

HODIC におけるメーカーの役割

三菱電機 情報総研 西辻 崇

「ホログラフではありません！ホログラ“ム”です！」「ああ、ごめんごめん、で、そのホログラムはなににつかえるの？」「そりゃもう、究極の3次元映像です！」「すごいね～、でいつできるの？」「・・・」

メーカーに勤めてから5年、学生時代にホログラムを専攻していたことが段々と知られるにつれ、似たような会話をする機会が増えました。その都度、技術の将来性や期待感への同意は得られるものの、いつできるのか、という問いに自信をもって答えられず、相手の表情を曇らせ続けてきました。むしろ、相手からは「やっぱりね」という納得感も出ていたように思います。2025年の実用化が標榜されてから約10年、残り8年間で本当に実現するのだろうか、という疑問がぬぐえず、同僚の期待を何度も裏切ってきました。

今年から前任の岩田様より国際担当幹事を引き継ぎました三菱電機の西辻崇と申します。千葉大 伊藤・下馬場・角江研究室でホログラムに出会ってから約8年、大学を卒業し、社会人になり、働きながらもう一度大学に入り、卒業してもなお、ホログラム技術に携わっていることに、この上ない喜びと、恵まれた環境へのありがたさを噛みしめながら、この筆を取っております。

(1 ページにつづく)

目 次

- | | |
|----------------------------------------------------|------------|
| 1. 巻頭言：HODIC におけるメーカーの役割 | 西辻 崇 表紙 |
| 2. コМПРЕССИブホログラフィの GPU 高速化 | 遠藤 優, 他 2 |
| 3. 汎用的なネットワークを用いた GPU クラスタシステムによるリアルタイム電子ホログラフィの検討 | 高田直樹, 他 8 |
| 4. 空間周波数分割多重記録を行なうデジタルホログラフィにおける高速像再生アルゴリズム | 田原 樹, 他 14 |
| 5. 高解像度 CGH におけるスイッチバック法隠面消去処理の GPU を用いた高速化 | 中清裕貴, 他 20 |
| 6. GPU を用いたイメージ型ホログラムの再生シミュレーション | 山口 健, 他 28 |
| 7. 次回研究会のお知らせ | 巻末 |

会社では監視カメラシステムを主な研究テーマとして扱っています。大学時代とは変わった方向から映像技術に取り組み、映像伝送や符号化圧縮、映像解析など、ホログラフィとは直接関わらないけれども、実用化される頃には絶対に必要と考えられる先端研究に携わっていることは、広く映像を研究するものとして大変良い機会に恵まれていると感じています。

一方で、映像技術を取り巻く環境は決してやさしくはありません。映像技術の筆頭であるテレビは、昨今の企業情勢からもわかるように、次の進歩を明確に示せない状態にあるように思います。過去の流れに従って進んでいる高解像度化や高画質化も、どこまで進めばよいのかを疑問に問う声も少なからずあり、映像の将来はもはや真面目に語られなくなっているようにすら感じます。

しかし、映像をはじめとするメディア技術は、これまでに人類の文化を作り、変えてきました。新聞やラジオしかなかった時代にテレビが登場した時の熱狂は、28歳の私には想像することしかできませんが、YouTubeに代表されるインターネットメディアの普及と時期を同じくして思春期を過ごした私にも、メディアが文化を変える力を理解することができます。そして、メディア技術の筆頭である映像技術は、これからも文化を変えていける可能性を秘めていると信じています。

2025年まであと8年です。ここから先、3次元映像としてのホログラフィの実用化を現実のものにするために、私は、民間企業の力が不可欠だと考えています。過去がそうであったように、大学や国研などの研究成果を、商業的な価値と紐づけて普及させることができて初めて、文化をも変えられる技術が完成するからです。したがって、電機メーカーの研究者として、私がHODICで担うべき役割は、民間企業が投資をしやすくするために必要なことを議論し、発信していくことなのだと考えています。そのためには、少しぼんやりしているホログラフィの価値を明確にし、サービスのレベルからホログラフィの活用方法を議論していくことが重要だと考えています。そして、民間投資を増やすことで、ホログラフィを学んだ学生の受入口を拡げ、研究者・技術者人口を増やし、昨今のAI技術のような盛り上がりを作り出すことが、私がHODICで成し遂げたい1つの目標です。

組織の垣根を越えて、技術の芯の部分で共同で議論・開発する体制は、今後、ますます重要になってくると考えています。映像の将来を広い視野で議論し、創り、活用していく場としてのHODICを、これからももっと発展させていきたいと思います。

コンプレッシブホログラフィの GPU 高速化

遠藤 優¹, 下馬場 朋禄², 角江 崇², 伊藤 智義²

¹金沢大学理工研究域

²千葉大学大学院工学研究院

E-mail: endo@se.kanazawa-u.ac.jp

あらまし: コンプレッシブホログラフィの信号再構成計算を GPU により高速化した結果について述べる. 本稿では, L1 または全変動正則化による信号再構成を取り扱う. 加速近接勾配法を基にしたアルゴリズムを GPU に実装し, CPU 実装と比較して約 20 倍の高速化を達成した. また詳しい性能評価のため, 各処理に要する時間の測定とボトルネックの考察を行った.

GPU-acceleration of compressive holography

Yutaka Endo¹, Tomoyoshi Shimobaba², Takashi Kakue², Tomoyoshi Ito²

¹Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

²Graduate School of Engineering, Chiba University

E-mail: endo@se.kanazawa-u.ac.jp

Abstract: We developed fast signal reconstruction for compressive holography using a graphics processing unit (GPU). In this article, signal reconstruction refers to L1 or total variation regularization. We implemented an algorithm based on accelerated proximal gradient methods on a GPU. The results show that GPU-based implementation is about 20 times faster than CPU-based implementation. For detailed performance evaluation, we measured processing time of each calculation step in our GPU-based implementation and discuss its bottleneck.

1 はじめに

デジタルホログラフィ [1] は干渉を用いた計測技術であり, 取得したホログラム画像から計算処理(逆伝搬)を行うことで任意奥行きに焦点を合わせた画像を得ることができる. しかし, 逆伝搬で得られた画像には, 直接光, 二重像, 物体光の高次成分などの不要成分が重畳される. また焦点外の物

体成分も重畳するため, 3 次元物体分布(断面画像のスタック)の再構成は困難である.

これらの不要成分及び焦点外像は, 圧縮センシング [2,3] の枠組みを適用することで除去できる. この手法をコンプレッシブホログラフィ [4,5] と呼ぶ. これにより, 2 次元ホログラム画像から 3 次元物体分布を再構成できる. しかし, この再構成計算は単純な逆伝搬計算と比べて計算負荷が高く,

またデータ量の多い3次元物体分布を再構成するため、計算時間が長くなることが問題であった。

本稿では、コンプレッシブホログラフィにおける再構成計算をGPU (Graphics Processing Unit)により高速化した結果[6]について述べる。GPUとはグラフィックス処理専用の演算装置であるが、近年その高い並列演算処理性能からグラフィックス処理以外の数値計算に利用されている。GPUによる並列処理を活用することで、CPUと比べて約20倍の高速化を達成した。

2 手法

2.1 コンプレッシブホログラフィ

図1のように平面波を物体に照射し、散乱光と透過光の干渉縞(ガボールホログラム)を記録することを考える。簡単のため、物体空間を x, y, z 方向にそれぞれ N_x, N_y, N_z だけ離散化した状況を考える。センサ面を $z=0$, 奥行き $z=z_i (i=1, \dots, N_z)$ の物体断面を \mathbf{s}_i とすると、物体断面 \mathbf{s}_i がセンサ面に形成する散乱光 \mathbf{u}_i は、

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{s}_i = \mathbf{h}_i \otimes \mathbf{s}_i \quad (1)$$

となる。ここで行列 \mathbf{H}_i は距離 z_i の伝搬を表し、インパルス応答 \mathbf{h}_i の量み込みとなる。物体全体は $\mathbf{s} = [\mathbf{s}_1^T, \mathbf{s}_2^T, \dots, \mathbf{s}_{N_z}^T]^T$ で表され、各断面の散乱光の和によってセンサ面での散乱光成分 \mathbf{u} が表されるとする。

$$\mathbf{u} = \mathbf{H} \mathbf{s} = [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_{N_z}] [\mathbf{s}_1^T, \mathbf{s}_2^T, \dots, \mathbf{s}_{N_z}^T]^T$$

ホログラム \mathbf{g} は散乱光(物体光)と透過光(参照光)の和の強度であり、

$$\mathbf{g} = |\mathbf{1} + \mathbf{u}|^2 = 2\text{Re}(\mathbf{u}) + \mathbf{1} + |\mathbf{u}|^2$$

となる。ここで、簡単のため透過光の振幅

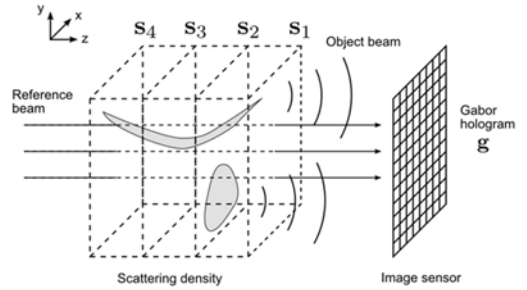


図1: ホログラム記録系。

を1とし、 $\text{Re}(\mathbf{u})$ は実部、 $|\mathbf{u}|^2$ は要素毎の絶対値の二乗をそれぞれ表す。一様な直接光成分 $\mathbf{1}$ を取り除き、物体光の二乗成分 $|\mathbf{u}|^2$ は誤差 \mathbf{e} として扱うことで、観測過程を、

$$\bar{\mathbf{g}} = \mathbf{g} - \mathbf{1} = 2\text{Re}(\mathbf{H}\mathbf{s}) + \mathbf{e} \quad (2)$$

と線形モデルで表すことができる。

ホログラム \mathbf{g} から物体分布 \mathbf{s} を求めることは不良設定逆問題である。圧縮センシングでは、求めるベクトル \mathbf{s} が疎であるという先験情報を用いて再構成を行う。本稿では以下の正則化により解 $\hat{\mathbf{s}}$ を推定する。

$$\hat{\mathbf{s}} = \underset{\mathbf{x}}{\text{argmin}} \underbrace{(1/2) \|\mathbf{H}\mathbf{x} - \bar{\mathbf{g}}\|_2^2}_{F(\mathbf{x})} + \underbrace{\tau \Psi(\mathbf{x})}_{G(\mathbf{x})} \quad (3)$$

ここで、 Ψ は疎な解を誘導する正則化項、 τ を正則化パラメータとした。今回正則化項 Ψ として、以下のようなL1ノルムと2次元断面に対する全変動(TV: total variation)[7]の和を用いた。

$$\|\mathbf{x}\|_1 := \sum_{j=1}^{N_x N_y N_z} |x_j| \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_z} \text{TV}(\mathbf{x}_i) := \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_x N_y} \|\mathbf{D}_k \mathbf{x}_i\|_2 \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{x}_i は奥行き $z=z_i$ の断面ベクトル、 \mathbf{D}_k は断面内(xy 方向)での局所差分を表す。

これらの正則化はコンプレッシブホログラフィや画像再構成でよく利用されている。

2.2 信号再構成アルゴリズム

式(3)を解く手法は様々なものがあるが[8], 本研究ではシンプルで計算負荷が比較的低い加速近接勾配法(以下, 単に近接勾配法と呼ぶ)[9,10]を用いた. この手法では, 微分可能な項 F に対しては勾配法を適用し, 微分不可能な項 G に対しては近接写像を行い, 反復的に解を更新する. 反復回数を $k = 1, \dots, V$, 推定値を $\mathbf{x}^{(k)}$, ステップサイズを t としたとき, 以下の式に従って推定値を更新し, 推定結果 $\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{x}^{(V)}$ を得る.

$$\mathbf{x}^{(k)} = \text{prox}_{tG} \left(\mathbf{z}^{(k-1)} - t \nabla F(\mathbf{z}^{(k-1)}) \right) \quad (6)$$

$$a^{(k)} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(a^{(k-1)})^2}}{2} \quad (7)$$

$$\mathbf{z}^{(k)} = \mathbf{x}^{(k)} + \frac{a^{(k-1)} - 1}{a^{(k)}} (\mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{x}^{(k-1)}) \quad (8)$$

ただし, $\mathbf{z}^{(0)} = \mathbf{x}^{(0)}$, $a^{(0)} = 1$ とする. ここで, ∇F は関数 F の勾配を表し, 式(3)より,

$$\nabla F(\mathbf{x}) = 2\mathbf{H}^*(2\text{Re}(\mathbf{H}\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{g}}) \quad (9)$$

と書ける. 式(1)より行列 \mathbf{H} 及び \mathbf{H}^* の乗算は畳み込みであり, 高速フーリエ変換(FFT)で効率的に計算できる. また prox_{tG} は関数 tG に対する近接写像であり,

$$\text{prox}_{tG}(\mathbf{v}) := \underset{\mathbf{x}}{\text{argmin}} \left(G(\mathbf{x}) + \frac{1}{2t} \|\mathbf{x} - \mathbf{v}\|_2^2 \right)$$

と定義される. 正則化項 Ψ が L1 ノルム(式(4))の場合, 近接写像は閉形式で,

$$\text{prox}_{tG}(\mathbf{v}) = (|\mathbf{v}| - t\tau)\text{sgn}(\mathbf{v}) \quad (10)$$

$$\text{sgn}(x) := \begin{cases} x/|x| & (x \neq 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases}$$

と書ける. ただし, $\text{sgn}(\mathbf{v})$ はベクトルの各要素に適用するものとする. 一方, 正則化項 Ψ が TV(式(5))の場合, 近接写像は閉形式で記

述できない. そのため本研究では, TV の近接写像を, Beck と Teboulle の手法[10]により数値的に求める. この手法は反復計算であり, 近接勾配法の 1 ループ毎に反復計算する必要があるため, L1 正則化と比べてより計算負荷が高い.

2.3 GPU 実装

上記のアルゴリズムを GPU に実装した. GPU として NVIDIA GTX 980 (2048 コア, 1126MHz, GDDR5 RAM 4GB), 開発環境として CUDA 7.5 をそれぞれ用いた. 図 2 に GPU 実装の概略図を示す. 最初に観測データ \mathbf{g} と観測行列 \mathbf{H} の情報をホストからデバイス(GPU)へ送る. その後, 近接勾配法のカーネル関数を反復回数 V だけ呼び出し, デバイス上で並列計算する. 最後に推定結果 $\mathbf{x}^{(V)}$ をデバイスからホストへ送り, 再構成結果を得る. ホスト-デバイス間のデータ転送は時間がかかるが, 本実装では最初と最後にデータ転送を一回ずつ行い, それ以外の処理はデバイス内でほぼ完結するため, ホスト-デバイス間のデータ転送量は少なく抑えられる. 近接勾配法は大きく分けて次の 3 つの処理からなり, これらを V 回反復する.

- (1) 勾配計算: 式(9)を計算する. この計算は前述の通り FFT で効率的に計算できる. FFT の実装は NVIDIA の FFT ライブラリである cuFFT を用いた.
- (2) 推定値の更新: 式(6)を計算する. L1 正則化は式(10), TV 正則化は Beck-Teboulle の手法を使う. Beck-Teboulle の手法では, 近接勾配法 1 ループあたり V_{TV} 回反復する.

(3) 変数の更新: 式(7), (8)における $a^{(k)}, z^{(k)}$ など, 次の反復に必要な変数を更新する.

近接勾配法での演算の大部分はベクトルの要素毎に並列処理ができるため, GPU で効率良く計算できる.

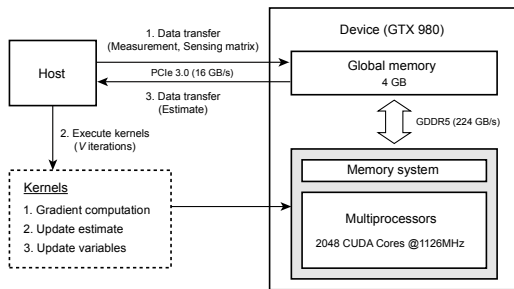


図 2: GPU 実装の概略図.

3 結果

3.1 CPU との処理時間の比較

GPU 実装の処理時間を測定し, 同じアルゴリズムの CPU 実装と比較することで, 性能評価を行った(表 1, 2). CPU 実装は, Intel Core i7-4790K (4 コア, 4GHz), FFTW を利用し, OpenMP による簡単な並列化(8 スレッド)を行った. 処理時間は, GPU 実装では 20 回実行した平均値, CPU 実装では 10 回実行した平均値をそれぞれとった. 近接勾配法の反復回数は $V = 600$, Beck-Teboulle アルゴリズムの反復回数は $V_{TV} = 10$ に設定した. これらの反復回数は良好な再構成結果が得られる回数を選んだ. 表 1, 2 より, L1 正則化, TV 正則化の両者とも, GPU 実装は CPU 実装に比べて約 20 倍の高速化を達成した. GPU の計算時間はデータサイズにほぼ線形に比例しており, 効率的に並列化できていることがわかる.

表 1: L1 正則化の処理時間.

データサイズ (N_x, N_y, N_z)	処理時間 [s]	
	GPU	CPU
(128, 128, 10)	0.119 (12.2×)	1.449
(256, 256, 10)	0.433 (22.7×)	9.818
(512, 512, 10)	1.930 (22.2×)	42.87
(1024, 1024, 10)	7.641 (24.5×)	187.5
(512, 512, 5)	1.074 (20.1×)	21.58
(512, 512, 20)	3.655 (20.0×)	73.01
(512, 512, 30)	5.383 (19.6×)	105.3
(512, 512, 40)	7.108 (16.2×)	114.9

表 2: TV 正則化の処理時間.

データサイズ (N_x, N_y, N_z)	処理時間[s]	
	GPU	CPU
(128, 128, 10)	0.548 (18.8×)	10.28
(256, 256, 10)	2.139 (21.5×)	46.03
(512, 512, 10)	8.636 (21.1×)	182.5
(1024, 1024, 10)	34.45 (21.6×)	743.3
(512, 512, 5)	4.443 (20.9×)	92.92
(512, 512, 20)	17.04 (20.4×)	348.0
(512, 512, 30)	25.44 (20.3×)	516.4
(512, 512, 40)	33.80 (17.7×)	597.3

3.2 各処理の評価

近接勾配法の各処理に要する時間を表 3 に示す. ここではデータサイズを $(N_x, N_y, N_z) = (1024, 1024, 10)$ とした. 表 3 では以下の点に注意されたい.

- 初期化処理, 推定結果の転送は 1 回だけ行われる.
- 勾配計算, 推定値の更新, 変数の更新はそれぞれ V 回ずつ行われるため, 計算時間がそれぞれ V 倍となる.

例えば, 表 1, 2 と同様の反復回数 $V = 600$ の場合, 勾配計算は 5532 ms, 推定値の更新は L1 正則化で 884 ms, TV 正則化で 27678 ms, 変数の更新は 1197 ms となる. この場合, 近接勾配法のカーネル関数以外の処理時間は無視できるほど小さく, L1 正則化では勾配計算, TV 正則化では推定値の更新が最も計算時間を要する.

表 3: 各処理に要する時間.

処理	処理時間[ms]
初期化処理	1.153
勾配計算	9.22 ($V=1$) 5532 ($V=600$)
推定値の更新 L1	1.474 ($V=1$) 884.4 ($V=600$)
推定値の更新 TV	46.13 ($V=1$) ($V_{TV}=10$) 27678 ($V=600$)
変数更新	1.995 ($V=1$) 1197 ($V=600$)
推定結果の転送	13.56

3.3 ボトルネックの考察

最も計算時間を要する処理(L1 正則化: 勾配計算, TV 正則化: 推定値の更新)のプロファイリングを行い, ボトルネックの考察を行った. 勾配計算では, GPU の計算リソース使用率が約 20%, メモリ帯域幅使用率が約 75%となった. 一方, TV 正則化における推定値の更新では, 計算リソース使用率が約 26%, メモリ帯域幅使用率が約 76%となった. 計算リソース使用率が低く, メモリ帯域幅使用率が高いため, デバイス上のマルチプロセッサとグローバルメモリ間の通信がボトルネックだと推測できる. GPU

実装, CPU 実装のメモリ帯域幅はそれぞれ 224 GB/s (GDDR5), 12.8 GB/s (DDR3-1600) であり, その比(GPU/CPU)は 17.5 である. したがって, 本実装で得られた約 20 倍の高速化は穏当な結果だと評価できる. またデータサイズが十分大きくない場合はレイテンシがボトルネックとなる. 例えば, $(N_x, N_y, N_z) = (64, 64, 5)$ のような小さなデータの場合, メモリ帯域使用率は 25%まで低下する.

3.4 再構成シミュレーション

GPU による再構成シミュレーションの結果を図 3 に示す. 図 3 上段は 3 次元物体の断面画像で, データサイズ $(N_x, N_y, N_z) = (1024, 1024, 5)$, 断面内ピッチ $\Delta x = \Delta y = 9\mu\text{m}$, 軸方向ピッチ $\Delta z = 2\text{mm}$ とした. この物体分布に平面波(波長 633nm)を照明し, $z = 100\text{mm}$ だけ離れたセンサ面でホログラムを取得し, 式(2)にしたがって直接光成分を除去する. 通常逆伝搬計算(図 3 中段)では, 各断面上に二重像, 物体光の二乗項, 焦点外像が重畳されている. 一方, コンプレッシブホログラフィ(図 3 下段)では, そのような不要成分が除去されている. この結果は TV 正則

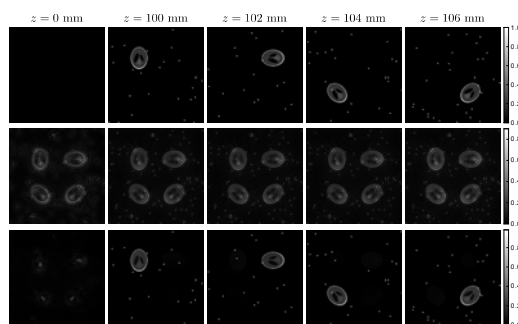


図 3: 再構成シミュレーション: (上段) 3 次元物体の断面画像, (中段) 逆伝搬計算による結果, (下段) コンプレッシブホログラフィによる結果.

化($V = 1000$, $V_{TV} = 10$)で得られた. 計算時間は GPU 実装で 29 s, CPU 実装で 597 s となり, 20 倍程度の高速化となった.

4 まとめ

コンプレッシブホログラフィの信号再構成計算を GPU による並列計算により高速化した. 加速近接勾配法に基づくアルゴリズムを GPU に実装することで, CPU と比べて 20 倍程度の高速化を達成した. またプロファイリングにより, メモリアクセスがボトルネックとなっていることを確認した. そのため, さらなる高速化のためにはメモリアクセスの効率化による計算リソース使用率の向上が必要だと考えられる.

参考文献

1. M. K. Kim, "Principles and techniques of digital holographic microscopy," J. Photonics Energy **1**, 18005-18005-50 (2010).
2. D. L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Trans. Inf. Theory **52**, 1289-1306 (2006).
3. E. J. Candes and T. Tao, "Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies?," IEEE Trans. Inf. Theory **52**, 5406-5425 (2006).
4. D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki, and S. Lim, "Compressive Holography," Opt. Express **17**, 13040-13049 (2009).
5. J. Hahn, S. Lim, K. Choi, R. Horisaki, and D. J. Brady, "Video-rate compressive holographic microscopic tomography," Opt. Express **19**, 7289-7298 (2011).
6. Y. Endo, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "GPU-accelerated compressive holography," Opt. Express **24**, 8437-8445 (2016).
7. L. I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms," Phys. D Nonlinear Phenom. **60**, 259-268 (1992).
8. V. Cevher, S. Becker, and M. Schmidt, "Convex Optimization for Big Data: Scalable, randomized, and parallel algorithms for big data analytics," IEEE Signal Process. Mag. **31**, 32-43 (2014).
9. A. Beck and M. Teboulle, "A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems," SIAM J. Imaging Sci. **2**, 183-202 (2009).
10. A. Beck and M. Teboulle, "Fast Gradient-Based Algorithms for Constrained Total Variation Image Denoising and Deblurring Problems," IEEE Trans. Image Process. **18**, 2419-2434 (2009).

汎用的なネットワークを用いた GPU クラスタシステムによる リアルタイム電子ホログラフィの検討

高田直樹[†] 老川稔[†] 三宮廣海[†] 前田祐貴[†] 中山弘敬[‡] 角江崇[¶] 下馬場朋禄[¶] 伊藤智義[¶]

[†]高知大学 〒780-8520 高知県高知市曙町二丁目 5-1

[‡]国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

[¶]千葉大学 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

Real-time electroholography using a GPU cluster system with gigabit ethernet

Naoki TAKADA[†], Minoru OIKAWA[†], Hiromi SANNOMIYA[†], Yuki MAEDA[†],
Hiroataka NAKAYAMA[‡], Takashi KAKUE[¶], Tomoyoshi SHIMOBABA[¶], Tomoyoshi ITO[¶]

[†]Kochi University, 2-5-1 Akebono-cho, Kochi, Japan

[‡]National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, Japan

[¶]Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

e-mail: ntakada@is.kochi-u.ac.jp

Abstract

The practical use of real-time electroholography is limited by the complexity of the CGH calculations and requires high-performance computational power. Parallel calculations of large-pixel-count CGHs are suitable for graphics processing unit (GPU) cluster systems. While, in GPU cluster systems with a single spatial light modulator, it is not easy for GPU cluster system to accomplish fast CGH calculations. In this case, the CGH transfer between the PCs becomes a bottleneck. To overcome this problem, we already proposed a simple method using the InfiniBand network. However, the InfiniBand network is very expensive. The cheaper network in the GPU cluster systems it is more desirable. In this paper, we propose GPU cluster systems with excellent cost performance using the compression of the CGH transfer data between the PCs. Consequently, we realized real-time electroholography using the cost-effective GPU cluster system having a performance comparable to that of the GPU cluster with InfiniBand network.

1. はじめに

3次元情報を記録したホログラムパターンを電子的に制御する技術（電子ホログラフィ技術）は究極の立体テレビを実現する有力な手段の一つになると考えられている。光の干渉をコンピュータ上でシミュレーションすることによって得られるホログラムは特に計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram) と呼ばれる。電子ホログラフィ技術は、シミュレーション時に設定した干渉光と同じ波長の光を、空間光位相変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) に表示した CGH に実際に照射することでホログラフィ像を再生することができる。この SLM に表示した CGH パターンを高速に(コンピュータディスプレイのリフレッシュレートと同程度に)次々と高速に切り替えることにより、ホログラフィ像の動画を実現することが可能になる。しかし、CGH の生成には膨大な計算量が必要であり、電子ホログラフィ実用化への課題の一つと考えられている。

近年、GPU (Graphics Processing Unit) の浮動小数点演算性能とコストパフォーマンスは著しく向上し、汎用的な科学技術計算にも広く利用されるようになった。CGH 生成時に行われる計算の特徴として、使用されるデータ量に比べて演算量が著しく多いことから PC クラスタを利用した並列化計算と相性がよいため、GPU を利用した電子ホログラフィの研究は盛んに行われている[1-6]。また複数の SLM とマルチ GPU クラスタによる CGH 計算の高速化についても報告されている[3,4]。これらの GPU クラスタでは、高解像度(Full HD 程度を想定している)の CGH 計算を複数の GPU 上に分散することで計算高速化を実現しているが、分散させた CGH データを最終的には 1 ～数台の SLM に集約させる必要があり、PC あるいは GPU 間の転送時間がボトルネックとなることが課題となりうる。著者らはこれらの転送時間のボトルネックを改善するため、InfiniBand ネットワークを用いた GPU クラスタシステムによるリアルタイム電子ホログラフィを提案した[7]。しかし、InfiniBand を構成する機器は普及しているとは言えず高価でもあるため、できればコストパフォーマンスに優れ広く普及している汎用的なギガビット・イーサネットを用いたシステムで実現するほうが望ましい。

本研究では、バイナリ CGH のデータ圧縮手法[8]を用いて PC 間の通信データ量を抑制し、汎用的なギガビット・イーサネットを搭載した GPU クラスタシステムによるリアルタイム再生を実現することを目的とする。10 台の GPU から構成されるマルチ GPU クラスタに SLM を 1 台接続したシステムを用いて評価を行なった。提案手法により汎用的なギガビット・イーサネットを使用した場合と、InfiniBand のネットワークを使用した場合を比較したところ、計算時間に大きな差が生じないことが確認され、提案手法の有効性が示された。

2. 計算機合成ホログラム (CGH)

ホログラフィ像として投影する 3 次元オブジェクトは点光源の集合であるとし、そのオブジェクトを構成する全点光源数を N_p とする。CGH 平面上にある特定の座標の光の強度は、オブジェク

トを構成している全ての点光源からの光の強度と位相の干渉(重ね合わせ)により求めることができる。フレネル近似を用いると、ホログラム面上の座標 (x, y) における干渉光の強度 $I(x, y)$ は次式により求められる。

$$I(x, y) = \sum_{j=1}^{N_p} A_j \cos \left[\frac{\pi}{\lambda z_j} \left\{ (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right\} \right],$$

ここで、3次元オブジェクトを構成する j 番目の点光源の座標を (x_j, y_j, z_j) 、点光源の光強度を A_j とそれぞれ示した。 λ はホログラムを計算に使用される参照光の波長である。

3. 提案手法

3.1. GPU クラスタの構成と通信速度の課題

本研究で使用した GPU クラスタの構成を図 1 に示す。GPU クラスタは全 10 台の GPU を含む。全ての GPU は表 1 に示した同一機種を使用しており性能は均一である。PC1 から PC3 は CGH 計算を担当するノードであり、1 台あたり 3 台の GPU を搭載する。動画中の CGH フレーム計算を GPU1~9 で分担して行う。PC1 から PC3 での各フレームの計算完了後、SLM の接続された PC0 に CGH を転送する。PC0 では各計算ノードで作成された CGH フレームを次々に更新することで CGH 動画を再生する。PC0 に含まれる GPU0 は CGH 表示専用であり計算には使用しない。CGH の解像度を $1,920 \times 1,024$ 画素、1 画素当たり 32bit のデータ量が必要であるとして 1 枚の CGH の送信に必要な転送時間を見積もると、ギガビット・イーサネットでの転送時間は約 63 ms である。一般に動画として認識されるために必要なフレーム更新レートは 30fps つまり約 33ms 間隔でフレーム更新することが求められることから、計算時間に加えて通信時間もボトルネックとなりうる。この通信時間の課題を改善するため、本研究では通信を行う前にバイナリ CGH データの圧縮手法[8]を利用した。この手法により、計算ノードから PC0 に転送される CGH データサイズを $1/32$ に圧縮して PC0 へ転送し、PC0 で受信後に CGH を復元してすることで通信時間を短縮した。CGH の圧縮と復元にかかるオーバーヘッドが通信時間に比べて十分に小さければ総合的な動作再生速度の向上を期待することができる。

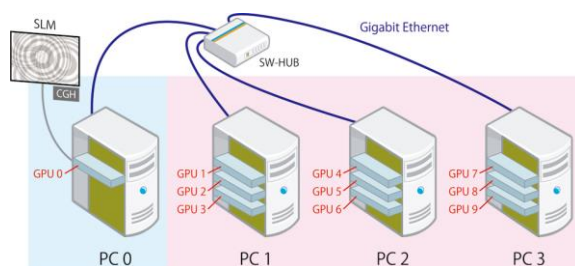


図 1 使用した GPU クラスタシステム

表1 GPUクラスタ内の各GPUの主な仕様
(NVIDIA GeForce GTX 680)

GPUクロック周波数	1,006 MHz
CUDAコア数	1,536 cores
搭載メモリサイズ	2,048 MB
メモリバンド幅	192.2 GB/s
計算速度(理論値)	3.09 TFLOPS

3.2. GPU クラスタによる CGH 計算

連続する各 CGH フレームを N 台の GPU 上で並列計算を行ったタイムチャートを図 2 に示す。CGH 表示に用いる GPU ボードを GPU0, CGH 計算に用いる N 台の GPU を GPU1 ~ GPU N で表す。1 枚の GPU ボードで動画 1 フレームの CGH の計算を担当させた。

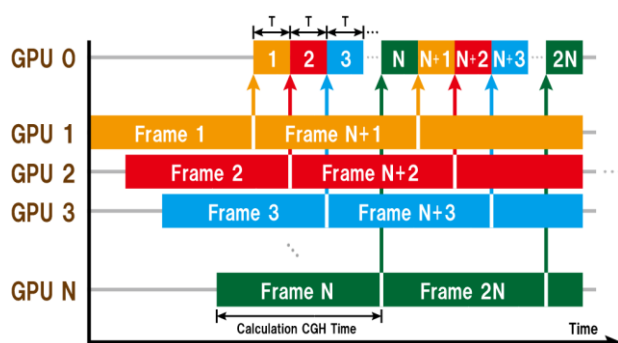


図 2 複数 GPU における並列計算のタイムチャート

図 2 に示したように、動画の最初のフレーム(Frame1)の CGH を GPU1 で計算する。次の 2 番目のフレーム(Frame 2)の CGH は GPU2 で計算する。同様に N 番目の CGH フレームを GPU N で計算させる。 $N+1$ 番目の CGH フレーム(Frame $N+1$)以降は、GPU ボードに順番にローテーションで割り当てて計算を行う。各 GPU で計算された CGH フレームは計算が完了後、表示用 GPU である GPU0 へ転送する(図 2 の上向き矢印で表す)。GPU0 は Frame 1 の CGH を受け取り次第、直ちに SLM へ描画する。Frame 1 の CGH を SLM に一定時間表示した後、GPU0 は GPU2 で計算された Frame 2 の CGH を受け取り SLM に表示する。これを繰り返すことで、次々に CGH 動画フレームが GPU0 上で更新される。図 2 のタイムチャートで必要とされる同期処理を実現するため MPI (Message Passing Interface) を使用した。

3.3. 通信データの圧縮と復号

CGH データの圧縮手法を図 3 に示し、①~③に手順を説明する。

- ① CGH の各座標での光強度"Light intensity" I を求める (図 3 内の左側)。
- ② 算出した光強度 I の先頭の符号ビットから、 I が 0 より大きいときは白(0)とし、それ以外は黒(1)と判定する。
- ③ ②での 2 値の判定結果をビットシフトにより変数(図 3 内の"Compression data")に 1bit 単位でパッキングしていく。以下全ての画素に対して適用

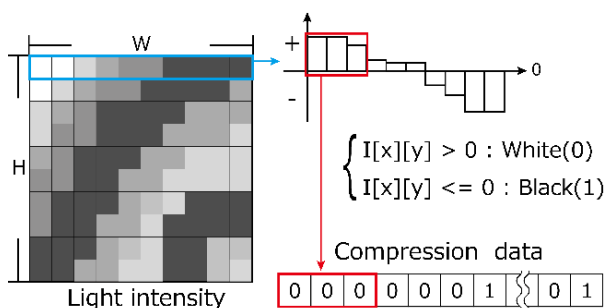


図 3 CGH データの圧縮手法

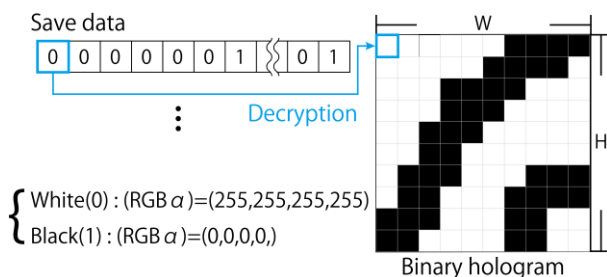


図 4 CGH データの復元手法

する。

以上の方法で CGH データ容量を 1/32 に圧縮して PC0 へ送信する。

PC0 で圧縮したデータの受信後に行う復元手法を図 4 に示し、④～⑤に手順を説明する。

④ 圧縮により保存したデータの変数(図 4 内の“Save data”)先頭から順に 1bit ずつ参照する。

⑤ ④で参照したビット値が 0 ならば画素を白と判定し、1 ならば黒と判定する。

以上の手法を使ってバイナリCGHの圧縮・復元を行ったのち、SLMに描画を行った。

4. 結果

図1に示したGPUクラスタのPC間をギガビット・イーサネットで接続し、提案した圧縮・復元手法を適用したリアルタイム再生実験を行った。再生速度の比較対象として、従来手法[7] (圧縮・復元を行わない)で高速なInfiniBandネットワーク接続環境を使用した場合を実施した。

表2に上記2通りの場合によるホログラフィ動作のフレーム表示時間間隔を示す。GPU1台のみを使用した場合も参考データとして掲載した。InfiniBandを使用した従来手法と比べると、提案手法の再生速度性能は、物体点数に依存せず4ms以内に収まっており、従来手法を高速なInfiniBand上で再生した場合とおおむね同程度の再生速度性能を得られることがわかった。

参考再生像として、図5に提案手法により得られた再生像(全点光源数:95,949点)を示す。上側の図がホログラフィ動画再生像のスナップショット、下側の図が対応する3次元オブジェクトの元データである(メリーゴーランドが回転しているシーンを表している)。再生に使用したSLMは、

表2 CGHフレームの表示更新時間の実測結果

3Dオブジェクトに 含まれる点光源数	CGHフレーム更新時間 [ms]		
	1 GPU (参考)	9 GPUs	
		従来手法 (InfiniBand)	提案手法 (Gb Ethernet)
10,240	103	14	15
20,480	204	27	30
40,960	411	52	57
61,440	621	79	82
81,920	824	105	109
102,400	1029	130	134

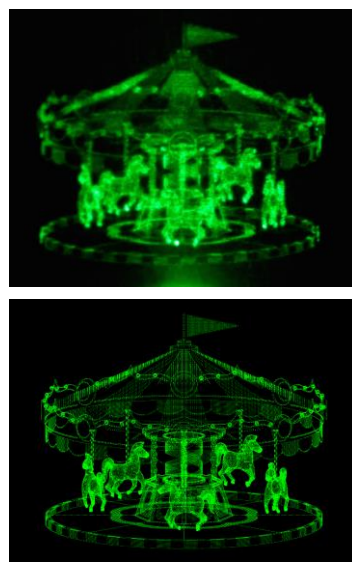


図 3 提案手法による再生像(上)と3次元モデル(下)

市販のプロジェクトに搭載されているLCDパネル(EPSON社製 EMP-TW 1000, 解像度1,920×1,024, Pixel Pitch: 8.5um×8.5um, Size: 16.4mm×9.2mm, Refresh rate:60Hz) を使用した。

5. まとめ

広く普及している汎用的なギガビット・イーサネットで相互に接続された GPU クラスタを使用し、電子ホログラフィのリアルタイム計算と再生の速度を改善する手法を提案した。高スループット・低レイテンシで知られる InfiniBand ネットワークで接続した同 GPU クラスタ上で、提案手法を用いなかった場合と概ね同等な計算・再生速度を得ることができた。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費・基盤研究(C) (課題番号 JP15K00153)ならびに研究活動スタート支援(課題番号 JP17H06919)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit," Opt. Express 14, pp.603- 608, 2006.
- [2] H. Nakayama, N. Takada, Y. Ichihashi, S. Awazu, T. Shimobaba, Nobuyuki Masuda and Tomoyoshi Ito, "Real-time color electroholography using multi graphics processing units and multi high-definition liquid-crystal display panels," Applied Optics, 49, pp.5993-5996, 2010.
- [3] N. Takada, T. Shimobaba, H. Nakayama, A. Shiraki, N. Okada, M. Oikawa, N. Masuda and T. Ito, "Fast high-resolution computer-generated hologram computation using multiple graphics processing unit cluster system," Applied Optics 51, pp.7303-7307, 2012.
- [4] Y. Pan. , X. Xu, X. Liang, "Fast distributed large-pixel-count hologram computation using a GPU cluster." Applied Optics 52, pp.6562-6570, 2013.
- [5] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, and T. Ito, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography with a single graphics processing unit utilizing movie features," Opt. Express 22, pp.28052–28057, 2014.
- [6] H. Araki, N. Takada, H. Niwase, S. Ikawa, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time time-division color electroholography using a single GPU and a USB module for synchronizing reference light," Appl. Opt. 54, 10029–10034 (2015).
- [7] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, Y. Maeda, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time electroholography using a multiple-graphics processing unit cluster system with a single spatial light modulator and the InfiniBand network," Optical Engineering, Vol. 55, Issue 9, 093108, 2016.
- [8] 前田祐貴, 藤原将人, 庭瀬裕章, 荒木啓充, 猪川翔平, 中山弘敬, 角江 崇, 下馬場朋祿, 伊藤智義, 高田直樹, "バイナリ計算機合成ホログラムのデータ圧縮," 3次元画像コンファレンス 2016 講演論文集, P-8 ,2016.

空間周波数分割多重記録を行なうデジタルホログラフィに おける高速像再生アルゴリズム

田原 樹^{1,2} 赤松 孝則³, 新井 泰彦¹, 下馬場 朋禄³, 伊藤 智義³, 角江 崇³

¹ 関西大学 システム理工学部 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

² 科学技術振興機構(JST) さきがけ 〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8

³ 千葉大学 大学院工学研究科 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

E-mail: tahara@kansai-u.ac.jp

あらまし 空間周波数分割多重記録を用い多種光波情報を単一露光同時取得するデジタルホログラフィにおける高速像再生アルゴリズムを提案する。当該多重記録方式では、各種光波の空間多重記録の際に異なる空間キャリア周波数を与え、空間周波数面において各光波情報が分離される。従来、一般的にフーリエ変換法に基づく分離抽出が用いられるが、計算時間がかかる問題がある。本提案では、フーリエ変換なく、平滑化フィルタを用いることにより高速に分離抽出できる。提案法の有効性を数値的に示し、また、実証に成功した。

キーワード ホログラフィ, デジタルホログラフィ, 空間周波数分割多重記録,
高速画像再生アルゴリズム

High-speed image-reconstruction algorithm in digital holography with spatial frequency-division multiplexing

Tatsuki Tahara^{1,2} Takanori Akamatsu³ Yasuhiko Arai¹ Tomoyoshi Shimobaba³
Tomoyoshi Ito³ Takashi Kakue³

¹Kansai University 3-3-35 Yamate-cho, Suita, Osaka, 564-8680 Japan

²PRESTO, Japan Science and Technology Agency, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012, Japan

³Chiba University, 1-33, Yayoicho, Inage Ward, Chiba-shi, Chiba, 263-8522, Japan

E-mail: tahara@kansai-u.ac.jp

Abstract We propose a high-speed image-reconstruction algorithm in digital holography with spatial frequency-division multiplexing. The multiplexing technique gives different spatial carrier frequencies for respective light waves in spatially multiplexed recording and separates respective light-wave information in the spatial frequency domain. However, it takes much computation time to reconstruct multiple light waves when using the Fourier transform method. The proposed method does not require any Fourier transforms for the separations and enables light-wave extractions with high throughput by using smoothing. The method is numerically verified and experimentally demonstrated.

Keywords Holography, Digital Holography, spatial frequency-division multiplexing,
high-speed image-reconstruction algorithm

1. 背景

ホログラフィ^[1]は光の干渉を利用して光波の複素振幅分布の情報を記録し、光の回折を利用して複素振幅分布情報から 3 次元画像を再生する技術である。波面、すなわち位相情報に 3 次元空間の情報が含まれていることにより、2 次元の記録材料面に 3 次元空間情報を記録できる。

ホログラムを電子的に記録し波面を数値的に再生する技術は、デジタルホログラフィ^[2]と呼ばれ、近年多くの分野で研究の広がりが見られる。電子的に情報取得することで動画像記録や定量的解析可能となり、深深度高速 3 次元動画像記録^[3]、定量位相イメージング^[4]などが報告されている。

ホログラフィでは、光の振幅(輝度)、位相(空間、光学厚さ)に加え、偏光(光の振動方向、振動状態)、波長(色、分散、分光特性)、干渉光と非干渉光などの同時記録が可能である。そして、ホログラフィを用いるならば偏光フィルタやカラーフィルタを記録面近傍に付さなくとも情報取得できる。Lohnman 氏は CGH で有名であるが、1965 年には空間周波数変調を用いる 3 次元画像、偏光、3 波長(RGB)の単一露光同時記録方式を発表している^[5]。デジタルホログラフィに置き換えるなら、市販の単板単色撮像素子で光波の振幅、定量位相に加え偏光や波長を空間周波数分割多重記録することに相当する。各種光波情報の分離抽出にはフーリエ縞解析法が用いられる。ここで、2 次元フーリエ変換/逆フーリエ変換が必要であるために、像再生に時間がかかる問題がある。高速度カメラなど画像取り込みの高速化が達成される中、デジタルホログラフィを用いた計測においてスループットのボトルネックは像再生にある。そのため、像再生の高速化を実現するアルゴリズムの提案は、計測スループットの向上に直結する。

本稿では、空間周波数分割多重記録を行なうデジタルホログラフィにおいて、像再生を高速化するアルゴリズムを紹介する。平滑化フィルタを用いて各種光波情報の分離抽出を行なうことで、フーリエ変換が必要なく、像再生を高速化できる。

2. 空間周波数分割多重記録を行なうデジタルホログラフィ

Lohnman 氏の基本概念に基づいた本方式は 1990 年代よりデジタルホログラフィに適用されるようになり^[6]、複数波長情報の記録も報告されるようになった^[7]。図 1 に当該方式を用いる単一露光複数波長デジタルホログラフィにおける実施形態例を示す。波長毎に参照光を異なる方向から入射するなど、干渉縞の空間周波数を波長毎に異ならせることにポイントがある。空間面で多波長の物体光を多重記録させるが、記録された干渉縞画像を 2D フーリエ変換すると、干渉縞の空間周波数に応じて物体光の空間スペクトルの現れる位置が異なる。フーリエ縞解析法^[8]に基づき所望のスペクトルを選択的に抽出し像再生すれば、多波長の 3 次元画像を得ることができる。

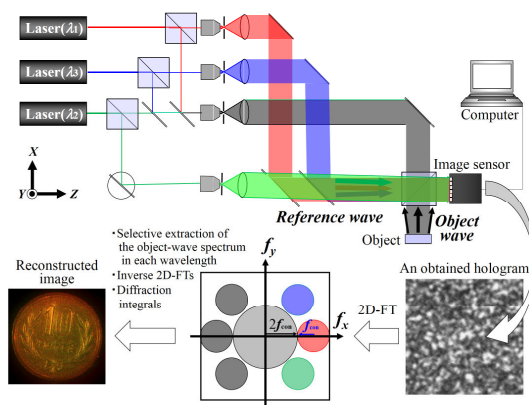


Fig. 1 Schematic of multiwavelength digital holography with spatial frequency-division multiplexing.

ここで、ホログラムの空間多重記録を考える。3波長記録で得られる空間多重画像を $H(x,y)$ 、波長 λ における光強度分布を $I_\lambda(x,y)$ 、物体光の複素振幅分布を $U_o(x,y) = A_o(x,y)\exp\{i\phi_o(x,y)\}$ 、参照光の複素振幅分布を $U_r(x,y) = A_r(x,y)\exp\{i\phi_r(x,y)\}$ 、 A を振幅、 ϕ を位相、 i を虚数単位、 $*$ を複素共役とくと、

$$H(x,y) = I_{\lambda 1}(x,y) + I_{\lambda 2}(x,y) + I_{\lambda 3}(x,y), \quad (1)$$

$$I_\lambda(x,y) = |U_o(x,y)|^2 + |U_r(x,y)|^2 + U_o(x,y) U_r^*(x,y) + U_o^*(x,y) U_r(x,y), \quad (2)$$

$$= A_o^2(x,y) + A_r^2(x,y) + 2A_o(x,y)A_r(x,y)\cos\{\phi_o(x,y) - \phi_r(x,y)\}. \quad (3)$$

(3)式より、 x - y 面上での物体光または参照光の位相変化の緩急に合わせて縞の細かさも変わることが示される。

課題としては、図 1 に示される様に、1 回の 2D フーリエ変換と、記録波長数と同じ回数の 2D 逆フーリエ変換の計算が必要である。当該計算が像再生速度の限界を招いている。

3 空間周波数分割多重記録方式における高速像再生アルゴリズム[9],[10]

ホログラムの空間周波数分布より、各物体光情報は局在する。即ち、どの領域にどの物体光スペクトルが存在するか既知であれば、空間面でのフィルタリングで抽出可能であり、本提案ではその点に着目した。

提案アルゴリズムの処理手続き流れを図 2 に示す。まず、記録される画像 $H(x,y)$ の内の λ_1 における物体光 $U_{o\lambda 1}(x,y)$ の抽出を目的とする。(2)式より、所望の成分には参照光の複素共役 $U_{r\lambda 1}(x,y)^*$ が乗算され、この位相項による空間キャリア $\exp\{i\phi_r(x,y)\}$ により空間周波数シフトがもたらされる。 $\phi_r(x,y)$ は、参照光の波長と角度差より分かるため、 $H(x,y) \exp\{i\phi_r(x,y)\}$ を演算する。当該演算により、 $U_{o\lambda 1}(x,y)$ の成分のみが低空間周波数領域に分布する。他の成分は高空間周波数領域に局在するため、空間面における平均値フィルタリング、sinc 関数に基づく平滑化フィルタ等により除去され、低空間周波数領域に局在する所望の光波成分は残る。高空間周波数成分を強力に除去するため

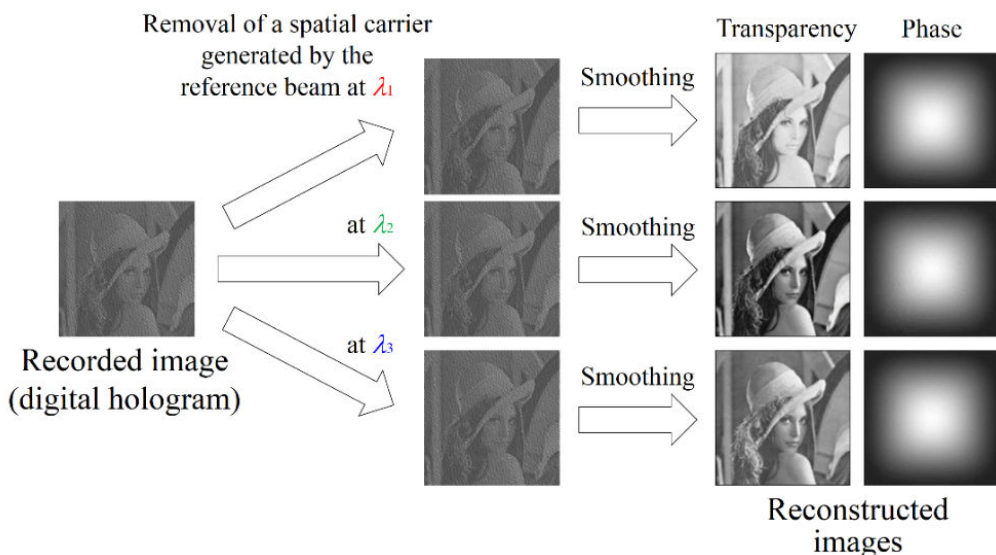


Fig. 2. Flow of the proposed image-reconstruction algorithm.

には、平滑化に使う繰り返し数または平均値処理における画素数を増加させる。以上より、所望の物体光波成分のみを抽出できる。抽出したい物体光成分数だけ同様の手続きを繰り返すと、空間周波数分割多重記録されたホログラムから、フーリエ変換なく所望の光波成分を抽出できる。

4. 計算機シミュレーション

提案法の有効性を示すために、計算機シミュレーションを行なった。条件として、図 1 の光学系を想定し、図 3(a)-(e)に示す物体光の振幅、位相、色合成結果の画像を仮定した。光源の波長 473nm, 532nm, 640nm, 撮像素子の画素数 512×512, 画素間隔 5 μ m とし、図 3(f),(g)のイメージホログラムを計算機内で生成し、提案法で像再生した。像再生にあたり、3×3 画素の相加平均を各画素に施す平均値処理を、7 回繰り返し計算した。結果を図 3(h)-(m)に示す。図より、所望の像成分を抽出でき、カラーイメージング応用可能性も示された。図 3(h)より、平均値フィルタ処理後の画像をフーリエ変換すると、所望の光波スペクトル以外の成

分が除去されている様子が伺える。以上より、有効性が数値的に示された。

5. 実験

提案アルゴリズムの性能を示すために実証実験を行なった。空間周波数分割多重を用いる単一露光 2 波長 off-axis デジタルホログラフィシステムを構築した。波長 640nm, 532nm の CW レーザ, 結像レンズの無い画素間隔 2.2 μ m, 画素数 2592 × 1944pixels, 12bits の単板単色 CMOS イメージセンサを用いた。被写体に 10 円玉硬貨を用い、イメージセンサから 450mm の深さに置いた。提案法の処理手続きとして、3×3 の平均値フィルタを 3 回適用した。ここで、光波の伝播計算においてフーリエ変換を計算しているが、物体光の選択的抽出においては一切フーリエ変換を用いていないことに注意されたい。実験結果を図 4 に示す。記録された単色画像をフーリエ変換すると、空間周波数面において各波長における物体光の空間スペクトルが局在化している様子が分かる。提案アルゴリズムにより所望の光波成分のみが抽出されて

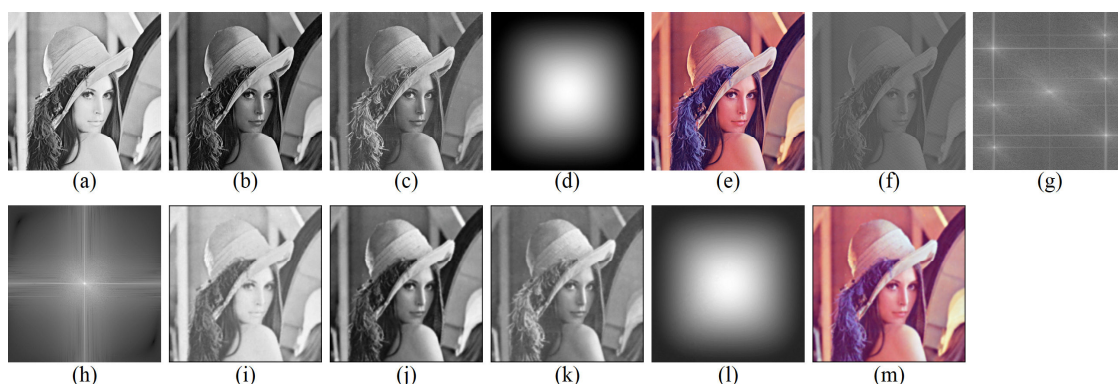


Fig. 3. Numerical results. Amplitude images at the wavelengths of (a) 640nm, (b) 532nm, (c) 473 nm, (d) phase image, and (e) color-synthesized image. (f) Spatially multiplexed hologram and (g) its spatial frequency distribution. (h) Spatial frequency distribution of the image obtained by the proposed algorithm at 640 nm. Amplitude image at (i) 640nm, (j) 532nm, (k) 473 nm, (l) phase image, and (m) color-synthesized image.

おり、色合成結果よりカラー3次元イメージング能力が実証された。以上より、当該アルゴリズムの性能が実験的に示された。

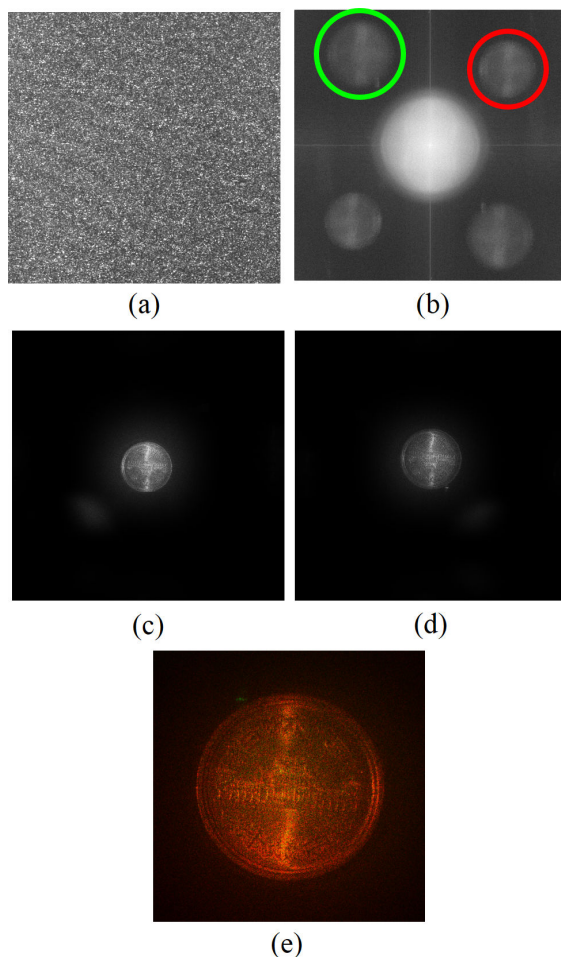


Fig. 4. Experimental results. (a) A recorded wavelength-multiplexed hologram and (b) its spatial frequency distribution. Red and green circles shown in (b) are object wave spectra at the wavelengths of 640 and 532 nm, respectively. (c) Red- and (d) green-component images reconstructed by the proposed algorithm with three times 3×3 mean filtering. (e) Color-synthesized images obtained from (c) and (d).

6. おわりに

空間周波数分割多重記録により得られたホログ

ラムから、フーリエ変換なく像再生可能にするアルゴリズムを提案した。画素数を N とすると、2Dフーリエ変換では計算量のオーダーが $O(N \log N)$ であるのに対し、平滑化フィルタでは $O(N)$ で済むため、画素数の増加に伴い像再生の高速化を実現できる。記録波長数3、画素数 2048×2048 , 4096×4096 の条件において、それぞれ3.34倍、4.85倍の高速化が達成できるとの評価結果も出ている[10]。波長情報の位相分割多重によりフーリエ変換なく波長分離する波長選択抽出位相シフト法[11]–[14]も、物体光抽出において計算コストが低いが、より少ない記録枚数で済む観点で空間周波数分割多重記録と提案法との組み合わせがより高いスループットを達成できるものと考えられる。以上より、本アルゴリズムは、当該多重記録方式で得たホログラムからカラーホログラフィックディスプレイ[15–17]で像を表示する際、リアルタイム表示を実現するための強力な処理技術となると予測される。また、多種多様な高速リアルタイムホログラフィックイメージングを推進できるものと期待される。

本研究は、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「セレンディピティの計画的創出」、平成25–29年度 文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の助成を受けた。

文 献

- [1] 久保田敏弘：”新版 ホログラフィ入門”，朝倉書店，東京，(2010)。
- [2] Y. Takaki, H. Kawai, and H. Ohzu, “Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images,” *Appl. Opt.* **38**, 4990–4996 (1999).
- [3] T. Tahara, R. Yonesaka, S. Yamamoto, T. Kakue, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “High-speed three-dimensional microscope for dynamically moving biological objects based on parallel phase-shifting digital

- holography," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **18**, 1387-1394 (2012).
- [4] E. Watanabe, T. Hoshiba, and B. Javidi, "High-precision microscopic phase imaging without phase unwrapping for cancer cell identification," Opt. Lett. **38**, 1319-1321 (2013).
 - [5] A. W. Lohmann, "Reconstruction of vectorial wavefronts," Appl. Opt. **4**, 1667-1668 (1965).
 - [6] Y. Ohtsuka and K. Oka, "Contour mapping of the spatiotemporal state of polarization of light," Appl. Opt. **33**, 2633-2636 (1994).
 - [7] R. Onodera, Y. Ishii, "Two-wavelength interferometry that uses a Fourier-transform method," Appl. Opt. **37**, 7988-7994 (1998).
 - [8] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am. **72**, 156-160 (1982).
 - [9] T. Tahara, T. Shimobaba, and T. Ito, "Image-reconstruction algorithm with no use of Fourier transform in interferometric imaging using spatial frequency-division multiplexing," in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2016 (DH)*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), JW4A.35, Heidelberg, Germany, July, 2016.
 - [10] T. Tahara, T. Akamatsu, Y. Arai, T. Shimobaba, T. Ito, and T. Kakue, "Algorithm for extracting multiple object waves without Fourier transform from a single image recorded by spatial frequency-division multiplexing and its application to digital holography," Opt. Commun. **402**, 462-467 (2017).
 - [11] T. Tahara, S. Kikunaga, Y. Arai, and Y. Takaki, "Phase-shifting interferometry capable of selectively extracting multiple wavelength information and its applications to sequential and parallel phase-shifting digital holography," in *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2014 (DH)*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), DM3B.4, Seattle, USA, July 14, 2014.
 - [12] T. Tahara, R. Mori, S. Kikunaga, Y. Arai, and Y. Takaki, "Dual-wavelength phase-shifting digital holography selectively extracting wavelength information from wavelength-multiplexed holograms," Opt. Lett. **40**, 2810-2813 (2015).
 - [13] T. Tahara, R. Mori, Y. Arai, and Y. Takaki, "Four-step phase-shifting digital holography simultaneously sensing dual-wavelength information using a monochromatic image sensor," J. Opt. (IOP Publishing) **17**, 125707 (10 pages) (2015).
 - [14] T. Tahara, Reo Otani, Kaito Omae, Takuya Gotohda, Yasuhiko Arai, and Yasuhiro Takaki, "Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts," Opt. Express **25**, 11157-11172 (2017).
 - [15] T. Ito, T. Shimobaba, H. Godo, M. Horiuchi, "Holographic reconstruction with a 10-μm pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light," Opt. Lett. **27**, 1406-1408 (2002).
 - [16] T. Ito, K. Okano, "Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel," Opt. Express **12**, 4320-4325 (2004).
 - [17] Y. Takaki, Y. Matsumoto, and T. Nakajima, "Color image generation for screen-scanning holographic display," Opt. Express **23**, 26986-26998 (2015).

高解像度 CGH におけるスイッチバック法隠面消去処理の GPU を用いた高速化

中清 裕貴 松島 恭治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: nakase@laser.ee.kansai-u.ac.jp

あらまし 全方向視差 CGH で自己オクルージョンを正しく処理できるスイッチバック法に GPU を用いた場合の計算時間短縮の効果を評価した. 高解像度 CGH の計算には GPU のメモリが不十分であるため, 準高解像度 CGH について, 計算全体あるいは部分的に GPU を使用した場合の計算速度の向上率を測定した.

キーワード 計算機合成ホログラム, ポリゴン法, スwitchバック法, GPU

Speedup of switch-back occlusion processing in high-definition CGH using GPU

Yuki NAKASE Kyoji MATSUSHIMA

Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan

E-mail: nakase@laser.ee.kansai-u.ac.jp

Abstract Validity of GPU assist is evaluated for the switchback method that can properly process self-occlusion in full-parallax CGHs. Because GPU memory is not large enough to keep the whole wave field of high-definition CGHs, the computation times are measured in cases where the whole or part of calculation is executed with GPU in quasi high-definition CGHs.

Keyword CGH, Polygon-based method, Switchback method, GPU

1. はじめに

近年, コンピュータホログラフィ技術の進歩によって, 数 10 億ピクセル以上の高解像度計算機合成ホログラム(以下 CGH)では光学ホログラフィに近い再生像が得られるようになった. コンピュータホログラフィで広い視域を得るためには, CGH の干涉縞画像のピクセル間隔を小さくしなければならない. そのため, 十分大きな画像サイズ

を得るためにはピクセル数を増やす必要がある. 実際, ホログラムらしい立体感が得られる広視域大画面の高解像度 CGH では数 10 億ピクセル以上が必要であり, その計算量は莫大になる. またそのため, 非常に長い計算時間がかかる. そこで, 我々は計算時間短縮のための波動光学的な数値合成法としてポリゴン法を提案している[1].

CGH において自然な再生像を得るために

は隠面消去も重要である。ポリゴン法は波動光学的な手法であるためシルエット法などの波動光学的な手法と相性がいい。ここで、シルエット法とは、遮蔽物のシルエットをマスクとして光波遮蔽を行う近似的手法である[2]。

シルエット法には物体のシルエット形状のマスクで光波を遮蔽する物体単位シルエット法とポリゴン形状のマスクでポリゴン毎に光波を遮蔽するポリゴン単位シルエット法がある。物体単位シルエット法は物体の数と同じ回数だけの処理で隠面消去を行うため処理が高速である[3]。しかし、物体単位シルエット法では物体相互間のオクルージョンを再生することできるが、物体自体に凹面がある場合に生じる自己オクルージョンを正しく再生することができない。自己オクルージョンを正しく再生するためにポリゴン単位シルエット法を用いればよいが、その場合、ポリゴンの数と同じだけ隠面消去を行わなければならないため計算時間が長くなってしまう問題があった。この問題を解決するために、Babinetの原理と部分光波伝搬を用いた高速な隠面消去法としてスイッチバック法が提案されている[4]。

計算機の性能は年々急速に向上して来ているが、高解像度 CGH の計算にはまだまだ長い時間がかかる。CPU よりも高い演算性能を持つ GPU(Graphics Processing Unit) を汎用計算に用いる GPGPU(General Purpose GPU) によって波動光学的な計算の時間が削減できることも報告されているが[5]、高解像度 CGH の作成には莫大なメモリが必要になるため、ビデオカード用の GPU では最新の物でも本格的な高解像度 CGH の計算にはメモリが不十分である。そのため本研究では、 $8K \times 8K$ と $16K \times 16K$ ($1K=1024$) の準高解像度 CGH をスイッチバック法により計算した場合について、計算全体に GPU を用いた場合と部分的に用いた場合のそれぞれで GPU による計算速度の向上を評価した。

2. スイッチバック法とサブモデル分割

スイッチバック法とは、Babinetの原理に基づき、シルエットマスクを反転したシルエット開口を用いてポリゴン単位シルエット法を高速化する手法である。シルエット開口を用いると、開口部分の光波の伝搬計算だけで光波遮蔽処理ができるため、大幅に計算量を減らすことができる。スイッチ

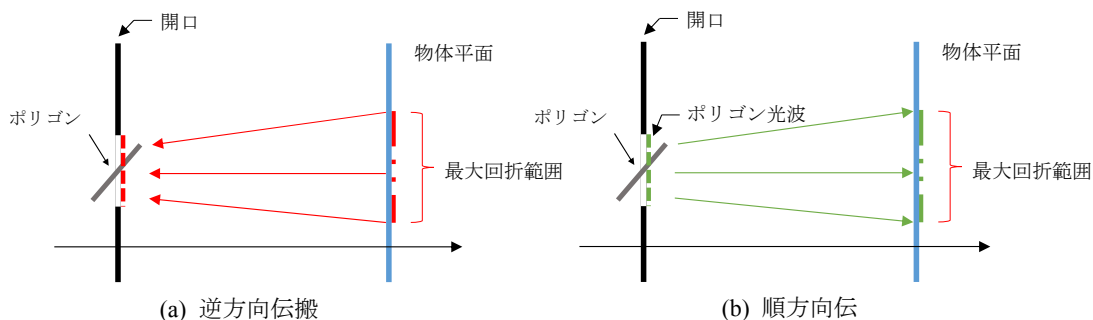


Fig.1 スイッチバック法における一つのポリゴンの処理

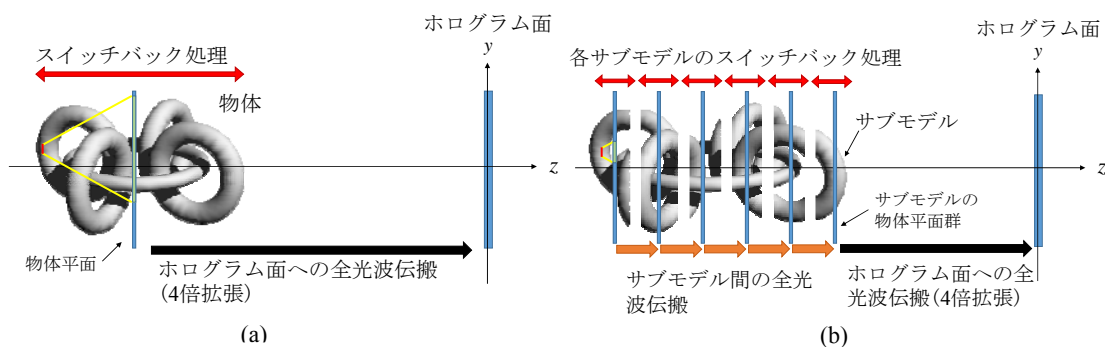


Fig.2 サブモデル分割を用いない場合(a)と用いた場合(b)のスイッチバック法

バック法の原理と定式化の詳細については、文献[4]を参照して頂きたい。

スイッチバック法における1つのポリゴンの処理をFig.1に示す。一つのポリゴンの処理では、(a)に示すように、まず物体平面上の全光波からポリゴン光波の最大回折範囲を部分光波として切り出し、ポリゴンの位置まで逆方向に伝搬してシルエット開口によるマスク処理を行う。次に、(b)に示すように、ポリゴン光波を加算して物体平面まで順方向伝搬し、全光波に加算する。

この手法では、Fig.2に示すように物体モデルが奥行方向に長い場合、物体平面上的ポリゴン光波の回折範囲が広がってしまうため、前述の順方向・逆方向伝搬計算に必要なサンプリング数が多くなってしまう。この問題を解決するために物体モデルを奥行方向の複数のサブモデルに分割する手法を用いる。この手法では、まず最奥のサブモデルについてスイッチバック法による処理を行い、そのサブモデルの中央付近に設置した物体平面上で物体光波を求める。この光波を次のサブモデルの物体平面まで全光波伝搬し、再びスイッチバック処理を行う。これをホログラムに最も近いサブモデル

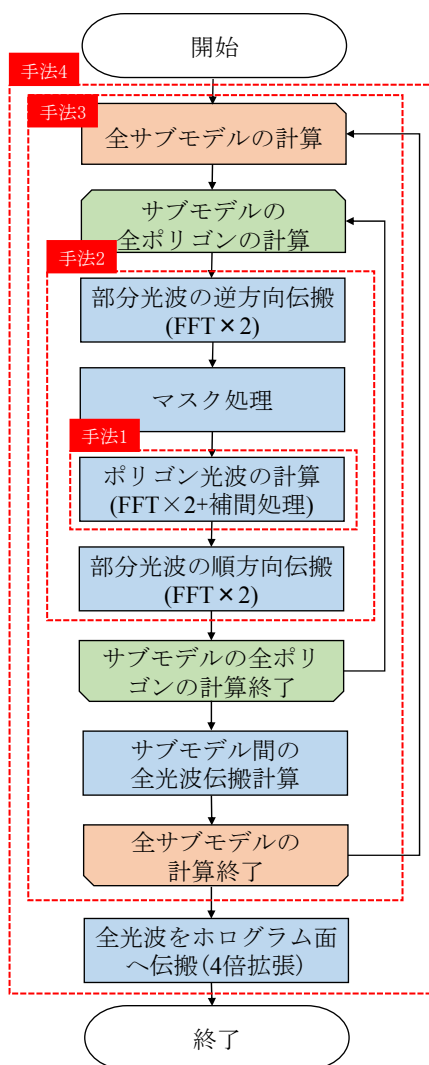


Fig.3 物体光波計算手順。赤色破線の範囲をGPUで処理している

ルまで繰り返す。これによりポリゴンと物体平面の距離が減少するため必要なサンプリング数を削減することができる。

3. スイッチバック法による物体光波の計算手順

サブモデル分割を用いたスイッチバック法の計算手順を Fig.3 に示す。まず、最奥にある一つのサブモデルについて、そのサブモデルに含まれる全ポリゴンを最奥から順に処理する。一つのポリゴンの処理は、前述のとおり、逆方向伝搬とマスク処理、ポリゴン光波の生成と加算、順方向伝搬からなっている。合計で6回のFFTが必要であるが、これらの処理はシルエット開口の範囲だけで良いため全光波よりはるかに小さな部分光波のみの処理である。

一つのサブモデル内の全ポリゴンのスイッチバック隠面除去処理が終わったら、得られた全体光波を次のサブモデルの物体平面まで伝搬計算する。これは全光波の伝搬であるため、サンプリング数が多く時間がかかる。ただし、サブモデル間の伝搬距離

は短いため、一般にサンプリング窓の4倍拡張は必要ない。伝搬した全光波に対して次のサブモデルにおけるスイッチバック隠面消去処理を行う。

同様の計算を最奥から順に最後のサブモデルまで繰り返し、全てのサブモデルを処理した後、全光波をホログラム面まで伝搬することで CGH における物体光波を計算することができる。なお、この最後の全光波伝搬計算は一般に距離が長く、4倍拡張が必要である。

4. GPU によるスイッチバック法の支援

前述のとおり、GPU のローカルメモリが足りないため、すべての処理を GPUで行うことは困難である。そのため、GPU で処理する範囲を変えた4種類の手法を評価した。それぞれの手法で GPU が処理する範囲を Fig.3 に示している。

手法 1

Fig.3 と 4 に示すように、ポリゴン光波生成計算のみを GPU によって行う場合を手

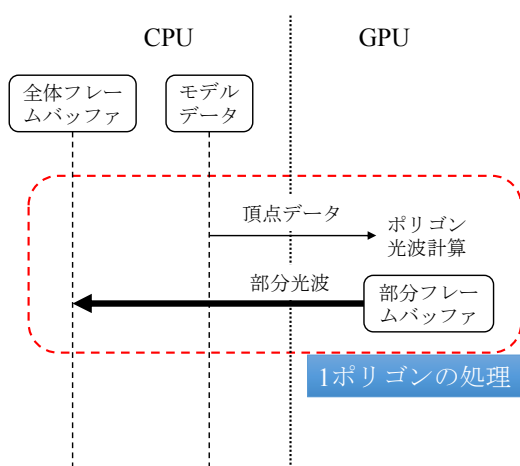


Fig.4 GPU における処理とデータ転送(手法 1)

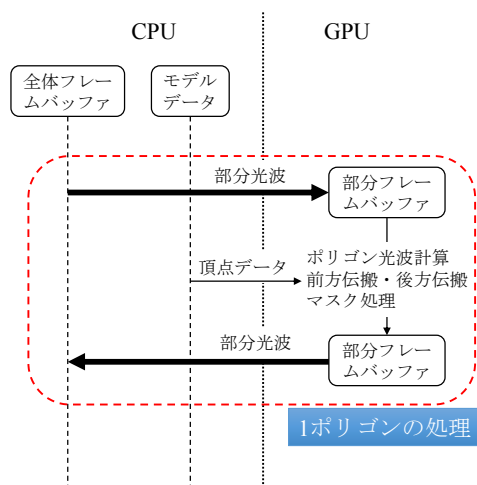


Fig.5 GPU における処理とデータ転送(手法 2)

法1とした。この手法では、GPU側ではポリゴン光波の計算に必要なフレームバッファのみが必要であるため、GPU側に必要なメモリが最も少なくて済む。

データの転送については、一つのポリゴンについて1回だけポリゴン光波の計算結果(部分光波)をGPUからCPUへ送ることになる。これが処理するポリゴンの回数分必要となる。

手法2

Fig.5に示すように、スイッチバック法における一つのポリゴンの計算の全過程をGPUによって行う場合を手法2とする。この手法ではGPU側に部分光波伝搬のフレームバッファとポリゴン光波生成のためのフレームバッファが必要になるため、必要なメモリが手法2よりもやや多くなる。

この手法では、CPU側に保持した全体光波から切り出した部分光波のGPUへの転送と、処理した部分光波の逆方向の転送がポリゴン毎に1回ずつ必要である。

手法3

この手法では、Fig.6に示すように、スイッチバック法における計算のほぼすべてをGPUで行うが、最後の全光波のホログラム面までの伝搬計算のみをCPUで行う。これは、この伝搬計算のみ4倍拡張が必要なため、大きなメモリが必要であるためである。

この手法では、GPU側で全光波と部分光波のフレームバッファ、ポリゴン光波生成計算に必要なメモリのすべてが必要である。中でも全光波のフレームバッファは16K×16KのCGHでは2GBとなるためGPUのメモリの大部分を占めることになる。ただし、データ転送については、全光波のフレームバッファをGPUからCPUへ一度だけ転送するだけで済む。

手法4

Fig.7に示すように、この手法では光波データの全てをGPU側に保持し、すべての計算をGPUで行う。しかし、手法3においてCPU側で行った4倍拡張を用いたホログラ

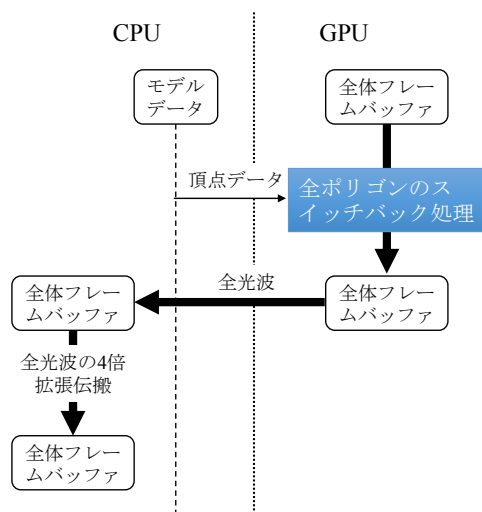


Fig.6 GPU における処理とデータ転送(手法3)

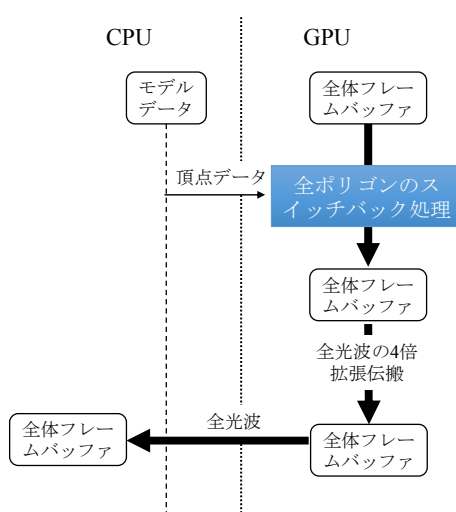


Fig.7 GPU における処理とデータ転送(手法4)

ム面までの全光波伝搬計算も GPU で行うため、16K×16K の CGH では GPU のメモリ上で全ての光波データを保持することができない．そこでこの場合は物体光波を二分割し、シフテッド角スペクトル法を用いて伝搬計算を行っている．

5. 速度比較

5.1. シーン構成

本研究ではスイッチバック法による隠面消去処理を確認する為にオクルージョンのある物体モデルを使用した．また、ポリゴン数による比較を行うために同じ物体でポリゴン数が違うものを用意した．用いた物体モデルと座標系を Fig.8 に、またパラメータを Table 1 に示す．

5.2. 計測環境

GPU によるスイッチバック法を用いたポリゴン法と CPU によるスイッチバック法を用いたポリゴン法の手法 1 から手法 4 までの速度比較を行った．計測に用いた環境を Table 2 に示す．

5.3. 計算時間の測定結果

GPU を用いない場合の計算時間を Fig.9 に、また GPU を用いた各手法による計算時間の測定結果を Fig.10 と 11 に示し、速度向上率を Fig.12 に示す．ここで、速度向上率を

$$R = \frac{T_{\text{CPU}}}{T_{\text{GPU}}} \quad (1)$$

と定義している． T_{CPU} と T_{GPU} はそれぞれ CPU と GPU による計算時間である．

これらの結果からわかるとおり、全ての場合で GPU を用いると計算時間が短縮し

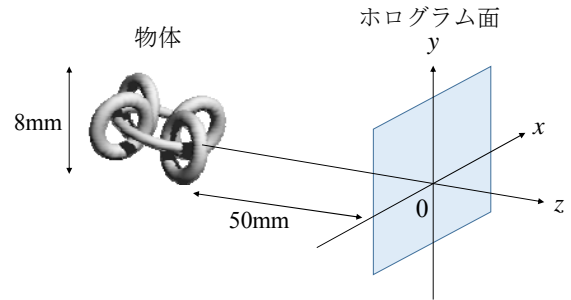


Fig.8 3D シーンとモデルの形状

Table 1 CGH のパラメータ

ピクセル数	8,192 × 8,192	
	16,384 × 16,384	
ピクセル間隔	0.8μm × 0.8μm	
波長	632.8 nm	
モデル	モデル 1	モデル 2
ポリゴン数	5000	2500
サブモデル分割数	16	

Table 2 測定環境

ホスト	
CPU	Intel Core i7-6800K (3.40 GHz)
メモリ	32 GB
コア	6
デバイス	
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN X (1.08 GHz)
メモリ	12 GB
CUDA コア	3072
ソフトウェア	CUDA 7.5

ていることが分かる．最も速度向上率が高かったのは手法 3 で 16K×16K のモデル 2 を処理した場合であり、最も低かったのは手法 2 で 8K×8K のモデル 1 を処理した場合であった．GPU で処理する範囲が大きいほうが速度が向上すると思われたが、8K×8K では手法 2 の方が手法 1 より遅い結果となった．これは手法 2 のデータ転送量が多いためと考えられる．一方、16K×16K で

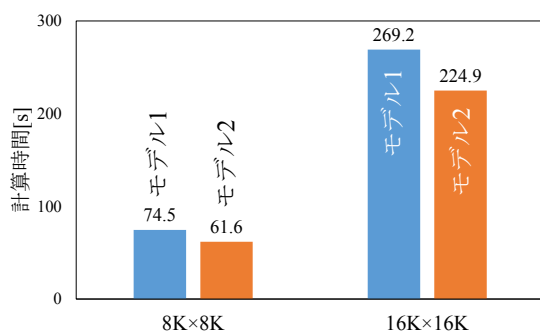


Fig.9 CPUによる測定結果

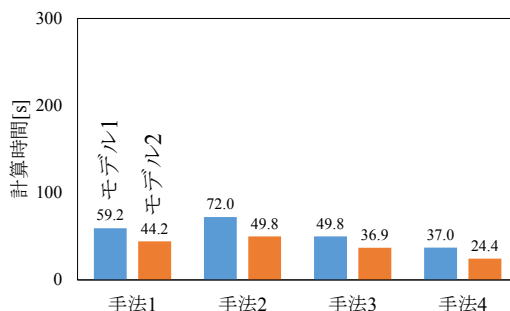


Fig.10 GPUによる8K×8Kの測定結果

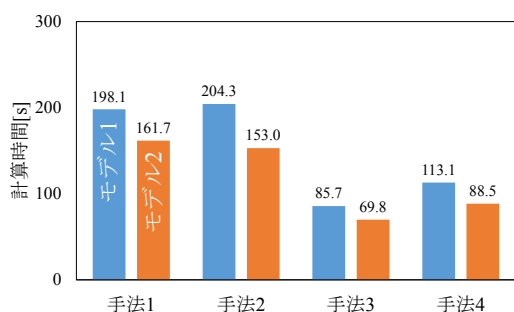


Fig.11 GPUによる16K×16Kの測定結果

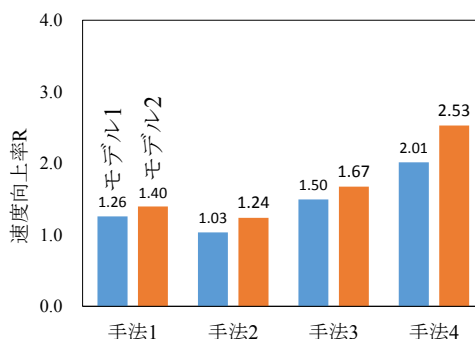


Fig.12 8K×8K 速度向上率

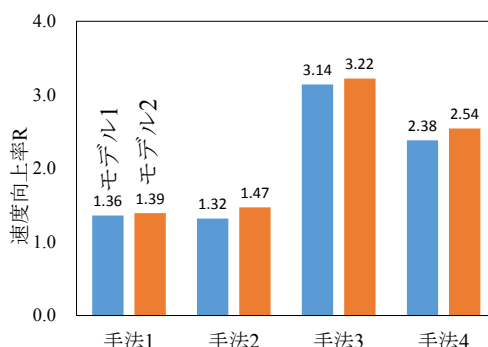


Fig.13 16K×16K 速度向上率

は、手法4が手法3よりも遅い結果となった。これは、メモリが足りずに光波を分割した影響を大きく受けているためである。同じ手法3で比較すると、8K×8Kよりも16K×16Kの方が速度向上率が高い。GPUでは各ピクセルを並列に処理する為、ピクセル数が多い方が効率が良くなるためこのような結果となると考えられる。一方、スイッチバック法ではポリゴンを並列処理しないため、いずれの手法でもポリゴン数が少ない方が処理時間が短くなった。

6.まとめ

現在のところ、スイッチバック法を用いたポリゴン法によって高解像度 CGH の計算を行うために十分なメモリをもつ GPU を用意することができない。そこで本研究では全ての計算に GPU を用いるだけでは

なく、一部の計算に GPU を用いる手法も実装し速度比較を行った。

当然ながら、GPU で処理する部分が多いほど高い速度向上率が得られる結果となった。しかし、光波を分割して伝搬を行った場合には、逆に速度向上率が低くなっている。以上の点から、手法3が最も速度向上率とメモリ使用量のバランスが取れていると言える。しかし、本格的な高解像度 CGH

では、手法 3 でも全体光波をメモリに格納しきれないため、物体光波を分割する必要がある。なお、物体光波を分割せずに 4 倍拡張付きの全光波伝搬が行える程度の解像度の CGH であれば手法 4 の速度向上率が手法 3 を上回ることが分かった。

7.謝辞

本研究は、JSPS 科研費 15K00512、文部科学省私立大学戦略基盤研究形成支援事業(平成 25 年～平成 29 年)、および科学技術振興機構産学連携バリュープログラム VP29117941340 の助成を受けたものである。

文 献

- [1] K. Matsushima, “Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture”, Appl. Opt. **44**, 4607-4614(2005).
- [2] K. Matsushima and A. Kondoh, “A wave optical algorithm for hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms for three-dimensional objects”, Practical Holography XVIII and Holographic Materials X, SPIE Proc. #5290, 90-97(2004).
- [3] K. Matsushima and S. Nakahara, “Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method”, Appl. Opt. **48**, 34, H54-H63 (2009).
- [4] K. Matsushima, M. Nakamura and S. Nakahara, “Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique”, Opt Express **22**, 24450-24465 (2014).
- [5] T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Ichihashi, and N. Takada, “Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL”, Opt. Express **18**, 9955-9960 (2010).

GPU を用いたイメージ型ホログラムの再生シミュレーション

山口 健[†] 吉川 浩[†][†] 日本大学理工学部応用情報工学科 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

E-mail: †{yamaguchi.takeshi89,yoshikawa.hiroshi}@nihon-u.ac.jp

あらまし 近年出力装置の高性能化に伴い、数十 Gpixel を超える計算機合成ホログラムが出力可能になってきた。それに伴い出力時間も長くなっており、出力前に再生される像を検証することは非常に重要である。これまでの研究で、イメージ型のホログラムのシミュレーションを実現してきたが、近年の高解像度化に伴う計算量の増加の影響からシミュレーションの高速化が重要となってきた。本研究では、これまで CPU で行っていた計算の一部を GPU 化することで、計算の高速化が実現できるか検証を行った。

キーワード 再生像シミュレーション, 計算機合成ホログラム, イメージ型, GPU, 高速化, FFT

GPU accelerated computer simulation of reconstructed image from image type hologram

Takeshi YAMAGUCHI[†] and Hiroshi YOSHIKAWA[†][†] Dept. of Computer Engineering College of Science and Technology, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501 Japan

E-mail: †{yamaguchi.takeshi89,yoshikawa.hiroshi}@nihon-u.ac.jp

Abstract Development of the output device of the computer-generated hologram (CGH), there are many reports which research over 10 Gpixel CGH. According to the increase of CGH resolution, output time also increased. Simulation of the reconstructed image is important to check the miscalculation or the quality. In our previous research, we have proposed simulation software for the reconstructed image of image type CGH. However, increase of the CGH resolution, calculation time also increased. In this study, we have investigated acceleration of the calculation time with GPU.

Key words Reconstruct simulation, Computer-Generated Hologram, Image type, GPU, Fast computation, FFT

1. はじめに

計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) は、ポリゴンデータなどの 3 次元形状データを元にして干渉縞を計算し出力することで 3 次元像を再生することが可能である。出力方法としては、空間光変調器に直接干渉縞画像を表示することで動く立体像を再生する方式や、感光材料に高精細な干渉縞を露光する方式^[1,2]、半導体などマスクなどを作る微細加工機を利用する方式^[3] などがある。中でも、文献 [4] や文献 [2] の手法は、高解像度のホログラム出力することが可能であり、近年では様々な CG の手法を取り入れて質感を向上させることを目的とした研究^[4-7] も盛んにおこなわれている。

ホログラム用の出力装置を用いる方式は、高解像度のホログラムを出力することが可能なため、計算時間や出力時間が数時間から数十時間と長時間になる傾向がある。ホログラムの出力には感光材料などの特殊なものが必要であるため、計算に誤りがあった場合時間と費用を無駄に消費することに

なってしまう。そのため、計算した干渉縞を元に数値シミュレーション (以下 再生像シミュレーション) を行い再生像を確認することができれば、時間や費用の無駄を削減することができる。

再像シミュレーションは、記録するホログラムの種類に応じて計算手法が異なるため、様々なソフトウェアを用意しなければならない。物体がホログラムから無限遠に位置するとみなせるフーリエ変換ホログラムでは、その再生像は逆フーリエ変換により容易に求めることができる^[8]。これに対して、像がホログラム面付近に再生されるイメージホログラムやレインボウホログラムでは、ホログラム全体にフーリエ変換を適用しても正しい再生像を得ることができない。そのため、著者らのグループは、ホログラムを少領域に分割し、各領域ごとにフーリエ変換を行い、再生時の照明の角度と観察者の位置および各領域のホログラムの空間周波数から、観察者の方向に向かう回折光を求める方法を提案した^[9]。さらに、再生像シミュレーション計算時に生成されるデータ圧縮することで、汎用的な PC においても 10 Gpixel を超える CGH の

シミュレーションが行えることを示した^[10]。しかし、近年出力装置の高精細化に伴い計算されるホログラムがさらに高解像度になり、再生像シミュレーションにかかる時間が増加することとなった。そのため、再生像シミュレーションの計算の高速化が重要な課題となってきた。

本研究では、これまで CPU で行ってきた計算の一部に GPU を取り入れることで、計算時間の短縮が行えるかを検証した。

2. イメージ型ホログラム

一般的なフレネルホログラムは、ホログラム面からある程度離れた場所に像が再生される。これに対して、イメージ型ホログラムは再生像がホログラム近傍またはホログラム面上に再生されるホログラムである。再生像がホログラム近傍にあるため、波長の異なる光による回折角の違いによって生じるばけが少なく、白色光による再生が可能である。CGH においても、イメージ型ホログラムは提案されており、白色光照明で鮮明な像が再生されている^[11,12]。また、水平スリットを用いたレインボウホログラムも CGH で実現されており、フルカラーの再生像が得られることが報告されている^[13]。

3. 計算機合成ホログラム作成の流れ

著者らの研究グループは、物体を点光源の集まりと考えそれぞれの点光源から生じる球面波と参照光の干渉計算を行い、干渉縞を生成している。物体点光源群を生成する際、CG モデルを元に OpenGL を持ちいて、ある視点の 2 次元透視図にデプスバッファから取得した奥行き情報を付加することで 3 次元座標の取得を行っている。さらに、2 次元透視図から得られるカラー情報を加えて、点光源の情報としている。近年の CGH では、視域も数十度とある程度確保することができるため、複数の視点からの物体点光源データを生成し計算することで、視点が移動した際にも正しいオクルージョンが得られるよう計算を行っている。イメージ型の計算機合成ホログラムは、ホログラム面から像の位置が近いと回折角が大きくなる傾向がある。ホログラム面全体で干渉縞を計算した場合、現状の出力装置では空間分解能が不足することがある。そのため、それぞれの点光源データに計算領域を付加することで、現状の出力装置でも再生可能なイメージ型 CGH の計算を可能としている。

4. ホログラムの記録・再生

ホログラムの記録の様子を図 1 a) に示す。まずレーザ光を 2 つに分ける。一方は記録素子に当てる参照光で、もう一方は素子に記録する物体で反射・拡散した物体光である。この物体光は物体の形状によって振幅や位相に変化が生じる。この参照光と物体光が干渉しあうことにより、素子上に干渉縞を作る。干渉縞の空間周波数を f とすると次式で表される。

$$f\lambda = \frac{\lambda}{d} = \sin \theta_{obj} - \sin \theta_{ref} \quad (1)$$

ただし、 $\sin \theta_{ref}$ は参照光の入射角、 θ_{obj} は物体光の入射角、

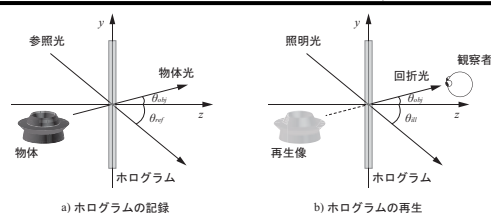


図 1 ホログラム記録と再生。

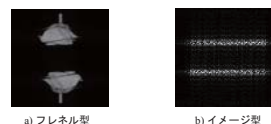


図 2 ホログラム種類によるフーリエ変換画像の違い。

d は干渉縞の周期、 λ は光の波長である。また、角度 θ は z 軸方向を 0 とし、反時計回り方向を正とする。

ホログラムの再生の様子を図 1 b) に示す。干渉縞に光を当てると光は干渉縞を通過する際に回折をする。この回折の角度と干渉縞の空間周波数 f の関係は次式で表される。

$$mf\lambda = \sin \theta_{obj} - \sin \theta_{ill} \quad (2)$$

ここで、 θ_{ill} は照明光の入射角、 θ_{out} は回折光の射出角、 m は回折の次数である。なお、図 1 は 2 次元で示してあるが、3 次元でも同様の関係が成り立つ。

5. 再生像シミュレーション

単一波長で記録・再生を行うフレネルホログラムでは、ホログラム面の一部に 2 次元フーリエ変換を行うと各ブロックに図 2 (a) のような画像が現れ、これが観測位置における再生像となる。これに対してイメージホログラムやレインボウホログラムでは、ホログラム面の一部にはオブジェクトの一部の情報しかないため、2 次元フーリエ変換を行っても図 2 (b) のように被写体の形状がわかる再生像を得ることはできない。さらに、レインボウホログラムは色情報を持っているため、カラーの再生像をシミュレーションするには、周波数領域を波長領域に変換し、可視光帯域の色情報を抽出する必要がある。そこで、再生波長と参照光角度を設定し、式(2)を用いて空間周波数を計算することにより各要素ホログラムの色を求める。

5. 1. 再生像シミュレーションの流れ

イメージ型の再生像シミュレーションは、計算機で生成した干渉縞を解析する際、図 3 のようにまずホログラム面を多数の正方形の小領域ブロック (以下 セグメント) に分割する。これらを 2 次元フーリエ変換し、小領域ごとに空間周波数の強度分布 (以下 中間データ) を求める。この中間データを画像ファイルとして保存し、シミュレーション画像の計算時に読み込み視点における色を求める。

5. 2. 波長の算出

フーリエ変換した各要素ホログラムは、図 4 のように空間

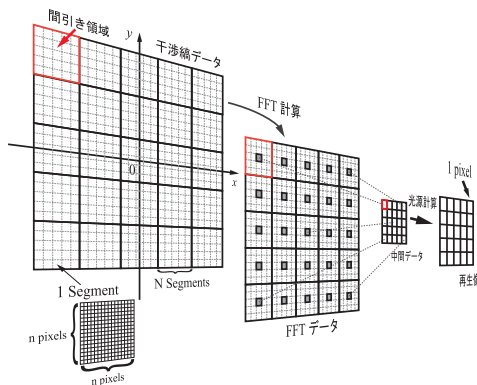


図3 イメージ型ホログラムの再生像シミュレーションの流れ。

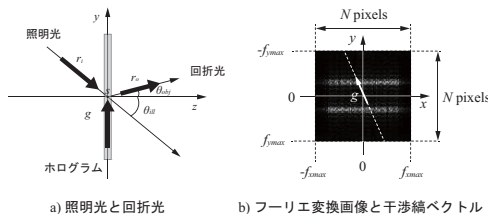


図4 再生波長の決定。

周波数成分となる。この空間周波数は、中心から離れる程絶対値が増加し、観察者へ向かう回折光の強度を求めるのに使用する。回折光の方向は、光源、ホログラム上の点、視点の関係から求める。光源と回折光の関係を示したものを図2-8に示す。ここでホログラム上の点を s とすると、光源ベクトル \mathbf{r}_i は光源から点 s に向かう単位ベクトル、視線ベクトル \mathbf{r}_o は点 s から視点に向かう単位ベクトルである。また干渉縞ベクトル \mathbf{g} は、ホログラム面内で視点に向かって回折する光に寄与する干渉縞の変化方向の単位ベクトルであり、 \mathbf{u}_z を z 方向の単位ベクトルとすると次式で求められる。

$$\mathbf{g} = (\mathbf{r}_i \times \mathbf{r}_o) \times \mathbf{u}_z \quad (3)$$

視点に向かう波長 λ は、式(2)より次式で表される。

$$\lambda = \frac{\sin \theta_{out} - \sin \theta_{ill}}{mf} = \frac{(\mathbf{r}_i \times \mathbf{r}_o) \cdot \mathbf{g}}{mf} \quad (4)$$

ここで、 $\sin \theta_{ill}$ は照明光とホログラムの法線のなす角、 $\sin \theta_{out}$ は視点とホログラムの法線がなす角度、 f は点 s における干渉縞ベクトルの方向に沿った空間周波数である。波長計算に関しては、ベクトル \mathbf{g} を含む直線上の点を考えればよい。

5. 3. 高解像度 CGH のシミュレーション

近年の高解像度の CGH の場合、この手法では中間データの容量は CGH の解像度と同程度となってしまうため、メモリサイズの大きな特殊な PC が必要となってしまう。そこで、高解像度の CGH においても汎用 PC で再生像シミュレーションができるよう、中間データの圧縮を行っている。再生像シミュレーションで用いられる中間データは、空間周波数

分布をもつ多数のセグメントで構成されている。このため、中間データをそのまま縮小すると、空間周波数領域のずれが生じ適切な再生像を計算することができない。また、セグメントを飛び飛びで利用する(以下 間引き)方法では、間引きに用いられないセグメントの情報が失われてしまう。そこで、間引かれる領域内で平均をとることで、情報の損失を少なくする。しかし、この手法ではすべてのセグメントに対してフーリエ変換を施す必要があるため、計算量は変わらない。

シミュレーションの解像度は1セグメントの画素数(Seg)と間引き数(M)、ホログラムの画素数(N)を用いて以下のように表せる。

$$R = \frac{N}{Seg \times M} \quad (5)$$

このため、セグメントの画素数と間引き数を調整することで任意の解像度のシミュレーション画像を得ることができる。また、中間データからシミュレーション画像を計算する際は、中間データ生成時のセグメントの画素数と間引き数を元に元の干渉縞の座標を算出し波長を計算する。

6. GPU を用いた計算の高速化

5. 1 に示す再生像シミュレーションにおいて、計算時間の大部分は中間データの生成に占められる。中間データの生成は、画像データの読み込み、セグメントごとのフーリエ変換、間引きにおけるデータの足し合わせ、画像の出力から構成されている。そこで GPU 計算適用可能な、セグメントごとのフーリエ変換、間引きにおけるデータの足し合わせを GPU 計算に変更することで、どの程度の計算速度の向上が見込めるか検証を行う。

6. 1. GPU 計算におけるボトルネック

本研究における GPU 計算で注意しなければならない点は、CPU と GPU 間のデータ転送とフーリエ変換処理である。CPU と GPU 間のデータ転送は、PCI Express を介して行われており、CPU や GPU のメモリ帯域と比較して狭いため極力少ないことが望ましい。GPU でフーリエ計算を行うため、元の干渉縞データは全て GPU 側に送らなくてはならないが、計算結果は間引き後の圧縮データだけにすることで転送時間を少なくする。

6. 2. GPU を用いた中間データの生成

本研究では、GPU として NVIDIA 社の GeForce シリーズを使用し、同社が提供しているプログラム開発環境 (CUDA) を用いて計算部を構築する。これまでの研究では、フーリエ計算を FFTW と呼ばれる高速フーリエ変換 (FFT) ライブラリを用いて計算を行っていた。CUDA にもフーリエ計算用のライブラリが用意されており (cuFFT)、本研究ではこれを用いて計算を行う。

GPU で FFT 計算を行う場合、2次元 FFT を利用すると一度に1セグメントの FFT しか行うことができない。そこで、1次元 FFT 一度に複数のセグメント(本研究では間引き領域内)同時に行うことで、高速化を図る。計算されたデー

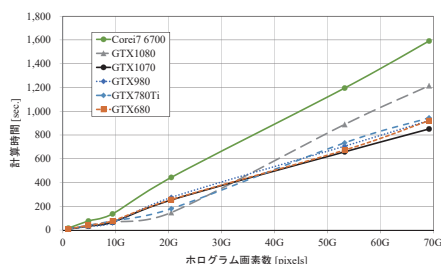


図 5 デバイスの違いによる中間データ生成時間。

タは、足し合わせた後低周波成分が中央に来るようにデータの入れ替えを行う。その後、GPU から CPU へ計算された中間データを転送することで、転送されるデータを最小限にする。

7. 結 果

画素数を変更した計算機合成レインボウホログラムを複数用意し、中間データ生成までの時間を計測した。新しく作成したプログラムを用いて 5 種類の GPU で測定した結果と文献 [10] のプログラムを CPU(Corei7 6700) で実行した結果を図 5 に示す。図 5 では、各画素数において最速となるセグメントサイズと間引き数の組み合わせを結果に用いている。グラフからわかるように、CPU と比較して 2 倍弱の計算の高速化が行えることが分かった。ここで、GPU の中で計算速度が速かった GTX1070 を使って、間引き数、セグメントサイズを変更したときの中間データ生成時間を計測した。図 6 にその結果を示す。グラフからセグメントサイズを大きくすればするほど、計算時間を短くすることができる。また、間引き数においても同様に、数を大きくするほど計算時間の減少につながる。セグメントサイズは一度に計算する画素数を決定するため、サイズが小さいと GPU の性能を十分に活かせないためであると考えられる。間引き数については、数が大きくなると計算後の GPU-CPU 間の転送量が少なくなり、中間データとしてファイルに書き出す量も少なくなるため、間引き数に応じて計算時間が短くなったと考えられる。セグメントサイズ、間引き数は式 (5) に示すように、シミュレーションの解像度に影響するためあまり大きな値にしてしまうと、細かい部分のシミュレーションを行うことができなくなってしまう。

8. む す び

本研究では、イメージ型の再生像シミュレーションの一部に GPU 計算を取り入れることで、中間データの生成時間の短縮が図れるかを検討した。セグメントの解像度が低い場合は、一度に計算できる量が少ないため GPU による並列計算の効果が表れにくかった。間引きに関しては、間引き数を多くすることで GPU による計算の増加、GPU-CPU 間のデータ転送が少なくなることから、計算速度の向上が見られた。現在、出力装置の性能の向上により高解像度 CGH が簡単に

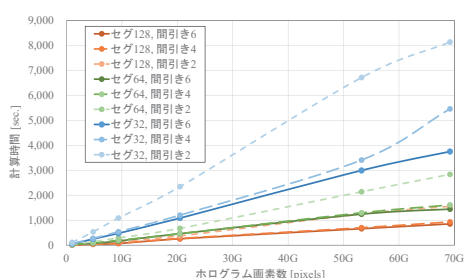


図 6 GTX1070 におけるセグメントサイズと間引き数の違いによる中間データ生成時間。

出力できるようになってきているため、本研究における再生像シミュレーションの計算の高速化はホログラム作製のサイクルを早めることに寄与できると考えられる。

9. 謝 辞

本研究において、計算時間のデータ収集に協力頂いた奥山瞬氏に感謝する。

文 献

- [1] 小林, 松島, 宮内: “ドット描画式ドラム型フリンジプリンタ”, HODIC Circular, **25**, 3, pp. 2-7 (2005).
- [2] 岩本, 山口, 吉川: “縮小光学系のレンズ変更によるフリンジプリンタの高精細化”, HODIC Circular, **37**, 3, pp. 14-17 (2017).
- [3] T. Hamano and M. Kitamura: “Computer-generated holograms for reconstructing multi 3-D images by space-division recording method”, SPIE Proceedings of Practical Holography XXII, **3956**, pp. 23-32 (2000).
- [4] 十嵐, 中村, 石井, 松島, 山口: “計算機合成ホログラムにおける視点移動に伴う視覚効果”, HODIC Circular, **37**, 3, pp. 2-6 (2017).
- [5] K. Wakunami and M. Yamaguchi: “Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane”, Optics Express, **19**, 10, pp. 9086-9101 (2011).
- [6] T. Ichikawa, T. Yoneyama and Y. Sakamoto: “Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane”, Optics Express, **21**, 26, pp. 32019-32031 (2013).
- [7] M. Ishikawa, T. Yamaguchi and H. Yoshikawa: “Generation of the point clouds data with PPM from multi-viewpoint for computer-generated hologram”, IWAIT 2016, paper 1B-2 (2016).
- [8] ハリハラン, 吉川, 羽倉: “ホログラフィーの原理”, オプトロニクス社 (2004).
- [9] 藤田, 山口, 吉川: “ホログラムの白色光再生シミュレーション”, 映像情報メディア学会誌, **61**, 10, pp. 1-5 (2007).
- [10] M. Tsumuta, T. Yamaguchi and H. Yoshikawa: “Computer Simulation of Reconstructed image from Huge Size Rainbow Hologram”, IWAIT2008, B3-5 (2007).
- [11] 神代, 山口, 吉川: “汎用 GPU を用いた計算機合成イメージホログラムの高速計算”, HODIC Circular, **32**, 3, pp. 19-22 (2012).
- [12] 山下, 松島, 中原: “スペクトル評価型誤差拡散を用いたイメージ型 CGH のバイナリコーディング”, 3 次元画像コンファレンス 2012, 4-2, pp. 70-73 (2012).
- [13] Y. Nakaguchi, T. Yamaguchi and H. Yoshikawa: “Computer-Generated Rainbow Hologram over 100 Giga-pixel”, International Conference on 3D System and Applications 2010, pp. 107-110 (2010).

平成 29 年第 4 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■日時：2017 年 11 月 17 日（金）13:00～17:00

■場 所：金沢大学サテライトプラザ 3F 集会室

920-0913 金沢市西町三番丁 16 番地

http://www.adm.kanazawa-u.ac.jp/ad_koho/satellite/

■テーマ：ホログラフィにおける計算の高速化

■プログラム

コンプレッシブホログラフィの GPU 高速化

遠藤優（金沢大），下馬場朋禄，角江崇，伊藤智義（千葉大）

汎用的なネットワークを用いた GPU クラスタシステムによるリアルタイム

電子ホログラフィの検討

高田直樹，老川稔，三宮廣海，前田祐貴（高知大），

中山弘敬（国立天文台），角江崇，下馬場朋禄，伊藤智義（千葉大）

空間周波数分割多重記録を行なうデジタルホログラフィにおける

高速像再生アルゴリズム

田原樹(関西大)，赤松 孝則(千葉大)，新井泰彦(関西大)，

下馬場朋禄，伊藤智義，角江崇(千葉大)

高解像度 CGH におけるスイッチバック法隠面消去処理の GPU を用いた高速化

中清裕貴，松島恭治（関西大）

GPU を用いたイメージ型ホログラムの再生シミュレーション

山口 健（日大）

■研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）

■参加費 会員 無料，非会員 2,000 円，学生は会報不要の場合は無料

■問合せ先 HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付

E-mail: office@hodic.org

平成 30 年第 1 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 日時： 2018 年 3 月 23 日 13:00～17:00 (予定)
- 場所： 印刷博物館 (東京都文京区トッパン小石川ビル内)
<http://www.printing-museum.org/index.html>
- テーマ 計算機合成ホログラムのプリントと作製
- プログラム 未定. 最新情報は HODIC の WEB ページで公開いたします.
<http://www.hodic.org/>
- 研究会参加申込 当日受付 (事前の申込は不要です)
- 参加費 会員 無料, 非会員 2,000 円, 学生で会報不要の場合は無料
- 問合せ先 HODIC 事務局
日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付
E-mail: office@hodic.org

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では, 独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております. WEB ページのアドレス (URL) は

<http://www.hodic.org/>

です, ぜひアクセスしてみてください. なお, WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています.

メールリストサービスは, 特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです. **HODIC** からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています. 加入も脱退も自由で, 費用もかかりません. 自分から情報発信したり, 分からないことを質問したりすることも可能です. インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます. 加入の申し込みは, 登録したいメールアドレスから maillist-req@hodic.org あてに, 本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください. ご質問は, w3@hodic.org までお知らせください.

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名誉会長	辻内 順平	会長	伊藤 智義（千葉大学）
副会長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前会長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（三菱電機）	企画委員長	山口 健（日本大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編集長	吉川 浩（日本大学）		

幹 事（５０音順）

石井勢津子（美術家）	石川 洵（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	太田 和哉（トリマティス）	鎌田 康昌（凸版印刷）
久保田敏弘（久保田和گرام工房）	酒井 朋子（千葉大学）	坂本 雄児（北海道大学）
佐藤 甲癸	佐藤 俊一（シャープ）	下馬場朋禄（千葉大学）
白倉 明（アーティエンス・ラボ）	高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）
田中 賢一（長崎総合科学大）	谷口 幸夫（大日本印刷）	福田 隆史（産総研）
本田 捷夫（本田ひかり技研）	松島 恭治（関西大学）	三科 智之（日本放送協会）
森田 正紀（アルファバグ）	山口 雅浩（東京工業大学）	渡邊恵理子（電気通信大学）

相 談 役（５０音順）

上田 裕昭（エコミナルグ・ラネトリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	永田 忠昭（arts-unis）	三田村峻右
堀内 道夫（光と風の研究所）		

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の１ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 37, No. 4 (Nov. 2017)

2017 年 11 月 17 日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局 (入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたは FAX にてお願いいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

HODIC