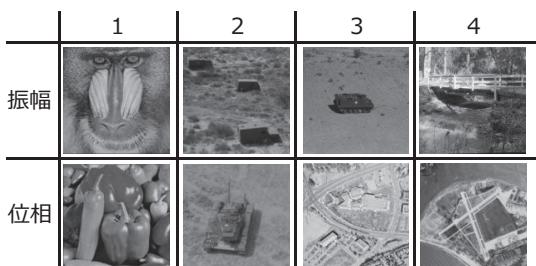


図3 検証に使用した入力画像。

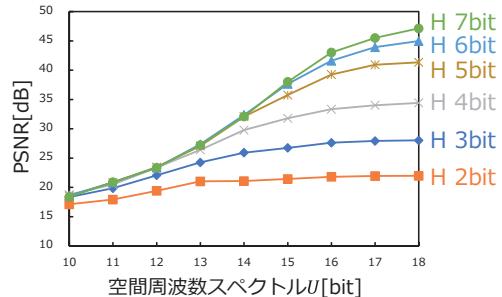


図4 固定小数点演算による再生像の画質検証。

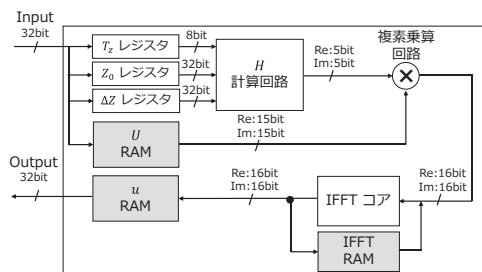


図5 設計した単波長フレネル回折計算回路。

3. 実装結果

3.1. 回路規模の評価

設計回路をFPGAに実装し、評価を行った。FPGAターゲットボードとしては、AMD-Xilinx社製のVirtex-7 FPGA VC707評価キットを使用した。このターゲットボードに対して、 256×256 画素のホログラムを扱えるように回路設計を行った場合の回路規模を表1に示す。ただし、ソフトウェア上でゼロパディングを行うため、回路の入力となる空間周波数スペクトルは 512×512 画素となる。最も使用率が大きいのはBRAMの40.5%となった。入力のホログラムの画素数を 512×512 画素とすると、必要なBRAMは約4倍に増えるため、使用率が100%を超ってしまう。そのため、DRAMなどの外部メモリを使用しない場合は、Virtex-7で扱えるホログラムの画像サイズは 256×256 画素が最大であると考えられる。一方で、LUTやFFなどの回路リソースは約5%以下しか使用していないため、計算の更なる並列化は可能であると考えられる。

表1 実装回路の規模。

リソース	使用量	使用率
LUT	15,470/303,600	5.1%
LUTRAM	836/130,800	0.6%
FF	14,106/607,200	2.3%
BRAM (36kb)	417/1,030	40.5%
DSP	14/2800	0.5%

3.2. 再生像の画質および計算時間の評価

設計回路により取得した再生像の画質評価を行った。ホストPCのCPUとしては、Intel® Core™ i5-4670k @ 3.40GHzを使用し、Virtex-7とはPCI express X8 (Gen 2)を通じて通信を行った。比較対象として使用したPCのCPUは、Intel® Core™ i9-9900k @ 3.60GHzである。

図3のパターン1,2の物体光成分をもつ複素ホログラムを回路に入力し、像再生計算を行った。伝搬距離は $z = 0.03\text{m}$ である。像再生結果を図6に示す。PSNRを算出するとどちらも30dB以上になり、設計回路によりCPUと同等の画質の再生像が得られた。

また、CPUとFPGAそれぞれについて、図6に示したパターン1の再生像が得られるまでの計算時間を測定した。測定結果を表2に示す。計算時間のみを比較すれば、CPUと比較して約2.6倍の高速化を確認できた。一方で、通信時間を含めるとFPGAの方が遅くなってしまった。これは、設計回路がホストPCのCPUを介した、PIO (Programmed Input / Output) 転送による実装となっているためである。

今回の実装における通信速度の実測値は入力が50MB/s、出力が6.3MB/sとなり、ボトルネックとなっている。しかし、Virtex-7の通信インターフェースであるPCI express X8 (Gen 2)は最大4GB/sで通信可能であるため、CPUを介さないDMA (Direct Memory Access) 転送によるハードウェア実装を行えば、通信部分を含めた計算の高速化が実現すると考えられる。DMA転送を仮に4GB/sで行えるとすれば、入力のデータ量は約1MB、出力は0.25MBであるから、通信時間は0.25ms、出力の通信時間は0.06msとなり、合計の計算時間は $0.25 + 3.16 + 0.06 = 3.47\text{ms}$ となるため、CPUと比較しても約2.4倍高速に計算できる。

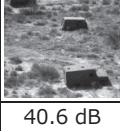
	パターン1	パターン2
CPU 64bit 浮動小数		
FPGA 固定小数		
PSNR	34.8 dB	40.6 dB

図6 再生像の画質評価。

表2 計算時間の測定結果。

	CPU	FPGA
入力通信時間	-	20.05ms
計算時間	8.33ms	3.16ms
出力通信時間	-	39.57ms
合計	8.33ms	62.78ms

4.まとめと今後の展望

インコヒーレントデジタルホログラフィにおける像再生計算の高速化を目的として、フレネル回折計算回路をFPGAに実装した。計算時間のみであれば、再生像の画質を維持しながら、CPUと比較して2.6倍の高速化を達成した。

今後の展望としては、カラー再生像の取得回路の実装が挙げられる。設計回路を3つFPGAに実装し、波長を変えて並列に動作させれば、CPUと比較して、 $2.6 \times 3 = 7.8$ 倍の高速化が期待できる。しかし、現在ボトルネックとなっている通信時間は3倍程度になると予想されるため、DMA転送による実装が必要になる。

高速化が成された後は、波長選択位相シフト法についてもハードウェアに実装し、像再生計算をFPGAで一貫して行う専用計算機を開発する。専用計算機を光学系に組み込むことで、ポータブルな撮像システムを目指す。

本研究の一部はJSPS科学研究費(19H01097)、千葉大学IAARの助成を受けて行なわれた。

文 献

- [1] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," Opt. Lett., 32, 8, pp.912–914 (Apr. 2007)
- [2] J. Rosen and G. Brooker, "Fluorescence incoherent color holography," Opt. Express, 15, 5, pp.2244–2250 (Mar. 2007)
- [3] Y. Wan, T. Man, and D. Wang, "Incoherent off-axis Fourier triangular color holography," Opt. Express, 22, 7, pp.8565–8573 (Apr. 2014)
- [4] T. Hara, T. Tahara, Y. Ichihashi, R. Oi, and T. Ito, "Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography," Opt. Express, 28, 7, pp.10078–10089 (Mar. 2020)
- [5] T. Tahara, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Single-shot wavelength-multiplexed digital holography for 3D fluorescent microscopy and other imaging modalities," Appl. Phys. Lett., 117, 3, 031102 (Apr. 2020)
- [6] T. Tahara and Y. Endo, "Multiwavelength-selective phase-shifting digital holography without mechanical scanning," Appl. Opt., 58, 34, pp. G218–G225 (Dec. 2019)
- [7] N. Masuda, T. Ito, K. Kayama, H. Kono, S. Satake, T. Kunugi and K. Sato, "Special purpose computer for digital holographic particle tracking velocimetry," Opt. Express, 14, 2, pp.587–592 (Jan. 2006)
- [8] Y. Abe, N. Masuda, H. Wakabayashi, Y. Kazo, T. Ito, S. Satake, T. Kunugi and K. Sato, "Special purpose computer system for flow visualization using holography technology," Opt. Express, 16, 11, pp.7686–7692 (May 2008)
- [9] T. Hara, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Design and Implementation of Special-Purpose Computer for Incoherent Digital Holography," IEEE Access, 10, pp.76906–76912 (Jul. 2022)

フルカラ一体積型 HOE を用いた透明スクリーンカメラ

小原 一真^{†*} 武山 彩織[†] 山口 雅浩[†]

[†] 東京工業大学工学院 〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-28

E-mail: *ohara.k.ae@m.titech.ac.jp

あらまし ホログラフィック導波路と画像再構成技術を用いた透明スクリーンカメラは、透明なスクリーンの真正面の像を撮影できるため、ディスプレイと組み合わせることで視線一致の遠隔コミュニケーションの実現などが期待されている。本研究では、単一のレーザー光による記録で赤・緑・青の3色の反射体積型ホログラム光学素子(vHOE)を作製し、フルカラーでの撮影を可能とした。

キーワード HOE, ホログラフィック導波路, 透明スクリーンカメラ, 視線一致コミュニケーション, 計算イメージング

See-through screen camera with full color volume HOE

Kazuma OHARA^{†*}, Saori TAKEYAMA[†], and Masahiro YAMAGUCHI[†]

[†] School of Engineering, Tokyo Institute of Technology 4259-G2-28 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8503 Japan

E-mail: *ohara.k.ae@m.titech.ac.jp

Abstract A transparent screen camera using holographic waveguide and image reconstruction techniques can capture objects in front of the screen and is expected to realize eye-gaze-matching remote communication. In this study, a three-color reflective volume holographic optical element (red, green, and blue) was fabricated by recording with a single laser beam, enabling full-color imaging.

Keywords HOE, holographic waveguide, see-through camera, eye-contact video communication, computational imaging

1. 研究背景

近年、PC やスマートフォンでのビデオ通話の需要はますます高まっており、高品質な通話体験が求められている。一般的なビデオ通話は、図 1 のようにカメラ部分とディスプレイ部分が分離しており、その結果、通話相手との間で視線が一致しないという問題がある。視線の一致はコミュニケーションの対面感を高めるために重要であることが知られており[1]、これまでに様々なシステムの提案がある[2,3]。しかし実写で携帯端末に適用可能な方式は確立していない。

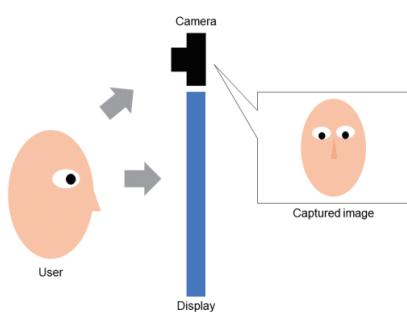


図 1 従来のビデオ通話システム

体積型ホログラム光学素子(vHOE)は、シースルー性を有する光学素子であり、透明薄型平板素子に取り付けることでホログラフィック導波路として機能する。我々のグループでは、図 2 に示すように、2 枚の vHOE をガラス板両面に配置し、回折光をカメラで撮影することで、ガラス板の正面の像を撮影可能な透明スクリーンカメラを提案した[1]。これをディスプレイ前面に貼り付けることにより、アイコンタクトを取れるビデオ通話が実現できる。先行研究では、単一波長のレーザーで記録された vHOE を用いて単色の画像取得と再構成の実験を行っている。本研究では、フルカラーでの撮影を可能とするため、赤・緑・青の3色の反射型 vHOE を作製してホログラフィック導波路を構成する。今回は、単一波長のレーザーによる記録でフルカラーのホログラフィック導波路の作製を試みた。

2. 提案手法

2.1. 透明スクリーンカメラ

透明スクリーンカメラ[1]は、図 2 のように、ガラス板の両面に反射型 vHOE を向かい合わせに貼り付けて

ホログラフィック導波路を形成し、カメラを導波路から光線が出てくる位置に配置したものである。広視野の撮影を行うためには大きなvHOEを用いる必要があるが、その場合に全反射の回数が異なる光がイメージセンサ上で垂直方向に多重像を形成する。そこで画像再構成技術を適用することで、多重像を取り除き、ボケのない像を取得する。

フルカラーでの撮影を可能にするためには、3色のvHOEを用いる必要がある。その作成方法としては、3色の多重露光、3枚のvHOEを重ねる方法が考えられる。今回、次節に述べるように単色のレーザー光でプラッギング条件を考慮して3色分のvHOEを作成し、同一箇所に重ねて貼り合わせた。単色のレーザー光源で3色のvHOEを作製できれば製造設備の簡易化の可能性がある。

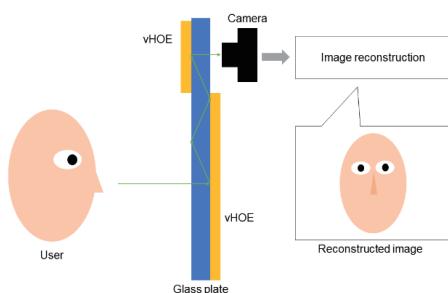


図 2 透明スクリーンカメラ

2.2. 反射型vHOEの作成

透明スクリーンカメラ用いるvHOEは平面波同士の干渉によるものであり、以下に述べるようにプラッギング条件をマッチングさせることで、単色のレーザー光源により異なる波長vHOEの露光が可能である[5]。

vHOEへの入射光の波数ベクトル \mathbf{k}_i 、格子ベクトル \mathbf{K} 、回折光の波数ベクトル \mathbf{k}_d が図3(a)のように閉じた二等辺三角形を形成するときにプラッギング条件が満たされ、回折光が再生される。vHOEの露光には2つの平面波を干渉させる。この平面波の波数ベクトルをそれぞれ \mathbf{k}_r 、 \mathbf{k}_o とすると \mathbf{k}_r 、 \mathbf{k}_o 、格子ベクトル \mathbf{K} も同様に閉じた二等辺三角形を形成する(図3(b))。したがって、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{k}_o - \mathbf{k}_r = \mathbf{K} = \mathbf{k}_d - \mathbf{k}_i \quad (1)$$

本研究では、 \mathbf{k}_i は波長532nm、vHOEに対して垂直なベクトル、 \mathbf{k}_d は波長532nm、ガラス板内で光線が全反射するような方向のベクトルとして、所望の回折光の波長とから(1)式より \mathbf{k}_r 、 \mathbf{k}_o を求め、露光を行う。

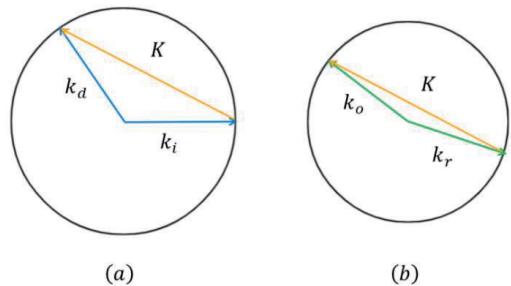


図 3 プラッギング条件が満たされたときの波数ベクトルの関係

3. 実験

3.1. 3色の反射型vHOEの作製

3色すべてのvHOEの露光で532nm、500mWのDPSSレーザーを使用した。使用したフォトポリマーはBayfol HX200で、サイズは5cm×5cmである。赤色、緑色、青色のvHOEは、それぞれ波長が638nm、532nm、465nmの再生照明光がvHOEに対して垂直入射したときにvHOEの法線に対して53°の方向へ回折光が再生されるように設計した。その結果、2つの記録平面波の記録媒質内での入射角度と、露光光学系はそれぞれ表1、図4、図5、図6に示すとおりになった。再生に用いる波長よりも長い波長で記録する場合には入射角が小さくなり、青色の場合に全反射を避けるためのプリズムが不要となっている。それぞれのvHOEの回折効率は[5]の分光透過回折効率として計測した結果、表2のようになった。

表 1 記録平面波の媒質内での入射角度と回折光の波長

	赤色のvHOE	緑色のvHOE	青色のvHOE
平面波の入射角度	15°, 112°	0°, 127°	-16°, 143°
回折光の波長(nm)	638	532	465

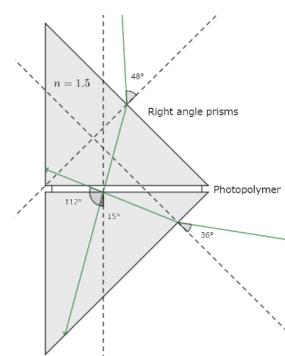


図 4 赤色のvHOEの露光光学系

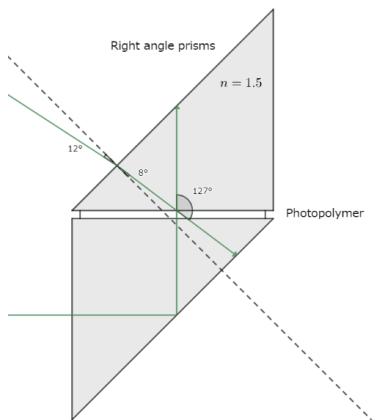


図 5 緑色の vHOE の露光光学系

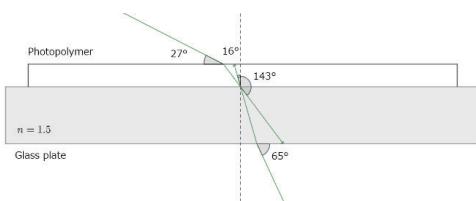


図 6 青色の vHOE の露光光学系

表 2 回折効率が最大になる波長とその回折効率

	赤色 HOE	緑色 HOE	青色 HOE
回折効率が最大になる 波長(nm)	647	522	485
回折効率の最大値(%)	5.7	9.0	30.4

3.2. 透明スクリーンカメラの構築

それぞれの vHOE は半分に切り離し、回折効率の低いものが内側に来るよう、内側から赤、緑、青の順番でガラス板の表裏に貼り合わせた。図 7 のようにカメラ（Edmund Optics, USB3.0 カメラ, FLIR CM3-U3-13Y3C, 1280×1024 ピクセル, ピクセルサイズ 4.8 × 4.8 μm ）を配置し、カメラレンズの正面にある vHOE の被写体側の面は黒いマスキングテープで光が通らないようにした。

3.3. 撮影

今回撮影した被写体はマネキン（図 8）と、カラーチャート（図 9）である。被写体にはハロゲンランプを照射し、被写体とカメラの距離はおよそ 30cm とした。



図 7 構築した透明スクリーンカメラ



図 8 被写体 1：マネキン



図 9 被写体 2：カラーチャート

4. 結果

撮影結果を図 10, 11 に示す。今回の撮影結果では、被写体の形は十分視認できるが、垂直方向に多重像が生じている。これは前述のように全反射の回数が異なる光が垂直方向にずれた位置に像を結ぶためであり、画像再構成手法を応用することで解決する。画像再構成の適用は今後の課題である。また、回折効率が低いため光量が不足しており、今回は露光時間を 0.5s (マ

ネキン), 0.9s(カラーチャート)と長くして撮影した。回折効率のムラも含め、HOE の品質の改善が必要である。

図 11 を見ると、垂直方向に対して撮影画像の色が変化しており、画像の上部は概ね赤色になっている。この原因は、垂直方向の光線の入射角に対するプラグ条件の変化と考えられ、垂直方向の画角を広くとるためにには柔軟な工夫が必要と考えられる。



図 10 マネキンの撮影結果

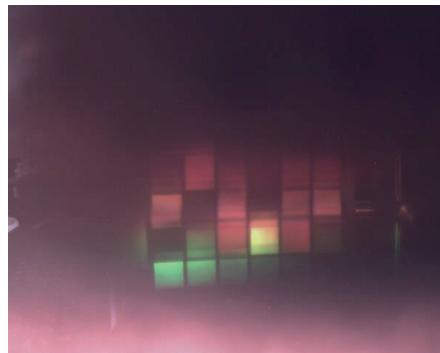


図 11 カラーチャートの撮影結果

5. 結論

本稿では、ホログラフィック導波路を用いた透明スクリーンカメラにおいて、RGB に対応する波長の光を回折する vHOE を重ね合わせて用いることでフルカラーでの撮影を可能にすることを示した。今後の課題としては、重畠した画像を画像再構成技術により重畠の無い画像に変換すること、vHOE の回折効率の改善、3 色のレーザーで 3 色の vHOE を記録する場合との比較などが挙げられる。さらに垂直方向の光線のプラグ条件のずれへの対策を行うことも検討する。

文 献

- [1] Y. Bondareva, L. Meesters, and D. Bouwhuis, "Eye contact as a determinant of social presence in video communication," in Proc. 20th International Symposium on Human Factors in Telecommunication (2006).
- [2] S. Kimura, E. Ooseki, Y. Aburakawa, and M. Yamaguchi, "Evaluation and formulation of the sense of social telepresence in video-mediated communication systems: Contribution of eye contact to enhancing social telepresence," J. Soc. Inf. Disp. 29(3), 179–195 (2021).
- [3] J. Gemmell, K. Toyama, C. L. Zitnick, T. Kang and S. Seitz, "Gaze awareness for video-conferencing: a software approach," in IEEE MultiMedia, vol. 7, no. 4, pp. 26–35, Oct.–Dec. 2000, doi: 10.1109/93.895152.
- [4] Xiao Chen, Noriyuki Tagami, Hiroki Konno, Tomoya Nakamura, Saori Takeyama, Xiuxi Pan, and Masahiro Yamaguchi : "A computational see-through screen camera based on a holographic waveguide device", Optics Express, 30, 14, pp.25006-25019(2022)
- [5] Zhenlv Lv, Juan Liu, Jiasheng Xiao, and Ying Kuang : " Integrated holographic waveguide display system with a common optical path for visible and infrared light", Optics Express, 26, 25, pp.32802-32811(2018)
- [6] ISO 17901-1:2015, Optics and photonics — Holography —Part 1: Methods of measuring diffraction efficiency and associated optical characteristics of holograms.

多項式近似を用いたホログラムにおける多重像除去

塩見 日隆[†] 下馬場 朋禄[†] 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: [†]{h-shiomi@, shimobaba@faculty, t-kakue@, itot@faculty.}chiba-u.jp

あらまし 点群データからホログラムを作成する手法は、その計算量が物体点数とホログラムの解像度の両方に比例するため、物体点数と解像度を共に高めることが困難である。この問題を解決するために、多項式近似を用いてホログラム計算における計算量を低減させる手法が提案されている。しかし多項式近似を用いる場合、高周波成分の近似精度が低く多重像が生じるという問題がある。本研究では、近似精度の低い高周波成分を計算しないことで、多重像の生じない計算方法を提案する。

キーワード CGH, 高速計算, 多項式近似, 多重像除去

Removing the multiple images for the polynomial approximated hologram

Harutaka Shiomi[†] Tomoyoshi Shimobaba[†] Takashi Kakue[†] Tomoyoshi Ito[†]

[†] Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: [†]{h-shiomi@, shimobaba@faculty, t-kakue@, itot@faculty.}chiba-u.jp

Abstract The computational complexity of hologram calculation methods with point-cloud data is proportional to the number of object points and hologram resolution. It is an obstacle to calculating high-resolution holograms from many object points. To address this issue, the hologram calculation method with less computational complexity using polynomial approximation has been proposed. However, this method has the problem that the reconstructed images are duplicated because of the approximation error of the high-frequency components. In this study, we propose the improved method using polynomial approximation, which does not calculate the high-frequency components to reduce approximation error and remove the multiple images.

Keyword CGH, High-speed calculation, Polynomial approximation, Multiple images removal

1.はじめに

計算機合成ホログラム（CGH）は計算機上で物体光と参照光の干渉を計算することで作成される。CGHは空間光変調器（SLM）に表示し、レーザ光を照射することで3次元映像を表示することができることから、3次元映像技術として注目されている[1]。

CGHの計算における物体光は3次元物体を表現するデータによって計算方法が異なり、主に点群法[1]、ポリゴン法[2]、多視点画像[3]、RGB-D画像[4]に分類される。

点群法は物体点と呼ばれる点光源の集合で3次元物体を表現する手法である。ホログラムの計算は画素ごとに物体点から届く光波を足し合わせることで求められる。この計算は物体点数を N 、解像度 $H \times W$ のホログラムを h とし、 i 番目の物体点と画素 (x, y) の間の距離を $r_i(x, y)$ とし、物体光の波数を k 、虚数単位を j と表現すると、

$$h(x, y) = \sum_{i=1}^N \exp(jkr_i(x, y)), \quad (1)$$

と表現できる。式(1)は画素ごとにすべての物体点からの光波を足し合わせることから計算量は $O(NHW)$ となる。このため物体点数の多い物体から高解像度なホログラムを作成する場合、計算負荷が高くなるという特徴がある。

この特徴は理想的なホログラフィックディスプレイにおいて特に問題となる。ホログラムの視域角 θ は再生時に用いる SLM の画素ピッチを p 、レーザ光の波長を λ とすると、

$$\theta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2p} \right), \quad (2)$$

となる。例えば視域角を 60 度程度にするためには、波長と同程度の画素ピッチの SLM が必要となる。理想的なホログラフィックディスプレイでは、SLM の大きさを維持し、画素ピッチを小さくするため高解像なホログラムを作成する必要がある[5]。

これまでこのような問題に対し、Graphics Processing Unit (GPU)や Field Programmable Gate Array (FPGA)による並列計算を用いた高速化手法が提案してきた[6,

7]. これらとは別に点群法における計算量の低減を目的とし、多項式近似を用いる手法が提案されている[9]。多項式近似を用いた手法は、ホログラムの高周波成分において近似誤差が大きく、結果として多重像が生じるという問題があった。本研究ではこうした多重像を防ぐため近似誤差の小さい物体点に限定し、多項式近似を行う手法を提案する。

2. 提案手法

本研究では以下の多項式を用いて、ホログラムを近似する。

$$h(x, y) \approx \sum_{j_x=0}^{D_x-1} \sum_{j_y=0}^{D_y-1} w(j_x, j_y) x^{j_x} y^{j_y}. \quad (3)$$

ここで、 D_x, D_y はそれぞれ x, y 軸における近似多項式の次元である。

提案手法は以下の 4 つのステップからなる。提案手法の概要を図 1 に示す。

1. ホログラムを $B_x \times B_y$ の要素ホログラムに分割する。
2. 式(1)を用いて、各要素ホログラム内の $D_x \times D_y$ 点のサンプリング点におけるホログラムの画素値を計算する。このとき要素ホログラムごとに計算する物体点を制限し、多重像を防ぐ。
3. 要素ホログラムごとに式(3)の係数 $w(j_x, j_y)$ を求める。
4. 式(3)を用いてホログラムの全画素を求める。

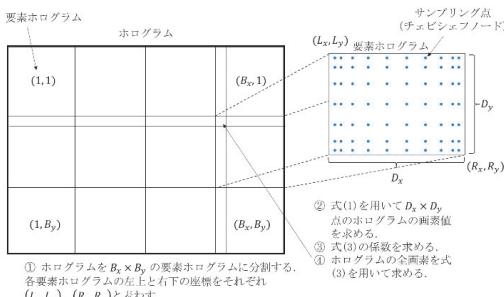


図 1 提案手法の概要

2.1. サンプリング点の位置

要素ホログラム内の $D_x \times D_y$ 点のサンプリング点は、チエビシェフノード[10]の軸ごとの組み合わせによって決定する。区間 $[L, R]$ を M 点に分割するとき、 i 番目のチエビシェフノード $C_i(L, R, M)$ は

$$C_i(L, R, M) = \frac{L+R}{2} + \frac{R-L}{2} \cos\left(\frac{2i-1}{2M}\pi\right) \quad (1 \leq i \leq M), \quad (4)$$

と表される。このため要素ホログラムの左上と右下の座標をそれぞれ $(L_x, L_y), (R_x, R_y)$ とし、 x 軸方向に l_x 番目、 y 軸方向に l_y 番目のサンプリング点を $l = l_x + (l_y - 1) \times D_x$ 番目と表現するととき、サンプリング点の座

標は $(C_{l_x}(L_x, R_x, D_x), C_{l_y}(L_y, R_y, D_y))$ となる。

2.2. サンプリングにおける物体点に対する制限

式(3)の多項式近似では、高周波成分における近似誤差が大きい。このため物体光の高周波成分を避けるために、要素ホログラムの中心から四角錐を設定し、その内部の物体点に限って光波の足し合わせを行う。錐台の大きさはレーザ光の波長を 532 nm , SLM の画素ピッチを $3.74 \mu\text{m}$ としたとき、経験的に奥行き方向に 10 cm 離れた時点で、底面が 600 ピクセル四方 となるよう設定した。

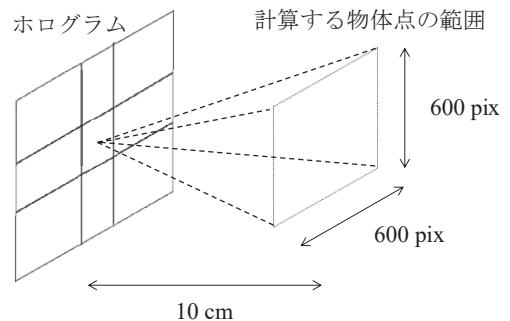


図 2 物体点制約の概要

2.3. 近似多項式の係数の決定方法

提案手法では近似多項式のすべてのサンプリング点における計算結果が、サンプリングされた画素値と等しくなるように係数を決定する。サンプリング数を $S = D_x \times D_y$ とし、 l 番目のサンプル点の座標を (x_l, y_l) とするとき、以下の連立方程式を解くことで近似多項式の係数 w を決定する

$$\begin{bmatrix} h(x_1, y_1) \\ \vdots \\ h(x_l, y_l) \\ \vdots \\ h(x_S, y_S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^0 \times y_1^0 & \cdots & x_1^{D_x-1} \times y_1^{D_y-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_l^0 \times y_l^0 & \cdots & x_l^{D_x-1} \times y_l^{D_y-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_S^0 \times y_S^0 & \cdots & x_S^{D_x-1} \times y_S^{D_y-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(0, 0) \\ \vdots \\ w(D_x-1, D_y-1) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.4. 提案手法の計算量

提案手法は主にサンプリング、係数の決定、式(3)による全画素の計算から成り立っている。サンプリングは $B_x \times B_y$ 個の要素ホログラムごとに $D_x \times D_y$ 点で式(1)を計算するため、計算量は $O(B_x B_y N D_x D_y)$ となる。係数の決定は $D_x \times D_y$ 次元の連立方程式を解くため、計算量は $O(D_x^3 D_y^3)$ となるが、 $D_x = D_y = 15$ 程度であれば、全体の計算時間において大きな割合を占めない。全画素の計算は式(3)を計算するため、画素ごとに $D_x \times D_y$ 次元の多項式を計算するため、計算量は $O(HWD_x D_y)$ となる。

このため全体の計算量は $O(D_x D_y (B_x B_y N + HW))$ となる。

これは $D_x D_y B_x B_y < HW$ かつ $D_x D_y < N$ を満たすとき、元の計算量より小さくなる。

3. 実験

提案手法によって再生像に生じる多重像が除去できるかどうか検証を行った。11646点の物体点データを用い、式(1)によって作成したホログラム、物体点の制限の無い多項式近似によるホログラム[9]と提案手法（制限のある多項式近似）によるホログラムを作成し、それぞれの再生像を比較した。ホログラムの解像度は 4096×2400 、画素ピッチは $3.74 \mu\text{m}$ 、参照光の波長は 532 nm とした。多項式近似を用いるホログラムは $B_x \times B_y = 64 \times 48$ ピクセルとして分割し、要素ホログラムは $D_x \times D_y = 15 \times 15$ として近似計算した。また物体点はホログラムから約30 cmの位置に設定した。図3に実験条件の概略を示す。

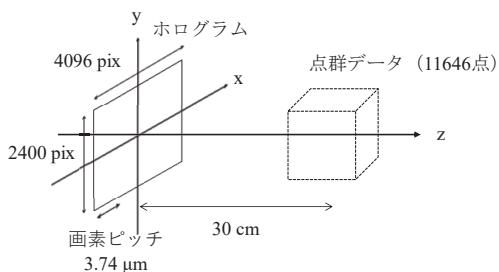
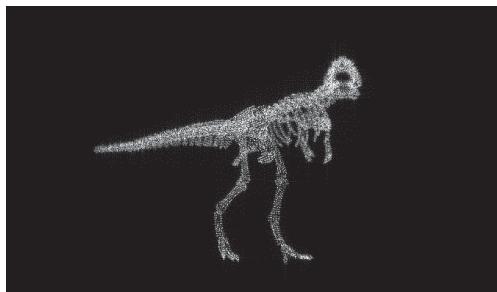
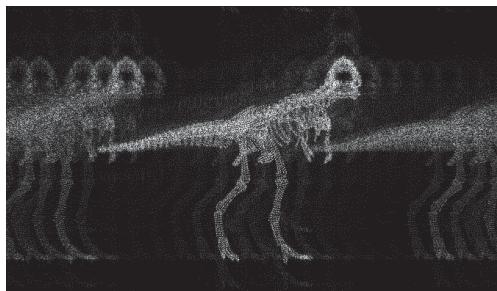


図 3 実験条件の概略

作成したホログラムを逆伝搬計算し得た再生像を以下の図4に示す。また光学再生像を図5に示す。

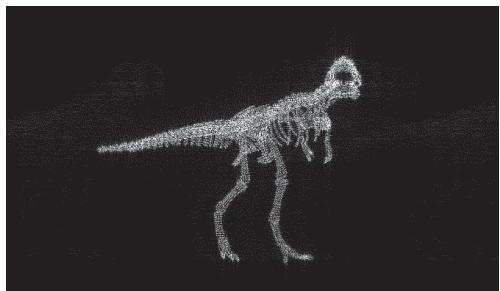


(a) 式(1)で計算したホログラムの再生像



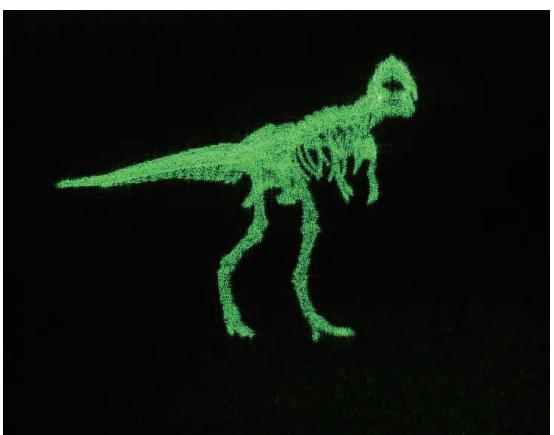
(b) 物体点制限のない多項式近似を用いたホログラムの再生像

ムの再生像

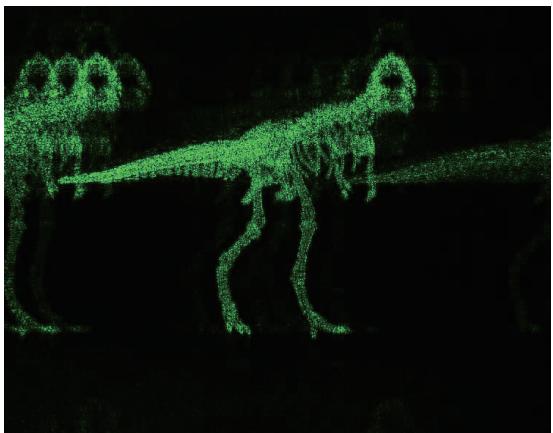


(c) 提案手法：物体点を制限した多項式近似を用いたホログラムの再生像

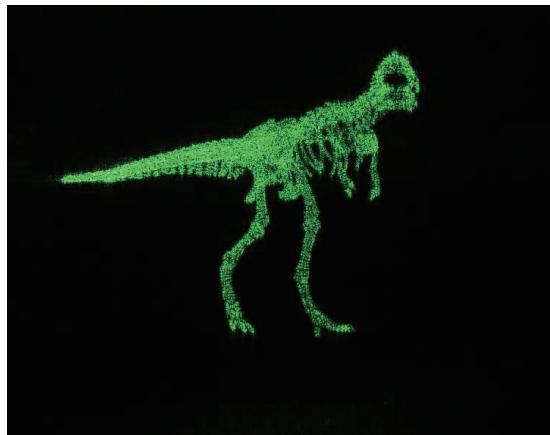
図 4 ホログラムの再生像
見やすさのため明るさを調整した)



(a) 式(1)で計算したホログラムの光学再生像



(b) 物体点制限のない多項式近似を用いたホログラムの光学再生像



(c) 提案手法：物体点を制限した多項式近似を用いたホログラムの光学再生像

図 5 ホログラムの光学再生像

再生像を比較すると、物体点に対する制限を行わない場合、図 4(b)のように多重像が生じているが、物体点に対し制限を加えることで図 4(c)のように多重像を除去することができている。再生像の画質を定量的に比較するために、図 4(a)を基準とし、Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) と Structural Similarity Index Measure (SSIM) を測定した。結果を以下の表 1 に示す。

表 1 再生像の画質比較結果

	PSNR [dB]	SSIM
物体点制限なし (図 4(b))	27.5	0.561
物体点制限あり (図 4(c))	30.9	0.858

表 1 のように物体点制限によって、再生像の画質が向上することが確認できた。

次にそれぞれの手法における計算時間の比較を行った。計算環境と計算時間をそれぞれ表 2, 3 に示す。

表 2 計算環境

CPU	Intel Core i7-10700F 2.9 GHz (16 threads)
RAM	32 GB
OS	Windows 10 Pro
コンパイラ	Visual C++ 2019

表 3 計算時間の比較結果

	計算時間 [s]	高速化率
式(1)による計算 (図 4, 5(a))	531	1.0
物体点制限なし (図 4, 5(b))	75.8	7.0
物体点制限あり (図 4, 5(c))	26.8	19.8

表 3 で示されるように、物体点制限を用いることにより高速にホログラムを計算できる。これは物体点が

制限されることにより物体点数が減るため、高速化ができると考えられる。

4.まとめと今後の展望

多項式近似を用いるホログラムにおける多重像の除去を目的とし、計算する物体点を制限する手法を提案した。提案した手法について再生像の画質比較と計算時間の比較を行った結果、多重像を除去し再生像の画質を高めるとともに、計算速度を従来の約 2.8 倍程度高速化することを確認した。

今後は高周波成分も含めてホログラムを近似する方法の検討を行う。また GPU や FPGA を用いた並列計算を適用し、さらなる高速化を目指す。

本研究の一部は JST 科学技術イノベーション創出に向けたフェローシップ創設事業 JPMJFS2107, JSPS 科研費 22H03607, 19H01097, 千葉大学 IAAR リサーチサポートプログラムの支援を受けたものです。ここに深く感謝いたします。

文 献

- [1] D. Blinder, *et al.*, "The state-of-the-art in computer generated holography for 3d display", *Light: Advanced Manufacturing* 3 pp.1-29 (2022).
- [2] P. W. M. Tsang, *et al.*, "Review of fast methods for point-based computer-generated holography [Invited]", *Photon. Res.* 6, pp.837-846 (2018).
- [3] Y.-P. Zhang, *et al.*, "Fast generation of full analytical polygon-based computer-generated holograms", *Opt. Express* 26 (15), pp.19206-19224 (2018).
- [4] H. Zhang, *et al.*, "Fully computed holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues", *Opt. Express* 23 (4), pp.3901-3913 (2015).
- [5] M. Bayraktar, *et al.*, "Method to calculate the far field of three-dimensional objects for computer-generated holography", *Appl. Opt.*, 49(24), pp.4647-4654 (2010).
- [6] P.-A. Blanche, "Holography, and the future of 3d display", *Light: Advanced Manufacturing* 2 (4) (2021) 446-459.
- [7] N. Takada, *et al.*, "Fast high-resolution computer-generated hologram computation using multiple graphics processing unit cluster system", *Appl. Opt.* 51 (30) pp.7303-7307 (2012).
- [8] T. Sugie, *et al.*, "High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging". *Nat Electron* 1, pp.254-259 (2018).
- [9] 塩見日隆、ほか、「多項式近似を用いたホログラム高速計算手法の基礎検討」SGSIPG, 8 (2022).
- [10] L. N. Trefethen, "Approximation Theory and Approximation Practice", SIAM, (2019).

Evaluation of the effectiveness of registration between the user's hand and reconstructed image in a holographic 3D-touch light field display

I. A SÁNCHEZ SALAZAR CHAVARRÍA, [†] Saori TAKEYAMA [†] and Masahiro YAMAGUCHI [†]

[†]Tokyo Institute of Technology, Suzukakedai Campus, 4259-G2 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 225-8502, Japan

E-mail: sanchez.a.aa@m.titech.ac.jp

Abstract We present the results of a user performance and subjective evaluation experiment using a 3D-touchable and gesture-capable holographic light field display to evaluate the effect of the spatial registration between the user and the content. The results obtained show a statistically significant difference in the Task Completion Time (TCT) between the registered interface and the unregistered interface when the user is required to use gestures combined with movements.

Keywords Light-field, 3D display, 3D-touch, holography, graphic user interface

1. Introduction

3D graphic user interfaces (3D GUIs) are getting much attention recently and there have been many advances of these interfaces based on light field (LF) displays [1,2] and holographic displays as well [3]. In such interfaces, the light volume can be modified in real time depending on the movements of the user, opening the possibility of having an interface that resembles the real world more accurately than 2D interfaces. This can enable new functions and use scenarios that exploit 3D autostereoscopic systems, which include not only the tracking of the movements of the hand but also the detection of gestures such as grabbing, spinning, deforming, etc.

One point that has to be clarified for the development of 3D GUIs is the importance of a spatial matching (registration) between the displayed content and the position of the user. Some studies, such as [4] have studied how this registration improves the user's experience and how it can also help reduce the time completion task (TCT), but in [4] they focused on a system that displayed 2D projections of 3D views to a user. Another study [2] has reported on how the registration affects the selection of reconstructed 3D buttons in a horizontal parallax only (HPO) LF display. However, there is still no report on how the interaction of displacing a LF volume and using gestures to interact with it, is affected by the registration between the user and the content. Without this evaluation, it is not possible to consider the required steps to develop a 3D GUI that enhances the user experience and brings meaning to the use of 3D displays. A registered GUI seems to have advantages, for example, when considering use scenarios such as information kiosks located in public venues. If the

system can match the position of the user and the reconstructed 3D image, the user needs not to adjust himself to the system, so it can interact faster with the content (Fig. 1)

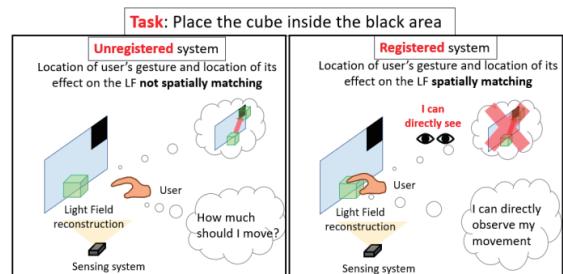


Figure 1. The user is not required to adjust the movement when using a registered interface

In this study, we present an evaluation on how the registration and mismatch between the position of the user and the reconstructed LF can affect the completion of a task as well as the user experience, but this time using a full parallax (FP) LF display, where the user can more accurately locate the finger thanks to the extra vertical parallax that is absent in other evaluation procedures. We also explore the effect this registration aids in the effectiveness of gestures by testing versions of our GUI where the coordinates match and where they do not. For registering the interface, we used a method proposed by our group [7] that consists of measuring the color of the scattered light while tracking the position of the user using a Leap Motion (LM) sensor. Results on the TCT, a subjective evaluation using a likert scale and a statistical significance test of the results are presented.

2. Experimental setup

2.1 Holographic LF display system

The system used in the experiment consists of a projector whose output is collimated by a lens. The collimated light is impinged into a holographic optical element (HOEs) that acts as an array of off-axis convex mirrors. By projecting an integral photography (IP, see [5]), the LF of a scene can be reproduced by the intersection of the light beams emerging from each small elementary hologram in the array. The relative position between the projector's pixels and the HOE screen is obtained by an algorithm developed in our group [6]. This permits the system to project the elements of the integral image correctly. An off-the-shelf gesture sensor, Leap Motion (LM) controller, which is able to track the position of the user and the performed gestures, is used to interact and modify the LF in real time. An RGB camera is used to detect the interaction of the user with the LF, and match the position of the content with the user as described in the next subsection (see Fig.2).

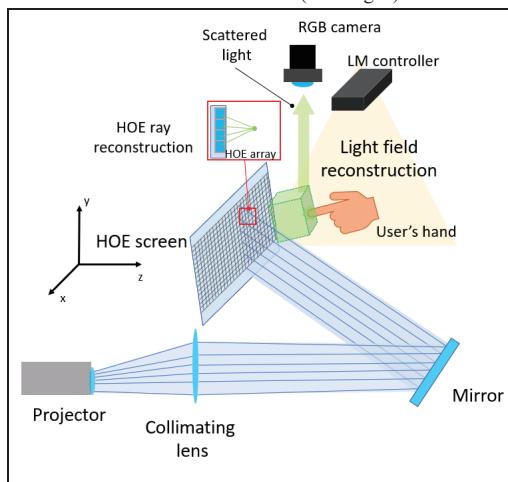


Figure 2. 3D touchable holographic LF display setup

2.2 Scattered light detection-based registration

For registering the position of the user with respect to the HOE screen, our group has proposed a method based on scattered-light detection [7]. The method is based on detecting the color scattered by the finger of the user when touching the LF of 3D reconstructed buttons. Each button is reconstructed using a different color, and each color is related to a specific 3D position in the HOE screen. When the user scatters the color by touching it, an RGB camera can detect the color (related to a known in the HOE screen) of the light scattered by the user. Then, the LM sensor reads out the 3D space position of that

color in its measurement space and relates it to a known position in the HOE screen. By repeating this procedure, an affine transformation can be estimated that relates the measured coordinates in the LM sensor to positions in the HOE screen, matching the position of the user with the reconstructed 3D image. Compared to the registration process presented in [2], the here used method is automatic and integrated into a GUI in a natural way. When registering the LM controller using scattered light, both the position of the user and its performed gestures can be matched with the content.

3. User evaluation experiment

To evaluate the effect of having a 3D interface with registered tracking and gesture functions, as opposed to an interface where this is not the case, we designed 3 different tasks (swipe gesture, box sorting, circle tracing) in 3 different spatial matching levels (unregistered case, registered case with a spatial mismatch and registered case). A brief description of the tasks is presented as follows. The tasks are depicted in Fig. 3.

1) Swipe gesture: This gesture mimics the unlock gesture used to unlock the screen of a conventional smartphone. A similar version using scattered light detection was presented in [8]. The color of the LF sphere was changed when the ball is moved to the edge of the screen. The user was required to swipe the ball 5 times before the unlocked screen appeared.

2) Box sorting: The LFs of 3 boxes are generated in the midair in front of the screen, and the task for this program is to move the boxes to the upper right corner of the screen. When the boxes reached the goal, the box was reduced and erased (mimicking an *absorption*). The task consisted on placing the 3 boxes inside the goal. The gesture of grabbing a LF object was detected by the LM controller.

3) Circle tracing: The LF of a circle is reconstructed in purple and the trajectory of the fingertip of the user was reconstructed in green. The user in this task needs to pass the finger near the 3D coordinates of the purple circle. When enough coordinates of the traced green circle matched the ones of the purple circle, the user finished the task.

The mentioned tasks were evaluated in 3 different registration scenarios:

1) Unregistered case: The LM controller and the LF display have no spatial registration. During the operation, a white LF sphere indicating the mean position of the index and thumb is displayed as an aid for the user.

2) Registered case: The LM controller and the LF display have been registered using the RGB camera to detect scattered light and following the procedure detailed in section 2.2.

3) Registered case with a random displacement: A random displacement is introduced in the registered coordinates of case 2. The displacement was grabbed from a uniform probability distribution that was limited by half the size of the screen in each dimension (screen size: 120 × 67 mm) and to 3mm in the z-axis. The registered scale is preserved.

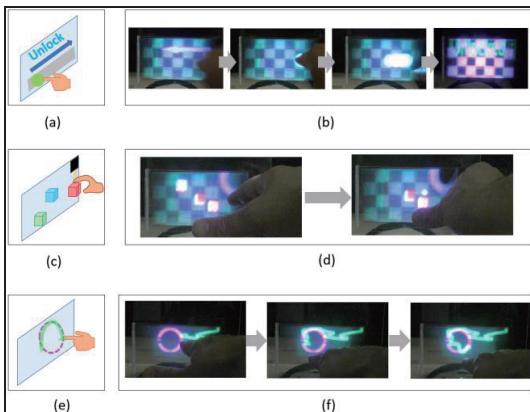


Figure 3. Task designed to evaluate the registered 3D touchable interface. Swipe gesture(a-b), box sorting (c-d) and circle tracing (e-f)

Therefore, from the 3 tasks and the 3 versions we get 9 scenarios to measure the TCT and the subjective evaluation of the users.

For the evaluation of the versions, the user received a tutorial on how to perform the tasks using the registered version. Then, the users rehearsed each task using the registered version just once. After the practice, each user had a random list of the 9 scenarios to perform (task-registration level) and each of the scenarios was repeated 3 times (27 scenarios evaluated). A beep to the user indicated the start of the test and the TCT was measured from that moment. Another beep was played when the user completed the task. After the experiment, a questionnaire was filled by the user to assess the subjective evaluation of each task and each scenario (see Tab. 1). The users were required to grade the experience in a scale from 0 (completely disagree) to 5 (completely agree) to express their opinion on the different implementations of the 3D GUI, for both the registered and the unregistered versions. It was not disclosed to the users that there were 3 scenarios, since it would have

been difficult for them to decide which was which due to the randomized order of tasks. This is the reason why their opinion of only 2 scenarios was retrieved.

4. Results

The experiment was performed by 11 subjects (8 males and 3 females). The results of the subjective evaluation are depicted in Fig. 4. Overall, we see that the registered versions are better evaluated. We can notice that the swipe gesture is considered the most natural one, while the box sorting task is the most novel but the one that is less easy to perform, along with the circle tracing task.

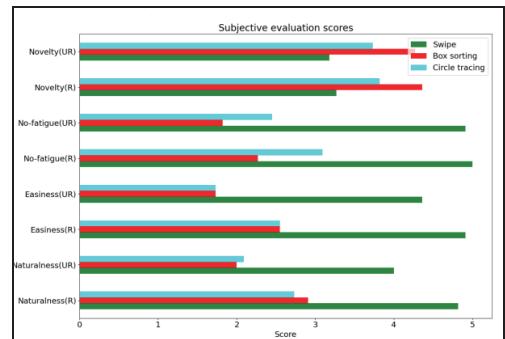


Figure 4. Subjective evaluation of the performed tasks by the users. UR: Unregistered, R: Registered

1. How would you grade the naturalness of the interaction for:	Registered interaction: Unregistered interaction:	very unnatural very unnatural	0 1 2 3 4 5	very natural very natural
2. How would you grade the difficulty of the interaction for:	Registered interaction: Unregistered interaction:	very difficult very difficult	0 1 2 3 4 5	very easy very easy
3. How would you grade the fatigue of the interaction for:	Registered interaction: Unregistered interaction:	very exhausting very exhausting	0 1 2 3 4 5	not exhausting not exhausting
4. How would you grade the novelty of the interaction for:	Registered interaction: Unregistered interaction:	not novel not novel	0 1 2 3 4 5	very novel very novel

Table 1. Questionnaire filled by the participants for the 3 evaluated tasks

Because we primarily focus on the difference among registered, unregistered and registered with displacement, the dependence on the task in the next subject of interest.

The TCT for each task in each of the registration scenarios is also depicted in Fig.5. It is noticeable that the unregistered task has the highest TCT regardless of the task. The difference between the registered task and the registered task with a random mismatch is less noticeable, but the registered version still has a small advantage.

To test these results for statistical significance, we

performed an analysis of variance (ANOVA). By having the mean TCTs of all the participants in the three GUI

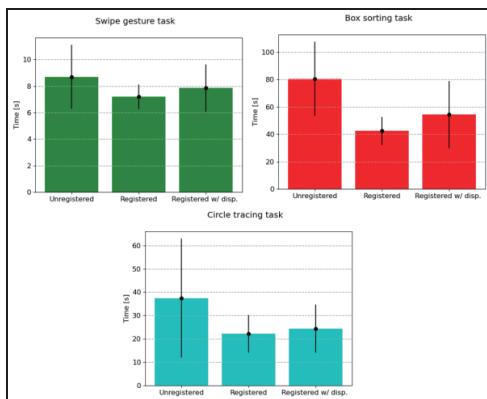


Figure 5. TCT for each of the proposed tasks in each of the spatial registration scenarios

conditions, we performed an ANOVA test for each of the tasks. The F -value was retrieved by dividing the mean sum of squares between groups by the mean sum of squares within groups.

Task	F-value	p-value
Swipe	1.748	0.1914
Box sorting	7.924	0.0018
Circle tracing	2.487	0.1001

Table 2. F-statistic and p-value for the three conditions of the three different tasks

By considering the degrees of freedom (registration versions and number of participants) we determine the p -value of our F -value. The results are depicted in Tab. 2. Tab. 2 shows that there is a significant difference in the mean TCTs for the box task ($p < 0.01$). Therefore, to clarify what version is different from the other, we perform a Bonferroni correction using the p -value of a T -test is computed for every set of the TCTs of the box. Since there are 3 tests, the Bonferroni corrected α -value will be 1/3 of the one used for the ANOVA test.

After performing the pairwise comparison of each group, the results are presented in Tab. 3. It can be observed that the condition $p < \alpha = 0.0167$, which was the threshold considered for statistical significance, showing a significant difference between the registered and the unregistered versions of the box sorting task.

5. Conclusion

This study demonstrated a statistical significance in the performance of the user when the content is registered with the position of the user and the task is a scenario

that requires to match gestures and displacement of objects. It shows the importance of having a spatial

Version	p-value from T-test
UR vs R	0.0005
UR vs R+Ran.	0.0349
R vs R+Ran.	0.1700

Table 3. T-test pairwise comparison to perform the Bonferroni correction for each version of the task. R+Ran: Registered and random displacement.

registration method between the user and LF display, like the one detailed in [7], to have an effective interaction. It is also known that showing the user's hand in the image is very effective when the image contents and the gesture are not registered [9]. The comparison with such case is an important research topic for further research. Future studies should focus on a wider variety of tasks to be performed with a 3D display that reproduces volumes of light accessible to the user, as well as more gestures for the user to interact.

References

- [1] Ma Xiao-Ming, et al. "A real-time interactive rendering method for 360° tabletop integral imaging 3D display." *Journal of SID* 29.9 (2021): 679-688.
- [2] Adhikarla, V.K. et al. "Exploring direct 3d interaction for full horizontal parallax light field displays using leap motion controller." *Sensors* 15.4 (2015): 8642-8663.
- [3] Takenaka, M., et al. "Interactive holographic display for real-time drawing and erasing of 3D point-cloud images with a fingertip." *IEEE Access* 9 (2021): 36766-36774.
- [4] Hilliges, O., et al. "HoloDesk: direct 3d interactions with a situated see-through display." *Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*. 2012.
- [5] Martínez-Corral, M., and Javidi, B. "Fundamentals of 3D imaging and displays: a tutorial(...)" *Advances in Optics and Photonics* 10.3 (2018): 512-566.
- [6] Nakamura, T., and Yamaguchi, M. "Rapid calibration of a projection-type holographic light-field (...)." *Applied Optics* 56.34 (2017): 9520-9525.
- [7] Sánchez Salazar Chavarria, I.A., Shimomura K., Takeyama S. and Yamaguchi M., "Interactive 3D touch and gesture capable holographic light field display with automatic registration between user and content." *Journal of SID* (2022): To be published.
- [8] Sánchez Salazar Chavarria, I.A., Nakamura, T., and Yamaguchi, M., "Interactive optical 3D-touch user interface using a holographic light-field display and color information." *Optics Express* 28.24 (2020): 36740-36755.
- [9] Sugimori, Ken, et al. "Avatar Tracking Control with Generations of Physically Natural Responses on Contact to Reduce Performers' Loads." *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. 2021.

令和4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： 2022年9月2日(金) 13:00～16:55

■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：

HODIC 会長挨拶

(1) 二重位相ホログラムを用いたハイブリッドポアンカレ球の赤道上の
ラゲール・ガウシアンビーム生成

○中村悠人・角江 崇・森田 健・下馬場朋禄・伊藤智義（千葉大）

(2) インコヒーレントデジタルホログラフィにおけるホログラム補間処理を用いた
合成開口の検討 ○後藤正英・信川輝吉・片野祐太郎・萩原 啓・室井哲彦（NHK）

(3) インコヒーレントデジタルホログラフィのためのフレネル回折計算回路の設計と
実装 ○原 貴之（千葉大/長野高専）・角江 崇・下馬場朋禄・伊藤智義（千葉大）

(4) フルカラ一体積型 HOE を用いた透明スクリーンカメラ

○小原一真・武山彩織・山口雅浩（東工大）

(5) 多項式近似を用いたホログラムにおける多重像除去

○塩見日隆・下馬場朋禄・角江 崇・伊藤智義（千葉大）

(6) Evaluation of the effectiveness of registration between the user's hand and
reconstructed image in a holographic 3D-touch light field display

○Ivan Alexis Sanchez Salazar Chavarria・Saori Takeyama・
Masahiro Yamaguchi (Tokyo Tech.)

情報交換 と 閉会の挨拶

■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

・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

令和4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： 2022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： 深層学習とホログラフィ（仮）
- 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
 - ・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

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。

HODIC 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 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 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	山本 健詞（徳島大学）
副 会 長	高橋 進（凸版印刷）	前 会 長	伊藤 智義（千葉大学）
国際担当	松島 恭治（関西大学）	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・ラボ）	西辻 崇（東京都立大学）
橋本 信幸	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（コニカミルタプロネタリウム）	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（久保田かげらむ工房）	酒井 朋子（千葉大学）
佐藤 甲癸	永田 忠昭（arts-unis）	三田村畯右
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. 42, No. 3 (Sep. 2022)
 2022年9月9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にてお願ひいたします。

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

HODIC