

研究課題別評価

1 研究課題名: 超高速ホログラフィ専用計算機システム

2 研究者氏名: 伊藤智義

3 研究の狙い:

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コンピュータ上で作ることが可能であり、計算機合成ホログラム (Computer Generated Hologram: CGH) 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ために、ホログラフィによる動画像システムは実用の目処がたっていない。その実現には今後 20 年を要するとも言われている。

ホログラムの計算は、物体を構成する点数とホログラムの解像度の積に比例する。物体点数を 10,000、ホログラムの解像度を $1,000 \times 1,000$ とすると、1 枚のホログラムを作成するためには $10,000 \times 1,000 \times 1,000 = 10,000,000,000$ (100 億) に比例する計算を行わなければならない。CGH の理論式をそのまま計算すると、Pentium4 3.2GHz CPU 搭載のパソコン (PC) で約 15 分を要する。30 枚 / 秒のビデオ・レート再生を実現するためには、計算速度を 1 万倍以上向上させなければならない。

これまで、筆者らも含め、いくつかの研究グループによって、理論式を近似展開したり、テーブル計算を用いたり、ホログラム上の点が規則的に並んでいることを利用するなど計算アルゴリズムの改良が進められてきた。その結果、前述の直接計算アルゴリズムに比べて、最近では数十倍速いアルゴリズムが開発されてきている。この高速アルゴリズムを用いると、計算時間を約 30 秒に短縮できる。しかし、ビデオ・レートの再生には、まだ 1,000 倍の高速化が必要である。

そこで本研究では、ハードウェアによる高速化を試みる。幸い、ホログラフィの計算は並列処理が有効である。並列型のホログラフィ専用計算機システムを開発して計算速度を飛躍的に向上させ、電子ホログラフィシステムによる三次元動画像再生システム (三次元テレビ) を試作しようというのが本研究のねらいである。

ただし、物体点数 10,000、ホログラムの解像度 $1,000 \times 1,000$ というシステムは、実際のところ、電子ホログラフィにとってはまだ不十分である。このシステムから得られる三次元再生像の大きさは $3\text{cm} \times 3\text{cm} \times 3\text{cm}$ ほどで、視野角 (像が見える角度) も 3° 程度と狭い。したがって、たとえこのシステムをリアルタイムで駆動できたとしても、残念ながらすぐに実用化されるには至らない。しかし、三次元テレビは次代表示技術の最終目標の一つであるので、本研究によって、電子ホログラフィの最大の課題となっている計算速度の向上が専用計算機システムで可能になり、実用化への道筋を示すことができれば、産業界の研究開発に対しても大きな促進力になるのではないかと考えている。

4 研究成果:

本研究で開発した試作システムの構成を図1に示す。このシステムは大きく二つ分けられる。計算機システムとそれ以外の光学系である。本研究では、専用計算機システムだけではなく、電子ホログラフィにとっては計算速度の向上とともに重要な表示に関する研究も行った。まず、その成果から述べたい。

4 - 1. 電子ホログラフィ再生光学系

ホログラフィでは三次元像の再生に光の回折を利用するために、十分大きな再生像を十分広い視野角で見えるようにするには、可視光を十分に回折させるだけの画素密度が必要となる。理想的には、可視光の波長と同程度の画素間隔($1\mu\text{m}$ 程度)である。感光材料で作られた光学フィルムでは画素間隔に相当する画質の解像度は $0.1\sim 1\mu\text{m}$ なので、視野角は 40° 以上あり、十分な立体視が可能であるため、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、動画の場合はホログラムを逐次更新しなければならない。データを制御でき、かつ、これほど高精細な表示デバイスは今のところ存在していない。これまでに音響光学変調器(AOM)や透過型液晶ディスプレイ(LCD)を用いたシステムが考案されてきたが、AOMは一次元デバイスであるので三次元視差を持たせるためには装置が大がかりになり、透過型LCDでは画素間隔が粗くて視野角がほとんど取れないなどで、どちらも決定打とはなっていない。

この二つに代わるものとして、本研究では最近流通し始めた反射型LCDに注目した。反射型LCDは透過型LCDと違い、LCD素子の制御回路を表示面の裏面に作ることができるので、高精細化しやすく、さらに光の利用効率(反射率)を高くできる特徴を持っている。本研究では画素ピッチ(間隔) $10\mu\text{m}$ の反射型LCDを使用した。期待通り、画素間隔 $36\mu\text{m}$ の透過型LCDに比べて3倍程度大きな像が得られ、肉眼で十分目視できる結果を得た。さらに、反射率が高いということで非常に明るい像が得られたので、参照光源をレーザーから発光ダイオード(LED)に代えてみたところ、きれいな像を再生した。レーザーを使わないでよいということはシステムを飛躍的に小さく、しかも安価にできるという利点を持つ。この成果をもとにして作った光学系が図1である(論文[2])。本システムは非常に簡素であり、LCDパネルとLEDの他は、ピンホール・フィルタ、ビーム・スプリッタ、2個のレンズと計算機システム(ふつうの実験にはPCを使用)で構成されている。PCで生成したホログラムをLCDに表示し、そこにピンホール・フィルタとコリメータ・レンズで平行にしたLEDの参照光を、ビーム・スプリッタを利用して入射する。実像が結像する位置に視野レンズを置いておくと、そこに空中に浮かんだ三次元再生像を見ることができる。

また、LEDによってシステムを小さくできる利点を活かして、三原色(赤・緑・青:RGB)のLEDを組み合わせた非常に簡素なカラーホログラフィ手法も開発した(論文[3][6])。

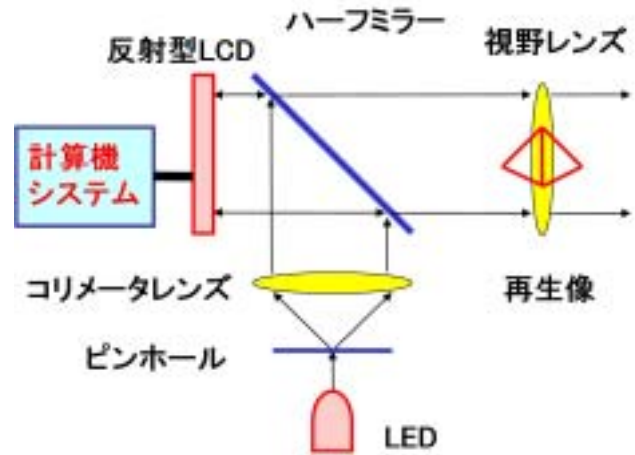


図1. 電子ホログラフィ再生システム

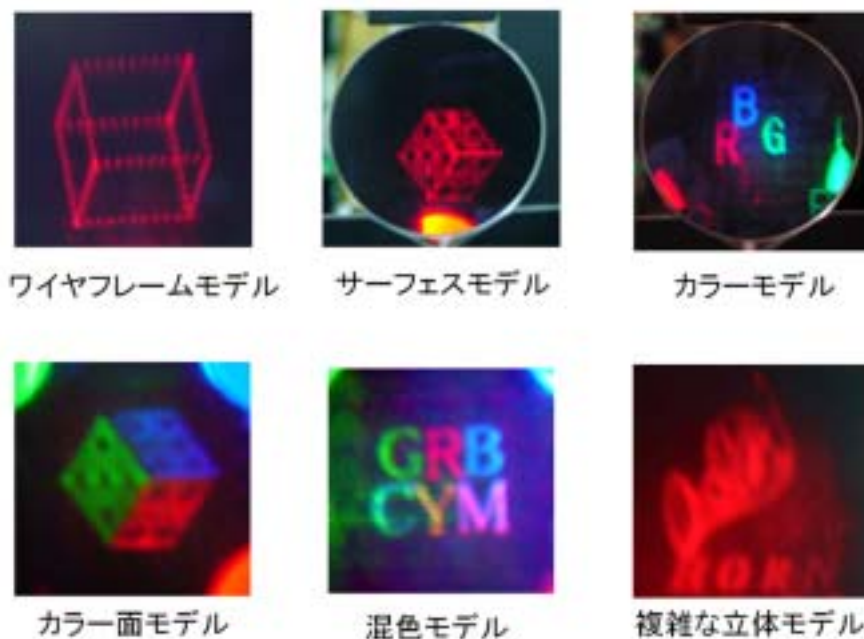


図 2. 電子ホログラフィ再生例

これまで行ってきた再生像の進展を図 2 に示す。単純で画素数の少ない(数百点程度)のワイヤフレーム(線画)モデル(左上図)から始まり、画素数が数千点のサーフェス(面)モデル、さらにはカラー化に成功し、最近ではよりリアルな三次元像が扱えるようになっている(右下図)。

4 - 2 . ホログラフィ専用計算機システム

再生像は改善されてきたが、実際の再生領域は小さく、視野角も広くない。これは、表示デバイスの画素ピッチが粗いためである。現時点でもっとも高精細な LCD の画素ピッチは $10\mu\text{m}$ を切ったところである。ただし、例えば、焦点距離の異なった 2 枚のレンズを組み合わせることで光学的に画素ピッチを縮小する手法も知られている。したがって理論的には、LCD パネルを複数用いて大きな表示面を作って光学的に縮小することで、現在の技術水準でも十分な大きさの三次元像が得られることになる。しかし、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。つまり、電子ホログラフィによる三次元テレビの実現は、最終的には情報処理速度の問題に帰結する。そこで本研究では、ホログラフィ専用計算機システムを開発して、大幅な計算速度の向上を試みた。

具体的にはホログラムの計算式をハードウェア化して、それを多数並列動作させる計算機システムの構築である。メインデバイスには大規模 FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた。読み書き可能な FPGA は 1990 年代後半から急速に発展してきたデバイスで、回路規模の増大とともに、近年、その有利性が高まっている。ただし、FPGA を用いて数値計算用のシステムを構築する際には、実装効率が問題となる。特に、数値計算で多用される乗算は回路面積が大きく、1 チップに多数は実装できない。そこで本研究では、まず、ホログラム面上の点が規則的に並んでいることに注目し、乗算を減らして大部分を加算の漸化式だけで並列計算が行えるアルゴリズムを開発した(論文[1])。このアルゴリズムはソフトウェア的にも直接計算アルゴリズムに比べて数十倍の高速化を実現し、ハードウェア的には回路規模を 10 分の 1 程度に縮小することを可能にした。

図3はHORN-5(HOlographic Reconstruction)と名付けて開発したホログラフィ専用計算ボードである。ザイリンクス社の大規模FPGAであるXC2VP70(700万ゲート相当)をPCI(Peripheral Component Interconnect)基板に4個搭載した。PCのPCIスロットに差し込んで使う。アルゴリズムをハードウェア向けに改良した成果で、この基板にはホログラム計算回路を1,408個実装することができた。動作周波数は166MHzである。

計算速度の比較を表1にまとめた。物体点数が10,000点で、ホログラムの解像度が1,408×1,050のときの、ホログラム1枚当たりの計算時間を示した。本システムで使用したLCDパネルの解像度が1,408×1,050であることから、この条件を選んだ。また、専用計算ボードはPCI仕様なので、1台のPCに複数枚装着することも可能である。4枚まで装着して評価を行い、数値を載せた。ソフトウェアでの最高速度は、高速アルゴリズムをIntel C++ 8.0コンパイラで最適化オプションをつけてコンパイルしたときで、ホログラム生成1枚当たり24.7秒だった。この数値を基準に高速化率を記した。



図3. ホログラフィ専用計算ボード

システム		計算時間 (秒/枚)	高速化率 (倍)
【ソフトウェア】 Pentium4 3.2GHz 2GB メモリ OS: Windows XP	直接計算 アルゴリズム	Visual C++ 6.0	1630
	高速計算 アルゴリズム	Visual C++ 6.0	60.0
		Assembler	35.7
		Intel C++ 8.0	24.7
【専用計算機】 FPGA ボード XC2VP70×4 166MHz	1 基板 実装回路数 1,408(並列計算)	0.0679	364
	2 基板 実装回路数 2,816(並列計算)	0.0365	677
	3 基板 実装回路数 4,224(並列計算)	0.0271	911
	4 基板 実装回路数 5,632(並列計算)	0.0232	1065

表1. ホログラム計算速度の比較

(計算条件: 物体点数 10,000 ホログラム解像度 1408×1050)

表1はホログラフィ計算がハードウェアに適していることを示している。専用基板1枚で約360倍の高速化を達成した。また、ホログラム計算が並列化に適していることもこの表からわかる。並列度を上げていくとともに計算は高速化され、4枚装着時には1,000倍を超える高速化を実現し、ホログラム1枚当たりの生成時間は0.0232秒を記録した。これは秒間43枚の速さであり、ビデオレート(30枚/秒)を越え、本研究の目標であったリアルタイムの動画再生を可能にする大きな成果となった(論文[7][8][9])。

4 - 3 . 並列システム

表1の結果を詳しく見ると、並列度が上がると計算速度の向上は鈍ってきている。これはホスト計算機(PC)と計算ボード間の双方向通信が主な原因となっている。例えば将来、1 μ mピッチで10cm \times 10cmの表示パネルができたとすると総画素数は100億になる。これだけのデータをまともに双方向通信しては、いくら計算を速くしても意味がなくなる。

しかし、画像表示だけを目的とする三次元テレビでは、本来、データは一方通信ですむので、通信負荷を大幅に軽減することが可能である。構成例を図4に示す。動作手順は、まずホスト計算機から三次元図形の座標を共有メモリに転送する。各専用チップは同時に共有メモリからそのデータを参照し、自分に割り当てられた部分のホログラムを生成し、自分に割り当てられた表示デバイスにそのホログラムデータを送る。膨大な情報量は分散・並列に処理されるが、通信されるデータは矢印の向きにしか進まないため、通信も分散・並列で行われてボトルネックは生じない。ホスト計算機と共有メモリ、および共有メモリと専用チップ間の通信量は三次元図形

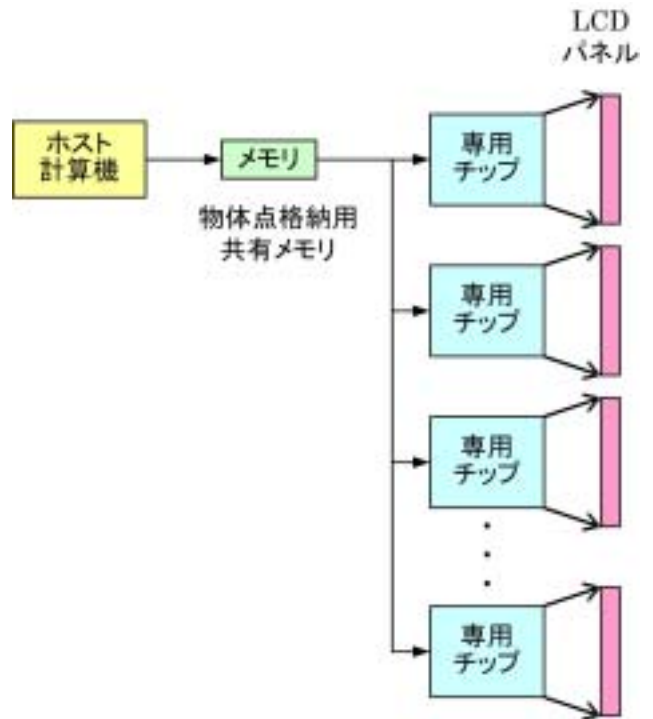


図4. 並列型電子ホログラフィシステム

データだけ(例えば10,000点の図形の場合、10KByte程度のデータ量)であり、表示デバイスの総画素数に無関係なので、無視できる程度でしかない。データ通信の負荷を軽くできるという点でも電子ホログラフィは専用計算機システムに非常に向いているといえる。

このような専用計算チップと表示デバイスをユニット化した並列システムの基礎的な研究のため、図5のようなLCD(右端)と計算用のFPGA(中央)を実装した基板も開発した(論文[5])。現在はこのユニット・ボードを複数枚組み合わせ使って、並列システム開発のための研究を進めているところである。

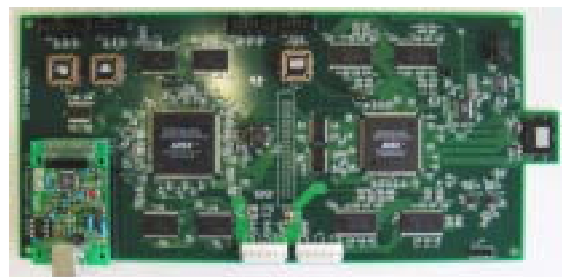


図5. ユニット・ボード

5 自己評価:

電子ホログラフィによる三次元動画システムを試作をめざして研究を開始し、3cm大と小さい像ながらもリアルタイム再生に成功したことは、当初の目標を達成できたと考えている。

電子ホログラフィの課題は、主に(1)高精細表示システムと(2)高速計算システムの二点である。

これに対して本研究では、以下の4つ成果を提示した。

- 1) 反射型LCDとLEDによる電子ホログラフィ再生システムの考案
- 2) 新しいカラー電子ホログラフィ手法の提示
- 3) 並列システム開拓のための専用計算チップとLCD表示系によるユニット基板の開発
- 4) ビデオ・レートのリアルタイム再生を可能にする専用計算機システムの開発

これらの成果は、光学分野ではトップジャーナルである“Optics Letters 誌”、“Optics Express 誌”にそれぞれ掲載された。

電子ホログラフィによる三次元テレビの実用化にはまだ課題も多いが、このような研究機会を与えて頂いたことを感謝するとともに、これらの研究成果をもとにさらにステップ・アップしていきたいと考えている。

6 研究総括の見解:

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が、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ために、実用の目処がたっていなかった。伊藤研究者は、ビデオ・レートのリアルタイム再生を可能にする専用計算機システムとLCD表示系の開発により、3cm大と小さい像ながらも三次元動画像のリアルタイム再生に成功した。今後の研究の進展が大いに期待される。

また、反射型LCDと発光ダイオード(LED)による新しいカラー電子ホログラフィ再生手法を考案した。参照光源にレーザーを使わないでよいということはシステムを飛躍的に小さく、しかも安価にできるという利点がある。将来の研究の進展が楽しみである。

7 主な論文等:

論文(査読付き)

1. Tomoyoshi Shimobaba, Sinsuke Hishinuma and Tomoyoshi Ito, “Special-Purpose Computer for Holography HORN-4 with recurrence algorithm”, Computer Physics Communications, Vol.148, pp.160-170 (2002)
2. Tomoyoshi Ito, Tomoyoshi Shimobaba, Hirokazu Godo and Masahiko Horiuchi, “Holographic reconstruction with a 10- μ m pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light”, Optics Letters, Vol.27, No.16, pp.1406-1408 (2002)
3. 伊藤智義, “RGB LEDを参照光源とした反射型LCDによるカラーホログラフィ”, 情報技術レターズ, Vol.1, pp.181-182 (2002)
4. Tomoyoshi Shimobaba and Tomoyoshi Ito, “A Color Holographic Reconstruction System by Time Division Multiplexing with Reference Lights of Laser”, Optical Review, Vol.10, No.5, pp.339-341 (2003)
5. Tomoyoshi Ito and Tomoyoshi Shimobaba, “One-unit system for electroholography by use of a special-purpose computational chip with a high-resolution liquid-crystal display toward a three-dimensional television”, Optics Express, Vol.12, No.9, pp.1788-1793 (2004)
6. Tomoyoshi Ito and Koji Okano, “Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel”, Optics Express, Vol.12, No.18, pp.4320-4325 (2004)

7. 伊藤智義, 下馬場朋禄, 杉江崇繁, 増田信之, “リアルタイム再生を可能にする並列型電子ホログラフィ専用計算機システム HORN-5”, 情報技術レターズ, Vol.3, pp.219-220 (2004)
8. 伊藤智義, “大規模 FPGA ボードによる数値計算の高速化”, 物理探査学会, Vol.57, No.6, pp.615-620 (2004)
9. 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)

解説記事

1. 伊藤智義, “ホログラフィ動画像再生 - 反射型液晶ディスプレイの有効性について -”, 画像ラボ, Vol.13, No.5, pp.8-13 (2002)
2. 伊藤智義, “反射型液晶ディスプレイと専用計算機システムによる動画ホログラフィー”, 光学, Vol.31, No.5, pp.429-434 (2002)
3. 伊藤智義, “超高速ホログラフィ専用計算機の開発”, ケミカルエンジニアリング, Vol.47, No.7, pp.24-28 (2002)
4. 伊藤智義, “簡易型動画ホログラフィ再生装置の開発”, 画像ラボ, Vol.14, No.12, pp.41-44 (2003)
5. 伊藤智義, “電子ホログラフィによる動画像システム”, テクノニュースちば, Vol.36, pp.20-21 (2004)
6. 伊藤智義, 増田信之, 下馬場朋禄, 杉江崇繁, “デジタル信号処理のハードウェア実装～性能向上の“切り札”をあなたの手駒に～”, デザインウェブマガジン 2004年11月号(CQ出版社), pp.43-103 (2004)

国際会議(査読付きプロシーディング)

1. Tomoyoshi Shimobaba, Kazuhiro Godo, Sinsuke Hishinuma, Masahiko Horiuchi and Tomoyoshi Ito, “A prototype of 3D-TV with a special-purpose computer for holography, HORN-4”, The 6th World Multiconference on System, Cybernetics and Informatics (SCI2002), July 14-18, 2002, Orlando, Florida, USA, Proc. Vol.XIII, pp.31-35 (2002)
2. Tomoyoshi Shimobaba, Kazuhiro Godo, Sinsuke Hishinuma, Masahiko Horiuchi, and Tomoyoshi Ito, “A Real-Time Three Dimensional Animation System by Electro Holography with a Special-Purpose Chip for Holography and a High Minute Reflective LCD”, Asia Display / The 10th International Display Workshop (IDW'03), December 3-5, Fukuoka, Japan, Proc. 3Dp-8, pp. 1457-1460 (2003)
3. Tomoyoshi Shimobaba, Atsushi Shiraki, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, “Electroholography Unit for Three-Dimensional Display Using Special-Purpose Chip and High Minute LCD Panel”, The 3rd International Conference on Experimental Mechanics (ICEM2004), November 29 - December 1, Singapore, CD-ROM Proc. A03-2 (2004)

特許

1. 発明者: 伊藤智義, 発明の名称: 動画ホログラフィ再生装置, 出願人: 科学技術振興事業団, 出願日: 2002年1月16日
2. 発明者: 伊藤智義, 発明の名称: 動画ホログラフィ再生装置, 出願人: 科学技術振興事業団, 出願日: 2002年5月16日
3. 発明者: 伊藤智義, 発明の名称: カラー動画ホログラフィ再生装置, 出願人: 科学技術振興事業団, 出願日: 2002年6月12日

4. (外国特許出願) 発明者: 伊藤智義, 発明の名称: 動画ホログラフィ再生装置及びカラー
動画ホログラフィ装置, 出願人: 科学技術振興事業団, 出願日: 2003年1月15日