

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 —

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 2012 年 6 月より 2013 年 9 月まで、米国ケンブリッジにある MIT ミュージアムにおいて現代ホログラフィ展 “The Jeweled Net: Views of Contemporary Holography” が開催されている。筆者達は、この特別展示に計算機合成ホログラム(CGH)を出品すべく三つの高解像度 CGH を制作し、そのうち「Brothers」と題した最も大きな CGH が採択され、実際に本稿執筆時点にミュージアムで展示されている。本稿では、この三作品、特に「Brothers」に焦点をあて、その制作過程を報告する。

キーワード CGH, シルエット法, ポリゴン法, 3D スキャン, デザイン, 展示

Making of a Computer Hologram “Brothers” — For exhibition of CGH in MIT museum —

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 Exhibition of contemporary holography, named “The Jeweled Net: Views of Contemporary Holography”, takes place in MIT museum at Boston USA from June 2012 through September 2013. We intended to apply to exhibit our high-definition computer-generated holograms (CGH) in this special exhibition and created three different holograms. As a result, one of them, the biggest one was accepted and now exhibited in MIT museum. This article reports these three CGHs, especially making process of Brothers, actually exhibited in the museum.

Keyword CGH, silhouette method, polygon method, 3D scan, design, exhibition

1. はじめに

3 年に一度開催される International Symposium on Display Holography (ISDH) が、今年 6 月に米国ボストン近郊のケンブリッジにあるマサチューセッツ工科大学(MIT)メディアラボで開催された。これは、ホログラフィの研究者とアーティストの共同シンポジウムであり、HODIC の趣旨に最も近い国際会議と言えよう。筆者も含めて 10 名程度の日本人研究者・ホログラファーも参加し、5 日間にわたって活発な議論を繰り広げた。今回の ISDH2012 の目玉の一つは、このシンポジウムをローンチイベントとした MIT ミュージアムにおける現代ホログラフィ展であった。シンポジウム自体の開期は 5 日間であったが、このホログラフィ展は 1 年 3 か月続く本格的なものである。

筆者のもとにこのホログラフィ展示企画の連絡が届いたのは、2011 年の夏のことであった。MIT メディアラボからメールには、最先端ホログラフィを象徴するような展示のプロポーザルを募集しており、専門委員会により選抜された作品が MIT ミュージアムで展示されるとのことであった。MIT ミュージアムは、MIT での学問や

研究成果を幅広く社会と結びつけることを主なミッションとしているが、世界有数のホログラムコレクションでも知られている。そのMITミュージアムにおいて、いや、MITに限らずそもそもミュージアムにおいてホログラム作品を展示してもらえるということは大変名誉なことであろう。以前、本誌のおいても報告したとおり[1]、筆者らのグループは、近年、従来の光学ホログラフィと見紛うばかりの美しい計算機ホログラム(CGH)の作成に成功しており、手法の研究のために、かなりの数の作品を発表している[2]。筆者らはこれらの CGH 作成技術を「コンピュータホログラフィ」と称しており、この特別展示は、その PR の絶好のチャンスに見えた。

そこで、筆者らのコンピュータホログラムを何点か応募しようと考えた。既存の作品でも良いが、どうせなら最新の技術を駆使したものを新たに制作しようと考え、共同研究者である関西大学機械工学科中原住雄先生はじめ、当時の院生であった有馬君、西君、小川君たちとも相談した結果、新しい技術の一つの作品に詰め込むのは難しいため、三つのコンピュータホログラム作品を **Trilogy (3 部作)** として応募することにした。募集があった当時は、いったい何点ぐらいが最終的に展示されるのか、また採択率がどのぐらいかなど全くわからなかったため、旨くすれば 3 点とも展示してもらえるかも・・・と考えたわけである。実際には、相当数の応募があったらしく、主催者側から 1 グループから 3 点の展示は難しいと言われ、そのうちの 1 点「**Brothers**」のみが展示されることになった。以下、これらの作品、とくに「**Brothers**」の制作について述べる。

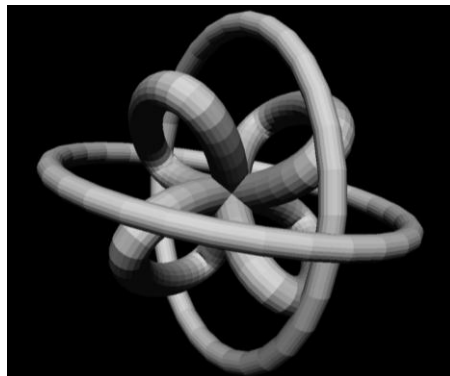
2. 応募した 3 部作

展示の企画が筆者のもとに舞い込んだ時点で、筆者らの最近の研究を生かした次の 3 点の制作を考えた。

Rose in Ring

このホログラムの狙いは、まず複雑な物体の隠面消去技術である「スイッチバック法」[3]を活かした作品を作ることであった。スイッチバック法は、現リコー勤務の中村君が院生時代に考案した手法である。また、西君が考案した鏡面性曲面のレンダリング技術[4]を用い、小川君が研究していた分散処理により、大型で複雑な相互/自己オクルージョンを示す物体を再生するホログラムを制作しようと考えた。

CG モデラーを用いて物体モデルを作成しても良かったが、筆者のモデリング技術のレベルでは見映えのするデザインは到底できそうになかったため、この作品については、数学的にモデルを発生することにした。そのために用いたのが薔薇曲線と呼ばれるパラメトリックカーブである。バラ曲線は、極座標において $r = \cos(n\theta)$ で定義される曲線であり、 n は任意の整数である。このままでは 2 次元の曲線なので、様々な試行を行ったのち、 $n=2$ とし、 $z = \sin(4\theta)$ の項を付け加えて 3 次元曲線化すると、ちょうど見易く、また計算しやすいモデルになることがわかった。モデルをもう少し複雑化して見映えの良い物体にするためにさらに二つのリングと組み合わせたのが Fig.1 (a) のモデルである。これを実サイズで



(a)



(b)

Fig.1 コンピュータホログラム “Rose in Ring”. (a) CG による画像化, (b) 光学再生像.

直径 8 cm とし、ホログラムの背面 8 cm の位置に配置してホログラムを計算・作製した。光学再生像を Fig.1 (b) に示す。なお、ホログラムのピクセル数は $131,072 \times 131,072$ であり、ピクセルピッチが縦横 $0.8 \mu\text{m}$ であるので、サイズは $10.5 \times 10.5 \text{ cm}^2$ である。

Penguin

このホログラムは、やはり新しい技術であるデジタイズドホログラフィ[5]により作成したものである。デジタイズドホログラフィでは、レンズレスフーリエ合成開口デジタルホログラフィの技術により実在物体の光波を広範囲かつ高密度に記録する。これを、多重化などのデジタル編集を行って 3D シーン中に埋め込み、デジタル画像やポリゴンメッシュ 3D 物体の仮想物と共に CGH として再生するものである。Penguin では、二つの物体の光波を記録し、大きな方ではその範囲は約 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ である[6]。これらの光波をそれぞれ二重化し、Fig.2 (a) の仮想 3D シーンに埋め込んでいる。光学再生像を Fig.2 (b) に示す。ホログラムのピクセルピッチは縦横 $1.0 \mu\text{m}$ でピクセル数が $131,072 \times 65,536$ 、サイズは $13.1 \times 6.5 \text{ cm}^2$ である。

Brothers

以前発表した Shion [1,7] の制作時に 3D レーザースキャナで計測した筆者の娘の顔形状データを追加加工して用いている。さらに、実は同時にスキャンしておいたもう一人(息子)の顔を追加して、「兄妹」とした作品。レンダリング方法は拡散モデルのスムーズレンダリングであり、特に目新しい手法は用いていないが、とにかく大きく、また高解像度にする事で、印象深いホログラムになることを狙っている。

3. Brothers の制作

3.1 顔形状の計測とポリゴンメッシュ

顔形状の計測については、以前にも本誌に書かせていただいた[1]。用いたのはコニカミノルタの Vivid 910 レーザースキャナである。このスキャナは、産業用途の非常に高精度なものであり、関西大学の卒業生で現在阪大で気鋭の研究者として活躍しておられる金谷先生にお借りした。このスキャナは、弱い可視レーザービームを空間的にスキャンし、三角測量の原理によって表面の形状を測定するものである。レーザー出力は微弱であるため、人の眼に害は無いようであるが、レーザー光が髪の毛で吸収されるため、Fig.3 の写真に

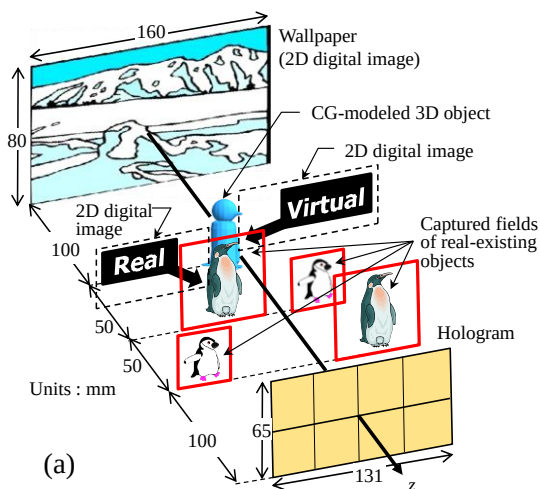


Fig. 2 コンピュータホログラム “Penguin”. (a) 3D シーン, (b) 光学再生像.

示すように、シッカロールを髪にふりかける必要があった。多少精度は下がっても Microsoft Kinect のようなタイプの方が、このような用途には便利であるかもしれない。

Fig.4 (a)にこのスキャナが出力した未加工のポリゴンメッシュを示す。ポリゴン数は 18,366 polygon であり、CGH のモデルとして用いるにはいささかポリゴン数が多すぎた。



Fig.3 3Dレーザースキャナによるスキャンの様子。

また、この図からわかるとおり、顎の下など、レーザービームが届かないところではポリゴンがごっそり抜けており、それ以外の場所でも多数の欠落が見られる。そこでまず、ポリゴンモデラーソフトである Metasequoia にポリゴンメッシュを読み込み、

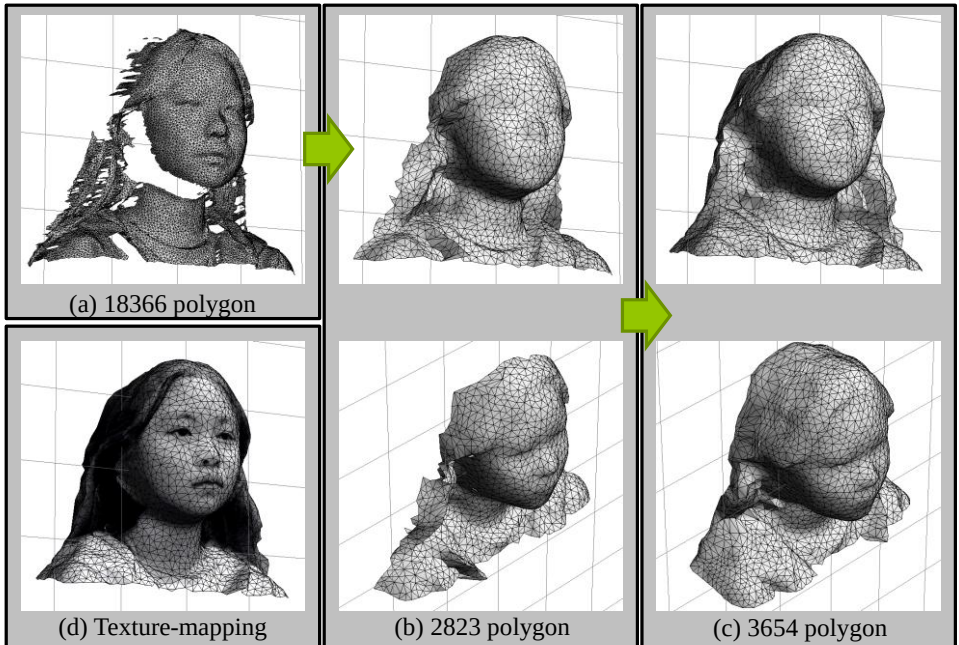


Fig.4 物体モデルの修正過程

このソフトの機能を用いてポリゴン数を 5 分の 1 程度に削減した。次に、ポリゴンが欠けた部分を埋めていく作業を行った。これは非常に重労働であった。こうして加工したポリゴンメッシュを Fig.4 (b)に示す。用いたレーザースキャナは形状計測と同軸で写真を撮影しているため、次にその写真画像をテクスチャマッピングした。しかし、ポリゴン数や形状が変わっている上、我々のライブラリの問題もあり、ポリゴンメッシュと写真の位置合わせ情報がスキャナから得られなかった。そのため、少しずつ写真をずらしながら、正しいと思われるテクスチャの投影位置と拡大率を探すという作業を強いられた。2 次元の位置と拡大率という 3 つのパラメータを手動で探索したため、非常に時間を要する作業になった。

この様にして、Fig.4 (b)のモデルを用いて作成したのが以前本誌でも報告したホログラム Shion である[1,7]。ところが、Fig.5の再生像写真からわかる通り、このモデルでシルエット法を行うと、かなり激しいオクルージョンエラーが発生する。これは、明らかに(b)のモデルでは頭の半ば



Fig.5 Shion の光学再生像を左視点から撮った写真[7].

までしかポリゴンメッシュがなく、またその端もギザギザになっているためである。そこで、Brothers の制作にあたってこのモデルをさらに改良した。すなわち、頭の後ろの方までポリゴンメッシュを拡張した。これも手動の

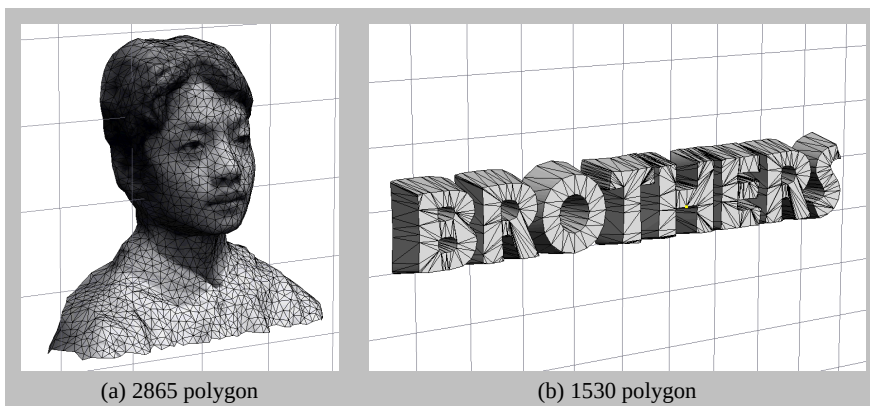


Fig. 6 その他の物体モデル.

作業である。出来上がった改良版のモデルを Fig.4 (c)に示す。拡張したためポリゴン数が約 800 polygon ほど増加している。また、Shion ではテクスチャの位置合わせが不十分であり、顎の下あたりが黒くなっていたため、再度位置合わせの微調整を行った。最終的に得られたのが Fig.4 (d)に示したモデルである。

同様の作業を行って作成したもう一つのモデルを Fig.6 (a)に、また背景のタイトル部分で使用した立体文字のモデルを(b)に示す。なお、ここで示したポリゴン数はあくまでモデルのポリゴン数であり、計算時には背面カリング処理により観測者から見えないポリゴンの計算が省かれるため、実際のポリゴン数は減少する。これらのパーツを配置した 3D シーンを Fig.7 に示している。

3.2 ホログラムのパラメータ

我々の手法、ポリゴン法とシルエット法では一般に物体光波数値合成に FFT を多用する。そのため、ホログラムのピクセル数は2のべき乗になるのが普通である。これは、特に大きなホログラムを計算する際にはパラメータ設定の制約になる。たとえば、 2^{34} ピクセル(約 160 億ピクセル)のホログラムより大きなホログラムを計算しようとする、次は 2^{35} ピクセル(約 320 億ピクセル)となるため、いきなり約 160 億ピクセルの増加となる。さすがにその規模の計算は難しいので、 2^{34} ピクセルよりももう少し大きなサイズといった決め方がそのままでは難しい。

そこで、Brothers では、ホログラムのセグメント分割手法を用いることを前提としてピクセル数を決定した。こ

れは、Brothers のような巨大なホログラムでは、元々全フィールドがメモリに入りきることはいずれ、複数の矩形セグメントに分割するためである。個々のセグメントのサンプリング数は 2 のべき乗でなければならないが、セグメント数やその配置には特に制限はない。そこで、当初、縦横の解像度を我々が用いているレーザーリソ

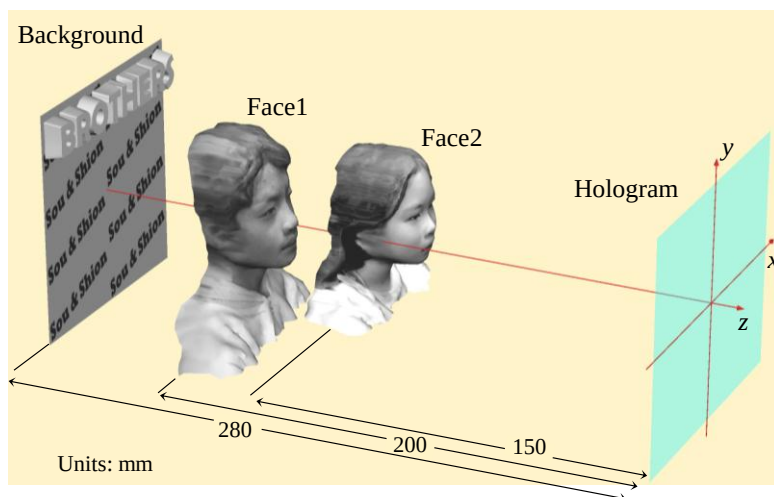


Fig. 7 Brothers の 3D シーン

Table 1 コンピュータホログラム“Brothers”の主要なパラメータ.

ホログラム		Brothers V1 (応募)	Brothers V2 (展示)
総ピクセル数	[pixel]	21,474,836,480	25,769,803,776
水平垂直ピクセル数	$W \times H$ [pixel]	163,840 × 131,072	196,608 × 131,072
ピクセルピッチ	[$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	0.8 × 0.8	0.64 × 0.8
ホログラムサイズ	[mm^2]	131.1 × 104.9	125.8 × 104.9
セグメント数		5 × 1	6 × 1
セグメントのピクセル数	[pixel]	32768 × 131072	
設計再生波長	[nm]	633	
コーディング		閾値によるバイナリ振幅	
参照光源位置(球面波中心)	(x, y, z) [mm]	(0, -75, -330)	
モデルとレンダリング			
		顔1(奥側)	顔2(前側)
総ポリゴン数		2,865	3,654
可視ポリゴン数		2,462	2,877
中心位置	(x, y, z) [mm]	(-15, 0, -200)	(20, 0, -150)
サイズ	$W \times H \times D$ [mm^3]	90.0 × 86.2 × 38.7	80.0 × 70.3 × 44.9
背景画像中心位置	(x, y, z) [mm]	(0, 0, -280)	
背景画像サイズ	$W \times H$ [mm^2]	104.9 × 104.9	
背景画像ピクセル数		378 × 378	
タイトル文字サイズ	$W \times H \times D$ [mm^3]	100 × 17.7 × 7.6	
レンダリング		拡散反射(グーローシェーディング)	
仮想照明光ベクトル	(x, y, z)	(-1, -1, -2)	

注)座標系の原点はホログラムの中心であり、水平方向にx軸、垂直方向にy軸とした右手系で表示している。

グラフィシステム(レーザー直接描画装置)[8]の仕様上の限度である $0.8\mu\text{m}$ とし、水平方向のサンプリング数を 32,768、垂直方向を 131,072 とした縦長のセグメントを水平高方向に 5 個並べ、全体として $163,840 \times 131,072$ ピクセルのホログラムになるようにした。

これが最初のバージョンの Brothers であり、その再生像を撮影して MIT ミュージアムの展示に応募した。しかし、実際に描画結果の干渉縞を見てみると、レーザー直接描画装置のスキャン方向に明瞭な筋が入っていることが分かった。また、それが原因かどうか分からないが、Brothers の回折効率とは明らかに他の今まで作成したホログラムより低く、暗い作品になってしまっていた。中原先生と相談した結果、一つは、非常に大きなマスクランクス(フォトマスク描画用の基板材料)を使ったことからその平坦性が不完全ではなかったかという問題があり、レーザー直接描画装置の実際のスキャンラインの間隔は $0.64\mu\text{m}$ になっているらしいことから、 $0.8\mu\text{m}$ という半端なピッチと合わさった結果、描画にむらが生じた可能性があることがわかった。

そこで、Brothers の展示が決定し、実際にホログラムをアメリカに送り出す直前に、わずかに仕様を変更した別バージョンの Brothers V2 を作成した。この V2 では、水平方向ピッチを $0.64\mu\text{m}$ に減少し、それで縮んだホログラムサイズを補うため、セグメント数を 6 個に増やした。さらに、レーザー直接描画装置のスキャンをホログラムの垂直方向に行うことにより、スキャンラインの間隔がホログラムの水平方向ピッチと一致するようにした。このように改良した結果、問題の筋はやはり多少残ったものの、回折効率は明らかに改善したため、これを MIT ミュージアムに送ることになった。

これらのホログラムや物体モデル, 3D シーンのパラメータを Table 1 にまとめている.

3.3 ホログラムの計算

ホログラムの計算には, Table 2 に示す通り, 実コア数が 24 コアでメモリ 256GB を有するマシンを用いた. このマシンではかなり大きなメモリが使えるが, この大量のコアをフルに用いて並列計算を行

った場合, しばしば特定のポリゴンでメモリ不足に陥った. どの位置で問題が生じるかを調べたところ, 鼻や頬で問題が生じることが多かった. これは, 顔の光波を計算する際に頭を中心を横切る平面(物体平面と呼んでいる)で計算を行っていたため, その平面から遠い位置のポリゴンでは回折波が広がり, 計算に必要なメモリ量が増加するためであることが分かった. そこで, 各々の顔モデルを光軸に垂直な断面で二つに分割し, 物体平面をそれぞれ 2 枚設けることでこの問題を回避することにした. ただし, 伝搬計算回数が増えるため, 計算時間の増加につながる結果となった.

ホログラムの計算時間については, 第 1 のバージョンでは, しばしばメモリ不足で計算がストールし, プログラムを改良して途中結果から続きの計算を行ったため, きちんとした計測は行えなかった. そこで, 第 2 バージョンの計算時に計算時間を測定したところ, 全モデルを読み込んでホログラム面での物体光波の計算を終えるまでが約 60 時間であることがわかった.

3.4 ホログラムの光学再生像と展示用の発送

Brothers の再生像を Fig.8 に示す. これは第 1 バージョンのものである. 第 2 バージョンは MIT が指定した期日ぎりぎりまで完成したため, 再生像写真をとることなく発送をおこなった. 発送は, FedEx に集配してもらい, MIT ミュージアムの FedEx カスタマ番号を指定してするだけであったので, 非常に簡単であった(もちろん送料, 保険料などはすべて MIT ミュージアムが支払ってくれた). しかし, 筆者が国際貨物に慣れないため税関申告書に妙なことを書いたらしく, アメリカの税関をすぐに通ることができず MIT ミュージアムの担当者が慌てて連絡してくるという一幕もあった.

なお, 再生システムについては, 我々が普段使用している電池と LED, アルミパイプアームを用いたシステムをサンプルとして 1 セット同梱し, さらに照明角度の指示書や長期の展示に必要な電源回路図, 交換用の

Table 2 Brothers の計算に用いた計算機環境

CPU	Intel Xeon E7540, 2.00 GHz 実コア数: 24, 仮想コア数: 48
メモリ	256 GByte
コンパイラ	Intel C++, MS Visual Studio
ライブラリ	Intel MKL, WaveFieldLib, PolygonSourceLib



Fig. 8 Brothers の光学再生像(赤色 LED による反射再生).

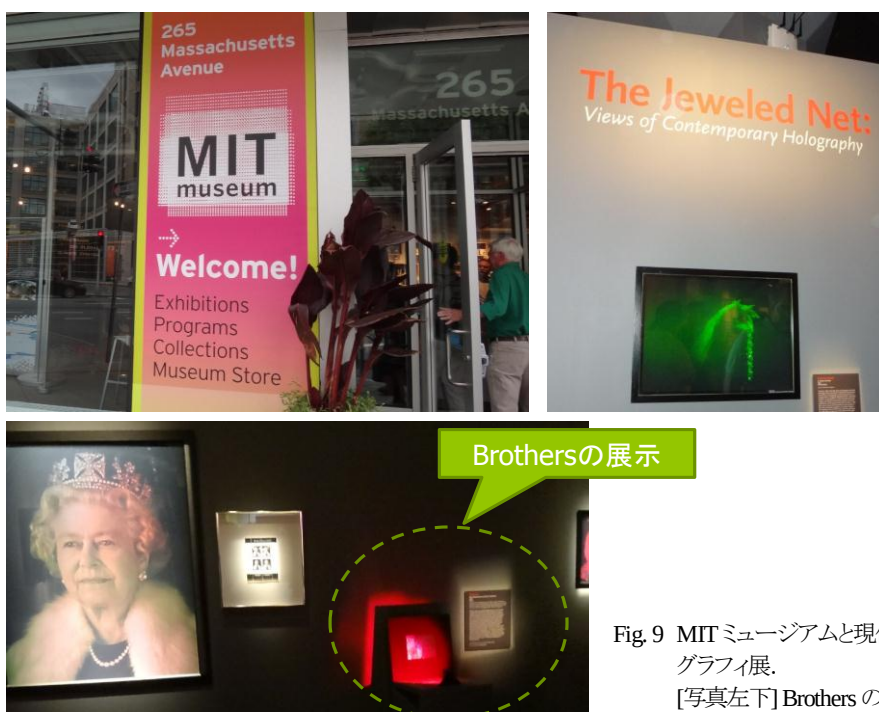


Fig.9 MITミュージアムと現代ホログラフィ展.
[写真左下] Brothers の展示.

LEDを同封している. MITミュージアムが準備してくれた実際の展示の様子は次節で示す.

4. MIT ミュージアムでの展示

MIT ミュージアムとそこでの展示の様子を Fig.9 と Fig.10 に示す. Fig.9 の左上がミュージアムの入り口である. 2 階の奥に現代ホログラフィ展のコーナーがあった(写真右上). このホログラフィ展を代表するシンボルになっているのが巨大なエリザベス女王のホログラム(ホログラフィックステレオグラム)である. 我々の Brothers はその隣に, ちょこんと展示されている. Fig.10 右下の写真を見てもらえばわかるとおり, 筆者の腰の高さぐらいに置かれている. これは, 子供でも見えるように配慮した結果であるらしい. 筆者が同封した照明用 LED は



Fig. 10 Brothers の展示とスナップショット.

ボックスに納められ、筆者が指定した角度でホログラムを照明するように傾斜させて設置されている。
横に置かれた説明プレートには次の文章が記されていた。

Brothers

Kyoji Matsushima and Sumio Nakahara

2012

Japan

High-resolution digital hologram (25 billion hogels [holographic pixels]) from 3D computer model constructed from laser scan data of human subjects; mathematically-generated interference pattern printed on chrome-coated glass plate with laser lithography

While traditional analog holography can only create images from perfectly still physical objects, digital holography gives artists the versatility to create and communicate their own 3D reality. The technology is still in its infancy, but *Brothers* reveals the potential of combining computer graphics techniques with holography to bring satisfying detail and depth of feeling to human subjects. Kyoji Matsushima and Sumio Nakahara produced this extremely high-definition hologram of Matsushima's children using entirely electronic methods — from laser scan data capture to laser lithography. It represents a significant step toward the ultimate image — a 3D display that uses the data-rich holographic method to accurately present a computer-modeled scene exhibiting all the light information (color, intensity, and phase) to satisfy the eye.

Developed at Kansai University, Osaka, Japan

On loan from the holographer

ネイティブの専門ライターが書いたもので、なかなか日本語には訳しづらいが、文章部分の大意は次のとおりであろうか。誤訳があってもご容赦願いたい。

人間をレーザースキャンして構築した3次元コンピュータモデルから創造された高解像度デジタルホログラム(250億画素)であり、数学的に発生した干渉縞パターンをクロムコーティングしたガラス板にレーザリソグラフィ技術でプリントすることにより製作されている。

従来の伝統的なアナログのホログラフィが、完全に静止した物理的実体のある物体からしか3次元画像を創り出せないのに対して、デジタルホログラフィはアーティストに対して彼らが心の中に思い描く実体を創り出す自由を与えます。このテクノロジーは未だ揺籃期にあります。この作品「*Brothers*」は、コンピュータグラフィックスとホログラフィの組み合わせが、再生された被写体に奥行き感と緻密さをもたらす高い潜在能力を秘めていることを示しています。松島恭治と中原住雄は、松島の子供たちを再生するこの究極の高解像度ホログラムの制作を、その姿のスキャンからレーザリソグラフィによるプリントまで、完全に電子的な手法で達成しました。それは究極の画像に至る重要な一つのステップを示しています。この究極の画像とは、濃密な情報を含むホログラフィの手法を用い、コンピュータでモデル化したシーンについて、人間の眼を満足するすべての光の情報(色、明るさ、位相)を再生する3次元立体画像です。

5. まとめと謝辞

計算機合成ホログラム(我々の呼び方だとコンピュータホログラム)が、本格的なミュージアムにおいて一般の入場者相手に展示されたのは、その長い歴史の中でもこれが初めてなのではないかと思う¹。今回の現代ホログラフィ展に展示された他の作品に比べるとまだまだ小さな、まさに小品ともいべき作品である。しかし、他

¹ もしもそういう事例が他にあったのなら、筆者の不明のいたすところである。ぜひ、ご教示いただきたく思う。

のアナログ系のホログラムとはまた雰囲気が違う再生像が見えるためか、入場者を見ているとけっこう足を止めてのぞき込む人も多く、作者としては非常にうれしく感じた。また、シンポジウムに参加した多くのホログラファークから、こんな映像は初めて見た、ぜひこの技術で作品を作ってみたいとのお褒めの言葉を多数いただいた。

筆者自身がCGHの研究に携わり始めてから、早10余年、自分の研究の成果と自画自賛したいところであるが、実際には、超微細加工技術やコンピュータ技術の発展に大きく支えられて来たことは間違いない。特に、数100ギガバイトのメモリや数テラバイトのディスクを持つコンピュータが、ここ数年で手軽に使えるようになったことは大きい。良い時代に良い研究テーマに出会えたものであるとしみじみ思う。

最後になりましたが、3D スキャナで形状スキャンをしていただいた大阪大学の金谷一朗先生、またMITでの展示に使われているLEDをご教示いただいた日本大学の山口健先生に感謝いたします。そして、共同研究者であり、すべてのホログラムを製作していただいている関西大学機械工学科の中原住雄先生に深謝いたします。どうもありがとうございました。

本研究は、日本学術振興会の科研費(21500114, 24500133)、および平成24年度関西大学学術研究助成金(共同研究)の助成を受けたものである。

文献

- [1] 松島: “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, pp.2-11(2011).
- [2] K. Matsushima, S. Nakahara, Y. Arima, H. Nishi, H. Yamashita, Y. Yoshizaki, K. Ogawa: “Computer holography: 3D digital art based on high-definition CGH”, International Symposium on Display Holography 2012 (ISDH2012), MIT Media Lab, (2012) in press.
- [3] 中村, 松島, 中原: “全方向視差CGHにおけるポリゴン単位の高速隠面消去法”, 3次元画像コンファレンス2011講演論文集, 66-69(2011).
- [4] H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara: “Advanced rendering techniques for producing specular smooth surfaces in polygon-based high-definition computer holography”, SPIE Proc. #8281, 828110(2012).
- [5] K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara: “Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects”, Appl. Opt. **50**, H278-H284 (2011).
- [6] 有馬, 松島, 中原: “デジタイズドホログラフィにより実在物と仮想物を混合した大規模コンピュータホログラム”, 映像学誌(投稿中).
- [7] 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).
- [8] 中原, 仲市, 川原, 土谷, 鳥取, 久田, 藤田: “レーザ直接描画装置を用いた大型CGHの作製”, HODIC Circular **25**, No.4, pp.8-11 (2005).