

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26730063

研究課題名(和文)ホログラフィックメモリシステムにおける全動作シミュレータの高速化および性能評価

研究課題名(英文)Fast calculation and performance evaluation of full motion simulator for holographic memory system

研究代表者

舟越 久敏 (Funakoshi, Hisatoshi)

岐阜大学・教育学部・准教授

研究者番号：50413711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：電子的な信号処理から光による記録再生までの全過程を含めたホログラフィックメモリシステムの全動作シミュレータの高速化およびその性能評価を目的として研究を行った。2つのGPUユニットによる並列実行が可能となるべくシミュレータの解析エンジンを改良することによって、全動作シミュレータの計算時間を短縮させることに成功した。また、同一条件下でのシミュレータの解析結果と実験結果との比較を行い、全動作シミュレータによる計算結果の妥当性について確認することができた。

研究成果の概要(英文)：This research aims at speeding up a full motion simulator for holographic memory systems and evaluating its performance. It can simulate all the process, not only optical recording and reading but also electronic signal processing. Faster calculation speed of the simulator can be achieved by the development of new calculation engine with dual GPU configuration. The validity of the simulator can be verified by comparison of experimental and numerical results under the same conditions.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ホログラフィックメモリ GPGPU ビーム伝搬法 高速計算

1. 研究開始当初の背景

ホログラフィックメモリは2次元ページデータを一括に処理するため、他の光記録技術に比べデータ転送速度の面で優位にあり、次世代光記録の本命技術として注目されている。現在のところ、大容量化では多重記録により 1TB/inch² の記録密度を達成した例が報告されている。しかしながら、この記録密度は、1 ディスク当たり 500TB~1PB といわれるホログラフィック記録の理論記録密度限界には程遠い。これは、新たな記録再生方式の開発により、ホログラフィックメモリは更なる記録密度向上の可能性を秘めていることを意味しており、理論記録密度限界に近づけるべく新たな記録再生方式が継続的に提案されている。

新たな記録再生方式の解析的評価には、電子的な信号処理から光による記録再生までの全過程を含めたメモリシステムの全動作シミュレーションが必須である。我々は、GPU による汎用計算 (GPGPU) を用いたホログラフィックメモリの高速全動作シミュレータ (図 1) を世界に先駆けて開発し、大型計算機を用いずに PC 1 台で高速計算を可能にしている。

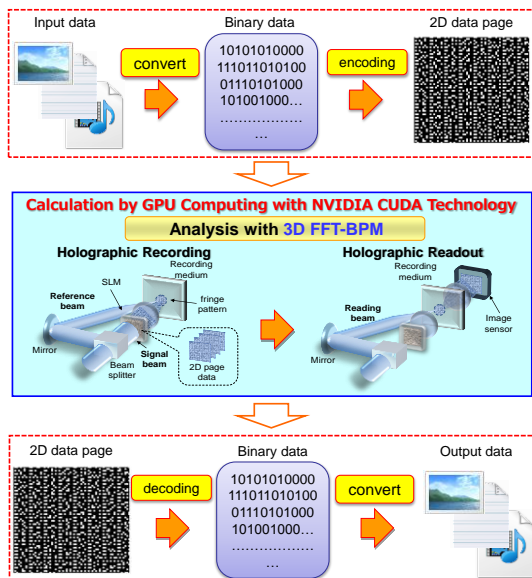


図 1 GPGPU を用いたホログラフィックメモリの高速全動作シミュレータ

このシミュレータの中核である、体積ホログラムの3次元数値解析手法として、高速フーリエ変換ビーム伝搬法 (FFT-BPM) を用いている。この手法は、有限差分時間領域 (FDTD) 法に比べて計算精度は落ちるものの、計算時間とメモリを大幅に減らすことができるため、FDTD 法では不可能であった実際の記録メディアと同じ厚さ (100~1000 μ m) の計算を PC で実行することが可能となり、より現実的な条件下でシミュレーションを実行することが可能となった。しかしながら、大きな解析領域で計算が可能になれば、必然的に計算時間は増大するため、計算時間短縮

のためには更なる高速化を行うことが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、低消費電力で廉価な計算環境下でも高速に実行可能な、ホログラフィックメモリの全動作シミュレータの性能向上を目的とし、シミュレータの更なる高速化とシミュレータによる解析結果の妥当性を実験結果との比較により評価する。具体的には、

- (1) シミュレータの解析エンジンを改良し、2つの GPU ユニットを用いた並列実行により全動作シミュレータの計算時間を更に短縮すること
 - (2) 同一条件下でのシミュレータの解析結果と実験結果との比較を行い、全動作シミュレータによる計算結果の妥当性について評価すること
- を目的とする。

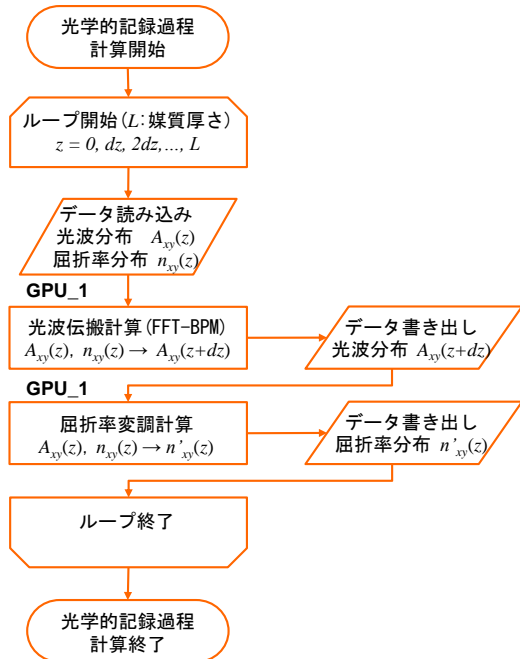
3. 研究の方法

- (1) 2つの GPU ユニットを用いた並列実行による全動作シミュレータの計算時間の短縮

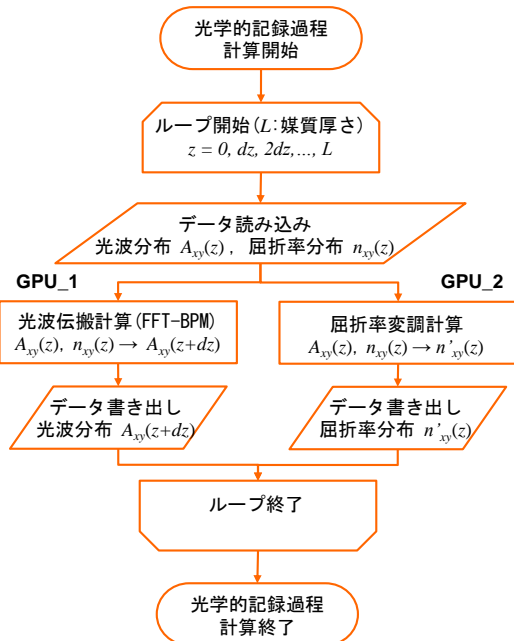
図 2 に光学的記録過程の計算手順を示す。伝搬方向 (z 方向) の微小ステップ (dz) ごとに実行される FFT-BPM による記録媒質内の光波伝搬計算と、光波の空間分布に応じた記録媒質の屈折率変調の計算は、共に GPU を利用している。これまでの計算プロセス (図 2 (a)) では、光波伝搬計算、屈折率変調の計算と順次行い、次の微小ステップの計算に進むが、次の微小ステップの光波伝搬計算では、1 つ前の微小ステップで計算した屈折率変調の値は利用しない。そこで、光学的記録過程における記録媒質内の光波伝搬と、それに伴う屈折率変調の更新の計算は並列的に実行可能であることに着目し、図 2(b)に示されるような、2つの GPU ユニットを用いた並列実行による光学的記録過程の計算時間の短縮を試みる。

2つの GPU ユニットを用いた並列実行による光学的記録過程の計算時間を評価するため、図 3 に示すような透過型コリニアホログラフィックメモリの光学系を仮定し、1 ページデータの記録過程を計算するのに要する時間を測定する。試行回数は3回とし、その平均時間を記録する。高速化率は、フリーの高速フーリエ変換ライブラリである FFTW を用いて CPU のみで計算を実行した場合の計算時間を基準とする。GPU を用いた計算では、GPU ボードとして GPU ユニットの2つ有する NVIDIA 社の GeForce GTX 590 を用い、CUDA のツールキットに含まれる FFTW とよく似たライブラリ構成の CUFFT という高速フーリエ変換ライブラリを使用する。また、2つの GPU ユニットの並列的に動作させるために OpenMP を導入し、2つの CPU コアを個々の GPU ユニット制御に割り当てて並列計算を実行する。計算に使用した PC の仕様

を表 1 に示す。



(a) 1つのGPUユニットを用いた計算手順



(b) 2つのGPUユニットを用いた計算手順

図 2 体積ホログラムの3次元解析における光学的記録過程の計算手順

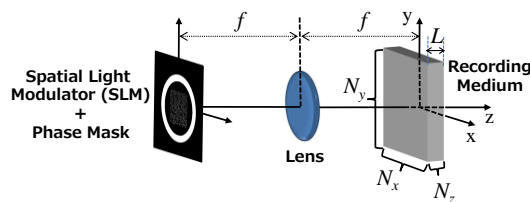


図 3 計算速度の評価に用いる透過型コリニアホログラフィックメモリの記録光学系

表 1 計算速度の評価に用いた PC の仕様

Operating System	Windows 7 Professional (64bit)
CPU	Intel Core i7 3820 (Clock freq. : 3.6GHz)
Main Memory	64GB (PC3-12800)
GPU	NVIDIA GeForce GTX 590
CUDA Version	4.2
Coding Software	Microsoft Visual Studio 2008 Professional

(2) シミュレータの解析結果と実験結果との比較による全動作シミュレータの性能評価

透過型コリニア光学系におけるシフト選択特性について、解析結果と実験結果を比較し、全動作シミュレータの性能を評価する。

実験光学系を図 4 に示す。光源として波長 633nm のヘリウムネオンレーザを、記録材料として厚さ 16 μ m のフォトポリマー (Litiholo 社製 C-RT20) を用いて、図 5 に示されるようなランダムドットのリング型参照光を用いた時のシフト選択特性を測定する。記録時には図 5(a)の画像を、再生時には図 5(b)の画像を、画素ピッチ 32 μ m の透過型空間光変調器 (SLM) に表示し、再生光分布をイメージセンサで検出することにより、記録媒質のシフト量に対する信号対雑音比 (SNR) とビット誤り率 (BER) を測定する。

シミュレーション実行時には、実験と同じパラメータを用いて、媒質のシフト量に対する SN 比と BER を求める。実験およびシミュレーションより得られた SN 比および回折効率を比較し、全動作シミュレータによる計算結果の妥当性について評価する。

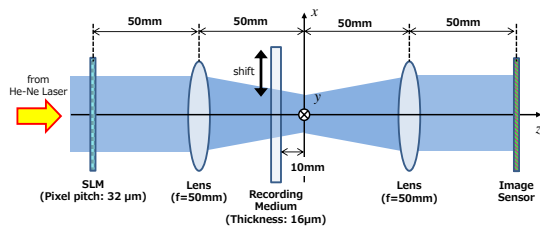


図 4 実験光学系

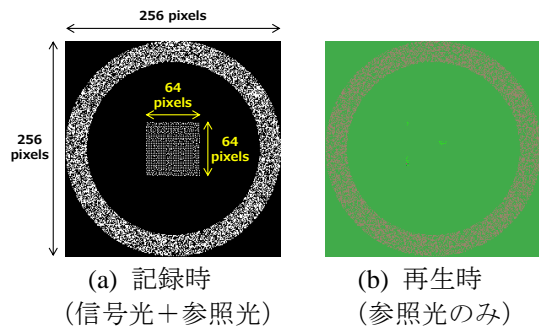


図 5 SLM に表示する信号光および参照光

4. 研究成果

(1) 2つのGPUユニットを用いた並列実行による全動作シミュレータの計算時間の短縮

図3に示す透過型コリニアホログラフィックメモリの光学系における、1ページデータの記録過程を計算するのに要する時間を測定した。表2に、厚さ方向のサンプル数一定 ($N_z=1000$) で、面方向のサンプル数 ($N_x \times N_y$) を変化させた場合における、1ページデータの記録過程を計算するのに要する時間の測定結果を示す。表2より、面方向のサンプル数が増加するにしたがって、計算速度は飛躍的に向上し、2つのGPUユニットを用いた並列実行による光学的記録過程の計算速度は、CPUのみで計算を実行した場合の約80倍にまで到達していることがわかる。

表2 面方向のサンプル数 ($N_x \times N_y$) に対する1ページデータ記録過程の計算時間測定結果 ($N_z=1000$)

$N_x \times N_y$	Calculation time [sec.] (Speed ratio)		
	CPU based calculation (FTW)	Single GPU based calculation (CUFFT)	Dual GPU based calculation (CUFFT+OpenMP)
256×256	115.19	5.43 (21.21)	3.98 (28.94)
512×512	487.03	11.64 (41.84)	8.36 (58.26)
1024×1024	1900.02	32.61 (58.26)	23.91 (79.47)

(2) シミュレータの解析結果と実験結果との比較による全動作シミュレータの性能評価

図4に示される実験光学系を用いて、透過型コリニア光学系におけるシフト選択特性について、記録媒質のシフト量に対するSNRとBERを測定した。また、実験条件と同じ条件下でシミュレータを用いて計算を行い、実験と同様に記録媒質のシフト量に対するSNRとBERを算出した。計算に用いたパラメータを表3に示す。

表3 計算パラメータ

Laser wavelength λ [nm]	633
Refractive index of photopolymer n_0	1.5
Maximum index modulation depth n_{max}	4.0×10^{-3}
SLM pixels	256×256
Page data pixels	64×64
Pixel size [μm^2]	32×32
Sample number $N_x \times N_y \times N_z$	$2048 \times 2048 \times 100$
Step size $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ [μm^3]	$0.86 \times 0.86 \times 0.16$
Beam intensity ratio I_{sig} / I_{ref}	1
Numerical aperture of objective lens NA	0.092
Total recording power P_m [mW]	0.2
Saturation energy flux density E_{sat} [J/cm^2]	0.02

記録時には図5(a)の画像を、再生時には図5(b)の画像をSLMに表示し、イメージセンサを用いて出力画像を検出した。図5(a)の中央部にある2次元データは、あるデータ列に2/4変調を施して生成している。また、再生時における媒質のシフト量は、実験では $1\mu\text{m}$ 、シミュレーションでは $0.86\mu\text{m}$ とし、各位置で画像を取得した。図6に再生時における記録媒質のシフト量に対するイメージセンサの取得画像を示す。図6上は実験によって得られた画像、図6下はシミュレーションによって得られた画像である。上述の手順で取得した画像データを元に、SNRおよびBERを求めた。

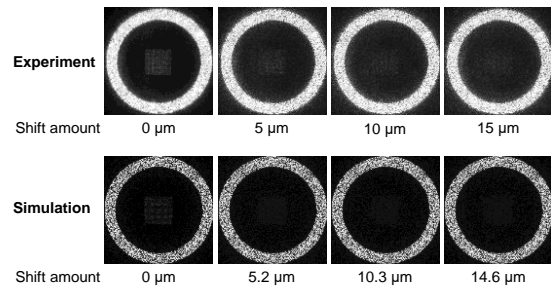


図6 再生時における記録媒質のシフト量に対する取得画像

図7に記録媒質のシフト量に対するSNRの変化を、図8に記録媒質のシフト量に対するBERの変化をそれぞれ示す。SNRおよびBERの値は実験結果と解析結果で若干異なるものの、いずれも同様の傾向を示しており、本研究で開発したシミュレータによって得られる結果は妥当なものであることが確認できた。

本研究で開発した全動作シミュレータは、ホログラフィックメモリシステムの高速解析を目的として開発したが、この全動作シミュレータのコアシステムを用いた、3次元表示の基本動作シミュレーションへの応用を示すことができた。

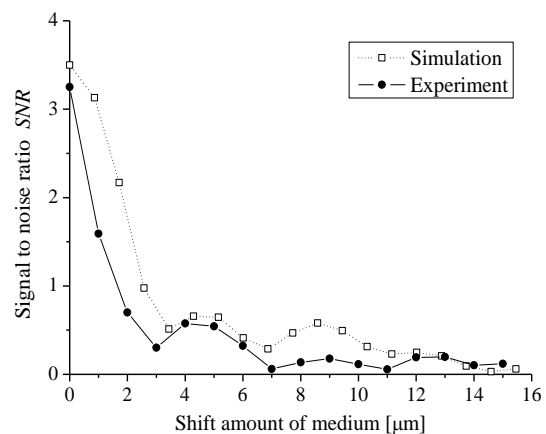


図7 記録媒質のシフト量に対するSNR

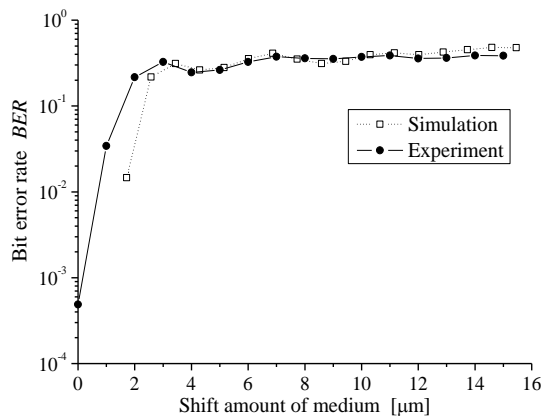


図8 記録媒質のシフト量に対する BER

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. 舟越 久敏, 岡本 淳, 渋谷 敦史, 菅 悠太, 佐久間 大樹: 体積ホログラムの高速数値解析手法を応用した新しい3次元ディスプレイの基本動作シミュレーション, 映像情報メディア学会技術報告, 査読なし, 2016, Vol. 40, No. 6, pp.309-313.
2. 舟越 久敏, 岡本 淳: ホログラフィックメモリ用全動作シミュレータにおける2つのGPUを用いた解析エンジンの高速化, 映像情報メディア学会技術報告, 査読なし, 2015, Vol. 39, No. 7, pp.27-30.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

舟越 久敏 (FUNAKOSHI, Hisatoshi)

岐阜大学・教育学部・准教授

研究者番号: 50413711