

LJ-006

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

Parallelized Special-Purpose Computer HORN-5 for Electroholography toward Real-Time Reconstruction

伊藤 智義^{†*} 下馬場 朋禄[‡] 杉江 崇繁[‡] 増田 信之[†]
Tomoyoshi Ito Tomoyoshi Shimobaba Takashige Sugie Nobuyuki Masuda

1. まえがき

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る。ステレオ立体視法のように両眼視差を利用する必要はなく、目に負担をかけることもないため、究極の三次元映像技術であるといわれる。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) と呼ばれている。したがって例えば、コンピュータ上で作成した三次元物体を数値計算によってホログラムに変換して再生を行えば、空間中に三次元像を再生できる。しかしホログラフィで扱う情報量は膨大であり、動画像システム (いわゆる立体テレビ) の実用化は困難な状況にある。

図 1 は本研究室で再生した電子ホログラフィの例である。この三次元像は 10,000 点で構成されており、ホログラムの表示には、画素間隔 $10\mu\text{m}$ 、解像度 $1,400 \times 1,050$ の高精細反射型液晶ディスプレイ (LCD) を用いた。参照光源には RGB 三原色の発光ダイオード (LED) を使用してカラー再生した。ホログラムの作成には (物体点 \times ホログラム点) に比例する計算量が必要になり、CGH 用の高速アルゴリズムを用いても、図 1 のホログラムを 1 枚作成するのに、Dual CPU (Xeon 2.66GHz \times 2) 搭載の Personal Computer (PC) で 52 秒を要した。

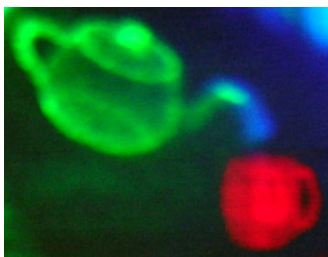


図 1 ホログラフィ再生例 (カラー)

私たちの研究室ではこの計算時間の短縮をめざしてホログラフィ専用計算機システム HORN (HOlographic ReconstructioN) の研究・開発を行っている。今回、PC の 280 倍の速さで CGH を作成するホログラフィ専用計算基板 (HORN-5 基板) を開発し、この基板を 8 枚並列に動作させて、ビデオ・レート (30 枚/秒) の動画像再生を行った結果を報告する。

^{†*} 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

2. 大規模 FPGA による HORN-5 基板

HORN-5 基板は大規模 FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いて開発を行った。これまでもいくつかの分野で、ある数値計算を目的とした専用計算機システムが開発されているが、成功例の多くは、専用 LSI を開発して計算速度を大幅に向上させている。専用 LSI は FPGA に比べて、数倍~10 倍程度、効率のよいハードウェア設計を可能にする。しかし専用 LSI の開発は、初期コストが高価なこと (数千万~数億円) と開発期間が長いこと (1~2 年) が問題となっている。それに比べて FPGA は、10~100 分の 1 程度の開発コストと数ヶ月程度の開発期間しか要しないため、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、実装効率が依然として問題として残っている。特に数値計算では多用される乗算は回路面積が大きく、1 チップに多数実装できない。そこで計算効率を上げるためには乗算器を減らすなどの工夫が必要である。

私たちは、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て、乗算を 2 回までに減らし、残りはすべて加算だけで並列計算が行えるアルゴリズムを開発した。その概要を以下に簡単に示す。

電子ホログラフィは表示装置の制約から視域が狭いため、次式のようなインラインホログラムから導かれる式を用いて計算することができる。

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

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。 A_j は物体点の光の強度、 λ は参照光の波長である。さらに $z \gg x, y$ という条件を設定してフレネル近似を行い、ホログラムの画素間隔 p で各変数を規格化すると以下の漸化式が得られる。

$$I(X_{\alpha+k}, Y_\alpha) = \sum_j A_j \cos(2\pi \Theta_k) \quad (2)$$

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

$$\Delta = \frac{p}{\lambda Z_j} \quad (3)$$

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k + \Gamma_k, \quad \Gamma_{k+1} = \Gamma_k + \Delta \quad (4)$$

図2で示すように、まずある1点 α でのホログラム強度を(3)式を用いて行う(このとき、乗算を2回行う)。X軸方向の残りのホログラム点に関しては、(4)式を用いて漸化式の加算のみで行う。端点まで来て次の行に移るときは、Yに1を加えて上記の手順を繰り返す。

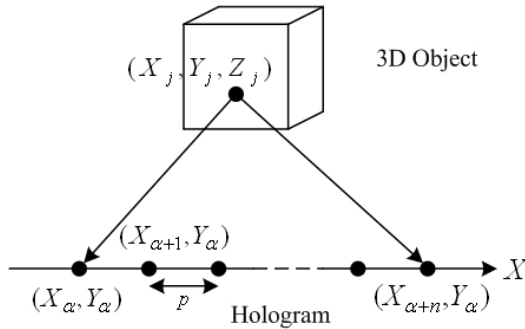


図2 漸化式によるCGH計算

HORN-5基板は、PCI基板上にザイリンクス社製大規模FPGA、XC2VP70(700万ゲート)を4個搭載して開発し、1基板上に上記アルゴリズムによるCGH計算回路をパイプライン方式で1024個実装した。PCのPCIコネクタに差し込んで使用する。PCIの制御用チップとして、ザイリンクス社製FPGA、XC2VP1000(100万ゲート)を基板上に実装した。

100MHzで動作し、PCの280倍の速さでCGH計算を行う。図1のホログラムを0.18秒で計算した。HORN-5基板を図3に示す。

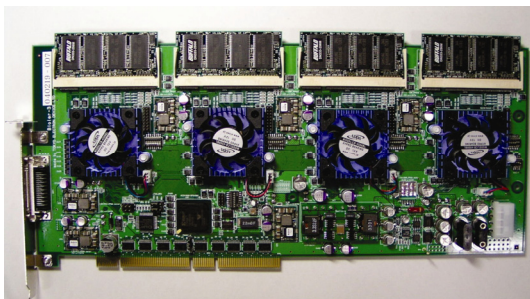


図3 HORN-5基板

3. 並列HORN-5システム

CGHの計算はホログラム各点で並列に行うことが可能である。そこで次に、リアルタイムのホログラフィ再生を行うために、HORN-5基板を複数並列動作させる高並列型のクラスタシステムを構築した。その構成を図4に示す。

ホスト計算機システムとして用いたのは4ノードのPCクラスタである。各ノードはDual CPU(Xeon 2.66GHz×2)搭載のPCとし、PC間はギガビットのイーサネットで接続した。1ノードに2枚のHORN-5基板を装着し、合計で8枚のクラスタシステムを構成した。クラスタ全体でのCGH計算回路数は8,192個である。

Node0のPCに全体のホスト計算機としての役割を割り当て、コンピュータ上で作成した三次元物体座標を各ノードに転送する。ノード間の転送速度は実測で90MB/sであ

ったので、10,000点の座標データを転送する時間は0.01秒程度と小さい。転送されてきた物体座標データを同時に参照して、各ボードが割り当てられた領域のホログラムを同時に作成する。並列化による転送速度の負荷を増大させないために、各HORN-5基板で計算した結果はLVDS(Low Voltage Differential Signaling)バスを通して直接表示システムに送ることができるようにした。

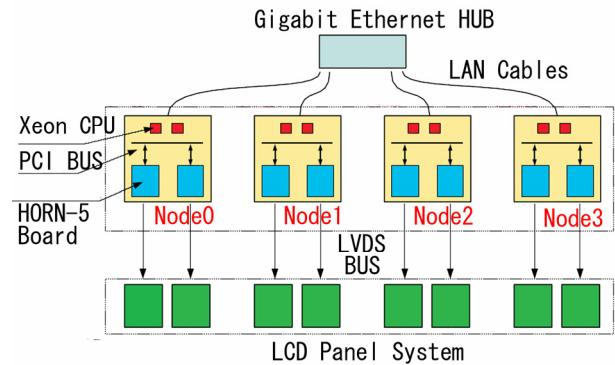


図4 HORN-5基板によるクラスタシステム

このクラスタシステムは、図1のCGHを0.025秒で生成し、PCに比べて2,100倍の速さを記録した。これは40枚/秒の速度であり、リアルタイムの動画再生を実現する。

4. まとめ

電子ホログラフィによる三次元動画システムを実用化するためには、視域や再生像のサイズを大きくするなど、今後さらに表示系の改善も必要である。表示系が改善されてくると必然的に画素数も多くなり、計算負荷がさらに大きくなる。本研究の専用計算機システムはスケラブルに並列度を上げることが可能であるため、CGH生成の計算高速化については非常に有用であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Ito, T. Shimobaba, H. Godo and M. Horiuchi: "Holographic reconstruction with a 10- μ m pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light", *Opt. Lett.*, 27, 1406-1408 (2002).
- [2] H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference," *Proc. SPIE* 3956, 48-55 (2000).
- [3] K. Matsushima and M. Takai: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference," *Appl. Opt.* 39, 6587-6594 (2000).
- [4] T. Shimobaba and T. Ito: "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition," *Comp. Phys. Commun.*, 138, 44-52 (2001).
- [5] J. Makino, T. Fukushige, M. Koga and K. Namura: "GRAPE-6: The massively-parallel special-purpose computer for astrophysical particle simulations," *Publ. Astron. Soc. Japan*, 55, 1163-1187 (2003).