マイクロデジタルホログラフィック流速計を用いた可視化計測に おける PC グリッドによる高速並列処理に関する研究*

佐竹 信一^{*1}, 安楽 隆史^{*2}, 金森 宏之^{*2}
功刀 資彰^{*3}, 佐藤 一穂^{*4}, 伊藤 智義^{*5}

Study on High Speed Parallel Algorithm Using PC for Visualization Measurements by Micro Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry Shin-ichi SATAKE^{*6}, Takafumi ANRAKU, Hiroyuki KANAMORI, Tomoaki KUNUGI, Kazuho SATO and Tomoyoshi ITO

^{*6} Department of Applied Electronics, Tokyo University of Science,
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba, 278-8510 Japan

Micro digital holographic particle tracking velocimetry with high-speed system is constructed by PC grid environment, which is used by Windows XP with AD-POWERS as parallel tool. Two algorithms for high-speed system are evaluated under the same PC grid environment. Both methods are based on the digital hologram algorithm. The first method is a division algorithm based on the time developing for the measurements. The second is a division algorithm based on the spatial reconstruction for the measurement. In case of the former, the performance is achieved for 4.7 times using 5 PC. The utilization of present system is possible to compute the huge hologram images on-site at the experimental facility.

Key Words: Parallel Algorithm, Image Processing, Digital Holography, Microflow

1. は じ め に

幅が 100 ミクロン以下のマイクロチャンネル内の流体現象を 3 次元リアルタイムで非接触計測することは、マイクロリアクター、血流運動、微小生物の鞭毛挙動などにおける熱物質輸送機構を解明する上で極めて重要である。例えば、生体の基本構成要素である細胞や血球の空間スケールはサブミクロンからサブミリメートルの範囲にあり、従来の可視化計測手法では定常状態の観察や 2 次元面内の流速分布の計測に留まり、血流運動のように本質的に非定常 3 次元的挙動の把握が重要である場合には適用することができない。このため、微小空間スケール内で高速時間分解可能な新たな可視化計測手法の確立が急務である。

現在、筆者らが開発した高速時間分解マイクロデジタルホログラフィック流速計 (m-DHPTV) と高繰り返しレーザと高速度 CCD カメラを組み合わせることで、マイクロスケールでの 3 次元流れ場の非定常計測を行うことが可能となった⁽¹⁾。しかしながら、この計測で得られるデータの処理には膨大な計算処理時間が必要となる。例えば、1 枚 100 万画素のホログラム画像の再生処理を行うには、Pentium4 を搭載した PC1 台

を使用した場合、1 フレームあたり高速フーリエ変換 (FFT) を用いて 600 秒かかる。1000[frame/sec] で撮影を行うため、実撮影時間 1 秒間の 3 次元動画像を得るための総時間は 600 秒 × 1000 (画像枚数) = 600000 秒 (約 167 時間 = 7 日) にも及ぶ。

ホログラム画像の高速処理手法としては筆者らによる並列処理システムを用いた例⁽²⁾があり、スーパーコンピュータ Altix を用いて 64 台並列で同様の処理を行い、1 フレーム当りの計算時間を 39 秒まで短縮することが出来た。しかし、この場合では MPI という並列処理言語を用いなければならず、加えてクラスタマシンやスーパーコンピュータのような高価で大規模な並列計算機も必要になる。また実験室実験での計測では、得られたデータを随時処理し、その結果をフィードバックすることでより効率的な計測をすることが出来るため、実験室外部にある並列計算機を用いてのオフサイト処理よりは、実験室内でのオンサイト処理の方が好ましい。

このような要求を実現する案としては、実験現場の遊休状態 PC を活用し、さらに台数に比例した処理を実現させるグリッドコンピュータの利用が考えられる⁽³⁾⁽⁴⁾。グリッドを構築するソフトウェアとしては Globus⁽⁵⁾や Condor⁽⁶⁾が挙げられるが、これらは大量のデータを扱うような大規模なシステムを構築するため

* 原稿受付 2007 年 3 月 27 日。

^{*1} 正員、東京理科大学基礎工学部 (☎ 278-8510 野田市山崎 2641)。

^{*2} 東京理科大学基礎工学部。

^{*3} 正員、京都大学大学院工学研究科 (☎ 606-8501 京都市左京区吉田本町)。

^{*4} 正員、(株)豊田自動織機 (☎ 448-8671 刈谷市豊田町 2-1)。

^{*5} 千葉大学工学部 (☎ 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)。

E-mail: satake@te.noda.tus.ac.jp

Fig. 1 Optical setup

には適しているものの、比較的少量のデータを扱う小規模システムを手軽に構築するには適していない。

そこで、小規模かつ柔軟なグリッドコンピュータとして大日本印刷株式会社の AD-POWERS を用いて分散ホログラム再生処理システムを構築した。AD-POWERS は遊休 PC を、一台の処理の統括を行う PC (以後マスター PC と呼称する) と複数台の与えられたジョブを行う PC (以後スレーブ PC と呼称する) に割り振ることによって分散処理環境を構築するソフトウェアである。

2. マイクロデジタルホログラフィック流速計

再生に使用する画像は、筆者らが開発した高速時間分解マイクロデジタルホログラフィック流速計によって幅 100[μm]、深さ 40[μm] のマイクロチャンネル内の流れを撮影したものである。図 1 に今回の計測の光学系を示す。光学系は 1 台の高繰り返しレーザ (波長 527[nm]、発光周期 1[kHz])、高速度 CCD カメラ (1024×1024[pixel]、1000[frame/sec])、対物レンズ (40 倍、開口数 0.55)、ミラー、マイクロチャンネル、シリンジポンプで構成される。粒径 1[μm] の微粒子を混入した水をシリンジポンプによって一定流量でマイクロチャンネル内に流し、レーザ光をマイクロチャンネルの下から透過させた。マイクロチャンネル内で微粒子によって回折されたレーザ光は、回折されなかったレーザ光と干渉して干涉縞 (ホログラム) を形成する。この微粒子のホログラムを対物レンズで拡大し高速度カメラで記録した。ホログラムには光の強度と位相の情報が含まれているため、得られた画像を再生処理することでマイクロチャンネル内の 3 次元空間を取得することができる⁽¹⁾。

本手法の不確かさは ANSI/ASME PTC 19.1 の不確かさ解析の手法⁽⁷⁾に基づいて行われた⁽¹⁾。図 1 におい

Fig. 2 Particle hologram in micro-channel (enlargement)

て、マイクロチャンネルの代わりにトレーサ粒子を表面に乗せたガラスプレートを取り付け、焦点から 30[μm] 離れた距離から 130[μm] 離れた距離までビエソ素子を用いたトラバース装置 (中央精機 NPS-347-S1、分解能 10[nm]、最大移動量 10[μm]) を用いて 1[μm] 刻みで撮影した。また、ガラスプレートの移動量はレーザ変位計 (キーエンス、LK-G35 分解能 50[nm]) によって測定し、再生距離と計測距離との誤差を求めた。要素誤差要因は校正に伴う誤差、データ収集に伴う誤差、データ処理に伴う誤差に大別され、ここではデータ収集に伴う誤差としてトラバースを行った際に生じる誤差、データ処理に伴う誤差としてホログラムを再生したときに生じる粒子座標の誤差について考えた。それぞれの誤差を統合し、各速度成分の不確かさを求めると、95% 包括度で以下ようになった。

$$U_{RSS,X} = \pm 1.600 [\text{mm/sec}]$$

$$U_{RSS,Y} = \pm 1.333 [\text{mm/sec}]$$

$$U_{RSS,Z} = \pm 9.914 [\text{mm/sec}]$$

マイクロチャンネルでは平均流速は 98.68 [mm/sec] であったため、Z 軸方向の不確かさは平均流速の 10.05 [%] となる。

3. ホログラム画像の再生処理の方法

図 2 に前述の流速計で撮影されたマイクロチャンネル内の粒子のホログラム画像を示す。このホログラム画像を再生し、粒子を抽出する過程を図 3 に示す。

Fig. 3 Hologram reconstruction algorithm

3.1 再生距離と断面数の指定 ホログラム再生における奥行き方向 (Z 方向) の再生距離を 45[μm] とし, 再生する最短の Z 軸方向の距離 (5[μm]) と最長の Z 軸方向の距離 (50[μm]) の間を 200 等分した。

3.2 高速フーリエ変換 (FFT) ホログラム画像をフレネル近似と高速フーリエ変換を用いて計算機上で再生した。再生に用いた式を以下に示す⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned}\Phi(I, J) &= \int_{-\frac{N_1}{2}}^{\frac{N_1}{2}} \int_{-\frac{N_2}{2}}^{\frac{N_2}{2}} H(x, y) G(I, J) \\ &\quad \times e^{-2\pi i(Ix + Jy)} dx dy \\ &= \hat{H}(I, J) G(I, J)\end{aligned}\quad (1)$$

但し, $\Phi(I, J)$, $H(x, y)$, $\hat{H}(I, J)$ はそれぞれフーリエ空間での再生像, 実空間でのホログラム画像, フーリエ空間でのホログラム画像を示す。 $G(I, J)$ はフレネル近似による伝達関数である。また, $G(I, J)$ の中にはホログラム画像を再生する距離 (Z 軸方向の距離) が含まれている。ここで, I, J, N_1, N_2 は X 軸方向のピクセル位置, Y 軸方向のピクセル位置, X 軸方向のピクセル数, Y 軸方向のピクセル数を示す。また, x は X 軸方向の位置, y は Y 軸方向の位置を示す。再生像は $\Phi(I, J)$ の逆フーリエ変換で求められるので, 1 枚のホログラム画像から 1 つの再生像を得るためには 2 回のフーリエ変換を行うことになる。

3.3 3次元空間の再構築 各再生距離で式 (1) を用いてホログラム画像を再生すると, 再生画像を Z 軸方向に積み上げた形式の擬似的な 3 次元空間を再現できる。再生された 3 次元空間では, 実体化した粒子と輝度値が Z 軸方向に伸びた形で現れる (図 3)。

3.4 XY 平面の最大輝度値データの作成 構築した擬似 3 次元空間において輝度階調を反転し, XY 平面の各点で Z 軸方向に輝度値の変化を調べ, 輝度値が最大となる Z 座標とその時の輝度値を記録した。

Fig. 4 Reconstructed particle in each z distance

Fig. 5 Reconstructed particles in micro-channel

3.5 粒子の導出 求められた 2 次元の最大輝度値データで粒子の識別を行った。ホログラム画像を再生すると, 再生距離によってトレーサ粒子のフリンジの大きさが変化するが, 再生距離がトレーサ粒子の存在する Z 座標に近いほどトレーサ粒子のフリンジが小さくなり, トレーサ粒子とほぼ同じ再生距離では再生画像内でトレーサ粒子が実体化する。図 4 は焦点面が 25[μm] のホログラム画像中の粒子を 20, 25, 30[μm] で再生したものである。

よって, 最大輝度値データ内で周囲よりも輝度値が大きく, かつ適切な閾値を超えた XY 座標を粒子として識別した。また, 輝度値が最大となる Z 座標をその粒子の Z 座標とした。図 5 にホログラム画像を処理して得られた 3 次元空間でのマイクロチャンネル内の粒子を示す。

4. ホログラム画像の分散処理手法

本研究ではホログラム再生の高速化の手段として, 各スレーブ PC に 1 枚のホログラム画像の処理を割り当てる時間分割法と, 1 枚のホログラム画像を Z 軸方向の距離で分割して複数台のスレーブ PC へ割り当てる空間分割法の 2 つを考案した。また, 空間分割法でスレーブ PC からのデータ転送量を削減する手法や, マスター PC での処理とデータ転送のタイミングが重ならないようにする手法を考案した。それぞれの手法の詳細を以下に述べる。

Fig. 6 Schematic viewgraph of time division method

Fig. 8 Schematic viewgraph of space division method with reduction of transfer data

Fig. 7 Schematic viewgraph of space division method

4.1 時間分割法 (T method : Time division method)

スレーブ PC にそれぞれ 1 枚ずつホログラム画像を割り当て、3.2 節から 3.5 節までの処理を 1 台の PC で行い、マスター PC へ 3 次元粒子座標を転送する形式である。1 台の PC が 1 フレームの画像から 3 次元粒子座標を導出する。図 6 に時間分割によるマスター PC とスレーブ PC の動作イメージを示す。

4.2 空間分割法 (S method : Space division method)

1 枚のホログラム画像を複数のスレーブ PC に割り当て、3.2 節から 3.4 節の処理をスレーブ PC 毎で分散して行う形式である。各スレーブ PC で作成された最大輝度値データをマスター PC へ転送し、そこで 3 次元粒子座標を導出する。

図 7 に空間を 2 分割した場合の空間分割によるマスター PC とスレーブ PC の動作イメージを示す。

この手法ではスレーブ PC からマスター PC へのデータ転送量がスレーブ PC1 台ごとにホログラム画像 1 フレームの処理につき 12MByte(1 ピクセルの最大輝度

値 (8[Byte]) × 画像サイズ (1024 × 1024) + 1 ピクセルの最大輝度値の Z 座標 (4[Byte]) × 画像サイズ (1024 × 1024)) に達するため、データ転送による待ち時間が多く、データ転送が重なると利用効率が低下してしまう。

4.3 データ転送量を削減した空間分割法 (SRD method : Space division method with reduction of transfer data)

空間分割法におけるデータ転送量の問題を改善するために、スレーブ PC からマスター PC へのデータ転送量を削減した手法を考案した。図 8 にデータ転送量を削減した空間分割法のマスター PC とスレーブ PC の動作イメージを示す。スレーブ PC からマスター PC へ転送するデータを削減するには、スレーブ PC から転送される輝度値データを適切な閾値で判定し、閾値を超えた最大輝度値データとその Z 座標のみを転送すればよい。

データ転送量を削減した空間分割法では、XY 平面の最大輝度値データに対して閾値を超えるかどうかの判別を行うため、通常の空間分割法よりも幾らか計算量が増加する。

4.4 空間分割におけるマスター PC の時間差処理法 (STD method : Space division method with time difference processing)

空間分割法ではマスター PC での粒子抽出処理が行われている間はスレーブ PC への新規タスクの割り当てが行われなため、スレーブ PC の利用効率は低下してしまう。そこでマスター PC の粒子抽出処理を始める前にスレーブ PC に新規タスクを割り当ててしまう時間差処理法を考案した。マスター PC の処理を割り込み関数 (onTimer 関数) 内で行うことによって、粒子抽出処理が行える状態になっても、onTimer 関数で定めた一定時間が経過するまで

Table 1 Specification of Master and Slave PC

	PC	CPU	Memory	Time[s]
Master		Celeron 2.4GHz	1GB	
	A	Pentium4 3.2GHz	2GB	235
Slave	B × 2	Pentium4 1.7GHz	256MB	615
	C × 5	CeleronD 2.53GHz	512MB	592

Table 2 Measurement case of time division method

	Running method	Using PC
Case 1	T	A,B × 2
Case 2	T	C × 5

粒子抽出の処理が開始されないようにする。粒子抽出が行われる前にスレーブ PC へ新たな処理を割り当てることが可能となるので、スレーブ PC に生じる待ち時間を短縮することが可能となり、全体の処理効率を向上する。

4.5 データ転送量削減と時間差処理法を組み合わせた処理法 (SRT method : Space division method with reduction of transfer data and time difference processing) 空間分割法において、データ転送量を削減する手法とマスター PC の時間差処理法はお互いに競合しない。そのため、これらの手法を組み合わせることで、より効率の良い計算を行うことが出来る。ただし、閾値判定の計算及び時間差処理の待ち時間の両方が発生するため、状況によっては速度が減少する可能性がある。

5. テ ス ト 環 境

計測に使用した PC の性能を表 1 に示す。表中の「Time[s]」は、スレーブ PC がホログラム画像を再生する最短距離と最長距離の間を 200 等分して再生し、粒子座標を取得するまでの処理にかかった時間である。今回は実際の環境を想定して故意に性能の異なる PC を用いて計測を行った。

使用した OS は WindowsXP の Home Edition 又は Professional Edition である。

マスター PC とスレーブ PC はルータ下に配置され、100BASE-TX で接続した。スレーブ PC は予め AD-POWERs を起動した状態にし、処理時間の計測は PC を占有して行った。また、処理を開始する前に画像を時間平均したグラウンド画像を作成した。

10 枚のホログラム画像を再生する最短距離と最長距離の間を 200 等分した各距離で再生し、すべての処理が終わるまでの時間を処理時間として計測した。測定は異なる性能のスレーブ PC を用いた場合と、同じ性能のスレーブ PC を用いた場合で行った。測定パターンを表 2、表 3 に示す。

Case 1 では、T method を用いて、異なる性能のスレーブ PC で、Case 2 では同じ性能のスレーブ PC で

Table 3 Measurement case of space division method

	Running method	Space partition	Using PC
Case 3	S,SRD	2 - 5	A
Case 4	S,SRD,STD,SRT	2 - 5	A,B × 2
Case 5	S,SRD,STD,SRT	2 - 5	C × 5

PC の数を変化させて計測を行い、並列化による処理速度の向上を測定した。Case 3 では、S method と SRD method のマスター PC への通信時間と、マスター PC での処理時間の比較をスレーブ PC-A で行った。Case 4 では、S method, SRD method, STD method, SRT method で異なる性能のスレーブ PC3 台を使用して、空間分割数を変化させて各 method の処理時間の計測を行った。Case 5 では同じ性能のスレーブ PC5 台で計測を行い、空間分割数を変化させて処理時間の計測を行った。

通信時間はスレーブ PC-A を用いて、ホログラム画像 10 枚の処理が終わるまでにかかった時間を測定し、その結果からスレーブ PC の処理時間、assignTask 関数(マスター PC からスレーブ PC へタスクを割り当てる関数)、initSlave 関数(スレーブ PC の初期化を行う関数)、getResult 関数(マスター PC へデータを転送する関数)を引いた時間とした。

T method においては 1 タスクの処理時間が長く、通信時間も短いため、計測は 1 回のみ行った。S method, SRD method, STD method, SRT method については 1 タスクの処理時間が短く、通信による待ち時間などで計測時間にばらつきが発生する。そのため複数回の測定を行い、最も処理時間の短かった結果を計測値として採用した。

6. 結果および考察

6.1 時間分割法による処理速度向上 Case 1 ににおける処理時間の変化を図 9 に、Case 2 の場合の処理時間を図 10 に示す。

T method ではマスター PC へのデータ転送量が小さい(再生後の粒子座標なので 1 枚のホログラム画像当り数十 kByte)ので、転送による待ち時間やマスター PC への負荷は小さくなる。また、S method, SRD method, STD method, SRT method のように同期をとる必要がないので、タスクの割り当て遅延が発生しない。よってスレーブ PC の台数が増えるごとに 10 枚のホログラム再生の総処理時間は小さくなる。

異なる性能のスレーブ PC を用いた場合には、スレーブ PC-A のみの時と比較して 3PC で約 1.7 倍の高速化が達成された。また、同じ性能のスレーブ PC を用いた場合には、5PC で 4.7 倍の高速化を達成した。

しかしながら、この方法では 1 枚当たりの処理速度

Fig. 9 Experimental time on T method for slave A to C in Case 1

Fig. 10 Experimental time on T method for slave D to H in Case 2

が向上する訳ではないため、少ない枚数のホログラム画像を高速で処理して計測結果の確認等を行う場合には適さない。

6.2 空間分割法による処理速度向上 まず、Case 3 において、S method と SRD method のマスター PC へのデータ転送に要する時間と、マスター PC での粒子抽出に要する時間の比較を行った。

スレーブ PC-A のみを用いた場合における、S method と SRD method のデータ転送に要する時間の比較を図 11 に示す。S method は分割数が増えるごとにデータ転送量が増加するため、それに比例して通信時間も増大している。対して SRD method はデータ転送の前に閾値によるデータ圧縮が行われるため、分割数を増やしてもほとんど通信時間は変化しない。

続いて、マスター PC における粒子抽出に要した時間の比較を、S method と SRD method について行った。図 12 に結果を示す。データ転送時間と同様に、S

Fig. 11 Communication time for 10 frame processing in S method and SRD method in Case 3

Fig. 12 Particle extraction time for 10 frame processing in S method and SRD method in Case 3

method よりも SRD method の方がデータ総量が小さいため、粒子抽出の時間も SRD method は分割数による影響がほとんどない。

この 2 つの理由により、空間分割法においては分割数が多い場合、SRD method (又は SRT method) を用いることで処理時間の短縮ができる。

最後に、Case 4、Case 5 におけるそれぞれの状況における各手法の処理時間をまとめる。

図 13 は、スレーブ PC-A と PC-B が 2 台の能力が異なる 3 台を用いた時の、Z 方向の分割数を変えた場合の処理時間の変化を示したものである。分割数が少ない場合は S method 及び STD method の総処理時間の方が短い、分割数が増えるにつれて SRD method 及び SRT method の方が短くなっていく。

Fig. 13 Comparison between number of partitions and processing time on S,SRD,STD,SRT method in Case 4

Fig. 14 Comparison between number of partitions and processing time on S,SRD,STD,SRT method in Case 5

これは前述したように、分割数が大きい場合は SRD method(又は SRT method)を用いた方がデータ転送時間と粒子抽出時間が小さいためである。分割数が小さい場合に S method 及び STD method の総処理時間が短くなるのは、閾値によるデータ削減に要する時間がデータ転送量及び粒子抽出時間の減少よりも大きかったためと考えられる。

S method と STD method の比較をしてみると、分割数が 3 の時を除いて、STD method の方が総処理時間が短い。分割数が 3 のときに総処理時間が長くなったのは最後のタスクが性能の低い PC に割り振られてしまったためと考えられる。SRD method と SRT method についても同様のことが言える。

図 14 は、同じ性能のスレーブ PC-C の 5 台を用いた時の分割数による処理時間の変化を示したものである。異なる性能のスレーブ PC を用いた場合と同様に、SRD method 及び SRT method の総処理時間が短いことが読み取れる。

同じ性能のスレーブ PC を用いる場合は、1 タスクを終了するタイミングが各スレーブ PC で同じになり易いので、マスター PC でのタスク待ちが発生する確率が高い。そのため、SDT method はすべての分割数において S method よりも総処理時間が短くなっている。SRD method と SRT method についても同様のことが言える。よって、空間分割数が大きくて 1 タスクあたりの時間が短く、同じ性能のスレーブ PC を大量に用い、マスター PC でのタスク待ちが頻繁に発生する場合には、STD method 及び SRT method を用いることで総処理時間の短縮ができるものと考えられる。

7. 結 言

m-DHPTV の最も計算時間のかかる再生処理について、オンサイト処理を目的とした PC グリッドのシステムを構築した。今回の計測により分かったことを以下にまとめる。

- (1) 時間分割法はマスター PC へ転送されるデータが小さいため、転送による待ち時間やマスター PC への負荷は小さい。また、同期の必要がないため、スレーブ PC の性能に大きな差があっても全体の処理スピードへの影響は小さい。同じ性能のスレーブ PC を用いて、5 台の PC で 4.7 倍の高速化を達成した。
- (2) 空間分割法は 1 枚分のデータを複数のスレーブ PC へ割り当てるため、1 枚当たりの処理速度の向上が見込める。また、粒子座標の取得はマスター PC の役割となるため、スレーブ PC は次々に未処理データの処理を行い、同期をとるための待ち時間は存在しない。このため、スレーブ PC を効率的に利用することが出来る。そして、単位タスクの大きさが小さいため、完全に PC を占有できないような状況においては有効である。
- (3) 時間差処理は 1 タスクにかかる時間が短い時やマスター PC の処理時間が長くなる時、つまり空間分割数が大きい場合に有効である。
- (4) 転送量削減は空間分割数が大きい場合に有効であり、時間差処理よりも大きく速度が向上する。但し、異なる性能の PC を用い、分割数が少ない時には逆に計算時間が増加する。

AD-POWERs は PC 占有による動作するタイプとスクリーンセーバー起動時に動作するタイプの 2 種類を選択することができる。PC を長時間占有できる場合には時間分割法を、スレーブ PC が多く、わずかな遊休時間を利用したい場合には空間分割法を用いることで効率の良い処理を行える。また、タイマー制御、転送量削減は構築した環境に合わせて利用することで更なる高速化を期待できる。

なお、時間分割法の知見は、m-DHPTV だけでなく通常の PIV, PTV の処理に対してもそのまま適応できるものと考えられる。空間分割法に関しては、たとえば一般的な二次元の PIV, PTV では画像分割の際に袖領域を適切に指定しなければならず、処理が複雑となり、計算量も大きくなると考えられる。しかし、m-DHPTV においては奥行き方向を分割するため袖領域を考慮する必要が無く、一般的な PIV, PTV と比べて高速な処理を行うことが出来る。

謝 辞

本研究は大日本印刷株式会社の『PC グリッドコンピュータに関する研究テーマ』に採択され、助成を受けた。記して感謝の意を表する。

本研究は文部科学省科学研究費若手研究 (B) (17760173) の援助を受けた。記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) S. Satake, T. Kunugi, K. Sato, T. Ito, H. Kanamori J. Taniguchi. Measurements of 3D flow in Micro pipe via Micro Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry. *Measurement and Science Technology*, Vol. 17, pp. 1647-1651, 2006.
- (2) Shin-ichi Satake, Hiroyuki Kanamori, Tomoaki Kunugi, Kazuho Sato, Tomoyoshi Ito, and Keisuke Yamamoto, Parallel computing of a digital hologram and particle searching for microdigital-holographic particle-tracking velocimetry. *Applied Optics*, Vol. 46, Issue 4, 2007, pp. 538-543.
- (3) Pawel Czarnul, Andrzej Ciereszko and Marcin Fraczak. Towards Efficient Parallel Image Processing on Cluster Grids Using GIMP. *ICCS 2004 LNCS 3037*, pp. 451-458, 2004.
- (4) Alina N. Moga. Parallel Multiresolution Image Segmentation with WaterShed Transformation. *Proceedings of the 4th International ACPC Conference Including Special Tracks on Parallel Numerics and Parallel Computing in Image Processing, Video Processing, and Multimedia: Parallel Computation ParNum '99*, pp. 226-235, 1999.
- (5) The Globus Alliance, <http://www.globus.org/>. *The Globus Alliance*.
- (6) Condor Project Homepage, <http://www.cs.wisc.edu/condor/>. *Condor Project Homepage*.
- (7) ASME. *ASME Performance Test Codes, Supplement on Instruments and Apparatus, Part 1, Measurement Uncertainty*. American Society of Mechanical Engineers, New York, 1985.
- (8) U. Schnars and W. Jüptner. Direct recording of holograms by a ccd target and numerical reconstruction. *Applied Optics*, Vol. 33, pp. 179-181, 1994.
- (9) T. M. Kreis, M. Adams, and W. P. O. Jüptner. Methods of digital holography : A comparison. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3098, pp. 234-240, 1997.
- (10) S. Murata and N. Yasuda. Potential of digital holography in particle measurement. *Optics & Laser Technology*, Vol. 32, pp. 567-574, 2000.