

GPU並列演算によるデジタルホログラフィの高速計算

Fast computation for digital holography using GPU parallel arithmetic

平野玄磨*, 大坊真洋*

Toma Hirano*, Masahiro Daibo*

*岩手大学

*Iwate University

キーワード: デジタルホログラフィー (Digital Holography), GPU (Graphic Processing Unit),
CUDA (Compute Unified Device Architecture), フーリエ変換ホログラム (Fourier transform hologram),
高速フーリエ変換 (Fast Fourier transform)

連絡先: 〒024-8551 盛岡市上田4-3-5
岩手大学 工学部 電気電子工学科 大坊研究室
大坊 真洋 Tel.: 019-621-6983 E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

1. 序論

ホログラフィーとは、光の回折と干渉を利用して、波面を記録、再生する技術のことである。この技術を用いて記録するホログラムには、光の強度と位相の両方の情報が含まれており、奥行き情報を含んだ三次元画像を表示することができる。

実際の光源を使わずに、光の干渉や回折をコンピュータでシミュレーションすることにより作成したホログラムをCGH (Computer Generated Hologram)という。一方、コンピュータを利用してホログラムを再生する技術をデジタルホログラフィーと呼ぶ。デジタルホログラフィーはゲルや液体、気体のような半透明の物質の内部の屈折率を、解析する方法として有効である。¹⁾

ホログラムの計算機再生には、ホログラム

の各点から再生平面の各点までの光の伝搬の組み合わせをすべて計算する必要があるため、処理には膨大な時間が必要となる。本研究では、GPU (Graphics Processing Unit)を利用してホログラム再生の計算を並列に行うことにより、ホログラム再生処理を高速化することを目的としている。高速化が実現できれば、観測物体の変化をリアルタイムで再生でき、動画を作成することも可能となる。

2. GPUとCUDA

GPUはコンピュータシステムの画像表示を高速に行うためのマイクロプロセッサである。近年、このGPUは多くのスレッドプロセッサと高速インターフェースで接続された大容量のメモリを搭載している。そのため、GPGPU (General Purpose computing on GPU)と呼ばれ

る，GPUの演算資源を画面表示以外の汎用計算に使用する技術の研究がここ数年活発に行われている．CPUよりも非常に高い並列演算性能を持っており，大規模なデータを高い並列性により高速に処理できるという利点を持っている．従って，繰り返し処理の多い科学技術計算に効果的である．しかし，命令実行の際に自由に読み書きが行えるメモリ空間がCPUよりも少なく，また，並列計算であるため分岐処理には向いていないというデメリットもある．CPUとGPUの構成の比較を図1²⁾に示す．

CPUは汎用性を高めるため，互換性を重視して開発されているのに対して，GPUは保つ互換性を最小限に留め，短時間で新しいアーキテクチャに改変されている．そのため，プログラミングモデルがCPUのものとは大きく異なり，GPUを利用するためには専門的な知識が必要であるという問題点があった．

この問題を解決するために，NVIDIAがGPU向けのC言語の統合開発環境である，CUDA (Compute Unified Device Architecture)を開発している．これによりC言語の中でGPUを利用するプログラムの作成が容易になった．本研究では，デジタルホログラムの計算がどの程度高速化されるかを調べた．

3. ホログラフィー

3.1 デジタルホログラフィーの特徴

光学系でのホログラムの再生には，記録したホログラムに，記録の時と同じ波長の参照光を当てる必要があるが，デジタルホログラフィーでは，参照光を当てる必要はなく，計算により元の物体の立体情報を再生することができる．ホログラムの情報をデジタルデータとして記録でき，科学的な処理が不要であるため，ホログラムデータを連続的に取得する

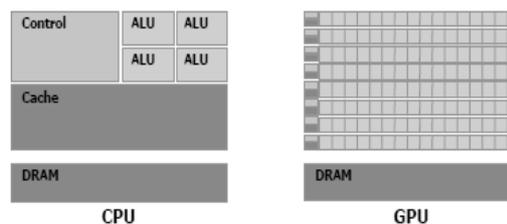


図1 CPUとGPUの構成

ことも可能である．これにより，計算の高速化ができれば立体情報を動画として再生することも可能となる．

3.2 ホログラムの計算機再生

図2にホログラム再生のホログラム平面，再生平面の幾何学的な位置関係を示す．入射した参照光がホログラム平面で回折され，記録時に物体が存在した位置に像を生じる．デジタルホログラフィーで再生する場合，光の回折と干渉を計算することにより物体の立体情報を再生する．

ホログラム平面と再生平面が有限距離の場合，再生平面に到達する光 $\Gamma(\xi, \eta)$ は，フレネル・キルヒホッフ積分により次式のように表すことができる．³⁾

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho)}{\rho} dx dy \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2}$$

ここで， λ は参照光の波長， $H(x, y)$ ホログラム関数， ρ はホログラム平面の座標 (x, y) と再生平面の座標 (ξ, η) 間の距離である．

式(1)をコンピュータで計算できるようにサンプリングする．次式を計算することによりフレネルホログラムを再生できる．

$$\Gamma(m, n) = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} H(k, l) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho)}{\rho} \quad (2)$$

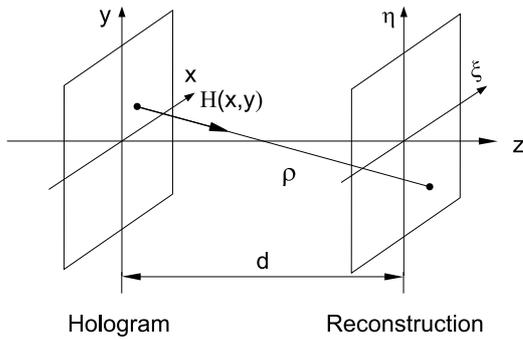


図2 ホログラム再生の座標系

4. 実験

対象がほぼ透明な物体の場合にはレーザー光が物体を透過できるため、物体の内部の構造を解析することができる。ホログラムを作成するためには、物体を透過させた物体光と、参照光を、ホログラム平面上で重ね合わせる光学系とする。本研究ではマッハツェンダー干渉計をアレンジして使用し、ホログラムを取得する。ホログラム記録のための光学系を図3に示す。

まず光源から出射したレーザー光をレンズで広げてコリメートし、ビームスプリッタ(BS)で物体光と参照光に分ける。物体光は物体の中を透過する。その後、再びビームスプリッタを用い物体光と参照光を重ね合わせる。物体内部を通過する際に、物体内部の屈折率の変化による強度や位相の変化により、参照光と物体光の間に位相差を生じれば干渉を起こし、ホログラムが記録される。ホログラム平面にはCMOSカメラを配置し、ホログラムパターンをデジタル的にコンピュータに取り込む。

試料下部のレンズにより、試料からの物体光をフラウンホーファー回折光とすることでフーリエ変換ホログラムを記録することができる。レンズは試料下方、焦点距離 f に位置している。レンズの記録物体側の面の座標を

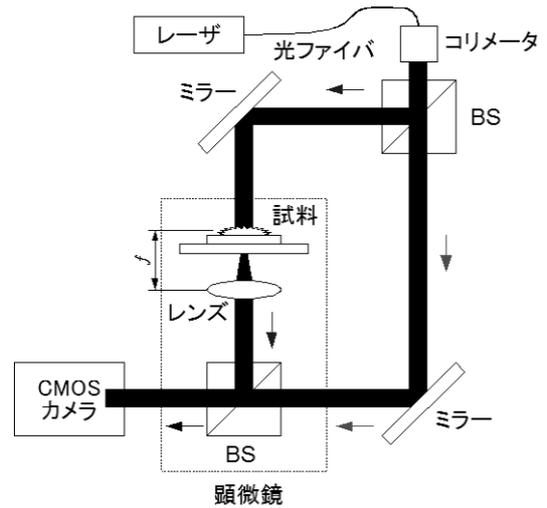


図3 干渉計の構成

(x_1, y_1) とし、距離 ρ をテイラー展開で近似する。

$$\rho = f + \frac{(x_1 - x)^2}{2f} + \frac{(y_1 - y)^2}{2f} \quad (3)$$

また、レンズは焦点距離 f から届く球面波を平面波に変換する性質がある。すなわち、波面に位相 $\exp[i\frac{2\pi}{\lambda}(x_1^2 + y_1^2)/2f]$ を与える性質がある。従って、記録物体により回折し、CMOSカメラに到達する光は次式のように表すことができる。

$$H(k, l) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} O(m, n) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda d} \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N} \right) \right] \quad (4)$$

ここで、 $\Delta x, \Delta y$ はCMOSカメラセンサーのpixelサイズ、すなわちホログラムのpixelサイズ、 N はホログラムの解像度である。式(4)は離散フーリエ変換の形をしている。従って、逆離散フーリエ変換をすることにより、CMOSカメラにより記録されたホログラムから物体が再生される。また、ホログラム再生計算はFFTを利用することが可能である。ここで、GPUを利用し、デジタルホログラフィー再生の高速化を試みる。

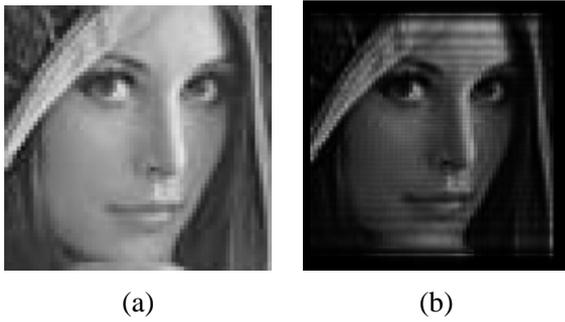


図4 (a)記録画像, (b)GPU利用した再生画像

5. 実験結果

本研究で使用したGPUはGeForce8800GTS, CPUはIntel Pentium 4である. GPUのメインクロックは650MHz, CPUのコアクロックは3.2GHz. コンパイラはそれぞれ, nvccとgccを使用した.

ここで, コンピュータで作成したCGHを再生し, 再生結果と計算時間を計測する. 図4(a)に記録画像, GPUを利用した再生画像を図4(b)にそれぞれ示す.

CGH作成時の条件は干渉計に設置してあるCMOSカメラを想定して与えた. 解像度は 1536×1536 pixel. ピクセルピッチは $3.2 \mu\text{m}$. また, カメラのフレームレートは5fpsである. 光源は, 波長809nmのレーザーとした. 試料下部のレンズは倍率50倍, 焦点距離は約1mmである.

図5に再生計算に要した時間の推移を示す. 上記の実験で再生した 1536×1536 pixelのホログラムを約600 msecで再生可能である. 1024×1024 pixelのホログラムであれば, 約250msecでの再生が可能であり, これはCMOSカメラのフレームレートに匹敵するスピードである.

ただし, リアルタイムで観測するためにはこの計算結果を画像として出力する必要がある. 画像化のための時間を含めると 1536×1536 pixelのホログラムの結果出力には約2600msec必要であり, この部分がスピードを制限している.

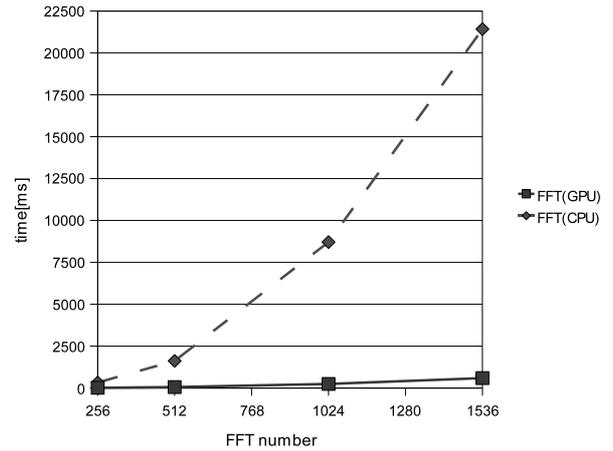


図5 計算時間

6. 結論

フーリエ変換ホログラムを記録する光学系の干渉計を想定し, 作成したCGHの計算機再生を行った.

再生計算にGPUの並列演算性能を利用することにより, 再生処理の高速化を試みた. 1536×1536 pixelのホログラムの再生において, GPUを利用した場合の計算時間は約600msecとなった. CPUを利用した場合の再生時間, 約22secと比較して, 大幅な高速化を実現できた. 従って, GPU利用した並列計算は, ホログラムの計算機再生において有効的であるといえる.

参考文献

- 1) Christian D. Depeursinge et al: "Digital Holography Applied to Microscopy", 30/34, SPIE Vol. 4659(2002)
- 2) "NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture", NVIDIA Corporation 2007
- 3) Ulf Schnars, Werner Jueptner: "Digital Holography", Springer 2004