

10万点の動画ホログラフィを可能にする専用クラスタシステム Special-Purpose Cluster System for Holography toward 100 Thousand Points Reconstruction

市橋 保之[†] 伊藤 智義[‡] 白木 厚司[†] 増田 信之[†] 杉江 崇繁[§]
Yasuyuki Ichihashi Tomoyoshi Ito Atushi Shiraki Nobuyuki Masuda Takashige Sugie

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(Computer Generated Hologram: CGH)という。本研究ではCGHを高速に生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]。本研究では、HORN-5で開発されたCGH専用のHORN-5ボードを多数並列化して、10万点で構成された物体の三次元動画再生が可能な計算速度を実現する。

2. CGHの作成

CGHの干渉縞は、物体の座標から、以下の式で求めることができる。

$$I(x_a, y_a) = \sum_j^N \frac{2A_j B_0}{r_{aj}} \cos\{k(r_{aj} - x_a \sin \theta_j)\} \quad (2.1)$$

I はホログラム上の点 (x, y) における光の強度を、 A, B はそれぞれ物体光、参照光の振幅を、 r_j は物体とホログラムの距離を、 θ_j は参照光のホログラムへの進入角度を、 k は波数を表している。物体点が N 個ある場合には、式(2.1)を j について N 回足し合わせればよい。

ここで、 $A=B=1$ とし、参照光はホログラム面に垂直に入射する($\theta=0$)として、さらに、物体とホログラム面との距離を十分大きくとると、次の近似式が成り立つ。

$$I(x_a, y_a) = \sum_j^N \cos(kr_{aj}) \quad (2.2)$$

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、(2.3)式に示す加算を主体にした漸化式の高速計算アルゴリズムを用いている。詳細については、参考文献[2]を参照されたい。

$$I(x_a, y_a) = \sum_{j=0}^{N-1} \cos(2p\theta_j) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \theta_n &= \theta_{n-1} + \Delta_{n-1} \\ \Delta_n &= \Delta_{n-1} + \Gamma \end{aligned}$$

HORN-5ボード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、(2.3)式を1408並列、つまり、1408点のホログラム点の干渉縞を同時に計算できる。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1408×1050)をおよそ0.1秒で生成する。なお仕様として、現在読み込むことのできる物体点の最大数は $2^{14}=16384$ 点であり、この条件のもとでCGHを作成した場合の時間である。これは、PC単体に比較して360倍速い演算速度である。

ただし、動画を再生する上での目安となるビデオレート(30fps)にはまだ達していない。そこで複数のボードを搭載したPCを並列化することで、計算速度をさらに向上させる。

3. HORN-5 クラスタ

3.1 クラスタ

クラスタとは、単一で稼動するコンピュータの集まりで、一つの計算資源として使用可能な並列もしくは分散システムである。そしてPCクラスタとは、PCをネットワーク結合して構築した並列計算機の一つである。本研究ではPCにHORN-5ボードを接続することで、専用計算機のクラスタシステムの構築をした。なおクラスタの環境はMPI(Message Passing Interface)により作成した。

このシステム概念図を図1に示すとともに、動作について以下で説明する。

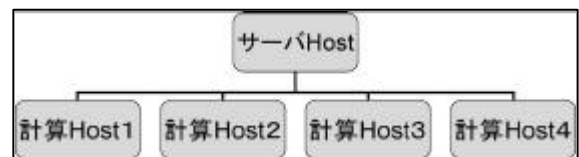


図1: HORN クラスタの概念図

- (1) サーバホストからMPIを立ち上げる
- (2) サーバホストから各計算ホストへ初期化の信号を送る
- (3) サーバホストから実行命令を出し、サーバホストに格納されている物体点データを読み込ませる
- (4) 各計算ホストでCGHの計算を実行する
- (5) 終わったら、次のCGHを作成するため(2)~(4)を必要な回数だけ繰り返す
- (6) 全てのタスクが終了したらMPIを終了させる

現在所有しているHORN-5ボードは16枚であるため、計算ホスト用のPCを4台用意し、各ホストに最大で4枚ずつ装着してシステムを構成した。また、作成するCGH

[†] 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

は 36 枚で評価を行った。つまり、各ホストに 9 枚ずつ CGH を作らせる並列方法をとった。また、比較のために、CGH 1 枚の作成時間も計測した。

3.2 CGH 作成時間

HORN クラスタによる CGH の作成にかかる時間を測定した。以下にその結果を示す。なお作成した CGH のサイズは 1408 × 1050 ピクセルである。

表 1: 1 ホストでの計算速度の比較

ボードの枚数	作成した CGH 枚数	計算時間 [秒]	高速化率
1	1	0.116	1.00
1	36	4.16	1.00
2	1	0.0655	1.77
2	36	2.33	1.79
3	1	0.0507	2.29
3	36	1.78	2.35
4	1	0.0449	2.58
4	36	1.55	2.69

表 1 は、16384 点の物体点から CGH を作成したときに、計算にかかる時間を測定したものである。高速化率は、ボード 1 枚での CGH を作成した時間を 1 とし、何倍速くなったかを示した。

作成した CGH が 1 枚から 36 枚に増えたときは、ボードの枚数に関わらず、計算時間は 34 ~ 36 倍となっており、1 枚作るよりも連続して作る方が、効率が良くなっている。

一方、同じ枚数の CGH を作る時に、ボードが増えていったときの計算時間を見ると、ボードを 4 枚使用しても 1 枚のときの 2.7 倍程度しか効率が上がっていない。これは、ボードに物体点の位置情報を読み込ませる時に、一度に複数のボードに読み込ませていないからである。PCI は複数のデバイスを接続した場合、マスタ権限を持つものだけが通信を行えるため、同じデータをブロードキャストで送る仕様には通常なっていない。しかし、ボード側で設計を変更することでブロードキャストの通信は可能であり、現在、その変更を行っているところである。

表 2: 専用計算機を並列化したときの計算速度の比較

ホスト	1 台	2 台	3 台	4 台
ボード 1 枚	4.16	2.08	1.39	1.04
ボード 2 枚	2.32	1.17	0.779	0.585
ボード 3 枚	1.78	0.891	0.596	0.448
ボード 4 枚	1.55	0.779	0.521	0.393

[単位: 秒]

表 2 は、16384 点の物体点から 36 枚の CGH を作成したときに、さらにクラスタ化した際の計算時間を表している。なおホストが 1 台のときの結果は、表 1 の作成 CGH 枚数が 36 枚のときと同じである。

表 2 より、クラスタ化により計算時間が線形に短縮されていることが分かる。ただ、上述した PCI での通信のロスのため、計算ホストが 4 台、各ホストにボードが 4 枚 (計 16 枚) の状態でおよそ 10.6 倍の数値になっている。またク

ラスタ化の際に PCI と同様の通信ロスが発生していない理由は、ネットワーク上では各計算ホストにブロードキャストで通信可能だからである。

また、リアルタイムでのホログラフィによる動画再生という観点から見ると、表 2 に関して言えば計算時間が 1 秒を切っていれば、ビデオレート (30fps) を達成しているといえる。PC 1 台では 1 秒を切れておらず、またボードを増やしても PCI での通信ロスが大きいため、高速化に際しては効率が悪い。それに比較して、クラスタでは計算時間が線形に短縮されているため、容易に計算時間 1 秒を切る事ができている。

4. むすび

4.1 計算時間の理論値

現在のクラスタシステムで、上限である 16384 点の物体像に対してビデオレートでのリアルタイム動画再生を行えることが確かめられた。HORN-5 ボード 16 枚を並列化したときの速度は、PC 単体に比べておよそ 3600 倍に達した。しかしある程度複雑な物体を再生するには、10 万点程度の計算が期待される。システムの上限を 10 万点に変えることは容易である。そこで 10 万点からなる物体を計算する際にかかる計算時間について考察する。

物体点数を N 、計算ホストの台数を P 、1 ホストあたりの FPGA ボードの枚数を B 、作成ホログラム枚数を H とおくと、計算時間の理論値は次式で求まる。

$$t = \left(6.33 \times 10^{-6} \times \frac{N}{B} + 1.58 \times 10^{-7} \times N \times B \right) \times f\left(\frac{H}{P}\right) \quad (4.1)$$

$f(x)$: x を小数点以下切り上げ

式 (4.1) より、 $N = 100000$ 、 $B = 4$ 、 $H = 30$ 、 $P = 4$ とすると $t = 1.77$ [秒] となる。また PCI での通信ロスが改善された場合、式 (4.1) の第 2 項の “ $\times B$ ” がなくなるので、 $t = 1.39$ [秒] となる。この場合フレームレートはおおよそ 22fps となり、10 万点でも動画再生が十分可能な計算速度が見込める。

今後は HORN-5 を 10 万点計算できるように改良した上で、計算時間を測定し理論値と比較する。そして安定した動画再生を目指してさらなる計算速度の向上をしていきたいと考えている。

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”, Optics Express, 13, pp.1923-1932 (2005)
- [2] 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)