

コンピュータホログラフィの研究を支援する 関大デジタルホロスタジオ

松島恭治, 中原住雄*

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科, *機械工学科

Abstract : Kan-dai digital holo-studio has been established to facilitate developments in computer holography. This workshop is equipped with laser lithography facilities to print the fringe pattern of high-definition computer-generated holograms with extremely high-resolution. This report presents the circumstance in computer holography, the facilities in holo-studio, and software tools provided for numerical generation of the fringe pattern from CG models.

1. はじめに

戦略基盤形成支援事業の一環として関大デジタルホロスタジオと称するワークショップ(工房)が設立された。これは、超高解像度の計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram: CGH)の描画手段を提供することによりコンピュータホログラフィ研究に寄与することを目的としたものである。本報告では、コンピュータホログラフィの現状とその性質に言及し、コンピュータホログラフィにおけるこのようなワークショップの存在意義とそこで用意しているハードウェア・ソフトウェア環境について述べる。

2. コンピュータホログラフィとその性質

ホログラフィの原理は1948年にD. Gaborによって発明されたものであり、この功績によりGaborはノーベル賞を授与されている。図1に示すように、ホログラフィではコヒーレント光で照明された物体の光と、同じ光源から得た参照光を干渉させ、その干渉縞パターンをフィルム等の感光性材料に記録する。これがホログラムである。この干渉縞パターンは一見するとランダムなノイズ状のものであるが、そこに参照光と同じ光を照射すると干渉縞パターンによる回折光が像を形成し、記録された物体光と同じ像を再生する。以下、このような方法で作成される従来型のホログラムを光学ホログラムと呼ぶ。

「薄いホログラム」と呼ばれる種類の光学ホログラムでは、この干渉縞パターンは単なる2次元画像である。そこで、このパターンをコンピュー

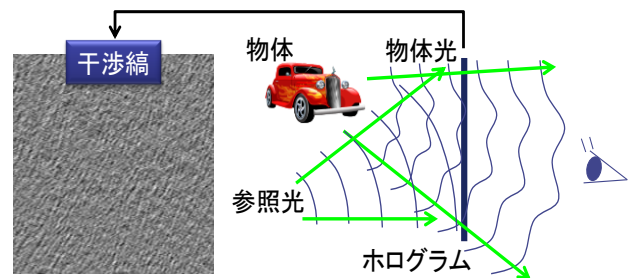


図1 ホログラフィの原理

タで発生することにより光学ホログラムと同様の物体像を再生できる。この技術がコンピュータホログラフィである¹。すなわち、計算機合成ホログラム(CGH)とは、コンピュータホログラフィにより数値的に発生した干渉縞パターンを静的な画像として描画してできるホログラムである。原理的には、この干渉縞パターンを液晶などのディスプレイデバイスで電子的に表示しても再生像が得られる。この場合は、動画ホログラムとなる。このようなシステムは電子ホログラフィあるいはホログラフィックディスプレイと呼ばれる。

ホログラフィによって再生される像は、記録された物体光と同じものであることが数学的に示されている。実際その再生像を観察すると、現在実用化されている立体画像技術による像とは異なり、実際にそこに物体があるかのような全く違和感の

¹ デジタルホログラフィという用語も用いられるが、これは主としてイメージセンサで干渉縞パターンを記録し、2次元画像として再生する技術を指す。



図 2 (a)Brothers の再生像と(b)MIT ミュージアムにおける展示

無い 3 次元再生像が得られることがわかる。そのため、ホログラフィックディスプレイはしばしば究極の 3D ディスプレイ技術と形容される。

しかしながら、電子的なホログラフィックディスプレイの実用化には大きな困難が伴う。これは空間バンド積の問題と呼ばれる。CGH のデータは光学ホログラムの干渉縞を空間的にサンプリングしたものに相当する。そのため、通常のデジタル信号と同様に、その空間的広がりとはスペクトルバンド幅の積はサンプリング数に一致する。コンピュータホログラフィでは、空間的な広がりとは物理的な画像サイズ、バンド幅は視域角(視点を移動して 3D 画像を観察できる範囲)に対応する。そのため、大画面で広視域角のホログラムをデジタル的に再生するには莫大なサンプリング数(ピクセル数)を必要とする。

例えば、視域角 45 度で $5 \times 5 \text{ cm}^2$ のホログラムを再生しようとする、ピクセルピッチは $0.8 \mu\text{m}$ 以下となり、必要なピクセル数は約 40 億ピクセル以上にもなる。この様な巨大な画像を電子的に表示することは、現在のディスプレイ技術では不可能であり、そのピクセルの微細さから静止画像を描画することも簡単ではない。また、物理シミュレーションにより、このような巨大な干渉縞パターンを得ることも従来極めて困難であった。そのため、究極の 3D 画像と形容されつつも、実際

には、高品質な 3D 画像を得ることができないのが長年の実情であった。

しかし、著者らはポリゴン法やシルエット法等の新規なアルゴリズムとレーザーリソグラフィ技術を用いてこの問題を克服し、40 億ピクセルを超える高解像度 CGH の作成に成功した[1]。また、その後、この技術を改良して様々な高解像度 CGH を作成し発表している[2-7]。これらのホログラムは、従来の立体画像技術では不可能な深い奥行きと自然で連続的な運動視差を再現するため、非常にインパクトのある像を再生する。そのため、Brothers と名づけられたその一つは米国ボストンのマサチューセッツ工科大学博物館(MIT ミュージアム)に寄贈され、図 2 に示すとおり、同ミュージアムで現在展示されている² [8,9]。

3. 関大デジタルホロスタジオ

著者らは、このように、コンピュータホログラフィが実際に究極のディスプレイ技術になり得ることを示したが、その極端な高解像度と巨大なデータ量のため電子的な方法でこれを表示することは未だ困難である。世界の様々な研究機関で電子的なホログラフィックディスプレイの研究開発は続いているが、著者らが作成する静止画ほどの高品質な再生像は得られていない。また、著者らと同様のレーザーリソグラフィ装置を所有する機関は少なくないが、それを高解像度 CGH の描画に使えるところはほとんど無いのが現状である。そのため、コンピュータホログラフィの研究者、特に理論やアルゴリズムの研究者は、干渉縞パターンを計算しても、それを実際に描画してホログラム再生像を観察することができない。このことがコンピュータホログラフィ技術発展の大きな妨げ

表 1 レーザー直接描画装置の仕様

Model	Heidelberg Instruments DWL 66+	
	Mode I	Mode II
最大描画サイズ [mm ²]	200 × 200	
最小位置決め単位 [nm]	10	
モード(描画レンズ)	Mode I	Mode II
アライメント精度 [nm]	100	120
最小描画ピクセル [μm]	0.6	0.8
描画速度 [mm ² /min]	4.0	16

² MIT ミュージアムにおける展示は 2012 年 6 月より始まっており、少なくとも 2015 年 3 月まで続くことが決まっている。

表 2 高解像度 CGH 制作に用いることのできるソフトウェア群[10]

名称	タイプ	説明
Wave Field Library (WFL)[12]	C++ クラスライブラリ	光波分布(Wave field)を取り扱うための基礎ライブラリ。光波間の演算処理、伝搬計算、FFT など 16 のクラスと約 580 の関数を実装している。CGH に特化したものではないが、上位のライブラリ/アプリケーションを使うために必要。
Polygon Source Library (PSL)	C++ クラスライブラリ	WFL の上位に位置するライブラリ。ポリゴン法、物体単位シルエット法、スイッチバック法のみならず、CG モデルファイルの読み込み、テクスチャマッピング等をサポート。10 のクラスと約 190 の関数を実装している。大規模光波の伝搬など基礎ライブラリの一部もこちらに実装されている。対応モデルファイル形式は WFL, POV, DXF, MQO。 (ただし、UV テクスチャマッピングは MQO のみ)
WaveFront3	アプリケーション	光波分布ブラウザ。様々な方法で光波を観察できる。種々の伝搬回折計算、回転変換計算などがグラフィカルなウィンドウ処理で会話的に実行できる。
HologramField Synthesizer[13]	アプリケーション	シーンデザインのための会話型アプリケーション。素材をシーン中に配置し、サイズ・方向などを指定できる。レンダリングエンジンも内蔵しており、小さな CGH なら、これ単体で光波数値合成と出力が行える。デザインしたシーンは XML ファイルで保存し、ライブラリを通して C++ プログラムで読みだすこともできる。
HologramField Library (HFL)	C++ クラスライブラリ	デザインしたシーン情報を XML で保存・読み出しするためのライブラリ。上のシンセサイザはこれを用いている。独自の C++ プログラムにリンクしてデザインシーンを読みだすことが可能。
ImagingView Simulator	アプリケーション	CGH 干渉縞から再生像をシミュレーションするプログラム。仮想光学系による結像計算を用いているため、共役像や高次回折像、エイリアシングエラーによる像等もすべて確認できる。

となっている。

そこで、戦略基盤形成支援事業により資金を得て設立されたワークショップ(工房)が、関大デジタルホロスタジオである。このワークショップはハイデルベルグインストルメンツ社の最新のレーザー直接描画装置を備えており、コンピュータホログラフィの研究者や CGH 作品を制作したいアーティストは、数値的に発生した干渉縞パターンを描画することができる。この描画装置は、表 1 に仕様を示すように、最大で $20 \times 20 \text{ cm}^2$ のホログラムを最小 $0.6 \mu\text{m}$ のピッチで描画でき、その最大視域角は両側で 60 度程度に達する。

なお、この関大デジタルホロスタジオ利用にあたっては審査があり、成果物の取扱いや各種権利には一定の制約がある。

4. ホログラム計算を支援するソフトウェア

関大デジタルホロスタジオの描画サービスを利用すると、高解像度 CGH を制作できるが、その前にレーザー直接描画装置で描画する干渉縞を数値的に発生できなくてはならない。前述のとおり、この干渉縞パターン画像の解像度は、例えば、

$5 \times 5 \text{ cm}^2$ 程度で 40 億ピクセルに達する。そのため、その計算は簡単ではない。そこで、著者らは干渉縞発生をある程度単純化するために、表 2 に示すようなソフトウェアツールを用意している [11]。

これらは、著者らが開発したポリゴン法とシルエット法の計算手法を実装したものであり、それなりの容量の計算機さえあれば、高解像度 CGH の干渉縞を計算することができる。これらのうち、C++ クラスライブラリの利用には C++ 言語のスキルと開発環境、また波動光学の知識が必要であるが、Windows のアプリケーションソフトではプログラミング作業無しに干渉縞計算ができる。

特に、近年著者らが開発したスイッチバック法を用いると [7]、図 3 に示すように、コンピュータグラフィックスのモデルデータから干渉縞を発生し、コンピュータホログラフィでそれを再生することも可能になりつつある。

5. まとめ

本稿ではコンピュータホログラフィの現状と性質を報告し、その研究を支援するための関大デジ

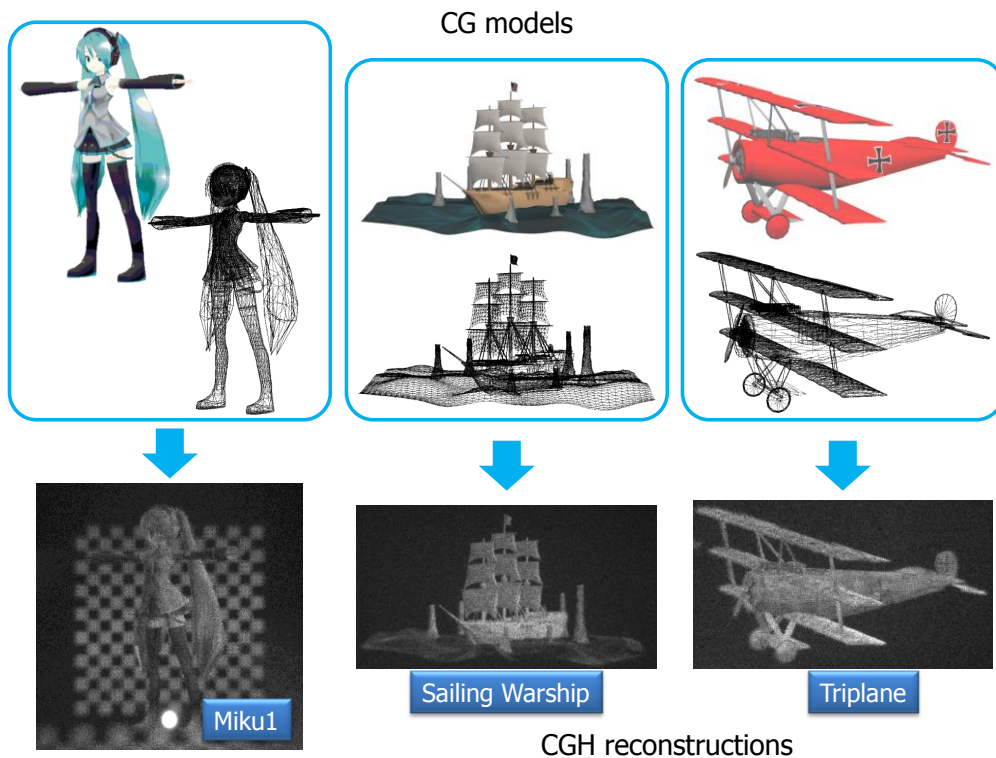


図3 スイッチバック法によるCGモデルからCGHへの変換例[10]

タルホロスタジオの意義を述べた。また、実際にホログラムを制作するための計算を支援するソフトウェアを示した。著者らは、これらのハードウェアとソフトウェアが今後のコンピュータホログラフィ技術の発展に寄与することを期待している。

本研究は、日本学術振興会の科研費(24500133)、および文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成25年～平成29年)の助成を受けたものである。

参考文献

[1] K. Matsushima, S. Nakahara: "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method," *App. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).

[2] K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara: "Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects," *App. Opt.* **50**, H278-H284 (2011).

[3] H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara: "Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms," *App. Opt.* **50**, H245-H252 (2011).

[4] 中村, 松島, 中原: "超高解像度CGHにおけるBabinetの原理と部分光波伝搬を用いた隠面消去法," *映情学誌* **66**, J136-J143 (2012).

[5] K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara: "Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition

computer holography," *J. Electron. Imaging* **21**, 023002 (2012).

[6] 松島, 中原: "ポリゴン法による100億画素規模の超高解像度コンピュータホログラムの作成," *レーザー研究* **40**, 18-27 (2012).

[7] 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**, 24450-24465 (2014).

[8] 松島: "コンピュータホログラム「Brothers」制作記 —MITミュージアムでのCGH展示を目指して—," *HODIC Circular* **32**, No.2, 31-40 (2012).

[9] K. Matsushima, S. Nakahara: "Stepping closer to the perfect 3D digital image," *SPIE Newsroom*, (6 Nov. 2012). DOI:10.1117/2.1201210.004526

[10] 松島: "コンピュータホログラフィ研究と作品制作のためのソフトウェア環境," *HODIC Circular* **34**, No.4, (2014).

[11] WaveField Tools ダウンロードサイト : <http://www.laser.ee.kansai-u.ac.jp/WaveFieldTools/>

[12] 松島: "波動光学シミュレーションツールキット: WaveField Tools," *Optics & Photonics Japan 2010 講演予稿集*, 9aC2 (2010).

[13] 村田, 松島, 中原: "コンピュータホログラフィにおけるデザイナーと研究者のための統合的なデザインシステムの開発状況," *HODIC Circular* **33**, No. 3, 11-14(2013).