

戦略的創造研究推進事業
発展研究（SORST）

研究終了報告書

研究課題
「専用計算機による
ホログラフィ動画像システム」

研究期間：平成16年12月 1日～
平成19年 3月31日

伊藤 智義
(千葉大学、教授)

1. 研究課題名

専用計算機によるホログラフィ動画像システム

2. 研究実施の概要

ホログラフィは三次元波面を忠実に記録・再生できる唯一知られた技術であり、ホログラフィによる三次元動画像システムは究極の立体テレビになり得るものと考えられている。ホログラムの干渉縞は計算によって作ることも可能であり、計算機合成ホログラム (CGH: Computer Generated Hologram) と呼ばれている。したがって、理論的には、CGH をビデオ・レートで逐次更新できれば三次元動画像システムを構築することができる。このような動画技術は電子ホログラフィと呼ばれ、1990 年頃から研究されてきている。しかし、CGH 生成には膨大な情報処理を必要とするため、ホログラフィによる動画像システムの実用化は困難な状況にある。その解決をめざして、本研究に先立って行われた「さきがけ研究 (PRESTO): (課題名) 超高速ホログラフィ専用計算機システム」で、高速なホログラフィ専用計算基板 HORN-5 ボードを開発した。本研究課題はその発展研究であり、HORN-5 ボードを用いた電子ホログラフィシステムの研究を行った。

はじめに、HORN-5 ボードの性能評価を行った。HORN-5 ボードは書き換え可能な集積回路である FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた基板で、そこに CGH 計算の回路を 1,408 並列実装した。ここでの計算アルゴリズムは、三次元像をホログラム面からある程度離れたところに再生するという近似を入れて高速化し、さらにハードウェアに適した改良を加えたものを用いた。基板は PC (Personal Computer) の標準インターフェースである PCI (Peripheral Component Interconnect) 規格に合わせてあり、PC の拡張ポートに差し込んで使用する。そのため、1 台の PC に複数枚装着することも可能である。1 枚装着時での演算速度は、PC 単体でもっとも高速なアルゴリズムを用いたときの 330 倍であり、4 枚装着時では 1,200 倍に達した。CGH の表示に 1,408×1,050 の反射型液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) を用いて実証を行い、10,000 点からなる三次元像に対して、ビデオ・レート (30 フレーム/秒) を超える速さの動画再生に成功した。

続いて、1 台に 4 枚の HORN-5 ボードを装着し、それを 3 台 (HORN-5 ボード 12 枚) クラスタ化したシステムを開発した。このシステムは、10 万点からなる三次元像を、9 フレーム/秒で動画再生することに成功した。

上記のシステムでは、計算結果は一度ホスト PC に返された後、表示デバイスに出力される仕様になっている。通信量が小さいため、現時点では、通信量はボトルネックになっていない。しかし、電子ホログラフィを実用化するためには表示デバイスの解像度を上げることが必要であるため、将来的には通信量が問題となってくることが予想される。計算システムとしては、通信のボトルネックを回避するために、データは入力から出力まで、単方向に流れることが望ましい。そこで、HORN-5 ボードから直接表示デバイスに CGH データを出力するシステムの研究開発を行った。HORN-5 ボードは、この目的のために、あらかじめ、LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 規格の出力端子を装備している。この出力端子に接続可能な表示基板を開発した。

本研究課題のめざしている目標は、高速な計算チップと表示デバイスをユニット化して、そのユニットを複数並列化したシステムである。そのための基礎研究として、計算の高速化と並行して、LCD パネルを複数並列化した表示システムの研究を行った。3 枚の LCD を用いた表示系で再生像が拡大することを確認した。

本研究の主題は専用計算機システムであるが、同時に、一般に入手可能な計算リソースを利用した CGH 計算の高速化の可能性を検証した。代表的なものは、近年、性能向上が著しい GPU (Graphics Processing Unit) である。内部に画素の計算を行うためのシェーダと呼ばれる演算ユニットを複数持っている。この演算ユニットはプログラム可能で、単精度浮動小数点での計算が可能なることから、近似を入れなくても CGH を計算できる。NVIDIA 社の GPU である GeForce8800GTX (シェーダ動作周波数 1.35GHz、シェーダ数 128) を用いて、近似を入れずに CGH 計算をしたところ、Pentium4 (動作周波数 3.4GHz)

の CPU (Central Processing Unit) 計算に比べて 1,800 倍の高速化を記録し、500 点程度の三次元物体であれば、ビデオ・レートでのホログラフィ再生が可能であることを確認した。そこで、LCD パネルを内蔵したプロジェクタと組み合わせて、簡易な電子ホログラフィシステムを構築した。

以上のように、本研究課題を通して、専用計算機システムによる電子ホログラフィシステムは並列化を高めることで、実用化への一つの可能性になり得ること、また、小規模ではあるが、GPU を計算に用いることで、安価な電子ホログラフィシステムが構築できることを示した。

3. 研究構想

ホログラフィの再生は回折光を利用するため、視野角 (= 回折角) はホログラム表示素子の画素間隔に依存し、理想的には可視光の波長程度 ($\sim 1 \mu\text{m}$) の高精細が必要となる。従来の光学的な静止画ホログラムでは光学フィルムの画素間隔が $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ に相当するので、静止画においては素晴らしいホログラム作品がいくつも作られている。しかし、動画の場合は、このホログラムを逐次更新しなければならない。そのため、表示データを電子的に制御できる高精細な表示系が必要となってくる。最近では反射型 LCD や DMD (Digital Micromirror Device) のような反射型表示デバイスの高精細化が進んでおり、画素間隔が $10 \mu\text{m}$ を切るパネルも市販され始め、徐々にではあるが、電子ホログラフィの条件に見合う性能に近づきつつある。

ただし、表示デバイスが十分な解像度を持つようになると、今度はこれを駆動する計算処理系の負荷が増大する。例えば、本研究課題で使用した反射型 LCD の一つは、画素間隔 $10.5 \mu\text{m}$ 、画素数 $1,408 \times 1,050$ であるが、有効利用面積は $1.4\text{cm} \times 1\text{cm}$ でしかない。表示系の画素間隔は光学的に縮小することも可能であるが、再生像も縮小されてしまうので、十分な視野角で十分な大きさの三次元像を再生するには、十分大きな表示面を用意しなければならない。これを駆動するには十分高速な計算機環境が必要である。ホログラフィによる三次元動画像システムの実用化が困難な大きな理由はこの点にある。

そこで、本研究では、前研究課題(さきがけ)で開発したホログラフィ専用計算機 HORN-5 ボードを用いた、「実用化を指向した電子ホログラフィによる三次元動画像システム」の研究・開発をねらいとした。具体的には、その基礎となる次の三つの研究課題を設定した。

- (1) ホログラフィ専用計算ボードを複数並列化した高速計算システムの開発
- (2) LCD パネルを複数枚使用した並列型表示系の開発
- (3) 計算システムと表示システムをつなぐインターフェースシステムの開発

将来的には、これらのシステムを統合して、並列型の電子ホログラフィシステムを構築することを視野に入れている。

(1) については、HORN-5 ボードを 12 枚並列化して、10 万点からなる三次元物体の動画再生を実現した。(2) については、3 枚の LCD パネルを用いて 10cm 程度の再生像を得た。視野角については、さらにパネルの並列数を増やししながら、光学系を工夫して、拡大していく予定である。(3) については、LCD パネルを 1 枚搭載した基板を別途作製して、HORN-5 ボードと LVDS の信号規格で接続し、HORN-5 ボードの計算結果をホスト PC に戻すことなく、直接表示系に送ることに成功した。

以上の知見をもとに、今後は、高速な専用計算機システムと並列型の大画素表示システムを直接つないだ電子ホログラフィシステムを構築し、実用化への道筋にしたいと考えている。

また、専用計算機システムは電子回路等の専門のノウハウを必要とするため、並行して、もう少し手軽なシステムの模索も行い、GPU を用いてホログラム計算を行ったところ、良好な結果を得た。GPU を用いた電子ホログラフィシステムは安価で手軽であるため、当該分野の基礎研究を進める上で、有益であると考えている。

4. 研究実施内容

(1) 実施の内容

図1は本研究で使用した電子ホログラフィシステムの概略である。計算機システムでCGHを計算し、それを反射型LCDに表示する。そこに参照光源をあてて、視野レンズの位置に三次元再生像を結像させる。図1では参照光源として発光ダイオード(LED)を記載しているが、レーザーも利用した。本研究課題では、図1のシステムの実用化を指向して、主として、専用計算機による計算システムの高速化、反射型LCDを用いた表示システムの拡大、及び計算システムと表示システムのインターフェースの研究を行った。

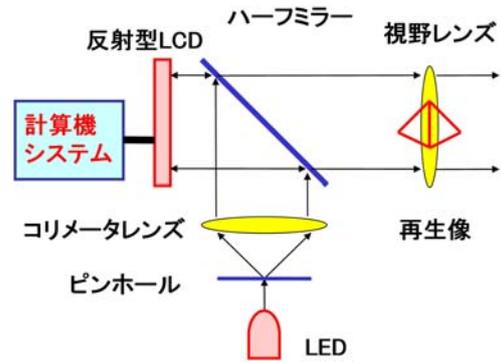


図1. 電子ホログラフィシステム

三次元像は点光源の集合で表現されたものを扱い、CGHの計算には次式を用いた。

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_{j=1}^M A_j \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2 + z_j^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 α はホログラム上の点を、 j は物体を構成する点を表わす。ホログラム面に平行な方向に x - y 平面を設定し、ホログラム面と垂直な方向を z と定めた。また、 A_j は物体点それぞれから放たれている光の強度、 λ は参照光の波長、 M は物体点の総数である。

・専用計算機によるCGH計算の高速化

図2は、本研究で用いたホログラフィ専用計算機基板(HORN-5ボード)である。大規模FPGAであるザイリンクス社VertexII ProシリーズXC2VP70(700万ゲート)を4個搭載して開発した。このチップにCGHの計算回路を多数並列実装して、高速計算を実現した。



図2. ホログラフィ計算専用HORN-5ボード

(1)式は、 z_j を十分大きくとるとフレネル近似が使えて、(2)式のように変形できる。

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_{j=1}^M A_j \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(z_j + \frac{x_{\alpha j}^2 + y_{\alpha j}^2}{2z_j} \right) \right] \quad (2)$$

ここでは、 $(x_\alpha - x_j)$ と $(y_\alpha - y_j)$ を $x_{\alpha j}$ と $y_{\alpha j}$ に置き換えている。さらに、距離を表わす変数をホログラムの画素ピッチ p で正規化すると、(3)式になる。

$$I(X_\alpha, Y_\alpha) = \sum_{j=1}^M A_j \cos \left[2\pi \left(\frac{pZ_j}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda Z_j} (X_{\alpha j}^2 + Y_{\alpha j}^2) \right) \right] \quad (3)$$

ここで、 X 、 Y 、 Z は整数である。この式は、ホログラム(LCDパネル)上の各点が規則正しく間隔 p (定数)で配置されていることを利用すると、最終的に次の漸化式で求めることができる[下馬場、伊藤：Computer Physics Communications(2001)]。

$$I(X_{\alpha+k}, Y_\alpha) = \sum_{j=1}^M A_j \cos(2\pi \Theta_k) \quad (4)$$

$$\Theta_0 = \frac{pZ_j}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda Z_j} (X_{\alpha j}^2 + Y_{\alpha j}^2), \quad \Gamma_0 = \frac{p}{2\lambda Z_j} (2X_{\alpha j} + 1), \quad \Delta = \frac{p}{\lambda Z_j} \quad (5)$$

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k + \Gamma_k, \quad \Gamma_{k+1} = \Gamma_k + \Delta \quad (6)$$

この式の特徴は、はじめに(5)式でホログラム上の1点についての計算を行うと、その隣の点以降については(6)式の加算だけで求まることである。回路規模としては、加算は小さく、乗算は大きいので、このアルゴリズムはハードウェアを構成する際、非常に有利である。HORN-5 ボードにもこのアルゴリズムを採用し、1,408 ユニット実装することに成功した。つまり、1,408 点のホログラム計算を同時に行う並列計算ボードである。

また、ボードは PC の標準インターフェースである PCI 規格に合わせてあり、PC の拡張ポートに差し込んで使用する。PC にはふつう、PCI スロットが複数用意されているので、HORN-5 ボードも一台の PC に複数枚装着することが可能である。図 3 は、1 台の PC に 4 枚の HORN-5 ボードを装着して、動作させている様子である。



図 3. 専用基板 4 枚装着時の PC

HORN-5 ボードを用いた専用ハードウェアシステムとソフトウェア (PC 単体による計算) による計算速度の比較を表 1 に示す。ホログラム画素数 $1,408 \times 1,050$ 、物体点数 10,000 に対して CGH1 枚あたりに要する計算時間で比較した。

ソフトウェアで「直接計算アルゴリズム」とあるのは、(1)式をそのまま計算した場合で、「高速アルゴリズム」は、(4)-(6)式の加算による漸化式のアルゴリズムを用いたときのものである。直接計算に比べて 50 倍以上の速さを実現したが、それでも 30fps (frame per second) 程度のビデオ・レートには、まだ数百倍の速度向上が必要である。一方、専用ハードウェアシステムでは、HORN-5 ボードを 2 枚使用することでほぼ 30fps に達し、4 ボード使用では 50fps を超え、PC 単体に比べて 1,000 倍以上の高速化を実現している。

表 1. ソフトウェア vs. 専用ハードウェア

システム (ホログラム $1,408 \times 1,050$; 物体点数 10,000)		秒 / CGH	速度比
【ソフトウェア】 CPU : Pentium4 3.2GHz OS : Linux コンパイラ : Intel C++	直接計算アルゴリズム	1300	0.0175
	高速アルゴリズム	22.8	1
【ハードウェア】 HORN-5 システム FPGA: ザイリンクス XC2VP70 動作周波: 166MHz	1 HORN-5 ボード 1,408 並列計算	0.0679	336
	2 HORN-5 ボード 2,816 並列計算	0.0349	653
	3 HORN-5 ボード 4,224 並列計算	0.0239	954
	4 HORN-5 ボード 5,632 並列計算	0.0185	1230

図 4 は、HORN-5 システムによる電子ホログラフィ再生の例で、画素数 10,000 点で作成した恐竜が歩き回りながらほえる動画のスナップショットである。表示デバイスに $1,408 \times 1,050$ 画素、 $10.5 \mu\text{m}$ ピッチの反射型 LCD パネルを用いた。



図 4. 1 万画素のリアルタイムの電子ホログラフィ再生

・HORN-5 クラスタによる 10 万画素の物体像の動画再生

続いて、HORN-5 ボードを 4 枚装着した PC をクラスタ化して、さらに高速な計算機システムを構築した。高速化すれば、さらに扱える三次元像の物体点数が増える。ここでは HORN-5 ボード 12 枚を用いて、10 万点の物体を動画再生するシステムを目標においた。

当初、HORN-5 ボードは 1 万画素の物体をリアルタイム再生することを目標として開発されていたため、16,384 (2^{14}) 画素までしか計算できない回路設計になっていた。そこで、131,072 (2^{17}) 画素まで扱えるように回路設計を変更した。FPGA の内部メモリの制約等で、並列数も 1 ボードあたり 1,280 に抑えた。また、表示デバイスとして、さらに性能が向上した 1,920×1,080 画素、6.5 μ m ピッチの反射型 LCD パネルが入手できたため、これに合わせたシステム開発を行った。

表 2. HORN-5 クラスタの性能
(ホログラム 1,920×1,080 ; 物体点数 100,000)

4 ボード搭載の PC の接続数	計算時間 (秒 / CGH)	フレームレート (fps)
1 台 (4 ボード)	0.333	3.0
2 台 (8 ボード)	0.166	6.0
3 台 (12 ボード)	0.111	9.0

表 2 にクラスタの性能を示す。CGH の計算量は (ホログラムの画素数×物体点数) に比例し、通信量は (ホログラムの画素数+物体点数÷ホログラムの画素数) にしか比例しないので、10 万点規模の物体で、クラスタの規模がそれほど大きくない範囲では、通信負荷は

ほとんど無視できる。そのため、クラスタの計算速度は PC の台数に比例して高速になり、3 台 (HORN-5 ボード 12 枚) のシステムで、秒間 9 枚の動画が可能になった。

本クラスタシステムで行った電子ホログラフィ再生の例を以下に示す。図 5 は 5 万画素で構成されたチェス盤を回転させる動画像再生の 1 枚である。左の図は原画像で、三次元 CG ソフトウェアで作成した。右の図がその原画像を HORN-5 クラスタシステムで CGH に変換して再生した映像である。図 6 は 10 万画素で作成したメリーゴーランドを動画像再生したときの 1 枚である。図 5 と同様に、左の図が原画像で、右の図が再生映像である。ここでは、表示デバイスに 1,920×1,080 画素、6.5 μ m ピッチの反射型 LCD パネルを用いた。

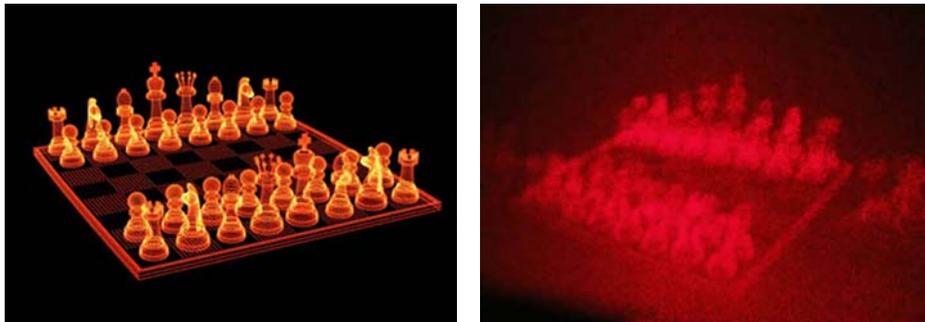


図 5. 5 万画素の電子ホログラフィ再生

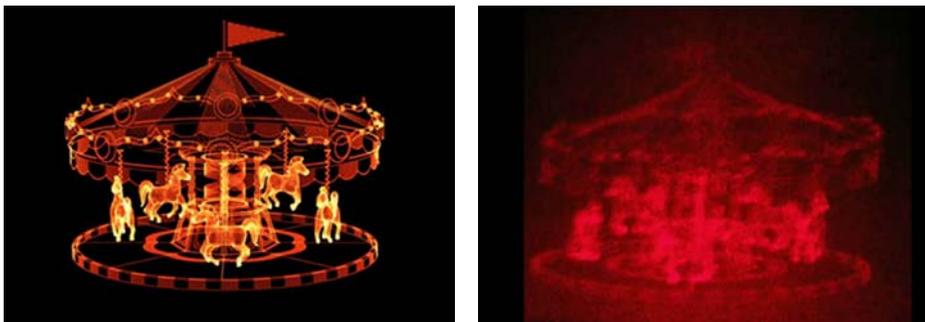


図 6. 10 万画素の電子ホログラフィ再生

・複数の反射型 LCD を用いた表示システムの拡大

ホログラフィでは再生に回折光を利用しているため、視野角は回折角によって決まる。図 7 は可視域の波長における両者の関係である。近年、反射型タイプの表示デバイスである反射型 LCD や DMD などの高精細化が急速に進んでおり、画素ピッチが $10\mu\text{m}$ を切るものまで市販され始めている。しかし、 $10\mu\text{m}$ の視野角は 3° 程度でしかなく、両眼視するには十分ではない。実用化を考えるならば $1\mu\text{m}$ ピッチに近付ける必要がある。

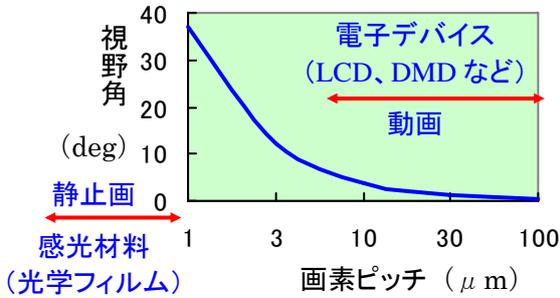


図 7. 画素ピッチと視野角の関係

視野角を拡大する方法として、光学的に画素ピッチを縮小する方法が知られている。例えば、図 8 のように焦点距離 (F) の異なった 2 枚のレンズを組み合わせれば、光学的に表示面 (及び画素ピッチ) は縮小し、回折角 (視野角) は広がる。ただし、それにとまって、再生像も縮小する関係にある。そのため、十分な視野角で、十分な大きさの再生像を実現するには、より大きな表示面が必要となる。

そこで、図 9 のように LCD パネルを複数枚並べた表示面の作製を試みた。

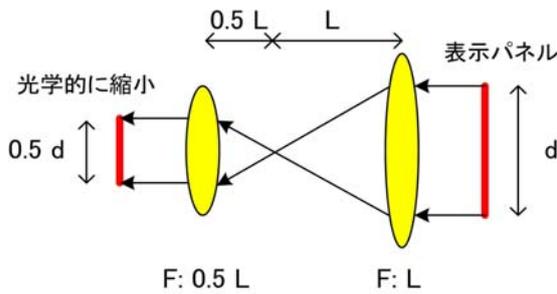


図 8. 光学縮小系

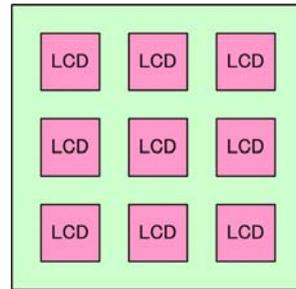


図 9. 複数の LCD による表示パネル

まず、図 10 のような LCD を 3 枚並べた表示面を作製した。基礎的な検証として、1 枚の LCD に比べて、再生像がほぼ 3 倍に拡大することを確認した。わかりやすい例を図 11 と図 12 に示す。どちらも、ホログラム面から 1m 離れた位置で、横幅 10cm に 1 から 9 までの数字を並べた像を再生させた図である。1 枚の LCD のみを用いた場合では中央の 3 から 6 までしかきれいに表示されないが、3 枚を用いた場合、1 から 9 までの数字がきれい再生されているのがわかる。



図 10. 3 枚の LCD による表示パネル



図 11. 1 枚の LCD による再生像



図 12. 3 枚の LCD による再生像

引き続き、この 3 枚の LCD による表示パネルをユニットとして、複数ユニット (最大 4 ユニット) を用いた拡大表示システムの構築を行った。

・計算システムと表示システムのインターフェースの研究

専用ハードウェアで計算された CGH データは、直接表示デバイスに出力されることが望ましい。そこで、図 13 のような FPGA と LCD を同一基板上に搭載したボードを開発した。このボードは USB (Universal Serial Bus) インターフェースでパソコンと接続して使用する。パソコンから物体点データをボードに送ると、ボード上の FPGA で CGH を生成し、それを直接 LCD に表示するシステムである。計算チップと表示デバイスをユニット化したシステムは、将来、基板の小型化、表示面の大型化が可能になれば、実用に向けて、有望であると思われる。



図 13. 計算チップと表示デバイスのユニットシステム

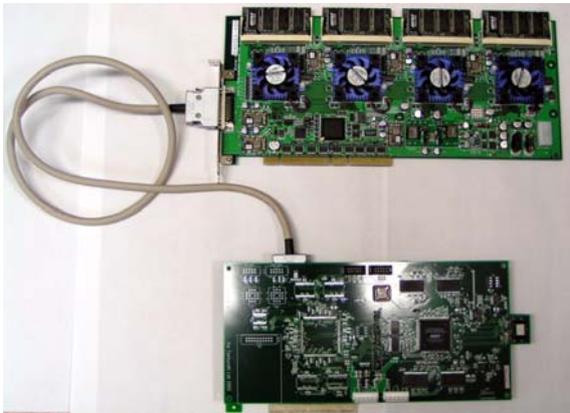


図 14. 計算ボードと表示ボードの結合システム

ただし、現時点では、十分高速な計算システムを表示基板に実装することは困難である。図 13 のボードに搭載した FPGA では、CGH 計算の能力は PC の 40 倍程度でしかない。そこで本研究では、さらに、図 13 のボードを表示機能だけに限定して外部信号を取り込めるように改良を加えて、高速な HORN-5 ボードと図 14 のように LVDS インターフェースで接続した。本システムでは、データは、ホスト PC→専用計算機→表示デバイスと単方向に流れ、通信のボトルネックは生じない。計算システムと表示システム間のインターフェースの基礎研究として試作した。

・GPU および Cell プロセッサによる CGH 計算の高速化

専用計算機によるシステム開発と並行して、市販のリソースを用いた CGH 計算の評価を行った。対象としたのは、GPU、Cell 及び ClearSpeed CSX600 の各プロセッサである。

GPU は、内部に画素の計算を行うためのシェーダと呼ばれる演算ユニットを複数持っている。近年、この演算ユニットは単精度浮動小数点でのプログラムが可能になり、シェーダ数も増加している。本研究で用いた GeForce8800GTX は、128 のシェーダを内蔵し、1.35GHz で動作する。漸化式を用いた高速アルゴリズムでは速度向上はみられなかったが、近似を入れない CGH 計算 ((1)式) では、Pentium4 (動作周波数 3.4GHz) での計算に比べて 1,800 倍の高速化を示し、500 点程度の三次元物体であれば、ビデオ・レートでのホログラフィ再生が可能であることを確認した。GPU を搭載したビデオカードは数万円程度と安価であり、CGH 計算には有用であると考えられる。さらに、LCD パネルを内蔵したプロジェクタと組み合わせて、簡易な電子ホログラフィシステムを構築した。

Cell プロセッサは並列計算可能な演算ユニットを 8 個内蔵している。Cell を用いているゲーム機プレイステーション 3 に CGH のプログラムを実装した。こちらも単精度浮動小数点での計算が可能なることから、(1)式で Pentium4 (動作周波数 3.4GHz) と比較したところ、30 倍の高速化が得られた。

CSX600 プロセッサには内部に 96 個の演算ユニットが実装されている。このプロセッサを 2 個 (192 演算ユニット) 搭載した計算ボードに(1)式をプログラムした。CGH は並列計算に向いていることから高速化が期待されたが、本研究期間内では Pentium4 (動作周波数 3.4GHz) と同程度の計算速度にとどまった。これは、CSX600 用の開発環境がまだ整備中であるためと考えられ、専用ライブラリが整うとともに高速化が期待できる可能性がある。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

電子ホログラフィの研究は、1990年頃、MITのメディアラボにおいて Benton らによって、表示デバイスに AOM (光学音響素子) を用いた試作機が作られて本格化した。この研究には日本からも吉川 (日大) が参加した。また、日本においても、佐藤 (湘南工科大) らが、表示デバイスに LCD を用いた電子ホログラフィの再生に成功した。1990年代中頃には、通信放送機構で、本田 (千葉大)、佐藤、吉川らを中心に本格的な研究が行われた。その頃の研究成果として、現状では、ホログラムを表示するための十分高精細な電子表示デバイスの開発が困難なことから、ホログラフィの持つ膨大な情報量を処理することが困難であること、二つの大きな課題があることが明らかにされ、電子ホログラフィによる動画像システムの実用化には、20~30年の歳月を要するとの予測もたてられた。そのため、電子ホログラフィの研究は、2000年頃から下火になっている感もある。

本研究者がホログラフィ専用計算機システムの研究を始めたのは1992年である。ソフトウェアでのアルゴリズムの研究は、吉川ら、松島 (関西大) ら、坂本 (北大) らなど、いくつかの研究グループで行われているが、ハードウェアによる高速化を本格的に行っているのは、本研究者らの研究グループの特徴となっている。ただし、ハードウェアでの研究においても、ソフトウェアでのアルゴリズムの研究は重要であり、例えば、本研究で高並列実装に成功した加算による漸化式のアルゴリズムは、吉川らの高速アルゴリズムをもとに、ハードウェアに適するよう改良を加えたものである。

本研究の成果としては、まず、専用計算機システムによって PC の 1 万倍の高速化を示せたことがあげられる。この専用計算機システムは、さらに並列度を上げることが可能であり、将来的には、小型で安価なデバイスに集約することで、実用的なシステムに応用されることが期待される。

専用計算機システムによる高速化をもとにして、電子ホログラフィシステム全体の関する研究を行ったことが、続く成果である。図 15 に、専用ハードウェアを用いた電子ホログラフィシステムの目標を示す。ホログラフィは情報量が多いため、大規模化するには、計算も表示も並列・分散処理する必要があると考えられる。そのため基礎研究として、LCD パネルの並列化、及び計算システムと表示システムのインターフェースの研究にも着手した。これらの成果をもとにして、今後も、本格的なシステム開発の研究を進めていきたいと考えている。

目に見えるデモンストレーションをともなったシステム開発の研究を続けていくことで、実用化の可能性を示すことができ、現在三次元動画像表示について模索を続けている産業界に対して大きなインパクトを与えていけるものと考えている。

また、専用計算機システムと並行して行った市販のリソースを用いた CGH 計算の評価では、GPU 及び Cell で良好な結果を示すことができた。特に GPU は、ビデオカードに搭載された形で PC に内蔵されている。つまり、誰でも利用することが可能である。このことは、当該分野において、研究を活性化させる一助になるのではないかと考えている。

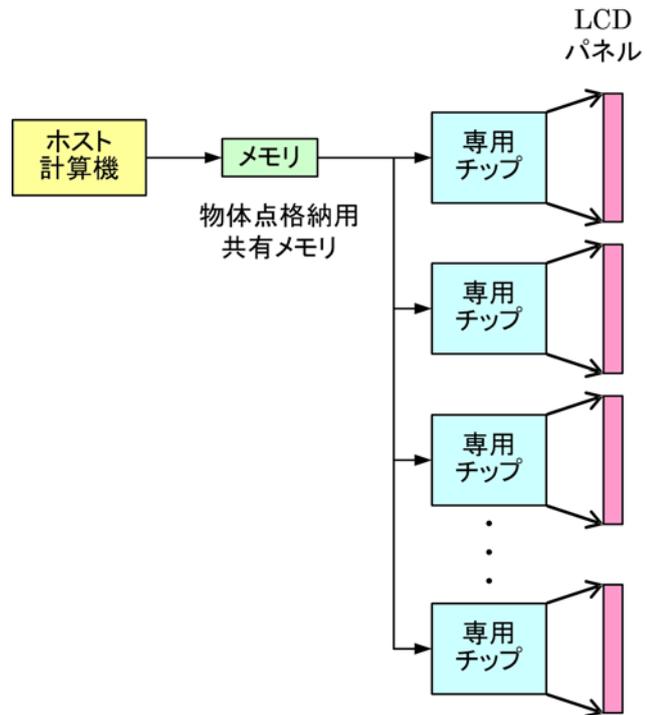


図 15. 並列型電子ホログラフィシステム

5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

専用計算機による電子ホログラフィシステムの研究開発は、当該分野においては、本研究者のオリジナルであり、類似研究は見当たらない。他分野においては、理論天文学で牧野（国立天文台）らのグループや、タンパク質の三次元構造のシミュレーションで泰地（理化学研究所）らのグループが、大規模な専用計算機システムを構築して、成功を収めている例がある。

複数の LCD パネルを用いた研究は、本研究では、高速な計算システムを背景に、オーソドックスな手法を中心に進めている。同様に複数の LCD パネルを用いた研究として、坂本（北大）らのグループは、独自の手法を加えて研究を進めている。また、佐藤（湘南工科大）らのグループは、複数の LCD を用いたカラーホログラフィの研究を従前より精力的に進めている。

GPU による CGH 計算の研究は、本研究で成果発表（Optics Express, Vol.14, No.2, pp. 603-608, 2006）を行ってすぐ、Ahrenberg（Max-Planck 研究所）らによって継続研究がなされ、成果報告されている（Optics Express, Vol. 14, No.17, pp. 7636-7641）。また、吉川（日大）らのグループでは、ホログラム近傍に三次元像を置くイメージホログラムを CGH に用いて、計算領域を削減することで、計算時間を大幅に削減することに成功している。この手法も、PC を用いて誰にでも利用可能であることから、当該分野の研究を促進するものと考えられる。

当該研究分野の中で、本研究課題は、ハードウェア（計算機及び電子回路）の設計・開発技術を駆使した研究であると位置づけられると考えている。他の研究グループの成果も精査しながら、当該分野で貢献できるように、今後も研究を進めていきたいと考えている。

6. 研究実施体制

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
伊藤智義	千葉大学	教授	全般	平成 16 年 12 月～ 平成 19 年 3 月
白木厚司	千葉大学	院生	表示システム	平成 16 年 12 月～ 平成 19 年 3 月
中山弘敬	スクエア・エニックス社	アルバイト社員	表示システム	平成 16 年 12 月～ 平成 19 年 3 月

7. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要

(ありません)

(2) 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間

(ありません)

8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表 (英文論文 7件 邦文論文 7件)

- [1] Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda, Kotaro Yoshimura, Atsushi Shiraki, Tomoyoshi Shimobaba and Takashige Sugie, "A special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography", Optics Express, Vol.13, No.6, pp.1923-1932 (2005)
- [2] Tomoyoshi Shimobaba, Atsushi Shiraki, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, "Electroholographic display unit for three-dimensional display by use of special-purpose computational chip for holography and reflective LCD panel", Optics Express, Vol.13, No.11, pp.4196-4201 (2005)
- [3] Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda, Atsushi Shiraki and Tomoyoshi Shimobaba, "Real-Time Electroholography by Special-Purpose Computer HORN", Proceedings of The 12th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2005, Vol.2, pp.1761-1764 (2005)
- [4] Tomoyoshi Shimobaba, Atsushi Shiraki, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, "A Colored Interactive Three-Dimensional Display System by use of Electroholographic Display Unit", Proceedings of The 12th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2005, Vol.2, pp.1765-1768 (2005)
- [5] Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito, Kazuya Kayama, Hiroaki Kono, Shin-ichi Satake, Tomoaki Kunugi and Kazuho Sato, "Special purpose computer for digital holographic particle tracking velocimetry", Optics Express, Vol.14, No.2, pp.587-592 (2006)
- [6] Nobuyuki Masuda, Tomoyoshi Ito, Takashi Tanaka, Atsushi Shiraki and Takashige Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit", Optics Express, Vol.14, No.2, pp. 603-608 (2006)
- [7] 伊藤智義, "電子ホログラフィによる三次元動画像表示技術", ディスプレイ, Vol.12, No.4, pp.72-76 (2006)
- [8] 伊藤智義, "専用計算機による動画ホログラフィ", 光技術コンタクト, Vol.44, No.6, pp.310-315 (2006)
- [9] 伊藤智義, 阿部幸男, 田中喬, 増田信之, 杉江崇繁, "GPUを用いた計算機合成ホログラム・リアルタイム再生システム", 情報技術レターズ, Vol.5, pp.245-246 (2006)
- [10] 白木厚司, 伊藤智義, 増田信之, 下馬場朋禄, "複数の液晶ディスプレイパネルを用いた電子ホログラフィ再生像の拡大", 情報技術レターズ, Vol.5, pp.247-248 (2006)
- [11] 下馬場朋禄, 伊藤智義, 白木厚司, 増田信之, 市橋保之, "誤差拡散法による計算機合成ホログラムからのマルチカラー立体再生像の基礎検討", ホログラフィックディスプレイ研究会会報, Vol.26, No.3, pp.20-23 (2006)
- [12] 下馬場朋禄, 伊藤智義, 白木厚司, 増田信之, 市橋保之, "誤差拡散法による計算機合成ホログラムからのマルチカラー立体再生像の基礎検討", 映情学技報, Vol.30,

No.43, pp.19-22 (2006)

[13] Atsushi Shiraki, Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Shimobaba, "Expansion of Reconstruction Image of Electroholography Using LCD Panels in Parallel", Proceedings of The 12th International Display Workshops, Vol.2, pp.1371-1374 (2006)

○[14] 白木厚司, 阿部幸男, 田中喬, 根尾敦, 増田信之, 伊藤智義, "GPU とプロジェクタを用いた簡易なりアルタイム電子ホログラフィ再生システム", 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.4, pp.508-513 (2007)

(2)口頭発表

①学会

国内 13 件, 海外 3 件

②その他

国内 7 件, 海外 0 件

(3)特許出願 (本研究に係わり、JST から出願したものとで研究機関から出願したもの)

出願元	国内 (件数)	海外 (件数)
JST	0	0
研究機関	0	0
計	0	0

(ありません)

(4)その他特記事項

(報道) 日経産業新聞 (2005年2月24日) 「ホログラフィ 毎秒30コマ、再生に成功」

9. 結び

本研究は「発展研究 (SORST)」であり、もとになっているものは「さきがけ研究 (個人研究型)」でした。さきがけ研究では主に専用計算機システムの研究を行い、最終成果として HORN-5 ボードの開発に成功しました。その成果を引きついで、HORN-5 ボードを利用した研究を行う必要が生じました。その研究を「発展研究 (SORST)」で行うことができ、大変幸運でした。JST の体制 (特に領域事務所) も継続して頂き、円滑に研究を進めることができました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

2 年半の研究期間は、短期的な目標設定としてはちょうど良い長さのように思いました。当初の計画事項に対して、概ね、着手・遂行することができたように思っています。しかし、100%とはいかず、当初の目標を完遂できなかった項目もいくつか残りました。特に、今回の研究テーマは、システムの開発をともなうものが多かったため、開発後の評価が研究期間中には間に合わなかったものがありました。本報告書のいくつかの事項は、現在、



研究に参加したメンバー

論文準備中にあり、これから順次発表していく予定です。

本研究課題は「さきがけ研究（個人研究型）」の継続との位置づけから、ポストドク等を雇う制度にはなっていなかったため、ほとんどすべての事項について、私の研究室内で行われました。本研究に携わってくれた学生たちに感謝を込めて、ここで（全員ではありませんが）メンバーの集合写真を載せさせていただきます。

余談になって恐縮ですが、本研究を通じて、学生のハードウェア設計技術も向上したように思います。毎年3月に学生の「LSI デザインコンテスト」が開催されているのですが、本研究室では2005年から参加していて、2005年準優勝（優勝は阪大）、2006年優勝、2007年優勝、2008年準優勝（優勝は京大）と、良好な成績を収めています。

このような研究機会を与えて頂いたことに感謝し、本研究で得られた成果をさらに発展するよう努めていくことを申し上げて、結びの言葉にさせていただきます。