論文

高精細映像再生に向けたホログラムメモリー信号処理アルゴリズム

Readout Signal Processing Algorithm for Holographic Memory toward High Definition Video Playback

正会員 木下 延博[†], 正会員 室井 哲彦[†], 正会員 石井 紀彦[†],
 正会員 上 條 晃 司[†], 正会員 菊池 宏[†], 正会員 清水 直樹[†]
 Nobuhiro Kinoshita[†], Tetsuhiko Muroi[†], Norihiko Ishii[†],
 Koji Kamijo[†], Hiroshi Kikuchi[†] and Naoki Shimidzu[†]

あらまし ホログラムメモリーは、ページデータと呼ばれる2次元データ配列を一括して記録または再生する光情報記録システムである。ページデータの重畳された再生光はイメージセンサで撮影され、データ領域特定、シンボル抽出、デインタリーブ、誤り訂正の順に信号処理することで元のデータを復元できる。撮影された再生像は一種の画像であることに着目し、画像処理に特化したGPU (Graphics Processing Unit) によるホログラムメモリーの再生信号処理アルゴリズムを新規に開発した。各処理段をパイプライン化することにより、GPUによる再生信号処理系として95 Mbps以上のスループットを確認した。次いで、高精細映像をホログラムとして記録再生した結果、すべてのビット誤りが訂正され、映像再生されることを確認した。

キーワード：光メモリー、ページデータ、ブロックマッチング、シンボル抽出、デインタリーブ、誤り訂正

1. ま え が き

ホログラムメモリー^{1)~4)}は光の干渉を利用した情報記録システムである。光源としてレーザ光を用い、情報記録時には参照光と、データを重畳した信号光とを記録媒体へ同時に照射して干渉させ、これを屈折率差や吸光度差として記録媒体に記録したものがホログラムである。情報再生時には参照光のみを記録媒体へ照射し、ホログラムにより生じる回折光を検出後、元データを復号する。記録媒体への参照光の入射角度を変化させながら、記録媒体の同一箇所に複数のホログラムを重ね書き(角度多重)できるため大容量化が可能である⁵⁾⁶⁾。また、1 Mb程度の情報量をもつ2次元配列デジタルデータ(ページデータ)を一度の光照射で一括して記録または再生できるため、高転送レート化に有利である。このような特徴を有するホログラムメモリーは、高精細映像記録システムとしてその実用化が期待されている。さらに、光強度に応じてモノマを重ねさせる感光性有機材料⁷⁾を記録材料として用いた場合、記録後の長期保存性が優れていることから映像アーカイブ用途にも適している。

すでに広く普及した光メモリーであるCD (Compact Disc)

やDVD (Digital Versatile Disc), BD (Blu-ray Disc)が記録層のマークの有無を記録または再生するBit-wise型であるのに対し、ホログラムメモリーはページデータを扱うPage-wise型であるため、その再生信号処理手法が従来の光メモリーとは大きく異なる。ホログラムからの再生光はイメージセンサで撮影され、その再生像にページデータが含まれている。この場合、画像処理の性質を持つ再生信号処理が必要となる。

ところで近年、コンピュータのグラフィクス処理に特化したデバイスであるGPU (Graphics Processing Unit)を画像処理や映像処理、汎用計算に用いる試みが多方面で行われている^{8)~11)}。GPUは数100もの演算コアを有し、高い並列演算数による高速演算が可能であるとともに、信号処理アルゴリズム構成やパラメータをその都度プログラミングにより容易に変更できるという特徴を持つ¹²⁾。

一方、ホログラムメモリーにおいて、ページデータを含む再生像を一種の画像であると見なせば、グラフィクス処理に特化したGPUがホログラムメモリーの再生信号処理回路として有効に機能するものと考えられる。しかしながら、GPUの特性を活かしたホログラムメモリーの再生信号処理アルゴリズムについて、これまで十分な有効性の検証・評価が為されたとは言えない。

そこで今回、GPUによるホログラムメモリーの再生信号処理アルゴリズムを新規に開発した。本論文では、第2章でホログラムメモリーの光学系、ページデータ構成、再生

2012年12月13日、マルチメディアストレージ研究会で発表

2014年1月30日受付、2014年5月19日採録

[†] NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3276)

信号処理系を概説し、第3章で各再生信号処理段のアルゴリズムを詳述する。第4章ではGPUによる各処理段の時間測定結果を示した後、高精細映像の再生実験によりGPU再生信号処理アルゴリズムを総合的に評価し、その有効性を検証する。

2. ホログラムメモリの構成

2.1 光学系

図1にホログラムメモリの記録再生光学系を示す。波長532 nmのレーザビームをスペシアルフィルタにより空間ノイズ除去後に径拡大し、半波長板 (Half-Wave Plate: HWP) 1と偏光ビームスプリッタ (Polarizing Beam Splitter: PBS) 1により信号光と参照光に分離する。信号光は空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) 上に表示されたページデータで空間的に変調され、フーリエ変換レンズ (Fourier Transform Lens: FTL) により一度集光される。SLMとして画素ピッチ10.4 μm 、画素数1,400 $\times$ 1,050の反射型液晶パネルを用いた。FTLを出た信号光の集光点に矩形開口A1を配置することで高次の空間高周波成分を除去し、リレーレンズ (Relay Lens: RL) 1を通過して記録媒体へ照射する。ここで、矩形開口A1の大きさをナイキスト周波数の2倍に相当するよう定めた。

記録媒体には、厚さ1.2 mmのガラス板2枚に光重合性高分子が挟まれたものを用いた⁷⁾。記録層の厚さは1.0 mmである。

参照光を記録時にRL2側から、再生時にRL3側から記録媒体へ照射する。記録時と逆方向から参照光を入射する再生方法を位相共役再生²⁾と呼び、再生光は記録時の信号光と逆方向に伝搬し、光学収差を相殺する作用がある。これにより収差の少ない再生像がイメージセンサへ到達する。イメージセンサとして画素ピッチ8.0 μm 、画素数1,696 $\times$ 1,710のCMOSセンサを用いた。取得画像はCameraLinkインタフェース (10 tap, Full Configuration) を経由して再生信号処理系へ送られる。

2.2 ページデータ構成

記録すべきデジタルデータ列をページデータとして生成する前に、誤り訂正符号による符号化とインタリーブ処理を施す (図2)。以下に誤り訂正符号化とインタリーブについて順に述べる。

今回、誤り訂正符号として符号長1,250、符号化率0.812のLDPC (Low Density Parity Check) 符号を用いた。LDPC符号は、誤り訂正能力が高い符号化方式として利用されており、ホログラムメモリにおいてもリード・ソロモン符号より優れていることが示されている¹³⁾。

以下に情報ビット列 $\mathbf{w}$ に対する符号化手順を示す。符号化で用いる検査行列 $\mathbf{H}$ はGallagerの構成法を用いて生成する。ここでは、検査行列 $\mathbf{H}$ の後半部分を検査ビット関連行列 $\mathbf{P}$ とし、

図1 ホログラムメモリの記録再生光学系

図2 誤り訂正符号による符号化とインタリーブ処理

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I} | \mathbf{P}] \quad (1)$$

として構成した。ただし、 $\mathbf{I}$ は単位行列である。また、符号語 $\mathbf{x}$ は、情報ビット列 $\mathbf{w}$ と冗長ビット列 $\mathbf{z}$ より、

$$\mathbf{x} = [\mathbf{z} | \mathbf{w}] \quad (2)$$

で表される。符号語 $\mathbf{x}$ と検査行列 $\mathbf{H}$ の関係は

$$\mathbf{x} \cdot \mathbf{H}^T = \mathbf{o} \quad (3)$$

である。ここで $\mathbf{o}$ は零ベクトル、 T は転置を示す。したがって、

$$\mathbf{z} \cdot \mathbf{I}^T + \mathbf{w} \cdot \mathbf{P}^T = \mathbf{o} \quad (4)$$

となり、冗長ビット列 $\mathbf{z}$ は

$$\mathbf{z} = \mathbf{w} \cdot \mathbf{P}^T \quad (5)$$

で求められる。

ページデータの一部が欠落して再生されるなど、ビット誤りが一つの符号に集中した場合、その符号の誤り訂正が困難になる。ビット誤りが集中しないように分散させて擬

図3 ページデータとマーカの位置関係

似ランダム誤りとするためにはインタリーブが有効である。まず，LDPC符号化により求められた符号語 $\mathbf{x}$ を4,677個並べた後，その末尾に150個の0を付加することで長さ5,846,400 bitの1次元配列を作成する。インタリーブ処理では，1次元配列の読出し番地を3,045 bitずつ加算しながら順に5 bitずつ抜き出す。ただし，読出し番地が一周した場合には5 bit分の番地加算を行い，抜き出しを継続する。

ページデータはシンボル(明点または暗点)を2次元状に並べた画像であり, 1シンボルをSLM上の1画素で表現する. インタリーブ操作に基づき, 1次元配列から抜き出した5bitを 3×3 シンボルに対応づける5:9変調¹⁴⁾を用いて8ページデータ分のバッファへ順次格納する. 一つのページデータにおける横と縦のシンボル数 N_x, N_y を1,260と1,044に定めたため, 8ページバッファの横と縦の大きさは $1,260 \times 8,352$ となる. これにより, 長さ5,846,400の1次元配列から8枚のページデータを得る.

イメージセンサで取得される再生像内のページデータは、一般に位置ずれや回転などの歪みを伴う。これらを補正し、各シンボルの位置を精度よく算出するために、マーカと呼ばれる微小画像¹⁵⁾をページデータ領域外の4箇所に配置した。再生像内のマーカ位置を特定できれば、すべてのシンボル位置を求めることができる。図3にページデータとマーカの位置関係を図示する。今回はマーカ図形として二つの線分が一つの交点で交わる大きさ 8×8 pixelのL字状図形を用いる¹⁶⁾。なお図3中、 I_1 , I_2 , J_1 , J_2 はページデータからマーカへのオフセット位置を示す。

2.3 再生信号の処理系

従来の光ディスクと異なり、ホログラムメモリーでは画像処理の性質を持つ信号処理が必要となる。今回構築した再生信号処理の流れを図4に示す。イメージセンサで取得した再生像のうち、像内のマーカー位置を検出しデータ領域を特定する。マーカー位置情報に基づきすべてのシンボルを抽出後、デインタリーブと誤り訂正により元データを復元する。

図4に示した再生信号処理段を、図5のように二つのGPUに割当てた。二つのGPUはそれぞれ、処理負荷の比較的大きな誤り訂正と、それ以外の処理とを担う。CPU (Central Processing Unit) はイメージセンサからの画像取

図4 再生信号処理の流れ

図5 GPUへの再生信号処理段の割当て

得と DRAM (Dynamic Random Access Memory) 内バッファへの蓄積のほか、各処理段の同期制御を行う。CPUとして Intel Xeon X5650 (コア数 6, クロック 2.66 GHz), GPU として NVIDIA Tesla C2075 (コア数 448, クロック 1.15 GHz) を用いた。GPU は計算器内部でバス (PCI Express $\times$ 16 Gen 2) に接続されている。

GPUは多数の数値演算コアを有しており、画像などの2次元配列を各コアに分担させ、同時に並列動作することで高速処理できる。処理系のプログラミングにはC言語と親和性のあるコンパイラ、ライブラリーが提供されており¹²⁾、処理アルゴリズム開発においてその構成やパラメータの変更が容易である。

GPU内部では“スレッド”と呼ばれる演算コアごとの処理単位が複数集まり, “ブロック”と呼ばれる並列処理単位を構成する. スレッド, ブロックは1~3次元の論理的な処理配列として定義される. GPU内のメモリーは階層構造であり⁸⁾, 小規模データのランダムアクセスが高速な“共有メモリー”と呼ばれる上層メモリーと, 大容量でバースト転送に有利な“グローバルメモリー”と呼ばれる下層メモリーをユーザ側で指定して利用できる. この他にキャッシュメモリーやレジスタがGPUに搭載されているが, これらをユーザ側で明示的に制御することは困難である. 実際

のアルゴリズム構築では、共有メモリは高速であるが数10 KByte程度の容量しかないこと、グローバルメモリは断片的なアクセスのレイテンシが速度低下を招くことに留意し、処理すべきデータを上述のGPUブロックやスレッドに割当てることが肝要である。

GPUを用いた各処理段の具体的動作に関し、次章で詳細に述べる。

3. 各再生信号処理アルゴリズムとGPUへの実装

3.1 データ領域特定

記録時に埋め込まれたマーカ画像位置をブロックマッチングにより探索する。マーカ画像とテンプレートには、図3で示したL字形の図形を用いた。ブロックマッチングとしてSSD (Sum of Squared Difference) 法を用い、パラボラフィッティングによりサブピクセル精度で位置検出する。

SSD法は、テンプレートを1画素分ずつラスタスキャンさせながら、再生画像との画素値の差の二乗総和が最小となるよう探索する方法であり、以下の評価式 $f(s, t)$ が最小となる位置 (s_0, t_0) を求める。

$$f(s, t) = \sum_{m_x=1}^{M_x} \sum_{m_y=1}^{M_y} \left(T(m_x, m_y) - Q(m_x + s, m_y + t) \right)^2 \quad (6)$$

ここで、 M_x, M_y は横方向と縦方向のテンプレートの大きさ、 $T(m_x, m_y)$ はテンプレート配列 T の要素、 $Q(x, y)$ は再生画像を格納した配列 Q の要素、 (s, t) は探索位置をあらわす。ここでは T を多値テンプレート¹⁷⁾で構成し、 M_x, M_y とも16とした。また、 s, t の探索範囲をともに8 pixelとした。

SSD法により得られる位置 (s_0, t_0) は整数座標であるが、次の式で示すパラボラフィッティングによりサブピクセル精度でマーカ位置 (s_{opt}, t_{opt}) を算出する。

$$s_{opt} = s_0 + \frac{1}{2} \frac{f(s_0+1, t_0) - f(s_0-1, t_0)}{f(s_0-1, t_0) - 2f(s_0, t_0) + f(s_0+1, t_0)} \quad (7)$$

$$t_{opt} = t_0 + \frac{1}{2} \frac{f(s_0, t_0+1) - f(s_0, t_0-1)}{f(s_0, t_0-1) - 2f(s_0, t_0) + f(s_0, t_0+1)} \quad (8)$$

データ領域特定において最も基本的な並列化手段は、4つのマーカ位置探索をGPUの4ブロックに割り振ることである。そのうえで、式(6)における異なる s と t をブロック内の各スレッドに対応させ、探索範囲内での評価式 f を並列計算させる。

図3のとおりマーカ位置をあらかじめ定義しているため、必ずしも再生像全体を探索する必要はない。GPUのグローバルメモリに格納された再生像のうちマーカ位置近傍のみを共有メモリへ転送し、同じく共有メモリに格納したテンプレートをを用いて式(6)を計算することが高速と考えられる。全スレッドが評価式 f の計算を終了した後、評価式 f の最小値探索と式(7)、式(8)によるパラボラフィッティングにより4つのマーカ位置ベクトル $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \vec{D}$ を

図6 マーカ位置検出誤差に対するRaw BERの変化

図7 再生像から再配列ページデータへのシンボル抽出

決定する。

ここでマーカ位置検出に必要な精度を検証するため、マーカ位置 $\vec{B}$ の x 方向座標に位置検出誤差を恣意的に与えた場合について、誤り訂正前のビット誤り率(Raw BER)の変化を調べた(図6)。対象とする再生像は、1枚のページデータのみを記録媒体にホログラム記録して得た。また、シンボル抽出の条件は、次節で述べるうちの最良な条件を用いた。図6の結果から、一つのマーカが0.5 pixelの位置誤差を生じれば1桁程度のビット誤り増加を引き起こすこと、低いビット誤り率を維持するためには0.1 pixel以下の位置検出精度を要することがわかる。

3.2 シンボル抽出

イメージセンサで取得した再生像に含まれるページデータは、記録媒体と光学系とのミスアライメントなどにより位置ずれや回転を含む変形された形状となるが、検出されたマーカ位置に基づく座標変換によりシンボル位置補正ができる。

図7に示すとおり、前節で求めたマーカ位置ベクトル $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \vec{D}$ を用いて、シンボル抽出後の再配列ページデータ配列 $\mathbf{R}$ の要素 $R(i, j)$ に対応する再生像内のシンボル位置ベクトル $\vec{Q}$ を次式により求める。

$$\vec{Q} = \frac{\vec{Z}}{N_{xa} \cdot N_{ya}} \quad (9)$$

ただし、

図8 補間とフィルタの同時実装の概念図

$$\begin{aligned} \vec{Z} \equiv & (N_{xa} - \tilde{i})(N_{ya} - 1 + J_2 - \tilde{j})\vec{A} \\ & + \tilde{i}(N_{ya} - \tilde{j})\vec{B} + (N_{ya} - i)\tilde{j}\vec{C} + \tilde{i}\tilde{j}\vec{D} \end{aligned} \quad (10)$$

であり $N_{xa} \equiv N_x + I_1 + I_2 + 1$, $N_{ya} \equiv N_y + J_1 + J_2 + 1$, $\tilde{i} \equiv i + I_1$, $\tilde{j} \equiv j + J_1$ と定義した. 変数 i, j は $0 \leq i < N_x$, $0 \leq j < N_y$ の範囲をとり, $R(i, j)$ の座標を表す.

ところで, 式 (9) で求めた位置ベクトルの座標 $\vec{Q}$ は必ずしも整数にならず, シンボル抽出には補間処理が必要となる. 一般的な画像処理手法における補間方法には, 最近傍法(Nearest neighbor)や双1次補間(Bi-linear interpolation), 双3次補間(Bi-cubic interpolation)などがあり, ホログラムメモリにおいてもこれら補間方法が有効に機能すると考えられる. 一方, レンズなどの光学系を通過することにより高空間周波数成分が低下しているため, これを補償するフィルタ処理も必要である.

そこで今回, 補間機能とフィルタ機能を同時に実装したシンボル抽出法を開発した. 補間とフィルタの同時実装の概念図を図8に示す. 再配列ページデータ上の任意の点 $R(i, j)$ を再生像上の点 $Q(x, y)$ から求める際, 仮想的なバッファ配列 $\hat{Q}$ を経由させる.

再生像 Q から仮想バッファ $\hat{Q}$ への遷移において, フィルタ処理として次式で与えられるコンボリューションフィルタを実装した.

$$\hat{Q}(x, y) = \sum_{X=1}^3 \sum_{Y=1}^3 c(X, Y) \cdot Q(x+X-2, y+Y-2) \quad (11)$$

ただし, $c(X, Y)$ は次の係数行列 $\mathbf{C}$ の要素を表す.

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_2 & C_1 & C_2 \\ C_1 & 1 & C_1 \\ C_2 & C_1 & C_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

ここで, C_1, C_2 はフィルタ係数である. 次に仮想バッファ $\hat{Q}$ の要素 $\hat{Q}(x, y)$ からシンボル値 $R(i, j)$ を抽出する際に用いる補間は, 演算子 $[]$ を小数点以下切捨てとし次のように与えた.

<最近傍法>

$$R(i, j) = \hat{Q}([x+0.5], [y+0.5]) \quad (13)$$

<双1次補間>

$$R(i, j) = \sum_{X=[x]}^{[x]+1} \sum_{Y=[y]}^{[y]+1} \hat{Q}(X, Y) h(X-x) h(Y-y) \quad (14)$$

ただし,

$$h(t) = \begin{cases} 1-|t| & (0 \leq |t| < 1) \\ 0 & (1 \leq |t|) \end{cases} \quad (15)$$

<双3次補間>

$$R(i, j) = \sum_{X=[x]-1}^{[x]+2} \sum_{Y=[y]-1}^{[y]+2} \hat{Q}(X, Y) h(X-x) h(Y-y) \quad (16)$$

ただし α を係数として,

$$h(t) = \begin{cases} (\alpha+2)|t|^3 - (\alpha+3)|t|^2 + 1 & (0 \leq |t| < 1) \\ \alpha|t|^3 - 5\alpha|t|^2 + 8\alpha|t| - 4\alpha & (1 \leq |t| < 2) \\ 0 & (2 \leq |t|) \end{cases} \quad (17)$$

GPUへの実装においては, 一つのスレッドが1シンボル $R(i, j)$ のフィルタ処理と補間処理を担うこととした. ページデータ全体を複数のブロックに分け, それらを並行して処理させる. 隣接シンボルを担当するスレッドが互いに同一の再生像画素を参照することから, グローバルメモリに格納された再生像のうち参照すべき画素の集合を共有メモリに格納することで, メモリアクセスの高速化を図る. すなわち, 図8の再生像 Q と仮想的なバッファ $\hat{Q}$ の一部を共有メモリ内に存在させる. 再配列ページデータ $\mathbf{R}$ の横, 縦の大きさ N_x, N_y はそれぞれ1,260と1,044であるから, ブロック数 40×33 , 1ブロックあたりのスレッド数 32×32 とした.

次に, 記録媒体に1枚のページデータをホログラム記録して得られた再生像を用いて, 上述した補間とコンボリューションフィルタの同時実装効果を検証する. 式 (12) のコンボリューションフィルタ係数 $C_2=0$ とし, C_1 を変化した場合のRaw BERを図9に示す. なお, 双3次補間については式 (17) の係数 $\alpha=-0.6$ とした. 図9の結果から, 補間方法により特性が大きく異なり, 最良な C_1 の値も異なることがわかる.

各補間方法におけるコンボリューションフィルタ係数 C_1 を最良な値(最近傍法, 双1次補間, 双3次補間についてそれぞれ $C_1=-0.225, -0.26, -0.235$) に固定したうえで C_2 を変化した場合のRaw BERを図10に示す. なお, 双3次補間については式 (17) の係数 $\alpha=-0.6$ とした. どの補間方法においても $C_2=0.01$ で最良の誤り率を得た.

双3次補間について, コンボリューションフィルタ係数

図9 各補間方法での C_1 に対するビット誤り率の変化
($C_2=0$, $\alpha=-0.6$)

図11 双三次補間における α に対するビット誤り率の変化
($C_1=-0.235$, $C_2=0.01$)

図10 各補間方法での C_2 に対するビット誤り率の変化
($\alpha=-0.6$, 最近傍法, 双一次補間, 双三次補間においてそれぞれ
 $C_1=-0.225$, -0.26 , -0.235)

リューションフィルタの同時実装において、コンボリューションフィルタ係数を $C_1=-0.235$, $C_2=0.01$ に設定し、補間方法として $\alpha=-0.6$ の双三次補間を用いる場合に最も誤り率が低くなる結果を得た。

3.3 デインタリーブ

図12にデインタリーブ操作の概念図を示す。まず8ページデータを格納できるバッファをGPUのグローバルメモリとして確保し、順次切出された再配列ページデータをバッファにバースト転送する。このとき、バッファのアドレス連続方向は図中の矢印方向とする。インタリーブ同様に、デインタリーブは連続しないアドレスからデータをコピーし再配置する必要があるためバースト転送を使用できず、レイテンシーの累積により転送時間が増大する懸念がある。そこで、この場合においても共有メモリを経由することで高速化を図る。

まず、8ページ分のバッファを 40×261 のブロックに分割し、一つのブロックで 32×32 のスレッドを実行させる。一つのブロックはグローバルメモリである8ページバッファの対象領域から共有メモリへ 96×96 画素をコピー

を最良値である $C_1=-0.235$, $C_2=0.01$ として式(17)の α を変化させた場合、図11に示すとおり誤り率は α の値に大きく依存しないことがわかる。以上より、補間とコンボ

図12 デインタリーブの概念図

し、各スレッドは 3×3 画素について5:9変調に基づく硬判定と 9×1 画素への再配列の後、グローバルメモリー上に設けられたそれぞれのバッファへ格納する。硬判定と再配列の結果は後段の誤り訂正で用いる。

3.4 誤り訂正

訂正能力が高いLDPC符号の復号法としてSum-Product法が知られている¹⁸⁾。そこで、ここではSum-Product法に基づき、その対数尤度比の計算方法をホログラムメモリーの5:9変調に対応するよう修正して復号を行う¹⁹⁾。以下に具体的な手順を示す。

ステップ1

デインタリーブの段階で得られた再配列符号を $\mathbf{r}$ とし、硬判定結果を復号語 $\hat{\mathbf{x}}$ の初期値とする。

ステップ2

検査行列 $\mathbf{H}$ における要素 H_{mn} について、 $H_{mn}=1$ を満たす (m, n) に対し、変数 $\beta_{mn}=0$ とする。

ステップ3

対数尤度比計算を行う。推定したビット長 N の復号語 $\hat{\mathbf{x}}$ に対して、 n 番目のビットを“1”および“0”としたときの符号語 $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ を、

$$\mathbf{u} = \Phi(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n-1}, 1, \hat{x}_{n+1}, \dots, \hat{x}_N) \quad (18)$$

$$\mathbf{v} = \Phi(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n-1}, 0, \hat{x}_{n+1}, \dots, \hat{x}_N) \quad (19)$$

とする。ここで $N=1,250$ 、 $\hat{x}_n$ は復号語 $\hat{\mathbf{x}}$ の n 番目の要素、 Φ は符号語を5:9変調することを示している。 $\mathbf{r}$ と $\mathbf{u}$ および $\mathbf{v}$ から、 n 番目における対数尤度比 $\hat{\lambda}_n$ を

$$\hat{\lambda}_n = \ln \frac{\exp(-d^2(\mathbf{r}, \mathbf{u})/N_0)}{\exp(-d^2(\mathbf{r}, \mathbf{v})/N_0)} \quad (20)$$

で求める。ここで d はユークリッド距離、 N_0 はノイズ分散を表す。

ステップ4

行処理を行う。 $H_{mn}=1$ を満たす (m, n) に対し、

$$\gamma_{mn} = \prod_{n' \in A(m) \setminus n} \text{sign}(\hat{\lambda}_{n'} + \beta_{mn'}) \cdot f\left(\sum_{n' \in A(m) \setminus n} f(|\hat{\lambda}_{n'} + \beta_{mn'}|)\right) \quad (21)$$

を計算する。ここで、

$$\text{sign}(a) \equiv \begin{cases} 1 & (a \geq 0) \\ -1 & (a < 0) \end{cases} \quad (22)$$

および

$$f(a) \equiv \ln \frac{\exp(a)+1}{\exp(a)-1} \quad (23)$$

であり、 $A(m)$ は変数ノードのインデックス集合を表す。

ステップ5

列処理を行う。 $H_{mn}=1$ を満たす (m, n) に対し、

$$\beta_{mn} = \sum_{m' \in B(n) \setminus m} \gamma_{m'n} \quad (24)$$

を計算する。ここで、 $B(n)$ はチェックノードのインデックス集合を示す。

ステップ6

推定した符号語

$$\hat{x}_n = \begin{cases} 0, & \text{if } \text{sign}\left(\hat{\lambda}_n + \sum_{m' \in B(n)} \gamma_{m'n}\right) = 1 \\ 1, & \text{if } \text{sign}\left(\hat{\lambda}_n + \sum_{m' \in B(n)} \gamma_{m'n}\right) = -1 \end{cases} \quad (25)$$

を計算する。

ステップ7

符号語の必要充分条件

$$\hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{H}^T = \mathbf{0} \quad (26)$$

を満たすならば、復号語 $\hat{\mathbf{x}}$ を出力してアルゴリズムを終了する。

ステップ8

繰り返し回数がその上限値より少ないとき、ステップ3に戻り演算を繰り返す。上限値に達した場合は復号を終了する。

今回、LDPC復号のGPU実装においてはテクスチャメモリーを積極的に活用した。テクスチャメモリーは、グローバルメモリーと同様に下層の大容量メモリーに位置づけられるが、メモリー内容の定義後は読み出し専用であること、テクスチャキャッシュと呼ばれる上層の高速なキャッシュ機能を使用できる点が異なる。したがって、前述のLDPC復号過程のうち検査行列 $\mathbf{H}$ やノードのインデックス集合など、規模が大きいかつ頻繁にアクセスされるが内容変更しない配列をテクスチャメモリーに配置した。さらに、指数関数の計算負荷が高いことから、式(23)の関数 $f(\alpha)$ をテクスチャメモリー内であらかじめテーブル化することにより高速化を図った。

4. GPUによる再生信号処理実験

4.1 各処理段の時間測定

前章で述べた各処理段および再生像取得、転送に要する時間を測定した。1ページデータあたりの時間測定結果を表1に示す。なお、8ページ単位で処理を行うデインタリーブと誤り訂正については、8ページ処理後の1ページデータあたりの平均時間を示す。

イメージセンサの露光時間は、ホログラムの回折効率や再生時の参照光パワーに依存する。強いホログラムを記録し回折効率を高めた場合、短い露光時間で十分な再生光量を得られるが、記録媒体の光重合性高分子が有限であるた

表1 各処理段の時間測定結果

処理内容	時間 (ms / page)
イメージセンサの再生像取得（露光）	2.0
データ転送（イメージセンサ→DRAM）	4.2
データ転送（DRAM→グローバルメモリ）	0.6
データ領域特定	0.3
シンボル抽出	3.8
デインターリーブ	1.8
誤り訂正（LDPC符号の復号）	4.7

め角度多重数が低下する。また、高い出射パワーを有するレーザ光源を用いれば参照光パワーを増すことができるが、光源自体が大型になる課題がある。今回は記録媒体の特性を踏まえた結果、最適な露光時間は2.0 msであった。

イメージセンサからDRAMへの転送時間は主にCameraLinkインタフェースの帯域幅で律速される。さらに高速なインタフェースの使用により転送時間を短縮できる可能性がある。一方、DRAMからGPUのグローバルメモリへの転送は、計算器内部バス上のバースト転送であるため0.6 msと比較的高速であった。

データ領域特定は、あらかじめ定義されたマーカー位置周辺のみブロックマッチングを行うため、短時間で処理を完了した。

表1のシンボル抽出は、3.2節で最良な結果を示した双3次補間とコンボリューションフィルタの同時実装における測定結果である。なお、最近傍法とコンボリューションフィルタを同時実装した場合は1.2 msであった。双3次補間は最近傍法に比べ演算量が多いものの、ビット誤り率の観点から有利である。シンボル抽出結果が後段のLDPC復号時間を増大させる懸念もあるため、双3次補間とコンボリューションフィルタの同時実装が現実的であると考えられる。

デインターリーブは単純なシンボル並び替えだけでなく、後段のLDPC復号のために硬判定を行っていること、またシンボル抽出処理と同一のGPUを用いていること、などが処理時間に影響していると考えられるが、1ページデータ

あたりの処理時間はボトルネックにならない測定結果であった。一方、LDPC符号の復号は他の処理段と比較して長い処理時間を要する。1符号あたりの平均繰り返し回数が増えるほど、その処理時間が増加するため、訂正前のビット誤り率を低く抑えることが重要となる。表1に示した測定結果は、再生ページデータのRaw BER平均値がおよそ 2×10^{-3} の場合であり、1符号あたりの平均繰り返し回数は2.33回であった。それ以下の誤り率であれば1ページデータあたりのLDPC復号時間が4.7 ms以下になることが期待できる。

4.2 パイプライン化

一つの再生像が最終段の誤り訂正処理を完了する前に次の再生像を受け入れるパイプライン化により、スループット向上を図った。パイプライン化した再生信号処理の遷移図を図13に示す。

イメージセンサの再生像取得（露光）とDRAMへのデータ転送が完了した段階で、イメージセンサは次の再生像取得命令（トリガ）を受け付ける。次の再生像を取得する間に、DRAMからGPUのグローバルメモリへ再生像を転送する。その後、GPUはデータ領域特定とシンボル抽出を順次行い、その間に次の再生像がイメージセンサからDRAMへ転送される。

再生ページデータが8枚分蓄積された段階で、デインターリーブ、誤り訂正を順次行うが、その間にも再生像取得からシンボル抽出までを並行して実行する。図13のとおりパイプライン処理を動作させるよう、CPUが同期制御した。

表1の時間測定結果と図13に示したパイプライン処理の遷移図を考慮すれば、ホログラムを連続再生するうえで1ページデータあたりの所要時間はイメージセンサ露光時間（2.0 ms）とDRAMへの転送時間（4.2 ms）の和（6.2 ms）により決定されることがわかる。誤り訂正符号を含めた1ページデータあたりの情報量は、

$$N_x \cdot N_y \cdot \frac{5}{9} = 730,800 \text{ bit} \quad (27)$$

であるから、1ページデータあたりの所要時間を用いて

図13 パイプライン化した再生信号処理の遷移図

$$730,800 / 0.0062 = 118 \text{ Mbps} \quad (28)$$

の総レートを得る．また，符号化率0.812を考慮するとユーザレートとして

$$730,800 / 0.0062 \times 0.812 = 95.7 \text{ Mbps} \quad (29)$$

を得る．

以上より，ホログラムメモリの再生信号処理系において，GPUに特化した再生信号処理アルゴリズムをパイプライン化して実装した結果，95 Mbps以上のスループットが確認できた．

4.3 高精細映像の再生実験

GPUに実装した再生信号処理系の総合評価を行うため，15秒の高精細映像（解像度 $1,920 \times 1,080$ ）をページデータ化してホログラムメモリに記録後，再生した．得られた再生ページデータをGPU再生信号処理系により処理し，元の映像が正常に復元されることを確認した²⁰⁾．用いた映像コーデックはMPEG-4 AVC/H.264，ビットレートとフレームレートはそれぞれ15 Mbps，30 fpsである．

映像データ量は28 MByteであり，2.2節で述べたページデータ構成法に基づき378枚のページデータを生成した．今回は記録媒体の1箇所あたりの角度多重数を96に設定した．したがって，378枚のページデータの末尾に6枚のダミーデータを追加し合計384枚とした後，記録媒体の4箇所（ピッチ1 mm）に96枚ずつ角度多重した．

次に，イメージセンサ露光時間を2.0 msとしてホログラムを連続再生した．再生された384枚のページデータに対するRaw BERを図14に示す．このときのRaw BERの平均値は 1.55×10^{-3} であった．第3章で一つだけホログラムを記録再生し得られたRaw BERと比較すると，ビット誤りが増加している．これは，角度的に隣接するページデータ間のクロストークが要因と考えられるが⁶⁾，誤り訂正後に得られた映像データを元データと比較し，すべてのビット誤りが訂正されていることを確認できたことから，どの再生ページデータも訂正可能な誤り率を示したと言える．

図14 全ページデータに対するRaw BER測定結果

記録媒体の4箇所から全ホログラムを再生するために要した時間は8 sであった．記録媒体の1箇所からの再生時間は0.6 s程度で完了するが，記録媒体の位置移動と，移動後の記録媒体の振動停止に時間を要した．今後，機構系の改良によりスループットを最大限に引き出すことができると考える．

5. むすび

ホログラムメモリはページデータと呼ばれる2次元データ配列を一括して記録または再生するため，従来の光ディスクに比べ高いデータ転送速度が期待できる．本論文では，ホログラムメモリから再生されるページデータが一種の画像と見なせることに着目し，グラフィクス処理に特化したGPUによる再生信号処理アルゴリズムを新規に開発し，これを評価した．

各処理段における時間を測定するとともに，各処理段をパイプライン化することにより，GPUによる再生信号処理系として95 Mbps以上のスループットを確認した．次いで，高精細映像から384枚のページデータを生成し，これらをホログラムとして記録，再生した結果，すべてのビット誤りが訂正され，映像再生されることを確認した．

今後，GPUの並列数を増加させるとともに，それに対応した各アルゴリズムの改良を進めることで，更なるスループットの改善が見込まれる．また，本論文では再生信号処理に焦点を当てたが，今後は記録時のページデータ生成にもGPU処理の適用を進める．

GPUは信号処理アルゴリズム構成やパラメータの変更が容易であるため，光学系の構成変更に応じた迅速なアルゴリズム検証が可能である．これは，ホログラムメモリにおいて光学系と信号処理アルゴリズムの双方を同時に開発するうえでの大きな利点である．さらに，GPUにより得られたアルゴリズム検証結果をFPGA (Field-Programmable Gate Array)やASIC (Application Specific Integrated Circuit)などの集積回路設計へ反映させることで，より実用的なホログラムメモリシステムの早期実現が期待される．

本研究を進めるにあたり，新日鉄住金化学株式会社様より記録媒体サンプルをご提供いただきました．ここに深く謝意を表します．

〔文 献〕

- 1) L. Hesselink, S.S. Orlov and M.C. Bashaw: "Holographic data storage systems", Proc. IEEE, 92, 8, pp.1231-1280 (Aug. 2004)
- 2) J. Ashley, M.-P. Bernal, G.W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J.A. Hoffnagle, C.M. Jefferson, B. Marcus, R.M. Macfarlane, R.M. Shelby and G.T. Sincerbox: "Holographic data storage", IBM J. Res. Develop. 44, 3, pp.341-368 (May 2000)
- 3) N. Ishii, T. Muroi, N. Kinoshita, H. Kikuchi, K. Kamijo and N. Shimidzu: "Holographic Data Storage System toward High Recording Density", presented at Photonics West 2011, 7957-25 (Jan. 2011)
- 4) 室井：「ホログラフィックメモリ」，映像誌，68，1，pp.42-45 (Jan. 2014)

- 5) M. Hosaka, T. Ishii, A. Tanaka, S. Koga and T. Hoshizawa: "1 Tbit/inch² Recording in Angular-Multiplexing Holographic Memory with Constant Signal-to-Scatter Ratio Schedule", Jpn.J. Appl. Phys., **52**, 9, pp.09 LD01.1-09 LD01.5 (Sep. 2013)
- 6) N. Kinoshita, T. Muroi, N. Ishii, K. Kamijo and N. Shimidzu: "Control of Angular Intervals for Angle-Multiplexed Holographic Memory", Jpn.J. Appl. Phys., **48**, 3, pp.03 A029.1-03 A029.4 (Mar. 2009)
- 7) T. Ando, T. Shimizu and K. Masaki: "Multiplexing Characteristics of Aromatic Photopolymer for Holographic Data Storage Media", Int'l Workshop on Holography and related technologies (IWH) 2011 Digest, P16, pp.53-54 (Nov. 2011)
- 8) 須田: "GPUとGPGPUの概要", 映情学誌, **66**, 10, pp.808-812 (Oct. 2012)
- 9) 富山, 岩館: "多視点ハイビジョン映像生成システムの開発", 映情学誌, **64**, 4, pp.622-628 (Apr. 2010)
- 10) 浜田, 高橋, 苗村: "超解像自由視点画像合成の高速化実装", 映情学誌, **66**, 10, J385-J394 (Oct. 2012)
- 11) 藤澤, 加藤: "GPUを用いたインタラクティブフォトモザイク", 映情学誌, **64**, 9, pp.1382-1384 (Sep. 2010)
- 12) 杉藤: "CUDAプログラミング", 映情学誌, **66**, 10, pp.813-816 (Oct. 2012)
- 13) H. Pishro-Nik, N. Rahnavard, J. Ha, F. Fekri and A. Adibi: "Low-Density Parity-Check Codes for Volume Holographic Memory System", App. Opt., **42**, 5, pp.861-870 (Feb. 2003)
- 14) 木下, 石井, 室井, 上條, 清水: "ホログラフィックメモリ用変調テーブルの一構成法", 映情学年大, 8-4 (Aug. 2007)
- 15) 本山, 杉山, 原田, 山本: "デジタルホログラム情報の高速・高精度データ位置検出処理", 信学技報, **103**, 494, pp.7-12 (Dec. 2003)
- 16) N. Kinoshita, T. Muroi, K. Kamijo and H. Kikuchi: "Precise Symbol Extraction in Holographic Data Storage", Tech. Dig. of Int'l. Symp. Opt. Mem. (ISOM), Mo-C-02, p.34-35 (Aug. 2013)
- 17) 特許第4809756号公報
- 18) 仲村, 柳田, 大沢, 岡本, 村岡: "LDPC符号化・繰り返し復号化方式における誤り伝搬抑制の一検討", 映情学技報, **37**, 26, pp.13-17 (June 2013)
- 19) 室井, 石井, 木下, 上條, 菊池: "ホログラム記録におけるLDPC符号化5:9変調方式の復号とHD映像再生", 映情学技報, **36**, 55, pp.9-12 (Dec. 2012)
- 20) N. Kinoshita, N. Ishii, T. Muroi, K. Kamijo, T. Ando, K. Masaki, T. Shimizu and H. Kikuchi: "HDTV Playback Demonstration of Holographic Data Storage System using Wavefront Control & GPU-Based Post-Processing", Tech. Dig. of Int'l. Symp. Opt. Mem. (ISOM), Th-N-01, pp.210-211 (Oct. 2012)

木下 延博 1997年, 同志社大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年, NHK入局。大阪放送局を経て, 2000年より, 放送技術研究所にて, 主に, 光ディスク, ホログラムメモリの研究に従事。博士(工学)。正会員。

室井 哲彦 2002年, 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了。同年, NHK放送技術研究所 Post Doctoral Fellow。2004年, NHK入局。放送技術研究所に勤務。冷陰極ディスプレイ, ホログラムメモリの研究に従事。博士(工学)。正会員。

石井 紀彦 1993年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年, NHK入局。放送技術研究所にて, 主に, 光通信用デバイス, 光メモリ材料, およびホログラムメモリの研究に従事。博士(工学)。正会員。

上條 晃司 1978年, 電気通信大学電気通信学部応用電子工学科卒業。同年, NHK入局。1981年より, 同放送技術研究所に勤務し, 現在に至る。超広帯域磁気記録, ハイビジョンVTR, 光記録, ホログラムメモリの研究に従事。正会員。

菊池 宏 1984年, 豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, NHK入局。神戸放送局を経て, 1987年より, 同放送技術研究所。2008年~2010年, (独)情報通信研究機構に外向。液晶・磁気光学材料を用いた空間光変調器, 3次元カメラ, ホログラム記録・表示などの研究に従事。博士(工学)。正会員。

清水 直樹 1982年, 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年, NHK入局。放送技術研究所にて, 光記録, 表示デバイスの研究・開発に従事。博士(工学)。正会員。