

全方向視差大規模コンピュータホログラフィによる 3D 映像技術の進展

Progress of 3D imaging by full-parallax large-scale computer holography

松島 恭治 (関西大学)

Kyoji Matsushima (Kansai University)

1. はじめに

ホログラフィは 1947 年に D. Gabor によって発明されたが, 1960 年のレーザーの登場までその技術は進展しなかった. また, それによる立体映像に関しては, E. Leith と J. Upatnieks, Y. Denisyuk を評価する声が高く, ホログラフィ 3D 映像技術の実際の創始者はこの 3 名だと考えてよい. Leith と Upatnieks はレーザーを用いて記録したオフ軸の透過型ホログラムを 1964 年の米国光学学会年次大会で初めて発表している. 実物のホログラムを見たことがない人には想像しづらいであろうが, このようなホログラフィ映像は「正にそこにあるように見える」究極の映像である.

しかし, 1964 年以降, 記録材料や記録技術, 再生技術などにおいて様々な改良がなされたが, 映像技術としてのホログラフィは本質的に変わっておらず, アナログ写真技術である. そのためか, お札やクレジットカード等のセキュリティ用途のホログラムではない本格的な 3D 映像を再生するホログラムを鑑賞できる場は年々減っている. 記録材料を製造するメーカーもほとんど無くなり, 過去に撮影されたホログラム作品も記録材料の経年劣化により失われつつあるのが現状である.

Leith と Upatnieks が 1964 年に披露したタイプのホログラムの干渉縞は 2 次元の画像パターンに過ぎない. そのため, そのパターンを計算機で作成するアイデアが 3 年後の 1967 年に A. W. Lohmann によって提案され, Computer-generated hologram (CGH) と名付けられている. しかし, Lohmann の CGH は波面変換素子の色合いが濃く, 3D 映像技術とは言い難いものであった. 実際には, アナログホログラムと同等の 3D 映像をデジタル技術で作成することは極めて難しく, 現在にいたるまで完全には実現していない.

ホログラムは光の回折現象によって入射光の方向を曲げる. そのため, 大きな回折角を得るためには干渉縞画像の物理的解像度が波長に近いレベルである必要があり, そのような微細画素で大きな画面を作ろうとすると, 巨大な画素数が必要となる. 例えば, 40 インチの HD 映像を視域角(視点を変えて映像を観察できる角度範囲)が 45° の CGH でカラー再生しようとする, CGH の干渉縞画像には, 画素間隔約 $0.6 \mu\text{m}$ で 1.2×10^{12} 画素, すなわち 1.2 兆画素が必要となる. これは現在のフル HD 映像の約 60 万倍, 8K

映像の約 3 万 7 千倍という巨大な画素数である. そのため, LCD 等の電子デバイスはもとより, 静止画像として作成することも困難である.

2. コンピュータホログラフィ

筆者らは, アナログのホログラム撮影をコンピュータシミュレーションで置き換えて計算した CGH から映像を再生する技術をコンピュータホログラフィと呼んでいる. 前述の 1 兆画素は極端な例であるが, 視域角 45° でサイズが 10 cm 角程度の CGH であっても, 数 100 億画素になるため, 現在の技術では電子的な再生は困難であり, その計算と静止画描画も難しい. なお, 視差を水平方向だけに制限すると全方向の場合の平方根に計算量が減るため, 計算が著しく簡単になる. しかし, それでは, 「正にそこにあるように見える」ホログラフィ映像ではなくなるため, 筆者らは全方向で計算する技術を研究している. また, 全方向で数 10 億画素を超えるような大規模 CGH を Full-parallax high-definition CGH (FPHD-CGH) と呼んでいる¹⁾.

このような FPHD-CGH の最初のものとして The Venus と名付けた 40 億画素の CGH を 2009 年に発表している²⁾. この CGH では, ポリゴン法と呼ぶ波動光学的計算手法で物体面を形成し³⁾, シルエット法と呼ぶマスクベースの波動光学的手法で⁴⁾, 物体相互のオクルージョン処理(隠面消去処理)をしている. また, 波動光学計算の基礎技術として, 平行平面間⁵⁾や非平行平面間⁶⁾, 軸外れ⁷⁾等の光波伝搬計算技術を開発している. これらは FPHD-CGH だけでなく, 一般の波動光学シミュレーションでも有用な技術である.

このような技術により 2012 年には, Brothers と名付けた 260 億画素規模のホログラムがマサチューセッツ工科大学博物館で約 3 年間展示された⁸⁾. また当初は, 分離した物体相互間のオクルージョン処理だけが可能であったが, スイッチバック法の開発により物体自体に自己オクルージョンがある場合も処理できるようになり⁹⁾, どのような複雑な物体であっても, 破綻のない映像を作れるようになった. また通常の拡散面だけではなく, メタリックな鏡面を表現したり^{10),11)}, 実物体と仮想物体を合成したりすることもできるようになっている^{12),13)}.

なお, 当初の FPHD-CGH はモノクロ再生のものだけであったが, 現在では, RGB カラーフィルタ方式¹⁴⁾と積層 CGVH(Computer-generated volume hologram)方式¹⁵⁾の 2 種類の方式によりカ

招待講演

ラー-FPHD-CGH も作成可能になっている。

3. 近年の進展

技術の成熟に従い、FPD-CGH の社会実装が模索されるようになった。そのため、近年の AI 技術を用いたポートレート CGH の作成¹⁶⁾やアニメーション再生¹⁷⁾、さらに大型化が進んでいる。

近年製作したモノクロとカラーの大型 FPHD-CGH の例をそれぞれ図 1 と図 2 に示している。

4. まとめ

近年進展している全方向視差で大規模なコンピュータホログラフィ技術を紹介した。本研究は、日本学術振興会科研費 22H03712 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) K. Matsushima, *Introduction to Computer Holography*, (Springer, 2020).
- 2) K. Matsushima, S. Nakahara, "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," *Appl. Opt.* **48**, (2009) H54-H63.
- 3) K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," *Appl. Opt.* **44**, (2005) 4607-4614.
- 4) 近藤, 松島, "シルエット近似を用いた全方向視差 CGH の隠面消去," 信学会論文誌 **J87-D-II**, 1487-1494 (2004).
- 5) K. Matsushima, T. Shimobaba, "Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields," *Opt. Express* **17**, (2009) 19662-19673.
- 6) K. Matsushima, H. Schimmel, F. Wyrowski, "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves," *J. Opt. Soc. Am.* **A20**, (2003) 1755-1762.
- 7) K. Matsushima, "Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation," *Opt.*

Express **18**, (2010) 18453-18463.

- 8) K. Matsushima, S. Nakahara, "Stepping closer to the perfect 3D digital image," *SPIE Newsroom*, (7 Nov. 2012).
- 9) K. Matsushima, M. Nakamura, S. Nakahara, "Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique," *Opt. Express* **22**, (2014) 24450-24465.
- 10) H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara, "Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms," *Appl. Opt.* **50**, (2011) H245-H252.
- 11) H. Nishi, K. Matsushima, "Rendering of specular curved objects in polygon-based computer holography," *Appl. Opt.* **56**, (2017) F37-F44.
- 12) K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara, "Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects," *Appl. Opt.* **50**, (2011) H278-H284.
- 13) K. Matsushima, N. Sonobe, "Full-color digitized holography for large-scale holographic 3D imaging of physical and nonphysical objects," *Appl. Opt.* **57**, (2018) A150-A156.
- 14) Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, "Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters," *Opt. Express* **25**, (2017) 2016-2030.
- 15) O. Kunieda and K. Matsushima, "High-quality full-parallax full-color three-dimensional image reconstructed by stacking large-scale computer-generated volume holograms," *Appl. Opt.* **58**, (2019) G104-G111.
- 16) S. Ikeda, K. Matsushima, "Holographic 3D portrait created by full-parallax high-definition computer holography and 3D face reconstruction," *Digital Holography and 3-D Imaging 2022*, (2022) W2A.1.
- 17) Press release, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2022/050901.html>

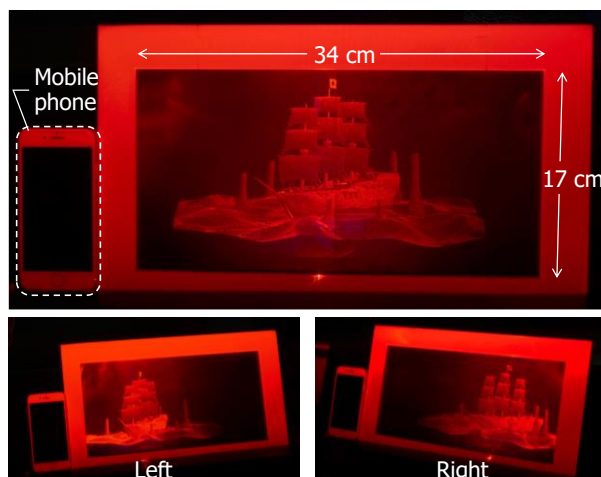


図 1 モノクロ FPHD-CGH 「Sailing Warship III」の光学再生像。画素数: 0.18 T pix (425,000 × 425,000), 画素間隔: 0.8 μm × 0.4 μm。

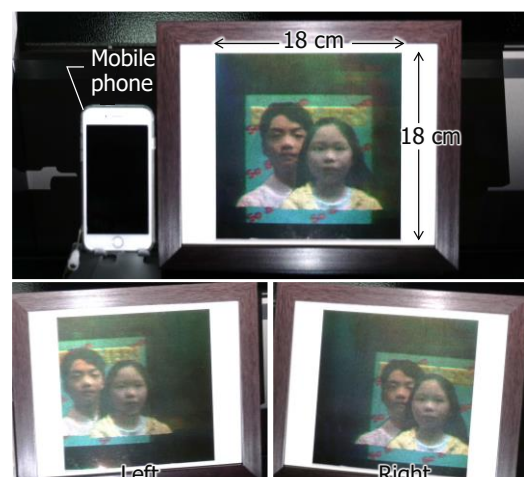


図 2 カラー FPHD-CGH 「Color Brothers」の光学再生像。画素数: 0.1 T pix (225,000 × 450,000), 画素間隔: 0.8 μm × 0.4 μm。