

GPU を用いた計算機合成ホログラムのリアルタイム再生システム Real-time reconstruction of computer-generated hologram using graphics processing unit

伊藤 智義†* 阿部 幸男† 田中 喬† 増田 信之† 杉江 崇繁‡
Tomoyoshi Ito Yukio Abe Takashi Tanaka Nobuyuki Masuda Takashige Sugie

1. まえがき

近年、三次元動画の表示技術の研究開発がさかんに行われており、数値シミュレーションの可視化や医療分野における人体情報の可視化など様々な分野での応用が期待されている。その中でも、ホログラフィは物体光の波面をそのまま記録・再生できる唯一知られた技術であり、究極の三次元映像技術であるともいわれている。

ホログラフィでは三次元の情報をホログラムに記憶するが、ホログラムは光の干渉をシミュレートすることによって計算機で作成することもできる。そのようにして作成されたホログラムは計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) と呼ばれる。しかしホログラムの持つ情報量が膨大なため、CGH の作成には相当な時間を要する。これがホログラフィを用いた三次元動画像システムの大きな問題点の一つとなっている。

私たちの研究室では、この問題を解消するために FPGA (Field Programmable Gate Array) などを用いた専用計算機システムを開発してきている[1]。しかし、専用計算機の開発には専門の技術が必要とする。そこで、もう少し手軽なシステムとして、近年、性能の向上が著しく進んでいるグラフィックス・プロセッサ GPU (Graphics Processing Unit) に注目した。

前回の FIT2005 では、GPU を計算機合成ホログラムに応用することで CGH 作成にかかる計算時間が短縮できることを報告した。この手法で、物体点が 48 点で、ホログラム面が 800×600 のとき、ビデオレートでのホログラムの作成ができるようになり、実際の光学系を用いて、リアルタイムでの再生に成功した[2]。

さらに最近、nVIDIA 社が 2 枚のグラフィックカードを同時に使用できる SLI (Scalable Link Interface) という技術を発表した。本研究ではこの SLI システムを使用することで、さらなる CGH 計算の高速化を行った。

2. 計算機合成ホログラムの作成

記録する三次元物体が N 点で構成されているとすると、(1) 式を計算することによって CGH を作成することができる。

$$I(x_\alpha, y_\alpha) = \sum_j^N \cos(2\pi\theta_j), \quad (1)$$

$$\theta_j = \frac{p}{\lambda} \sqrt{(x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2 + z_j^2}. \quad (2)$$

I はホログラム面上 (x_α, y_α) での光の強度、 p はホログラ

ムの画素間隔、 λ は参照光の波長、 (x_j, y_j, z_j) は物体点の座標である。ただし、座標はすべて p で規格化している。

ここで、物体の z 座標を x, y 座標に比べて十分大きくとると、(2) 式の代わりに (3) 式の近似式が使える。計算負荷を軽減できる。さらに、(3) 式の第 1 項を省略してもホログラムを作ることが可能であり、本研究ではその近似式を用いて CGH 計算を行った。

$$\theta_j = \frac{pz_j}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda z_j} \{(x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2\}. \quad (3)$$

3. SLI システム

コンピュータ・グラフィックスの分野では非常に多くの浮動小数点演算を求められることが多く、CPU (Central Processing Unit) ではリアルタイム処理に追いつくことができなくなってきている。そこで GPU のようなグラフィックス処理に特化した専用の演算装置が用意されている。

開発当初、GPU は固定された内部処理のパイプラインを持ち、複数のベクトル演算装置で並列処理を行うことで CPU を上回る高い演算能力を得ていた。さらに最近になって、パイプラインの一部を自由にプログラム可能にした GPU が登場した。プログラム可能になったのは、頂点処理を行う「Vertex Shader」とピクセル処理を行う「Pixel Shader」である。それぞれ、32bit 浮動小数点精度の 4 次元ベクトルプロセッサが並列に組み込まれている。

また、nVIDIA 社によって、2 枚の GPU を同時に使用できる SLI システムが開発された (図 1)。この SLI システムでは、PC (Personal Computer) のマザーボードに装着した 2 枚のグラフィックカードを専用のブリッジコネクタで接続することでデュアル GPU 化を行う。グラフィックス処理に関しては、それぞれの GPU の計算負荷が等しくなるように画面を分割して高速化を図っている。

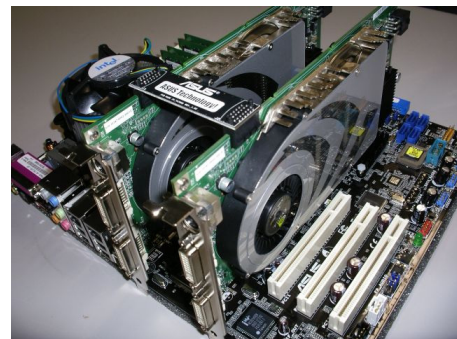


図 1: SLI システム

本研究では、これらのプログラム可能な GPU と SLI システムを用いて CGH 計算を行い、その高速化を評価した。使用した GPU は nVIDIA 社の GeForce 7800 で、CGH 計算用のプログラムを作成するために、グラフィックス API

†* 千葉大学工学部 / 科学技術振興機構

† 千葉大学工学部

‡ 理化学研究所

(Application Program Interface) に DirectX 9.0c を使用し、上位レベルシェーダ言語として、HLSL (High Level Shader Language) を使用した。

4. 結果

256 点で構成された物体 (立方体) から、実際に使用する光学系に合わせた $1,408 \times 1,050$ (約 150 万画素) のホログラムを、CPU および GPU を用いて計算したときの計算時間を表 1 に示す。

表 1 : CPU と GPU の計算時間の比較

System		計算時間 (ms)	速度比
CPU only CPU: Pentium 4 3.4-GHz Memory: 2GB OS: Windows XP Pro Compiler: Visual C++		22,703	1
Geforce7800	Single	80	280
	Dual (SLI)	44	520

本研究で用いた GeForce 7800 には、Vertex Shader が 8 並列、Pixel Shader が 24 並列実装されている。前節で述べたように、GPU では、Vertex Shader と Pixel Shader の両方がプログラム可能であるが、ここでの計算では、より並列度の高い Pixel Shader を用いて CGH 計算を行った。

CGH 作成の計算時間を比べると、SLI システムを用いた場合、CPU で行った場合より約 520 倍の計算速度が得られた。CGH の生成時間が 44 ms ということは、23 フレーム/秒であり、ビデオレートに近い速度を実現している。実際に、本システムを用いてリアルタイムでこの立方体を自在に動かすことに成功している。また、GPU を 2 枚使ったときと 1 枚使ったときの速度比は 1.82 倍であり、SLI の理論値 (1.87 倍) に近い速度が得られている。

図 2 は SLI による Dual GPU システムで作成された CGH で、図 3 はその再生像である。

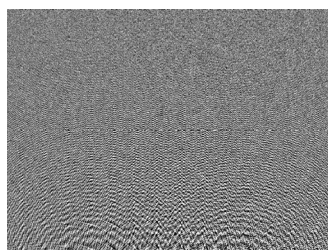


図 2 : ホログラム

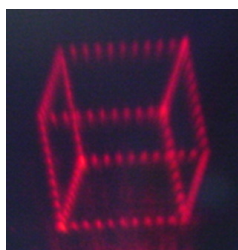


図 3 : 再生像

以上の結果は CGH 計算が並列性と演算能力をさらに高めた GPU の SLI システムに有効であることを示している。

5. まとめ

本研究では、SLI による GPU の並列システムで CGH 計算を行い、簡易な三次元像ながら、リアルタイムの電子ホログラフィシステムを実現した。

CGH の計算はピクセルごとに独立して行うことができる。そのため、並列処理に向いており、GPU に並列に搭載されているパイプラインを有効に使うことができる。さらには、

画面を分割して並列処理する SLI も有効に利用することが可能である。また、すべてのピクセルで同じ計算を行うようになっているため、GPU での計算を制御する Shader プログラムの読み込みも一度だけですむ。これらのことから、GPU の構造は CGH 計算に適していることが示唆され、実際に CPU に比べて計算速度の大幅な向上が確認された。

ただし、現時点では、物体点データを GPU 内のレジスタに保存しているため、物体点の点数に制限ができています。今回のシステムでは、292 点である。

点数をさらに増やす方法としては、GPU に外付けされているメモリを利用する方法が考えられる。物体点数をレジスタ数以下に分割し、それぞれの計算結果を、グラフィックカード上のテクスチャメモリなどに一時保持して重ね合わせれば、確かに 292 点を超える物体点数からでも CGH を作成することは可能である。

しかし、現時点の GPU ではメモリアクセスの負荷が大きく、特に SLI の利点は物体点数の増加とともに失われていく。その様子を図 4 に示す。物体点数がレジスタ数を越えたところで、計算時間が不連続に増加していることがみとれる。GPU dual (SLI) と GPU single の速度比は 500 点で 1.4 倍になり、表には明示していないが、1,000 点では 1.1 倍にまで落ちる。

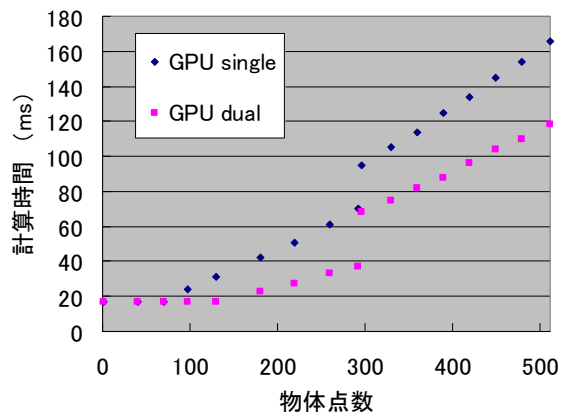


図 4 : 物体点数と計算時間

(ホログラムサイズ : $1,024 \times 1,024$ (約 100 万画素))

このような制限もあるが、GPU が CGH 計算に有効であることは確かであり、現時点においても、物体点数を限ればリアルタイムシステムを構築することが可能である。このことは、当該分野の研究を促進する一つの手段になり得るものと考えられる。

また、GPU は現在も進化を続けており、例えば 4 つ同時に使用できる Quad SLI も発表され、更なる高速化と物体点数の向上が期待される。

参考文献

- [1] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba and T. Sugie, "A special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography", *Opt. Express*, 13, 1923-1932 (2005).
- [2] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit", *Opt. Express*, 14, 603-608 (2006).