

HOPTECH について -波面印刷技術から投影型ホログラフィック 3D 映像技術まで-

HOPTECH -from wavefront printing technology to projection-type holographic display-

涌波光喜¹⁾
Koki Wakunami¹⁾

国立研究開発法人 情報通信研究機構¹⁾
National Institute of Information and Communications Technology¹⁾
E-mail: k.wakunami@nict.go.jp

Overview of holographic printing technology (HOPTECH), which is a research project in NICT, is introduced. An arbitrary designed wavefront can be recorded as a hologram by wavefront printing technique that is a core technology of this project. In this paper, some applications related with HOPTECH such as 3D data visualization, fabrication of digitally designed holographic optical elements (DDHOE) and projection-type holographic 3D display are briefly introduced.

1. はじめに

ホログラフィは、光の干渉と回折現象を利用して対象物体から伝搬する“物体光”の複素振幅分布を記録・再生できる技術である。ホログラムから再生される光は元の物体光を再現するため、ホログラフィは 3 次元情報の可視化技術として広く認知されている。電子ホログラフィは、本来ホログラムに記録される干渉縞を計算機で計算し、空間光変調器(以下、SLM)に表示することで、ホログラム映像を動的に再生する技術である。究極の 3 次元映像表示技術として、様々な研究機関が研究開発を行っている[1-7]。しかし、干渉縞を表示する SLM には高い空間・時間解像度が要求されるのに対して、現状の SLM ではこれを満足しないため、実用レベルの画面サイズや回折角を同時に満たす技術の提案はなされていない。NICT では、電子ホログラフィの研究と並行して、2013 年から波面印刷技術に基づく波面プリンタの研究開発を開始した[8-10]。波面プリンタは、電子ホログラフィで再生される物体光を縮小結像し、ホログラム記録材料上で 2 次元的にスキャンしながら体積型ホログラムとして記録する。これによって広回折角かつ大画面のホログラム記録・再生を実現することができる。NICT では、この波面プリンタで記録・再生される波面の精度評価を始め、3 次元データの高精細な出力、特殊な光学素子 DDHOE(Digitally designed holographic optical element)の製造、波面プリンタに入力する数千億画素のホログラムデータの計算技術、波面印刷の特性を考慮したホログラム複製技術などの研究開発を行っている。著者らは波面印刷およびその周辺技術を HOPTECH(Holographic printing technology)と総称している。ここでは、HOPTECH の研究内容

の一部を紹介する。

2. 波面印刷技術の原理

図 1 に NICT における波面プリンタの光学系を示す。予め記録したい任意の波面の複素振幅分布を求め、ホログラムデータに変換する。このホログラムデータの解像度が SLM の有効解像度より大きい場合は、適宜サブホログラムデータとして分割する。SLM には 1 枚のサブホログラムが表示され、入射する平行光は SLM に表示されたサブホログラムデータの干渉縞によって回折する。その後、シングルサイドバンドフィルタによって非回折光や高次回折光、共役光がカットされ、意図した波面のみがその後のレンズ群を介してホログラム記録材料上に物体光として縮小結像される。一方、参照光はホログラム記録材料に対して反対側から平行光として入射することにより、反射型ホログラムが形成される。ホログラム記録材料は自動 X-Y ステージに固定されており、2 次元平面上で記録位置を移動しながらサブホログラムデータを切り替えてホログラムを記録することによって、SLM の解像度以上のホログラムデータを記録することができる。

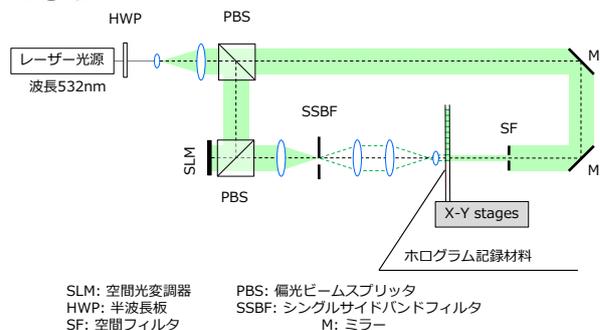


Fig.1 Optical setup of wavefront printer

Table 1. Specifications of wavefront printer

仕様項目	値
液晶パネルの有効解像度	3,600 × 1,800画素
液晶パネルの画素間隔	3.5μm
縮小倍率	0.10
光源の波長	532nm

記録されたホログラムに再生光となる平行光を入射させると、物体光として記録された任意の波面が再生される。表 1 に波面プリンタの主な仕様を示す。

波面プリンタと類似する技術として、ホログラフィックステレオグラム(HS)に基づく HS プリンタがある。HS プリンタはすでに記録技術が成熟しており、3D データのホログラムプリントサービスを事業として行う企業も複数存在する[11, 12]。ここでは HS プリンタと波面プリンタの違いを考える(表 2)。HS プリンタは、空間方向、角度方向に高密度にサンプリングされた光線情報(光線の位置と伝搬方向、強度)をホログラムとして記録することで立体像を再生する。そのため再生される像の画質は、光線の幅を上限とし、またホログラム面から離れるほど回折の影響で光線が広がるため劣化する[13]。一般的に HS プリンタの場合、再生される光線の幅は記録時のサブホログラム(Hogel と呼ばれることも多い)の大きさと等しい。一方、波面プリンタの場合は、予め用意した任意の波面の複素振幅分布を光学的に再現し、ホログラムとして記録する。厳密にはサブホログラム間の位相の整合性の問題や理想的な再生光による照明が難しいといった課題はあるが、特定の記録条件や再生条件を満たすことで HS プリンタによる像再生を上回る画質を実現できる可能性がある。また、計算機で設計した位相分布を物体光として記録することができるため、3D データの可視化だけでなく、入力光に対して任意の位相変調を実現するホログラフィックス光学素子(HOE)の製造技術としての可能性も持つと考えている。

Table 2. Difference between HS printer and wavefront printer

種類	記録再生される情報	利用例
HSプリンタ[X-Z]	光線情報 (光線群, ライトフィールド)	3Dデータの可視化
波面プリンタ[X-Z]	波面情報 (複素振幅分布)	3Dデータの可視化 光学素子の製造

3. 3次元データの記録例

波面プリンタは、3D データの高精細な記録再生が可能である。図 2 に波面プリンタによる 3D データの出力例を示す。記録する対象物体は、実物体から取得した 3D データでもコンピュータグラフィックスで作成されたコンテンツでも良い。また、

波面プリンタの入力に必要なホログラムデータは、計算機合成ホログラム (CGH:Computer generated hologram)と呼ばれる手法で計算する。CGH の計算法は、点光源法やポリゴン光源法[14]、光線ベースの手法[15]など種々提案されているが、基本的にはどの計算法を用いても良い。

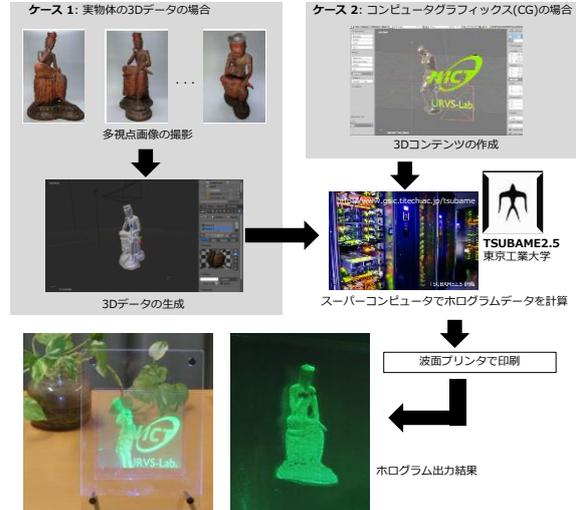


Fig.2. Examples of 3D data printing [8]

著者らの開発した波面プリンタは、SLM の画素サイズがホログラム記録時に 0.36μm 程度に縮小されるため、例えば記録サイズが 10×10cm² の場合、約 775 億画素のホログラムデータが必要となる。そのため著者らは東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME2.5[16]上で、約 300 並列の計算処理環境を利用してホログラムデータを計算している。

4. 光学素子の製造技術としての利用応用

波面プリンタは、デジタルに設計した HOE を製造することができる。通常の HOE の製造では、所望の回折特性を実現するためには、種々の光学素子を用いて同じ回折光を物体光として形成する必要がある。そのため HOE の大型化には大型の光学素子が必要となりコストがかかる、複雑な回折特性の実現が難しいといった課題がある。これに対して、波面プリンタで製造する HOE は、記録する物体光の位相は SLM に表示するホログラムデータで制御するため、所望の回折光を形成する光学素子を必要とせずに複雑な回折特性の実現が可能である。またサブホログラムずつ 2 次元的に走査しながら記録するため大型化のハードルも低い。特に通常の HOE 製造技術では物体光をアナログに形成するのに対して、波面プリンタの場合はデジタルに設計した物体光を記録することから、波面プリンタで作製した HOE を著者らは DDHOE(Digitally designend holographic optical element)と呼んでいる。NICT では、これまでに

それぞれの凹面ミラーが固有の仕様(直径や焦点距離)を持つ凹面ミラーアレイやステレオ立体視に基づく3Dプロジェクタ用のHOEスクリーンの作成等を行ってきた。次章では、DDHOEの別の作成例として、NICTで開発した投影型シースルーホログラフィック3D映像技術に用いる光学スクリーンについて紹介する。

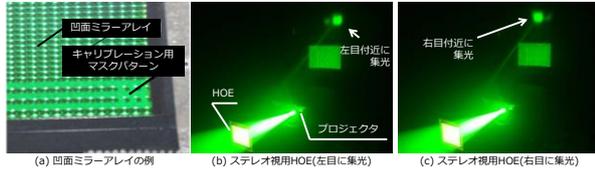


Fig. 3. Examples of DDHOE fabrication [17]

5. 投影型ホログラフィック 3D 映像技術

第一章で述べたように、電子ホログラフィは現状のSLMの解像度が不十分であることに加えて、画面サイズ W と回折角 θ_{DIF} が以下の式に基づいてトレードオフであることから、両パラメータを同時に実用レベルで実現することが難しい。

$$W = p \times M \quad (1)$$

$$\theta_{DIF} = \sin^{-1}(\lambda/2p) \quad (2)$$

ここで p, M と λ はそれぞれ SLM の画素サイズ、画素数、再生光の波長を表す。そこで、著者らは電子ホログラフィで再生されるホログラム映像を投影レンズで拡大投影し、波面プリンタで作成した DDHOE スクリーンによって特定の観察位置に投影光を集光する技術を開発した。これにより、観察位置は限定されるが、これまでトレードオフの関係にあった画面サイズと画面全体を見るときに成す視野角(図4参照)を独立に設計することができる。また、図5にあるように DDHOE スクリーンが可視光域に対してほぼ透明であることから、提案技術はシースルーなスクリーン越しにホログラム映像を提示することが可能となった。本技術は、例えば車載ヘッドアップディスプレイやスマートグラス、ヘッドマウントディスプレイといったシースルーかつ観察者の眼の位置とスクリーンとの関係がある程度固定されるような映像分野への展開が期待できる。

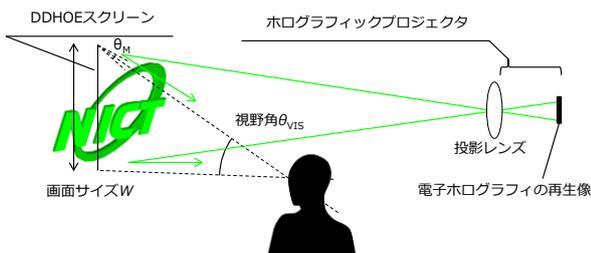


Fig. 4. Concept of projection-type see-through holographic 3D display [9, 10]

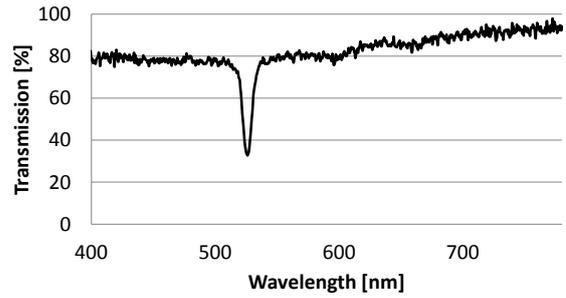


Fig. 5. Transmission curve of DDHOE screen [9]

表3に今回作製した DDHOE スクリーンの主な仕様を示す。想定する観測位置すなわちホログラム映像の集光点の座標は、スクリーンの中心を原点とする座標系で $(x, y, z) = (0, 59, 200\text{mm})$ とした。この時、観測位置での水平視野角は約 20 度であり、これは後述するホログラフィックプロジェクタ内の SLM を用いた通常の電子ホログラフィ装置と比べて約 6 倍にあたる。図6に、作製した DDHOE スクリーンにホログラフィックプロジェクタからの投影光を模したレーザー光を照射した時の反射光の振る舞いを示す。想定する観測点に反射光が集光していることがわかる。

Table 3. Specifications of the fabricated DDHOE screen

仕様項目	値
スクリーンサイズ	73.6 × 41.4mm ²
観測位置での水平視野角	20.8度
ホログラム記録材料	コベストロ社 Bayfol HX102

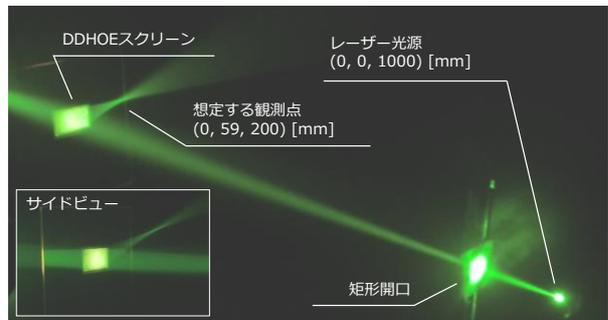


Fig. 5. Reflection of DDHOE screen in artificial fog [9]

図6にホログラフィックプロジェクタの光学系を示す。NICTで以前開発した電子ホログラフィ装置[18]を用いており、再生されたホログラム映像を投影レンズによって DDHOE スクリーンに拡大投影する。表4にホログラフィックプロジェクタの主な仕様を示す。今回の実験では、投影倍率を 2.0 とした。これによって、最終的な画面サイズは $73 \times 41\text{mm}^2$ であった。

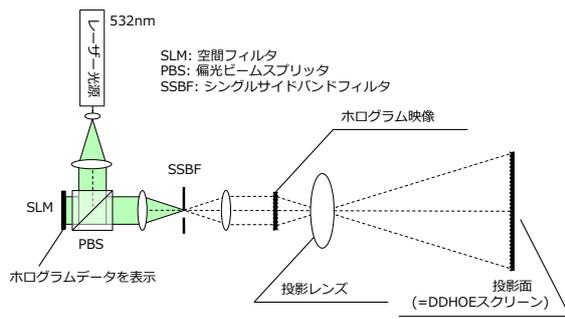


Fig. 6. Optical setup of holographic projector

Table 4. Specifications of holographic projector

仕様項目	値
液晶パネルの解像度	7,680 × 4,320画素
液晶パネルの画素間隔	4.8 μ m
投影倍率	2.0
投影レンズの焦点距離	500mm

図7に本技術で再生された映像を示す。aは、2次元のチェッカーパターンを表示して観測位置から見た図である。DDHOEスクリーンの光学特性によって、画面全面の光が観測位置に反射されていることがわかる。b, c, dはDDHOEスクリーンの後方1cmと5cmの位置に球体を配置した3D映像を表示した例である。cとdはそれぞれの球体にカメラの焦点を合わせており、それぞれの焦点付近に配置された球体のみがインフォーカスされていることから、ホログラムによる3D映像が表示されていることがわかる。

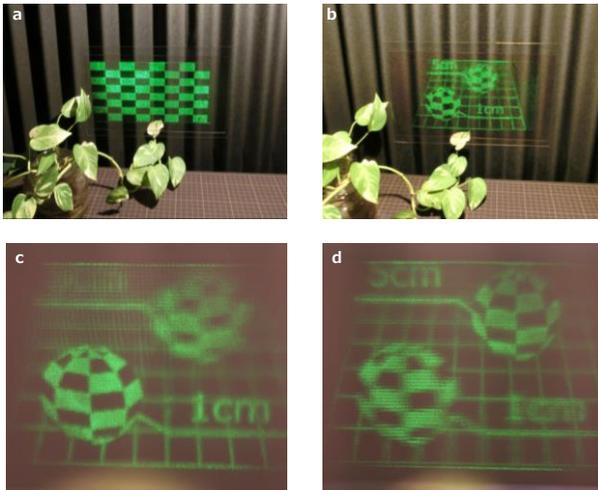


Fig. 7. Reconstructed images of proposed system [9]

5. まとめと今後の取り組み

これまで波面印刷に基づく波面プリンタおよびその応用例をいくつか紹介した。波面プリンタは、デジタルに設計した複素振幅分布を出力することで、3Dデータの高精細な可視化や任意のホログラフィック光学素子製造の可能性を開く一方、その

特長を発揮するためにはサブホログラム間の位相の整合性やサブホログラムに記録される波面自体の精度、再生時に照射する再生光の設計など検討すべき課題も多い。NICTでは、図8にあるように解像度チャートの記録による奥行きと解像度の評価および記録時のパラメータの検討を行っている[X]。また、波面プリンタのフルカラー化および作製されたホログラムの複製技術に関する研究開発も並行して進めている。



Fig. 8. Comparison of spatial resolutions by different recording parameters [19]

今後は再生される波面が設計通りの特性を有するかといった精度の検証や補正技術の開発を進める。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費(26790064, 16H01742)の助成と総務省SCOPE(162103005)、文部科学省COI STREAMの委託を受けたものです。

文献

- Hilaire, P. S. t. et al., Proc. SPIE 1667, 73–84 (1992).
- Sasaki, H. et al., Sci. Rep. 4, 6177 (2014).
- Yaras, F., Kang, H. & Onural, L. Opt. Express 19, 9147–9156 (2011).
- Hahn, J. et al. Opt. Express 16, 12372 (2008).
- Takaki, Y. et al., Appl. Opt. 47, D6 (2008).
- Haußsler, R. et al., Proc. SPIE 7237, 72370S (2009).
- Blanche, P.-A. et al., Nature 468, 80 (2010).
- Wakunami, K. et al., Proc. SPIE 9867, 98670J (2016).
- Wakunami, K. et al., Nature Communications, 12954 (2016)
- 情報通信研究機構, 報道発表, 2016年10月13日
- <http://www.zebraimaging.com/>.
- <http://www.holoxica.com/>.
- Wakunami, K. et al., Optics Express Vol.19, No.10 (2011).
- Matsushima, K. et al., Applied optics, Vol.48, No.34 (2009).
- Yatagai, T. Appl. Opt. 15, 2722–2729 (1976).
- <http://www.gsic.titech.ac.jp/>
- 大井隆太郎, 他, Hodic circular, Vol.36, No.4 (2016)
- Senoh, T. et al., Proc. SPIE 7957, 795709 (2011).
- Ichihashi, Y. et al., Proc. SPIE 10127, 101270L-1 (2017).