

DHPTV 専用計算機システムの並列化による高速化

Special Purpose Computer with Highly Parallel Pipelines for Digital Holographic PTV

阿部 幸男[†] 増田 信之[†] 伊藤 智義[†] 濱田 悠[†] 佐竹 信一[§] 功刀 資彰[¶] 佐藤 一穂^{||}

Yukio Abe Nobuyuki Masuda Tomoyoshi Ito Yu Hamada Shin-ichi Satake Tomoaki Kunugi Kazuho Sato

1. まえがき

流れ現象の解明と制御は、科学技術の発展に必要とされる大切な技術である。トレーサ粒子の追跡および個々の粒子像を意識した手法は PTV (Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡法) と呼ばれ、この PTV にデジタルホログラフィ技術を応用させた手法を DHPTV (Digital Holographic PTV) と呼ぶ。この手法では、奥行きの広い三次元測定、非常に多くの粒子像の同時撮影、複数の撮影物体の多重記録などが可能となる。このシステムを構築するにあたり様々な問題点が浮上する。その中でも、三次元情報を記録するホログラムを撮影する際にかかる時間に比べるとホログラムから再生する際に時間を費やしすぎるとい点が挙げられる。その問題点を解決するために、我々のグループでは、この計算処理を高速に行うための専用計算機の開発を行ってきた [1]。

しかし、今までは1枚のFPGA(Field Programmable Gate Array) ボードにつき4つあるFPGAの1つしか用いてなかった。そこでボードとPC間を高速通信できるようにし、4つのFPGAで並列計算を行い、より速く計算できるように改良した。さらにボードを複数枚使用して、ボードの並列化によりさらに高速に計算できるようにした。本研究では、設計した専用計算機の回路を大規模FPGAボード「HORN-5」[2]に実装して動作させた。

2. デジタル・ホログラフィック PTV 専用計算機

DHPTVでは、トレーサ粒子を加えた流体の像をホログラムで記録し、数値計算により三次元像を再生して流れを解析する。この手法は、流体の速度ベクトルを三次元で得ることができるという利点があるが、ホログラムの再生に膨大な計算量を必要とする。そこで、この計算を高速に行うために専用計算機FFT-HORNを開発した。

ホログラムからの再生像は、光の回折によって得られ、フレネル-キルヒホッフ回折積分式を基にフレネル近似を行い、次のように再生式を導くことができる。

$$\phi(x_i, y_i) = \int_{-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \int_{-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} I(x_\alpha, y_\alpha) g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha) dx_\alpha dy_\alpha \quad (1)$$

ただし $g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha)$ は、

$$g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha) = \frac{\exp(ikz_i)}{i\lambda z_i} \exp\left[\frac{ik}{2z_i} \{x_{i\alpha}^2 + y_{i\alpha}^2\}\right] \quad (2)$$

[†]千葉大学大学院工学研究科

[§]東京理科大学基礎工学部

[¶]京都大学工学系研究科

^{||}豊田自動織機

とする。ここで、 $\phi(x_i, y_i)$ は再生空間の強度、 x_i, y_i, z_i は再生空間内の座標、 $I(x_\alpha, y_\alpha)$ はホログラム面上の光の強度、 λ は光の波長、 k は $k = 2\pi/\lambda$ で表される光の波数、 x_α, y_α はホログラム面上の座標、 N はホログラム面と再生面の縦と横のピクセル数を表す。

式(1)は二次元の畳込積分の形になっており、フーリエ変換を行っていくと、

$$\Phi(n, m) = \hat{I}(n, m) G(n, m) \quad (3)$$

となる。ここで、 $\Phi(n, m)$ は $\phi(x_i, y_i)$ のフーリエ変換、 $\hat{I}(n, m)$ は $I(x_\alpha, y_\alpha)$ のフーリエ変換、 $G(n, m)$ は $g(x_i - x_\alpha, y_i - y_\alpha)$ のフーリエ変換である。

本研究では、図1に示す光学系をデジタル・ホログラフィ再生の対象とした。この光学系において、ホログラムの再生像は次の手順で求めることができる。

1. ホログラムを二次元フーリエ変換する
2. 奥行き z_i の面を再生するためのフィルタ関数 $G(n, m)$ を1.の結果に乗算する
3. 2.の結果を二次元逆フーリエ変換する

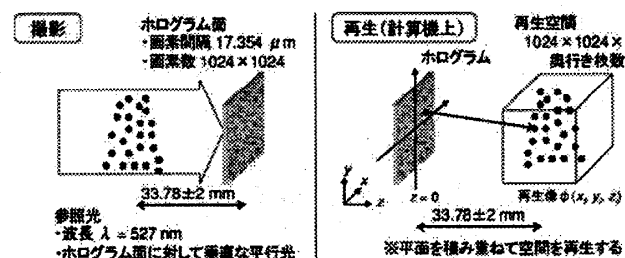


図1: ホログラムの撮影と再生の概略図

FFT-HORNの計算パイプラインを図2に示す。計算部は、マルチプレクサで配線を切り替えながら5つのステージに分けて計算を行う。二次元フーリエ変換は、一次元フーリエ変換を横方向および縦方向に行うことによって計算する。この専用計算機は133MHzで動作し、全ての計算は固定小数点で行い、そのビット数は図中のデータ線の上に記述してある。

3. FFT-HORNの並列化

FFT-HORNの並列化では次のことを行った。

- HORN-5 ボードとホスト PC の通信の高速化
- FPGA の並列化
- FPGA ボードの並列化

HORN-5 ボードには、演算用FPGAと通信用FPGAが搭載されていて、ホスト PC と PCI バスで接続され

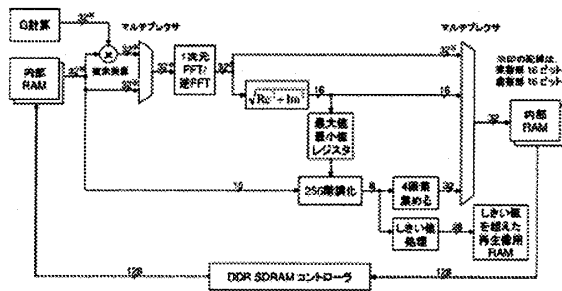


図 2: FFT-HORN ブロック図

ている。従来の専用計算機では HORN-5 ボードとホスト PC 間の通信は、シングルデータ転送となっている。そのため、FPGA を並列させてより速く計算させようとしても、FPGA から PC ヘデータへの再生面転送の通信時間がネックとなり、並列化しても計算時間はほとんど短縮できない。よって、通信用 FPGA にバースト転送、バスマスタ通信の機能を付加させて、再生面転送の時間を減らした。このことから計算時間は 24.20ms となり、通信時間は 0.53ms となり、その比は約 50:1 となり、理論上約 50 チップまで並列計算しても通信時間が並列計算による高速化の妨げにならないようになった。

4 ボードを並列に計算を行う場合は、図 3 のような計算の流れになる。このように、FFT-HORN が計算を行っている間に、PC との通信を行うことが可能になった。

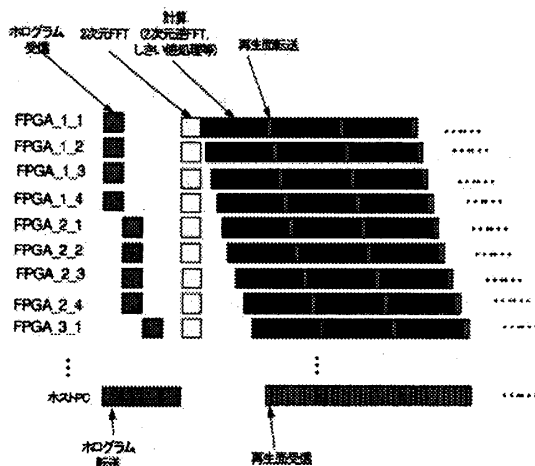


図 3: 並列時の計算の流れ

表 1 は計算速度の比較である。しきい値処理を行って約 1 万点の再生点の結果を得る場合、並列無しでもパソコン単体 (CPU : Intel Pentium 4, 3.2 GHz, メモリ : 2 GB) よりも 5 倍高速に計算できた。それを通信高速化することでさらに 1.6 倍高速化できた (ソフトウェアの 7.9 倍)。FPGA を 4 つ並列計算させることでさらに 3.9 倍 (ソフトウェアの 31.3 倍) 高速化でき、ボードを 4 枚並列することでさらに 3.36 倍 (ソフトウェアの 105 倍)

高速化することができた。また、ホログラムを再生した結果の一例を図 4 に示す。ソフトウェアと専用計算機で同じ位置に粒子の像が再生されていることがわかる。

表 1: 計算時間の比較

	ソフトウェア	通信高速後	1 ボード 4FPGA	4 ボード 4FPGA
時間 [s]	196.76	24.81	6.29	1.87
高速化率	1	7.9	31.3	105.2

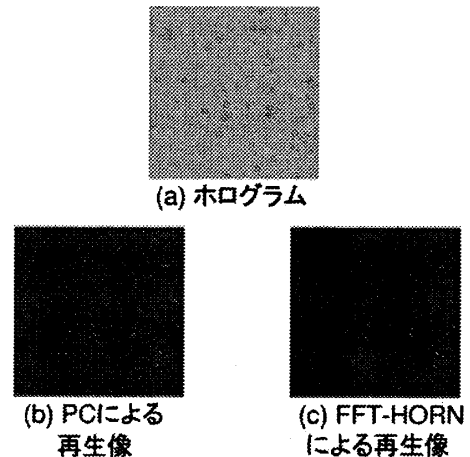


図 4: 再生像の比較

4. まとめと今後の課題

本研究によって、粒子追跡のための DHPTV における計算を FPGA に実装し、さらに FPGA の並列化、FPGA ボードの並列化を行い、ソフトウェアに比べて 100 倍以上という大幅な時間短縮ができた。この計算速度ではリアルタイムに流体の流れ場を解析する速度には足りないが、流体の撮影とその検証の時間を減らすことができ、三次元流速計測システムに対して有用であると考えられる。今後の課題は撮影を行っている実験系のグループと協力してホログラム撮影から空間の再生を一連に行えるシステムをつくることである。

5. 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (C)(課題番号 20500048) による。

参考文献

[1] N. Masuda, T. Ito, K. Kayama, H. Kono, S. Satake, T. Kunugi and K. Sato, Opt. Express, 14, 587-592 (2006)

[2] T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba and T. Sugie, Opt. Express, 13, 1923-1932(2005)