

C-014

ホログラフィを用いた三次元流速計測専用計算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

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

Nobuyuki Masuda Tomoyoshi Ito Shinjiro Tanaka Yukio Abe Shin-ichi Satake Tomoaki Kunugi Kazuho Sato

1. まえがき

流れ現象の解明と制御は、科学技術の発展において様々な面で必要とされる重要な技術である。流体中のトレーサ粒子の追跡、および個々の粒子像を意識した流れの解析手法を PTV (Particle Tracking Velocimetry: 粒子追跡法) と呼ぶ。本研究では、この PTV にデジタルホログラフィ技術を応用させた DHPTV (Digital Holographic PTV) という技術に注目する。DHPTV はホログラフィを PTV に適用することによって、奥行き幅広い三次元測定や非常に多くの粒子像の同時撮影などを可能とする技術である [1]。

DHPTV において、撮影したホログラムから再生像を得る計算にかかる時間は、ホログラム撮影にかかる時間に対して、膨大である。その問題を解決するために、本研究室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いる [2, 3]。

さらなる高速化のために、専用計算機の並列化、および、PC クラスシステムを使用することで計算速度の向上をさせた。

2. デジタル・ホログラフィック PTV 専用計算機

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する。

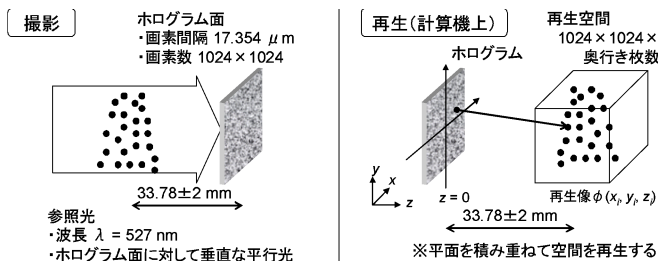


図 1: 計算対象とする光学系

ホログラムによる再生像は、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、次のように再生計算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、

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

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 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ で表される光の波数、 x_α, y_α はホログラム面上の座標、 $x_{i\alpha}$ は $x_i - x_\alpha$ 、 $y_{i\alpha}$ は $y_i - y_\alpha$ 、 i は虚数単位、 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、フーリエ変換を行うと、

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

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 $g(x_{i\alpha}, y_{i\alpha})$ のフーリエ変換であり、以下のように表される。

ホログラムからの再生計算アルゴリズムとしてまとめると以下ようになる。

1. ホログラム $I(x_\alpha, y_\alpha)$ のフーリエ変換 $\hat{I}(n, m)$ を求める
2. $G(n, m)$ を求める
3. $\hat{I}(n, m)$ と $G(n, m)$ との積 $\Phi(n, m)$ を求める
4. $\Phi(n, m)$ の逆フーリエ変換 $\phi(x_i, y_i)$ を求める
5. z_i の値を変更してから 2~4 の手順を繰り返し、空間全体の $\phi(x_i, y_i, z_i)$ を求める

3. 専用計算機 FFT-HORN

専用計算機システム FFT-HORN は、本研究室で開発した HORN-5 ボード [4] を用いて実現される。このボードには通信用 FPGA として Xilinx 社の XC2V1000 (100 万ゲート) が 1 チップ、論理用 FPGA として Xilinx 社の XC2VP70 (700 万ゲート) が 4 チップ、DDR-SDRAM が 4 モジュール搭載されている。回路設計には、ハードウェア記述言語の VHDL を使用した。

DHPTV 専用計算機 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。2 次元フーリエ変換は、1 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 133.3MHz で動作させた。

[†] 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

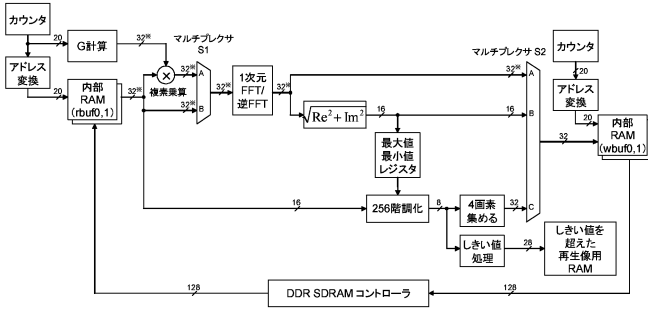


図 2: FFT-HORN の計算パイプライン

4. FFT-HORN の並列化

効率的な並列化を行うため、HORN-5 ボードとホスト PC 間の通信を高速化、効率化した。具体的には、通信用 FPGA にバースト転送・バスマスタ通信を実装することで転送を高速化し、計算結果をホスト PC に返す転送は計算時間で隠蔽できるようになったことで FPGA55 チップまでの並列が効率的に動作するようになった。また、ホログラム転送の無駄を省くことで転送を効率化し、転送量を従来の計算機システムの 1/4 にすることに成功し、転送時間は 3.96 倍高速となった。

本研究では、HORN-5 ボード上の 4 つの FPGA を使用するチップの並列化、HORN-5 ボードを複数枚使用するボードの並列化、HORN-5 ボードを複数枚挿した PC を複数台使う並列化をそれぞれ行った。構築したクラスタシステムを図 3 に示す。

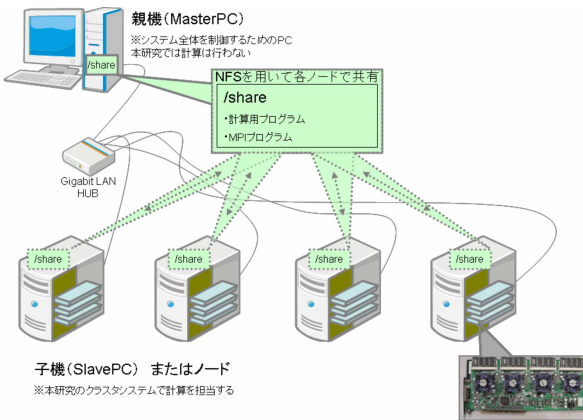


図 3: クラスタシステム概略図

5. 性能評価

1,024×1,024 ピクセルのホログラム面から 1,024×1,024 ピクセルの再生面を奥行き方向に 1,024 枚再生を行う計算において、PC (CPU Core2Duo E8400 3.0GHz メモリ 4.00GB) によるソフトウェア計算と本研究のシステムの計算時間を比較した結果を表 1 に示す。専用計算機システムによる計算においては、計算結果を適切な値で閾値処理している。高速化比はソフト

ウェア計算を 1 とした比率である。また、ソフトウェアによる再生像を図 5、専用計算機システムによる再生像を図 6、それらの入力に用いたホログラムを図 4 に示す。

表 1: 計算時間の比較

| PC 単体のシステム | ソフトウェア | 1board | 3board |
|------------|------------|------------|--------|
| 計算時間 [sec] | 84.72 | 6.13 | 2.21 |
| 高速化比 | 1 | 13.8 | 38.3 |
| クラスタシステム | 4PC×1board | 4PC×3board | |
| 計算時間 [sec] | 1.64 | 0.77 | |
| 高速化比 | 51.7 | 110.0 | |



図 4: ホログラム 図 5: ソフトウェアによる再生像 図 6: ハードウェアによる再生像

6. まとめと今後の課題

従来の計算機システムを改良することにより高並列型の DHPTV 専用計算システムの開発に成功した。これにより、開発したクラスタシステムを用いた再生計算では最大で 12 枚の HORN-5 ボードを効率的に動作させることが可能となった。このシステムを用いることで、汎用 PC によるソフトウェア計算に比べて最大で 110 倍の計算速度を達成した。

今後の展望として、本研究のシステムは現在実験系システムの開発を進めている東京理科大学で試験的に使用しているので、必要に応じて改良を加え、さらに、ホログラム撮影から空間の再生まで一連の処理を行えるシステムを開発することなどが挙げられる

7. 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] Shin-ichi Satake *et al.* Opt. Review, Vol.11, No.3, pp.162-164 (2004)
 [2] N. Masuda *et al.* Opt. Express, 14, 587-592 (2006)
 [3] Yukio Abe *et al.* Opt. Express, Vol.16, pp.7686-7692 (2008)
 [4] T. Ito *et al.* Opt. Express, 13, pp.1923-1932(2005)