文献情報:HODIC Circular Vol. 34, No. 4, pp.31-38(口頭発表: 2014.11.19, Invited).

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

松島 恭治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし 関大デジタルホロスタジオと称して，高解像度計算機合成ホログラム描画用レーザーリソグラフィ設備の運用が始まろうとしている．本稿では，それにあわせ，高解像度 CGH の制作用に著者らが研究開発しているアルゴリズム，3D シーン構成モデル，ソフトウェアツールについて述べる．また，この関大デジタルホロスタジオで用いる描画装置についても触れる．

キーワード CGH，シルエット法，スイッチバック法，レーザーリソグラフィ

Software Environment for Studying Computer Holography and Making Artworks

Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

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

E-mail: matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract Kan-Dai digital holo-studio that is established soon in Kansai University will provides a drawing service of high-definition CGHs using its laser lithography facilities. In this paper, the software aspect related to making high-definition CGHs such as algorithm, the configuration model of the 3D scene and software tools are presented to assist in the use of the drawing service. Several specifications of the laser writer, used in the digital holo-studio, are also provided for prospective users.

Keyword CGH, the silhouette method, the switch-back technique, laser lithography

1. はじめに

The Venus というのが，著者と中原先生が初めて製作した高解像度計算機合成ホログラムの作品名であった．宣伝の意味もあって，当時，英語では“Extremely high-definition CGH”，日本語では「超高解像度 CGH」と少し大げさに称していた．現在では，単に電子ホログラフィとの区別だけの理由で高解像度 CGH と呼ぶことにしている．The Venus 以降，様々な技術的課題の解決を目指して，Moai I/II, The Moon, Shion, The Metal Venus I/II, Aqua 1/2 等の作品を制作してきた．これらについては，以前の本誌において詳細を報告している[1]．また，その後 International Symposium on Display Holography (ISDH) 2012 と連動してマサチューセッツ工科大学博物館(MIT ミュージアム)で開催された現代ホログラフィ展に出品した The Brothers[1]についても，本誌で詳細を報告している[2].

これら一連の作品は，ポリゴン法とシルエット法で計算され，レーザーリソグラフィで製作されている．著者らはこれらの作品を種々の学会や研究会で展示しているので，すでに見て頂いた方も多いと思う

[1] The Brothers は現在，MIT ミュージアムへの正式な寄贈手続きが完了し，同ミュージアムの収蔵品となっている．ただし，2015 年 3 月までは展示が続くことは決まっているが，その後の展示については未定である．

が，深い奥行きのある自然で独特な 3 次元映像を再生することができる．45 度程度の広い視域角があり，シルエット法により，継ぎ目のない連続的で自然な運動視差が再生されるため見た人は非常に強い印象を受ける．

著者は，報告[1]でこのような高解像度 CGH がアートとして成立する可能性を述べ，その最後に著者らが使用していたのと同様のレーザーリソグラフィ設備を備えた研究センターの設立について言及した．その時点ではあくまで一つの夢として言及したものであったが，その後，関係者の尽力のおかげで，少しその夢に近づくことができた．まだまだ研究センターというには程遠い陣容であるが，少なくともレーザーリソグラフィ設備をホログラム描画専用として共同利用する準備を整えることができた．これを「関大デジタルホロスタジオ」と称している．このホロスタジオで描画する CGH は，ポリゴン法とシルエット法で計算されなければならない訳ではなく，どのような手法であれ干渉縞データさえあれば，再生像の確認や，発表，展示を行うための CGH を作製できる．

しかしながら，高解像度 CGH に必要な巨大な干渉縞を独自に計算できる研究者やアーティストがそれほど多いとは思われないため，本稿では著者らが提案するアルゴリズムや，それを比較的手軽に利用できるように実装したライブラリやツールについて解説する．特に，著者らがスイッチバック法と呼ぶアルゴリズムの進展により[3]，以前構想していたような 3D シーンの構成モデルが少し実情に合わなくなってきた感もあるため，このアルゴリズムについてやや詳しく解説する．

2. シルエット法とそれを前提とした 3D シーン構成モデル

著者らが従来製作した高解像度 CGH に強い立体感を与えたのは，シルエット法と呼ぶ隠面消去処理あるいはオクルージョン処理である．これは図 1 に示す通り，不透明な遮蔽物による光の遮蔽現象を簡単化して物理的にシミュレートするものである．すなわち，光軸に垂直な平面上の光波複素振幅分布(以下，光波分布)で光を表現し，物体の断面積が最大となる位置においてその物体のシルエットで光波分布をマスクするものである．これにより，現実の光と遮蔽物の関係がそうであるように，視点を動かすことにより遮蔽物の背後が見え隠れするオクルージョンをかなり正確に再現することができる．この様な考えに基づくオクルージョン処理をシルエット法と呼んでいる．

著者らは，前述のように，ポリゴン法とシルエット法で高解像度 CGH を作成してきた．ポリゴン法は広く使われている点光源法に対比される手法であり，その計算速度は一般に点光源法よりかなり速いものの，場合によっては点光源法でも置き換え可能である．しかし，著者の知る限り，シルエット法ほどの強力なオクルージョン処理法は存在しないのではないかと思う．オクルージョン処理は様々なものが提案されているが，運動視差が連続的でなかったり，数 10 億ピクセル以上の高解像度 CGH には到底使えないほど計算が遅かったりする．特に，分離した物体相互のオクルー

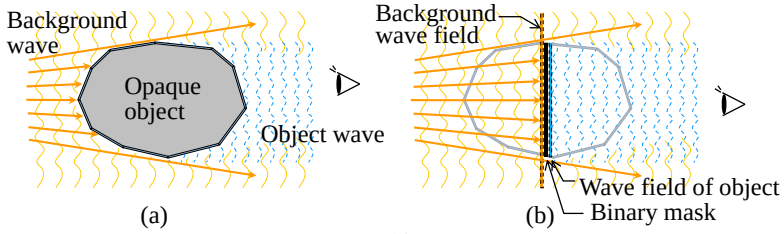

図 1 シルエット法の原理 [3].

ジョン処理についてだけ言えば，シルエット法はほぼ無敵であろう．

シルエット法による相互オクルージョン処理の手順を表したのが，図 2 である．このタイプのシルエット法では，一つの物体毎に背景光波分布にシルエットマスクを乗算して物体光波を加算し，次の物体位置まで伝搬する．この処理をシーンの奥から順に物体毎に実行し，最終的にホログラム面での光波分布を得る．

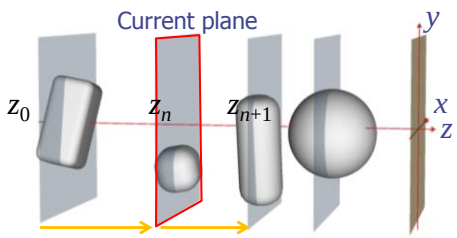

図 2 物体単位シルエット法の処理手順．

そのため，著者らが高解像度 CGH 作品制作のために従来作成してきたソフトウェアは，図 3 のようなシーン構成モデルを前提としている．すなわち，3D シーンは分離した要素で構成され，その構成要素をシーン中に配置してシーンデザインを行うという考え方である．なお，この要素としては，ポリゴンモデルの立体物だけではなく，平面画像や，デジタルホログラフィで取得した実物体光波，多視点画像なども用いられる．

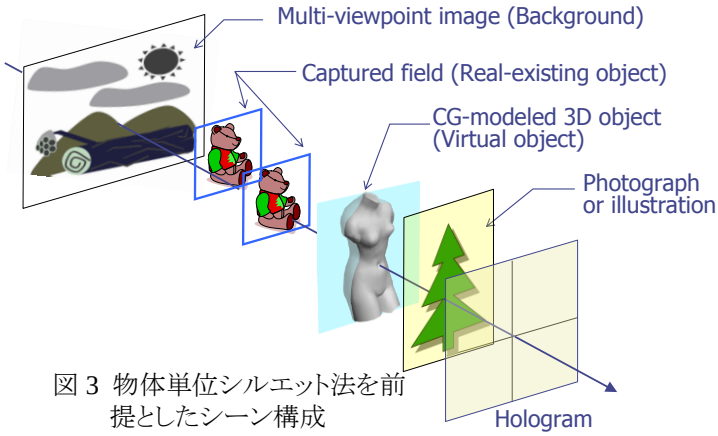

図 3 物体単位シルエット法を前提としたシーン構成

以前報告したデザイナー用会話型ソフトウェア等は，すべてこの 3D シーン構成モデルに従って設計され，実装されている[4]．このソフトでは，3D シーン中での要素の位置や大きさ，向きなどをデザインしてそのデザインデータを保存し，シルエット法を用いてオクルージョン処理し，そのシーンの光波分布を数値合成することができる．

3. 物体単位シルエット法の限界とシーンデザインの問題点

前節で述べたシルエット法は，正確には，物体単位シルエット法と呼ばれる．これは遮蔽の単位が分離した物体になっているからである．少し考えれば，このような手法ではうまくオクルージョン処理ができないケースはたくさんある．図 4(a)はその例である．この場合，最大断面積の位置でシルエットマスクを用いて遮蔽しても，物体自体

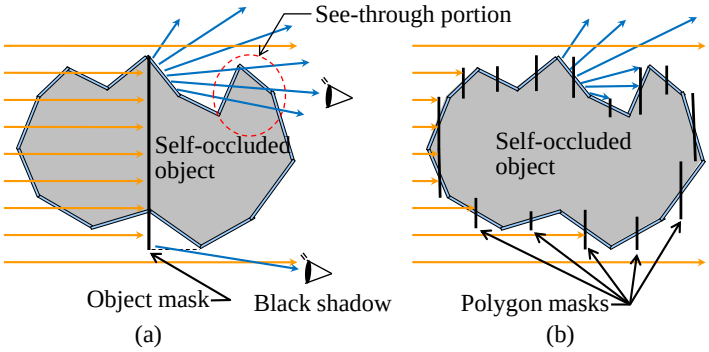

図 4 自己オクルージョンがある物体の物体単位遮蔽処理(a)とポリゴン単位遮蔽処理(b) [3]．

に遮蔽関係のあるポリゴンが存在するため，物体が部分的に透明になって再生されてしまう．あるいは，マスクそのものが直接見えてしまう視点位置があり，その位置から見ると黒い影が見える．このように自己オクルージョンを有する物体は，物体単位シルエット法ではうまく処理できない．

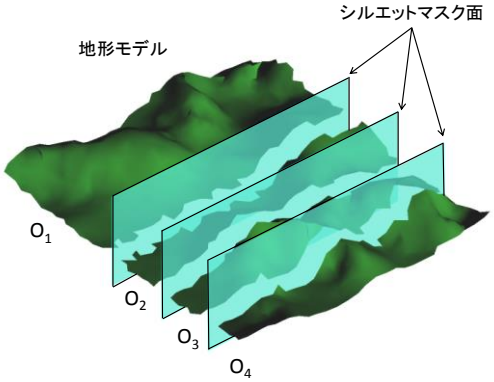

図 5 地形のような一つながりの大きな物体を計算するための物体分割と遮蔽処理 [5].

そのため，例えば，風景を再生するような CGH では，図 5 に示すように，地形を表すモデルを適切に分割し複数のマスク処理をしなければならない[5]. この場合，分割とマスク処理をする位置はデザイナーが発見的に探すか，あるいはその状況に合致した何らかのアルゴリズムを考案して決定しなければならなかった. この煩雑な作業を避けるため，実は，The Venus をはじめとする従来の高解像度 CGH 作品では物体モデル自体に自己オクルージョンが存在しない物を慎重に選んできた.

つまり，物体単位のシルエット法をベースとした場合，シーンデザインには次のような制約が生じる.

(1) 物体モデルは連続的に広がったものではなく，個々に分離したものでなければならない.

(2) 物体モデルには自己オクルージョンがあってはならない. あったとしても目立たないものでなければならない.

(3) もしも自己オクルージョンがあるか，あるいは連続的な大きな物体モデルであった場合は，物体を分割し適切な個所にマスクを入れる必要がある. マスクを入れる位置は，通常，デザイナーが判断しなければならない.

4. スイッチバック法によるポリゴン単位シルエット法の高速処理

図 4(b)に示すとおり，光波遮蔽をポリゴン単位で行うと，このような問題の大半は避けられる. 物体に自己オクルージョンがあったとしても，ポリゴン毎に遮蔽されるため，部分的な透明化もおこらず，黒い影が見えるようなこともない. ただし，この手法であっても，遮蔽はシルエットによる近似的なものであるので，マスク間には隙間がある. そのため，遮蔽しきれずに漏えいする光波や小さな影が見える可能性はある. しかし，十分にポリゴン数が多く個々のポリゴンが小さければ，このような現象はほとんど目立たないため，実用上十分なオクルージョン処理ができる.

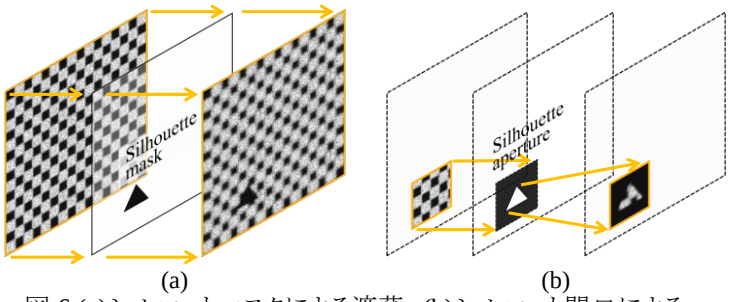

図 6 (a)シルエットマスクによる遮蔽. (b)シルエット開口による遮蔽 [3].

しかしながら，シルエット法は遮蔽物一つにつき一回の光波伝搬計算が必要であるため，ポリゴン単位の遮蔽をすると，必要な光波伝搬計算回数はポリゴン数と等しくなり，ポリゴン数が増加すると莫大な計算量となる．そこで，ポリゴンのサイズが小さいことを利用し，シルエットマスクの考え方を逆転する．すなわち，従来はシルエットの内側で光を通さないマスクで処理をしたが，図 6 に示すように，逆にシルエット形状の開口を考え，シルエットの外側で光を通さないマスク処理をする．この様にすると，伝搬計算を実行しなければならない範囲は，開口を通過する光が回折する範囲に限定されるため，大きく計算量を削減することができる．

図 7 はスイッチバック法の考え方を示している．(i)は通常のシルエットマスクを用いてシルエット法を行った場合であり，シルエットの内側を遮蔽した光波が得られる．(ii)では，シルエットマスクを反転したシルエット開口を用いており，遮蔽を考えずにそのまま伝搬した光波から，開口を通過した光波を減算することにより(i)と同じ光波が求まる．これは Babinet の原理として知られているものである．

(iii)では，開口で遮蔽される光波を求めるために，遮蔽なしで伝搬した光波を一旦逆伝搬している．この様にすると，伝搬計算が一組の面の往復になるだけではなく，一つの面に中間結果が蓄積される効果が生まれる．詳細は文献[3]に譲るが，これを複数のポリゴンに拡張して定式化するとスイッチバック法の原理式が導出できる．

スイッチバック法は，ポリゴン単位シルエット法の計算時間を大きく削減する．例えば 64K×64K でピクセルピッチ 0.8μm (視域角約 45 度)の CGH で，5000 ポリゴンのモデルを計算した場合，計算時間は約 1.7 時間と測定されている．これは，従来のシルエット法でポリゴン単位遮蔽を行った場合に対して約 60 倍高速である[3]．

このスイッチバック法を用いると，シーンデザインの考え方が大きく変わる．すわなち，上で述べたよ

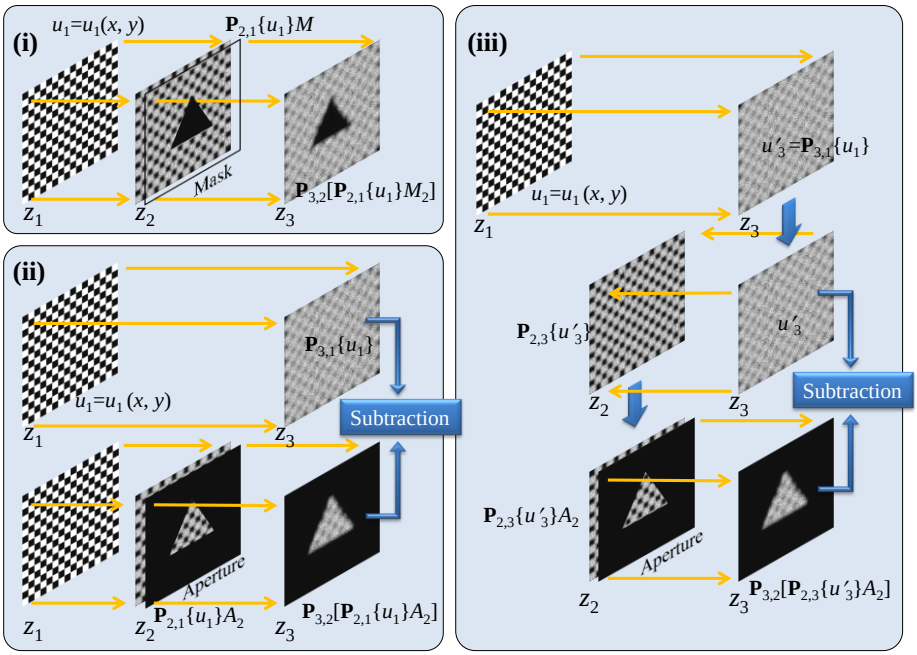

図 7 シルエットによる遮蔽処理のバリエーション [3].

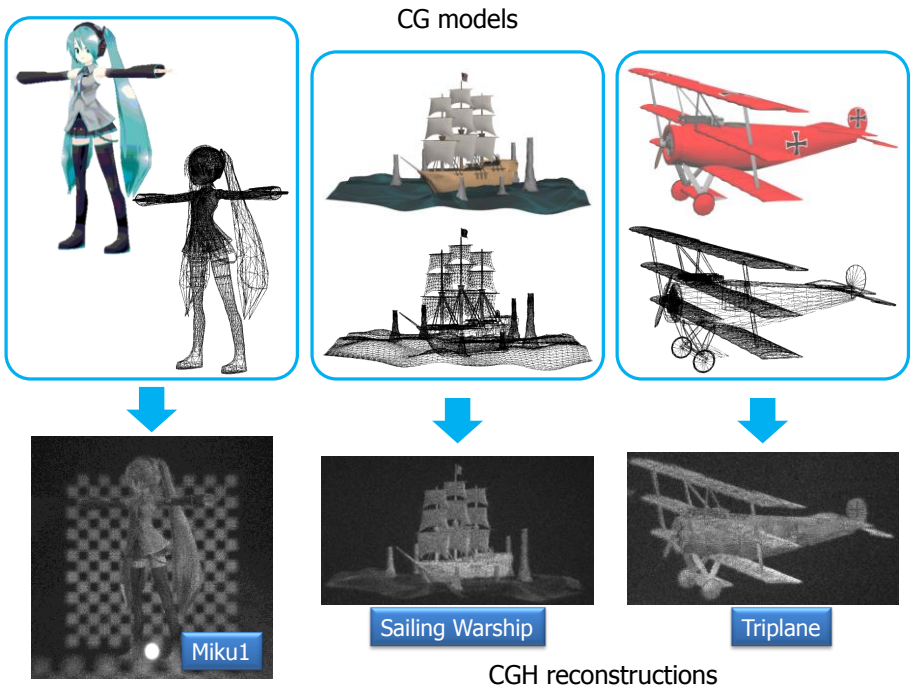

図 8 スイッチバック法による CG モデルから CGH への変換例.

うなデザイン上の制約や配慮は必要なくなる. どのような複雑な形であれ, CG モデルとしてデザインしたものがそのまま機械的に CGH に変換できる. その例を図 8 に示す. いずれも複雑な形状を有するモデルであるが, スイッチバック法を用いた計算プログラムに入力すると, 物体光波に変換され, 干渉縞が生成できる. そのため, CG モデルの素材に関してだけ言えば, CGH 専用のデザイナーツールは必要なく, CG モデラーでデザインし, モデルファイルをそのまま読み込んで CGH をレンダリングするような簡易なツールも開発可能である.

5. 高解像度 CGH 制作用ソフトウェア

著者らは, 高解像度 CGH を計算するだけではなく, 波動光学的計算を幅広く実行するためのソフトウェアツール群を作成しており, これを WaveField Tools と呼んでいる[6]. このツール群の中から, 高解像度 CGH 作成に役立つものを表 1 にまとめている. この表の中で, C++クラスライブラリとあるのは, プログラミングライブラリであり, マイクロソフト Visual Studio 用のものである.

この中でも Wave Field Library (WFL)が最も規模が大きく, すべての基礎になっている. これは CGH に特化したものではなく, 波動光学用の汎用ライブラリであり, 光学素子/回折素子の設計などにも使われている. CGH 制作に大きく関係するのは, Polygon Source Library (PSL)であり, 本稿で紹介したようなアルゴリズムで実際にモデルファイルを読み込んで CGH 計算を行う種々の機能が詰め込まれている. WFL/PSL を使いこなせば, まだアプリケーションに実装されていないようなものも含めてすべての機能を利用できる. ただし, C++プログラミングのスキルと波動光学の知識が必要である. また WFL/PSL のドキュメントは 180 ページ程度あるため, ハードルはかなり高い.

表 1 高解像度 CGH 制作に用いることのできるソフトツール群 [6].

名称	タイプ	説明
Wave Field Library (WFL) [6]	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 [4]	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.

今後は, WFL/PSL のようなライブラリではなく, プログラミングを不要とした Hologram Field Synthesizer が CGH 制作の中心になる予定である. これは図 3 で示した 3D シーン構成モデルを前提として設計されている. その意味ではやや古い設計思想に基づいている. しかし, このシンセサイザにはすでにスイッチバック法も実装されているため, CG モデラーでデザインした単一のモデルを CGH の物体空間に配置し, パラメータ指定するために使うだけでも価値がある. また, 実物体光波や多視点画像は一般の CG モデラーでは扱えないため, これらを用いるためには本シンセサイザが必要である. なお, Direct-X を用いている関係で, 本シンセサイザは Windows Server などを OS とする大容量マシンとはグラフィカルユーザーインターフェース(GUI)の相性が悪いため, 現在, GUI 無しのレンダリングエンジンを Hologram Field Library (HFL)を用いて実装中である. これが完成すれば, デザインは通常のデスクトップ PC の GUI 付きのシンセサイザで行い, 計算の実行は大容量マシンでできるようになる.

6. 関大デジタルホロスタジオ

はじめに述べたとおり, 関大デジタルホロスタジオと称するレーザーリソグラフィ設備(以下, レーザー直接描画装置)の運用を始める予定である. 利用の形態としては, 関大内の研究者との共同研究をベースとした利用方法と, 干渉縞データを描画するだけの共同利用ベースのものがある. 後者はいわゆる CGH 描画サービスであるが, 文部科学省と関西大学から資金を得た設備であるため, いくらか制限の厳しいものとなる予定である.

例えば企業が描画サービスを利用する場合，企業内での閉じた研究には使えず，外部で論文等を発表することが利用条件となる．アート目的の利用も規定される予定であるが，こちらも，私的鑑賞や販売目的は不可で，展示会や美術館での展示目的のみとなる．なお，実施にあたっては知的財産権，著作権，所有権の取扱いなど複雑な問題が絡むため，本稿執筆時点では未だ正式決定していないことも多い．

この関大デジタルホロスタジオで運用するレーザー直接描画装置の仕様を表 2 に示す．この表に示されているとおり，最高では0.6μmのピクセルピッチで20×20cm^{2}のCGHが描画できる．しかし現時点では，実際には著者らもそれほどのものは描画した経験が無く，描画データのフォーマット変換を含めて，実際に描画できるかどうかは不明である．なお，本装置で描画する干渉縞はバイナリ振幅の干渉縞になる．

表 2 レーザー直接描画装置の仕様

Model	Heidelberg Instruments DWL 66+	
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

7. まとめ

関大デジタルホロスタジオの設立に絡めて，高解像度 CGH 作品を作成するために著者らが考えている 3D 構成モデルやスイッチバック法による計算手法の進歩，また著者らが用意しているソフトウェアツールについて述べた．繰り返しになるが，関大デジタルホロスタジオにおけるレーザーリソグラフィ設備の共同利用(描画サービス)は，これらのソフトや手法の利用に限定されるものではなく，原則として利用者が持ち込む干渉縞データをそのまま描画するものである．著者は，この様な描画サービスが今後のコンピュータホログラフィ研究の進展に結びつくことを大いに期待している．

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．

文献

[1] 松島恭治: “新しいデジタルアートとしてのコンピュータホログラフィ”, HODIC Circular **31**, No.1, 2-11(2011).
[2] 松島恭治: “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).
[3] 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). http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.024450
[4] 村田峻平，松島恭治，中原住雄: “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).
[5] 東 健太郎，西 寛仁，松島恭治，中原住雄: “山岳風景を再生する超高解像度 CGH の合成,” HODIC Circular **30**, No. 3, 9-12(2010).
[6] 松島恭治: “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).
[7] WaveField Tools ダウンロードサイト:http://www.laser.ee.kansai-u.ac.jp/WaveFieldTools/