

I-023

## 10万点で構成された物体像の電子ホログラフィ再生

Electronic holography for object image composed of 100,000 points

市橋 保之† 中山弘敬† 白木厚司† 増田信之† 伊藤智義† 下馬場朋禄‡  
 Ichihashi Yasuyuki Nakayama Hiroataka Shiraki Atsushi Masuda Nobuyuki Ito Tomoyoshi  
 Shimobaba Tomoyoshi

## 1. はじめに

3次元の画像を再生する技術の一つにホログラフィ(holography)がある。ホログラフィは物体の位置情報を干渉縞として、写真乾板等の記録媒体に記録し、それに再生用の光(参照光)を当てることで再生する技術である。干渉縞を記録した面をホログラム(hologram)といい、特に計算機の演算処理により作られたホログラムを計算機合成ホログラム(CGH: Computer Generated Hologram)という。本研究室ではCGHを高速に作成するための専用計算機システムHORN(HOLOGRAPHIC RECONSTRUCTION)を開発してきている。最新のHORN-5では物体点1万点の動画再生が可能になった[1]。またHORN-5をクラスタ(cluster)化することで、10万点程度の物体でもリアルタイムで再生可能な計算速度が得られるようになった。

しかしHORN-5ボードは、当初1万点の物体像をリアルタイム再生することを目的に設計、開発されたため、計算できる物体点の上限が16,384(=2<sup>14</sup>)点となっており、そのままでは10万点の物体を計算することができない。

本研究では、HORN-5を10万点計算できるように改良し、HORN-5ボードを多数並列化して、物体点数10万点の三次元動画のリアルタイム再生を実現する。

## 2. 電子ホログラフィと動画再生

ホログラフィ技術において、ホログラムの表示にLCD(Liquid Crystal Display)などの電子デバイスを用いる場合を、特に電子ホログラフィ(electronic holography)という。電子ホログラフィは電子デバイスを用いているため、例えばLCDに表示させるCGHを高速に切り替えれば、3次元テレビも可能になる[2]。

はじめに本研究で用いているホログラフィ再生用の光学系、動画再生の手法について説明する。

## 2.1 ホログラフィ技術と光学系

ホログラフィ技術を用いて3次元像を再生する手順を、図1を元に説明する。

まず物体像の座標データをホストコンピュータ(Host Personal Computer)に格納する。次にHORN-5を用いてCGHを作成し、それを反射型LCDに表示させる。LCDの制御回路はビデオ信号をLCDに送る役割をしている。

光源にはレーザー(laser)、あるいは発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)を用いる。光源からの光はコリメータレンズ(collimator lens)により平行光に変えられる。そしてCGHが表示されたLCDにその平行光を当てると、結像レンズに(imaging lens)に3次元の再生像が

得られる。ビームスプリッタ (beam splitter) は光源からの光をLCDに照射し、LCDからの光を透過する。またLCDから約1m離れたところに像を再生している。これはHORN-5では再生像とホログラム面との距離を十分大きくとることで、後述する高速計算を可能にするアルゴリズムを採用しているからである。

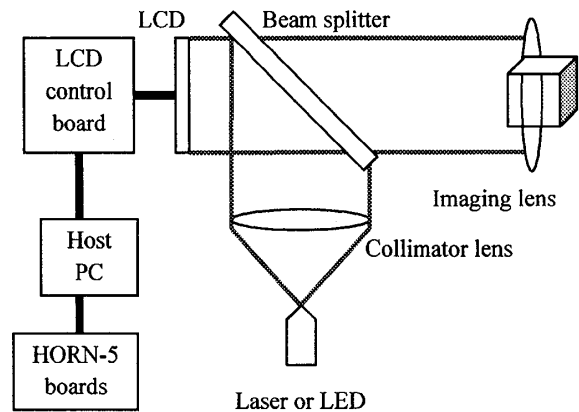


図1 再生用の光学系

## 2.2 アルゴリズム

CGHの干渉縞は、次の式で求められる。

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_j^N A_j \cos(kr_{\alpha j}) \quad (2.1)$$

$$r_{\alpha j} = \sqrt{(x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2 + z_j^2} \quad (2.2)$$

$I$ はホログラム上の点 $(x_\alpha, y_\alpha)$ における光の強度を、 $A_j$ は物体点の輝度を、 $r_{\alpha j}$ は物体点 $j$ とホログラム上の点 $\alpha$ の距離を、 $x_j, y_j, z_j$ は物体点の座標を、 $k$ は参照光の波数を、 $N$ は物体点の総数を表している。

式(2.2)において $x_j, y_j$ に比べて $z_j$ を十分大きくとると次のような近似式になる[3][4]。

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_j^N A_j \cos \left[ \frac{p\pi}{\lambda|z_j|} \left\{ (x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2 + z_j^2 \right\} \right] \quad (2.3)$$

式(2.3)はフレネルの近似式で、これにより演算コストを低減できる。なお $p$ はホログラムの画素間隔を、 $\lambda$ は参照光の波長を表している。

さらに本研究で使用するHORN-5ボードでは、ハードウェアの効率化のために、フレネル近似式を漸化式に展開した高速計算アルゴリズムを用いている。以下、式

†千葉大学 大学院工学研究科

‡山形大学 大学院理工学研究科

(2.4) ~ (2.6) に示す. なおここで  $A_j = 1$  ( $j=0,1,2,\dots$ ) とした.

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_j^N \cos(2\pi\Theta_j) \quad (2.4)$$

$$\Theta_n = \Theta_{n-1} + \Delta_{n-1} \quad (2.5)$$

$$\Delta_n = \Delta_{n-1} + \Gamma \quad (2.6)$$

また式 (2.5), (2.6) の初期値  $\Theta_0, \Delta_0, \Gamma$  は式 (2.7) ~ (2.9) より求める.

$$\Theta_0 = \frac{p|z_j|}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda|z_j|} \{(x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2\} \quad (2.7)$$

$$\Delta_0 = \frac{p}{2\lambda|z_j|} \{2(x_\alpha - x_j) + 1\} \quad (2.8)$$

$$\Gamma = \frac{p}{\lambda|z_j|} \quad (2.9)$$

式 (2.7) ~ (2.9) によりホログラム上の最初の点の位相を求めれば, 式 (2.5), (2.6) に示す加算のみで隣接する画素の位相を計算できる[5]. HORN-5 ボードではこの部分をパイプライン処理することで, 2.3 節で述べるような高速化に成功している.

### 2.3 HORN-5 ボード

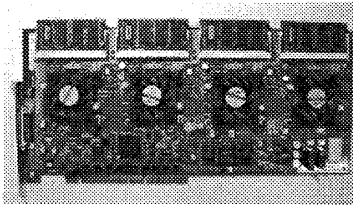


図2 HORN-5 ボード

HORN-5 ボード (図 2) 上にはザイリンクス社製大規模 FPGA (Field Programmable Gate Array) Vertex II Pro XC2VP70 が 4 個実装されており, 式 (2.4) ~ (2.6) を 1,408 並列, つまり, 1,408 点のホログラム点の干渉縞を同時に計算できるように設計されている. このボードは PCI (Peripheral Component Interconnect) で通信でき, PC (Personal Computer) にこのボードを 1 枚搭載した場合, 1 枚の CGH (サイズは 1,408×1,050) をおよそ 0.1 秒で生成する. これは物体点が 1 万点のときであり, PC 単体と比較して約 360 倍速い演算速度である.

PCI 基板のため, HORN-5 ボードは複数枚を PC に装着して使うことができる. 4 枚装着した場合は, 1 万点の物体像をビデオレート (秒間 30 フレーム以上) で動画再生することに成功した.

### 2.4 HORN-5 クラスタシステム

図 3 に HORN-5 クラスタシステムの概観図を示す. このシステムは 1 台のサーバ PC と, 複数台の計算用 PC (図 3 では 3 台) から構成される. サーバ PC に CGH の計算に必要な

な物体点のデータ  $x_j, y_j, z_j$  を格納しておき, ネットワークを通して各計算用 PC に送る. そして PCI バスを通して物体点データを HORN-5 ボードに送り, 計算を行う.

現在のシステムでは, 4 台の計算用 PC を用意しており, 2.3 節で述べたようにそれぞれ最大 4 枚の HORN-5 ボードを搭載できる. つまり最大で HORN-5 ボードを 16 枚同時に用いることができる. CGH の計算は並列化が容易であり, 16 枚の HORN-5 ボードを同時に用いて計算すると, 2.3 節と同じ条件で PC 単体に比べて約 3,600 倍の高速化を達成した.

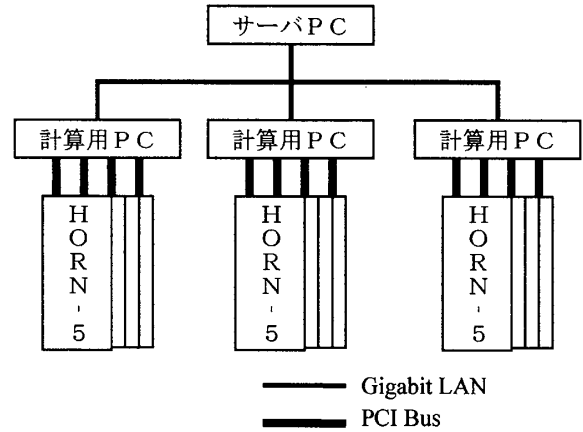


図3 HORN-5 クラスタシステムの概観図

### 3. 10 万点の計算を行うための改良点

最初に述べたように, これまでの HORN-5 は物体点の上限が 1 万点程度となっている. その理由は, FPGA 内部の RAM (Random Access Memory) 容量によるものである. FPGA は Block RAM と呼ばれる SRAM (Static RAM) を内蔵している. 現在の HORN-5 では, この内部 RAM を物体点データの格納と, コサインテーブルに用いている. コサインテーブルはあらかじめコサインの演算結果を RAM に記録したもので, 三角関数の演算を高速に処理できる. これまでの HORN-5 ではこのテーブルを式 (2.4) のコサイン演算に使用している.

10 万点の物体点を処理するには, 現在の仕様では内部 RAM の容量が不足する. そこで 10 万点の計算を可能にするために, 計算精度の検討を行って物体点のデータ幅を削減すること, 及びコサインテーブルを Block RAM を使わずに実現する検討を行った.

#### 3.1 計算精度の検討

Block RAM は 1 つの FPGA につきおよそ 6Mbit ある. ここで物体点の座標データは  $x_j, y_j, z_j$  の 3 つがあり, これまでの HORN-5 では,  $x_j, y_j$  は 14bit,  $z_j$  は 64bit の計算精度を用いている. なお  $z_j$  は 2.1 節で説明したように, 再生像が LCD から 1m 離れているため, z 方向だけ倍精度浮動小数点数と同じ bit 数を用いている. 以上より物体点数が 16,384 のときには

$$(14\text{bit} \times 2 + 64\text{bit}) \times 16,384 = 1,507,328\text{bit} \approx 1.5\text{Mbit} \quad (3.1)$$

となる.

しかし 10 万点程度の物体点を記憶するには、131,072 (=2<sup>17</sup>) を上限とすると、

$$(14\text{bit} \times 2 + 64\text{bit}) \times 131,072 = 12,058,624\text{bit} \approx 12\text{Mbit} \quad (3.2)$$

となり、6Mbit では足りなくなる。

そこで、精度の検討を行った。再生実験を行った結果、 $x_j, y_j$  は 11bit,  $z_j$  は 22bit であれば、目視で確認できるほどの再生像の乱れがないことを確認した。このときのメモリ使用量は

$$(11\text{bit} \times 2 + 22\text{bit}) \times 131,072 = 5,767,168\text{bit} \approx 5.8\text{Mbit} \quad (3.3)$$

となり、FPGA の内部 RAM (約 6Mbit) に収めることに成功した。

### 3.2 コサインテーブルの検討

3.1 節で述べたように、Block RAM はすべて物体点データの格納に使うので、コサインテーブルは別の所に格納する必要がある。FPGA では Block RAM 以外に Distributed RAM という内部 RAM を使うことができる。この RAM は論理回路を作る部分を RAM として利用するもので、本研究では HORN-5 回路の空き領域を利用して、コサインテーブルを Distributed RAM として格納することを考え、設計の変更を行い、実装に成功した。

以上の改良により、HORN-5 ボードは 10 万点の計算を行うことが可能になった。

## 4. 結果

### 4.1 CGH 計算時間

10 万点の物体像を計算できる改良型 HORN-5 ボードでクラスタを構成し、CGH の作成にかかる時間を測定し、それを元にフレームレートを求めた。表 1 にその結果を示す。なお作成した CGH のサイズは 1,920×1,080 ピクセルである。第 2 節で用いている CGH のサイズと異なるのは、本研究で用いた LCD がより高精細になったためである。LCD パネルの変更に合わせて、HORN-5 ボード 1 枚につき 320×4 (=1,280) 段のパイプラインを搭載し、166MHz で動作させた。

表 1 10 万点計算したときの CGH 計算時間

	計算用 PC の台数			
	1 台	2 台	3 台	4 台
1 ボード	0.986	1.975	2.962	3.948
2 ボード	1.862	3.733	5.581	7.452
3 ボード	2.609	5.213	7.802	10.404
4 ボード	3.220	6.432	9.624	12.882

表 1 の単位は fps (frame/sec) である。また縦は HORN-5 ボードの枚数を、横はクラスタの計算ホストの台数を表す。この表より 12 枚の HORN-5 ボードを並列にした場合、計算用 PC4 台で 3 枚のボードを用いたとき、10fps を達成している。また計算用 PC4 台で 4 枚のボードを用いれば 12fps 以上のフレームレートが期待できる。

次に物体点数が変化したときに、1 枚の CGH を作るのにかかる計算時間を図 4 に示す。計算の条件は表 1 と同じである。このグラフでは縦軸が時間なので、0.1 秒以下であれば 10fps を超えるフレームレートとなる。また凡例のなかで host とは計算用 PC の台数、board とは HORN-5 ボードの枚数をさす。

これを見ると物体点数が 1 万点程度であれば、単一ホストでも、HORN-5 ボードを複数用いることで容易に 10fps を達成することができる。また物体点数が 1 万点以上では、HORN-5 クラスシステムを用いることで、10fps が達成できている

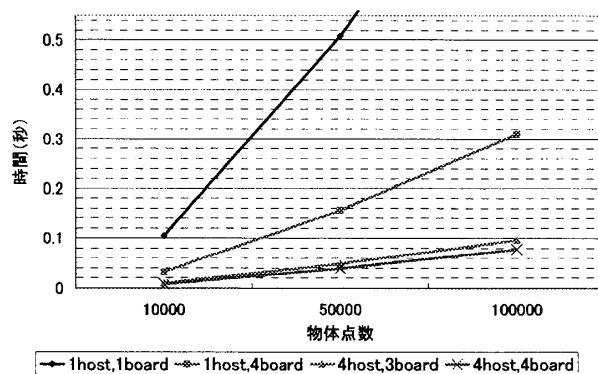
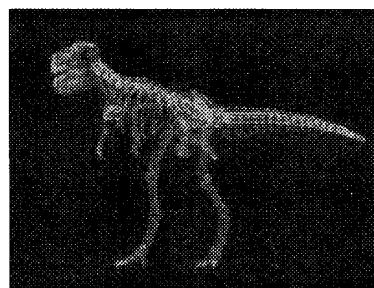


図 4 物体点数と CGH1 枚の計算時間

### 4.2 動画ホログラフィの再生例

改良した HORN-5 を用いて恐竜の動画とチェスの動画、メリーゴーランドの動画の再生実験を行った。

参照光源にレーザ (波長 : 640nm) を使用し、CGH を表示する SLM (Spatial Light Modulator) に画素間隔 6.5 μm の LCD パネルを用いた。画素数は 1,920×1,080 である。

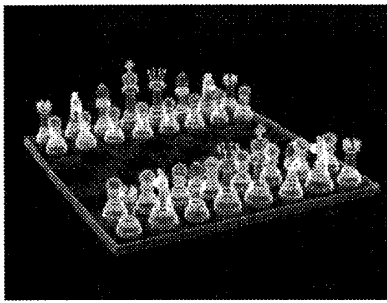


(a)元のデータ

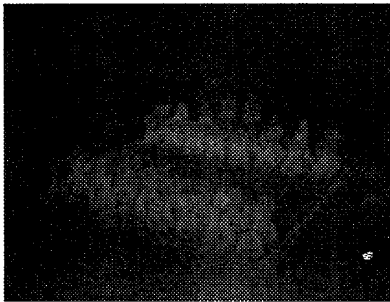


(b)再生像

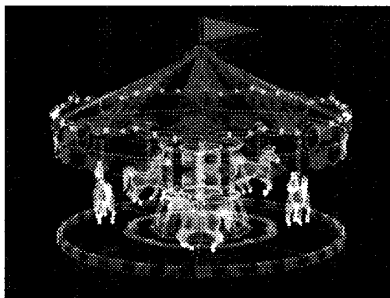
図 5 1 万点の電子ホログラフィ (歩く恐竜)



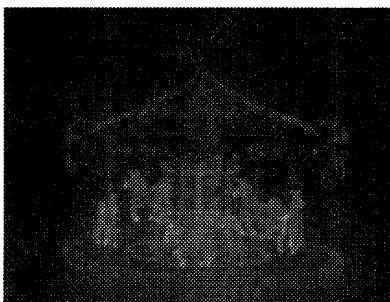
(a)元の物体点データ



(b)再生像

図6 5万点の電子ホログラフィ  
(回転するチェス板)

(a)元の物体点データ



(b)再生像

図7 10万点の電子ホログラフィ  
(メリーゴーランド)

図5は約1万(11,646)点で構成された恐竜が歩く動画のワンショットである。図6は約5万(44,647)点で構成

されたチェスが回転している動画のワンショットである。図7は約10万(95,949)点の物体点で構成されたメリーゴーランドの動画のワンショットである。いずれもの図も、上が3次元CGソフトウェアで作成した原画像で、下が電子ホログラフィによる再生像である。なお再生像の左右が反転しているのは、ついでに写した像を撮影したためである。どの再生像もデジタルカメラで撮影したものである。1万点から10万点まで綺麗な再生像が得られ、10fpsで滑らかに再生できた。

## 5. 結び

物体点のデータ幅を削減することで、RAMに10万点分のデータを記憶することを可能にした。これにより図5～図7で示すような複雑な物体もHORN-5で計算できるようになった。またこれらの動画を10fpsで再生できるだけの計算速度の実現にも成功した。

今後の課題としては、PCIバスでの通信のブロードキャスト化、外部RAMの使用などがあげられる。

まず表1を見ると計算ホストの台数に比例してフレームレートは増えているが、ボードの枚数に対しては4枚でもせいぜい3倍程度しか高速化できていない。この原因として考えられるのはPCIバスでの通信である。現在ホストPCとHORN-5ボードは1対1でしか通信ができず、PC側から一斉に物体点データを送信するというようなことができないからである。PCIバスの通信をブロードキャストのようにすることは可能である。

次に図2にもあるようにHORN-5ボードは1つのFPGAに対して1つの外部RAM(DDR-SDRAM: Double-Data-Rate Synchronous Dynamic RAM)が付属している。この外部RAMの容量は1つにつき256Mbyteである。今後は外部RAMを使用した回路を設計し、さらにHORN-5システムを改良していく予定である。外部RAMを使用することで物体点数の上限は10万点よりも大きくなり、また内部RAMの使用量が減ることで、今回よりもさらに回路のパイプライン段数を増やすことが可能となる。

次の研究プロジェクトとして、さらに改良したHORN-5ボードを高並列化して、さらに高精細な三次元像の動画再生に挑戦していきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] T. Ito, et al., "A special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography", *Optics Express*, 13, pp.1923-1932 (2005)
- [2] 本田捷夫, 他, "高度立体動画通信プロジェクト最終成果報告書", 放送・通信機構(1997)
- [3] H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference," *Proc. SPIE 3956*, 48-55 (2000)
- [4] H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference," *Proc. SPIE 3956*, 48-55 (2000)
- [5] T. Shimobaba and T. Ito, "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition", *Comp. Phys. Comm.*, 138, pp.44-52 (2001)