

# 4K リアルタイム実写カラーホログラフィーシステム

大井 隆太郎

## 4K Real-Time Color Holography Video System

Ryutaro Oi

In holography technique that targets the video rather than a still image, and that the hologram cannot be taken in slight vibration, and not within the darkroom has been a problem for a long time. We have achieved a holographic system color video that is converted into the hologram by parallel fast three-dimensional image taken by the integral photography (IP) is one of the playback system rays, real-time behavior can be. We performed IP shooting under natural light using a lens array and camera pixels (3840×2160) 4K (lens elements 240×135). We have a hologram when playing using as SLM (spatial light modulator) device 4K-LCOS (liquid crystal on silicon) for the three primary colors RGB. We confirmed (30 frames per second) real-time operation of the entire system.

**Key words:** integral photography, 4K, holography, IP-hologram conversion, real-time

ホログラフィーの原理それ自体は60年以上も前から知られており、SF映画等の中でたびたび用いられてきた。しかし、実際のホログラフィーは静止画の写真技術として一部が実用になっているに過ぎず、SFに登場するようなフルカラーかつ動画、等身大のホログラフィーはまだ実現していない。その原因のひとつとして、ホログラフィーの記録のためには光の波長程度の細かさをもった記録媒体(ホログラム)が必要であり、これを電子的に実現するためには膨大な画素数が必要になるという技術的な困難さが挙げられる。他方、フルカラーのホログラムを撮影から表示まですべてにわたって電子的に流通させることができれば、原理的に究極の三次元映像システムが得られると考えられており、これは電子ホログラフィーとよばれている。1990年代の初めにMITのベントンらは、音響光学素子を空間光変調器(SLM)として用いたholographic video display<sup>1)</sup>を提案し、その後この分野の研究が盛んになった。当時は水平方向のみの単色(赤)のホログラムであり、被写体はCGにより作られていた。また、電子ホログラフィーの研究はその後、旧通信放送機構(TAO)やNHKにおいても研究が行われた<sup>2-3)</sup>。実写物体を対象とした電子ホログラムでは、シチズンの橋本らによるシステム

が有名である<sup>4)</sup>。これは、CCDイメージセンサーとレーザーにより被写体のホログラムを直接撮影し、液晶素子をSLMに用いた再生装置により、モノクロではあったが、動画に対応した電子ホログラフィーを実現している。

実写のホログラフィーの撮影の際には暗室が必要で、撮影中に光の波長程度の振動が生じただけで撮影が失敗するという難しさがあり、これが電子ホログラフィーの実現を困難にしているもうひとつの原因である。つまり、われわれが慣れ親しんだテレビのように屋外(白色光)で動きのある被写体を撮影することは、實際上、ホログラフィーの直接撮影ではきわめて難しい。

われわれは、上記2つ目の問題を克服する方法のひとつとして、光線再生方式のひとつであるインテグラル・フォトグラフィー(IP)により撮影された立体動画像を、計算によってリアルタイムにホログラムに変換し、液晶素子をSLMに用いたホログラム表示装置でフルカラー再生する方法を考案し、その動画対応等を進めてきた。本稿では4K(3840×2160画素)カメラおよびレンズアレイを用いたIP撮影装置、4K液晶素子を用いたホログラム再生装置、4KのIP-ホログラム実時間変換装置による電子ホログラフィーシステムについて解説する。

表1 各種三次元映像の記録・再生方法の特徴

	両眼視差 幅転	運動視差	調節 (浅い)	調節 (深い)
二眼立体 (眼鏡式3D テレビなど)	○			
多眼立体	○	○		
光線再生 (インテグラル・フォト グラフィーなど)	○	○	○	
ホログラフィー	○	○	○	○

## 1. 実写三次元映像の撮影

### 1.1 インテグラル・フォトグラフィーによる撮影

三次元映像を記録・再生する方法として、ホログラフィーは最も完全な方法であることが知られている。近年では、3D機能(三次元映像の表示機能)をもったテレビが広く市販されるなど、三次元映像が以前よりも身近になりつつあるが、立体視を実現する方法にはいくつかの種類が知られている。表1はおもな三次元映像の記録・再生方法の代表的な特徴を示したものである。表1にあるとおり、市販3Dテレビのほとんどは、左右2視点分の映像を提示することで人間の脳内で立体を知覚させている。このため、画面に対して左から見るときと右から見るときでは本来は被写体の見え方が異なるはずであるが、どの位置から見た場合でも常に正面からの映像だけを見ることとなる(両眼視差)。これに対し、多眼立体では画面に対する観察位置(視点)が異なると、それに応じて異なる被写体像を得ることができ、運動視差が再現される。光線再生とホログラフィーでは、実際に空中に被写体像を結像させるため、上記の両眼視差と運動視差に加えて、例えば一眼レフカメラなどにて、再生された被写体へピントを合わせて再度撮影することも可能である。

一般に、二眼立体<多眼立体<光線再生<ホログラ

フィーの順で、立体映像による複雑なシーンの再現性がよくなるが、同じ順で取り扱う情報の量が増えて、実現は難しくなる。光線再生とホログラフィーを比較すると、ホログラフィーのほうがピントの合う範囲がより広く、より高精細な立体映像を得ることが可能であるといえる。

ホログラムの撮影には、前述した光の波長精度の除振に加えて、レーザーの使用が不可欠である。自然光でカラーの三次元動画を撮影するために、われわれの電子ホログラフィーシステムでは、IPを入力に使用した。図1(a)はIPの撮影を示した図である。IPでは同一の被写体を多数のレンズから成るレンズアレイを使って撮影する。このとき、レンズアレイの焦点距離 $f$ の位置に記録面を配置すると、記録面上にはレンズアレイを通して被写体の微小な像(要素画像)が記録されてくる。ここで重要なのは、被写体表面で反射した光(光線)の色、輝度、レンズアレイに対する方向の3種類の情報が記録面上に保存されていることである。同様に、図1(b)はIPの再生を示した図である。先ほどの要素画像を反転した記録面を自然光で照明して、撮影時と同様のレンズアレイを通して観察すると、レンズアレイ越しに被写体の立体像が観測される。技術的には記録面としてカラーフィルムを用いた歴史が長いですが、この記録面として高解像度カメラを用いると、実写動画の三次元映像を撮影することができる<sup>5)</sup>。

### 1.2 レンズアレイの設計

通常のカメラはレンズ系によって、被写体空間(三次元)のうちのある焦点を定めてから(ピントを合わせてから)撮影を行う。このため、再生像の解像度は記録面の画素数によってのみ決定される。IPカメラの場合には事情が異なり、レンズアレイのレンズ数が同時再生可能な光線の数を決定し、1つのレンズに対応する画素数(要素画素数)がIPから再生可能な光線の方向数を決定する。両者

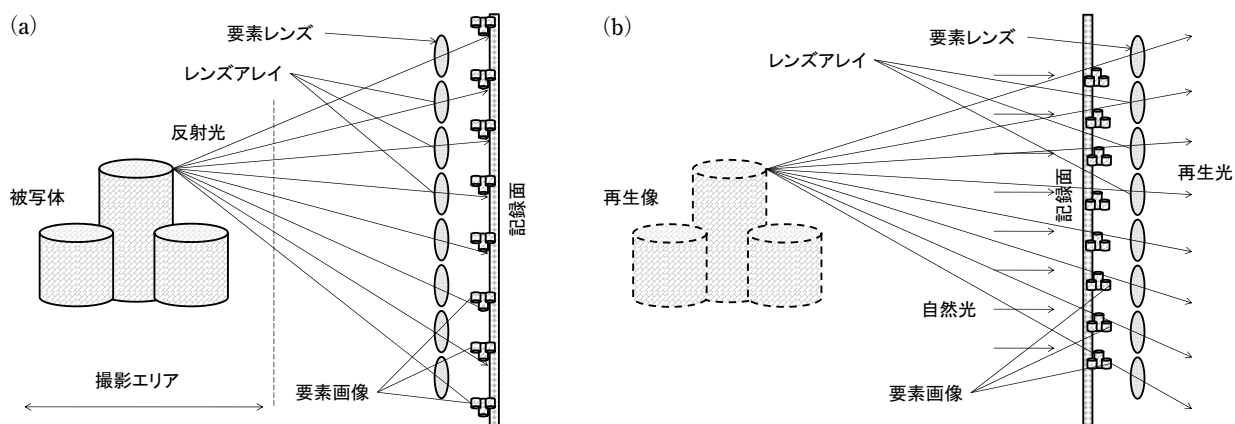


図1 インテグラル・フォトグラフィーの記録(a)と再生(b).

表2 IP レンズアレイの仕様.

有効レンズ数 (水平×垂直)	240×135
レンズ開口	0.8 mm×0.8 mm (正方形)
レンズピッチ	0.8 mm
焦点距離	$f = 8.6$ mm
レンズ配列	正方配列
IP 要素画像 (水平×垂直)	16×16 画素

の積が記録面の画素数となるから、両者の間にはつねにトレードオフの関係が存在する。光線数はおもに再生像の2D 解像度に影響を与え、要素画素数はおもに再生像の3D 特性に影響を与える。

### 1.2.1 要素レンズ数の選定

表2は今回使用したレンズアレイの仕様である。要素画素数は16×16画素を選んだ。これよりも要素画素数が少ないと、十分な運動視差を得ることができずレンズアレイから離れた位置の被写体の結像特性が悪化し、逆に要素画素数を多くすると再生像の2D 解像度が低下するからである。また、後述するようにIPからホログラムへの変換にFFTを使用する都合上、要素画素の各辺が2のべき乗となっていると後段の処理負荷が軽くなるため、この値を選んだ。IPカメラとして見たときの性能では、被写体がレンズアレイ上に存在するときが理論的に最も高解像度となる。

### 1.2.2 要素レンズの焦点距離の選定

IP要素レンズの開口サイズは表2に示した通り開口幅が0.8 mmであるので、要素レンズの焦点距離によって、IPカメラで記録できる光線のレンズアレイ法線に対する最大角度が定まり、撮影後に変更することはできない。この角度は、ホログラム再生時に被写体を回り込んで見ることができる角度(視域角)に相当する。ホログラムでは後述の通り、光の波長とSLMの画素ピッチによって、光を記録可能な角度(最大回折角度)が決定される。このため、IP撮影時に要素レンズの撮影画角をこの最大回折角度と一致させておくと、最も効率よく三次元映像を記録することができる。本稿で示した電子ホログラフィーシステムでは、再生時の視域角が約 $5.3^\circ$ (波長:450 nm時(青))であるので、要素レンズの開口幅を $D = 0.8$  mm、要素レンズ焦点距離を $f = 8.6$  mmに選ぶことで画角を約 $5.3^\circ$ とし、再生時とほぼ同じ画角でIP撮影が行われるようにした。画角 $\varphi$ は次の式で求めることができる。

$$\varphi = 2 \cdot \arctan\left(\frac{D}{2 \cdot f}\right) \quad (1)$$

## 1.3 4K (3840×2160 画素) 対応の IP カメラ

図2に今回作成した4K対応のIPカメラの構成を示す。記録面となる高解像度4Kカメラには、JVC製4Kカメラヘッド

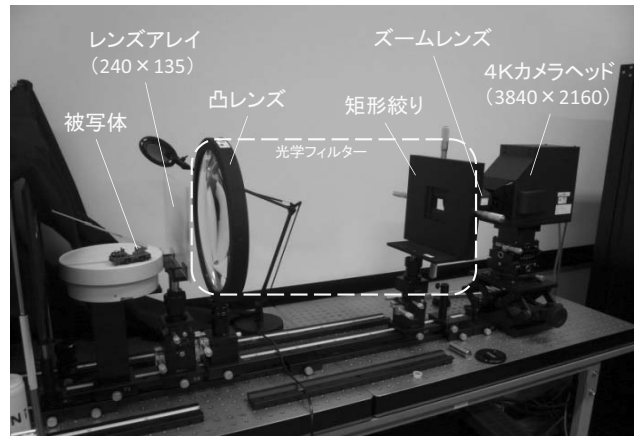


図2 4K 対応 IP カメラの構成.

ド(3840×2160画素@30P/RGB各10bit)を使用した。レンズアレイと4Kカメラの間には、フーリエ変換レンズ(凸レンズ)と、矩形絞りで構成される光学フィルターを挿入した。この光学フィルターは、レンズアレイの法線に対し想定する画角より大きな角度をもって入射する光線をカットするためのものであり、このフィルターを経由することで、各要素レンズを通過した光線を重なることなく分離することができる。詳しくは文献を参照されたい<sup>6)</sup>。レンズアレイから焦点距離 $f$ 離れた位置に形成される要素画像の位置に4Kカメラのズームレンズのピントを合わせて撮影した。ズーム位置は、レンズアレイの要素画像全体がちょうどカメラ画素数に収まるように定めた。

撮影することができる被写体の最大サイズは、今回のIPカメラの画角が $5.3^\circ$ であるため、ほぼレンズアレイと等しいサイズとなり、200 mm(W)×100 mm(H)程度である。また、レンズアレイほか、複数の光学素子を用いたカメラシステムであるため、全体の感度は低くなり、カラー動画の撮影時には被写体の上方からハロゲン電球(12 V-50 W)により照明を行った。また、撮影された4KのIP動画は、標準的なハイビジョンの伝送インターフェースであるHD-SDI(4:4:4/30p)×4システムを用いて出力した。

## 2. インテグラル画像からホログラムへの変換

### 2.1 ホログラムへの変換方法

インテグラル画像からホログラムへの変換方法として、写真の分野(静止画)ではホロコーダー・ホログラムの方法が知られている。これは図3に示すようにIPを再生する際に、記録面を自然光ではなくレーザー光で照明する。再生されるコヒーレントな物体光と、これと可干渉な参照光の干渉縞が形成され、それをホログラムとして記録するのである。光学的にホロコーダー・ホログラムを作ること

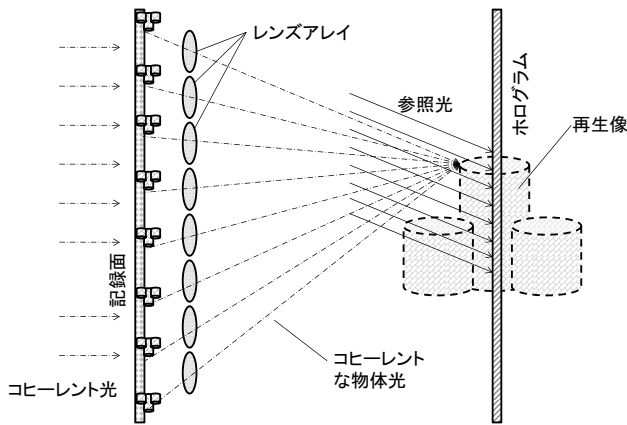


図3 ホロコーダー・ホログラムによるIP-ホログラム変換.

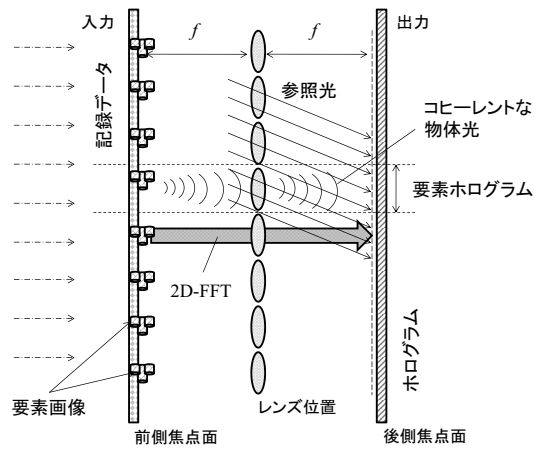


図4 並列FFTによるIP-ホログラム変換の方法.

は、暗室内での露光、光の波長精度での振動の排除などの制約があるため困難であり、応用例は少なかった。近年、この光の伝搬・干渉をすべて数値的に行う方法が提案されており、電子データとして得られたIP画像が用意されれば、安定的にホログラムを得ることができるようになった<sup>7)</sup>。

数値的なIP-ホログラム変換方法では、はじめに各要素画像の複素振幅  $u(x_0, y_0)$  を元に、レンズアレイまでの光の伝搬をフレネル回折により追跡して  $U(x_1, y_1)$  を得る。伝搬距離  $l$  のフレネル変換は次式のとおりである。なお、積分範囲はIP画像のもつ光波分布すべてである。

$$U(x_1, y_1) = \iint u(x_0, y_0) \cdot \exp\left\{j \cdot 2\pi \cdot \frac{x_1 x_0 + y_1 y_0}{\lambda f}\right\} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

次に、得られた  $U(x_1, y_1)$  に対して凸レンズによる位相変調を乗算し、さらに2回目のフレネル回折によりレンズアレイからホログラムまでの光の伝搬を計算する。最後に、ホログラム面上におけるコヒーレント物体光と参照光の干渉(スカラー量になる)を計算すれば、ホログラムを得ることができる。ホログラムの情報量がIPと比べて十分に大きければ、IPの再生で得られるすべての光線情報(三次元映像)をホログラム側に記録することができる。数値的なIP-ホログラム変換の途中では、式(2)で示したとおり、計算量がIP画像の画素数の2乗に比例して増大する。さらに、この方法はIP画像の全画素数分のメモリーに一括してアクセス可能である必要があるため、例えば4Kなどの高解像度IPについて、リアルタイムでホログラムを作成することは不可能だった。数値的なIP-ホログラム変換では、計算量については式(2)で示したフレネル回折の計算が支配的である。

## 2.2 並列FFTによるリアルタイムIP-ホログラム変換方法

ホロコーダー・ホログラムによるIP-ホログラム変換を数値的に行う方法では、計算量が膨大になる問題が存在したが、ホログラムを作成する位置を限定すれば、変換演算

を要素画像ごとに独立に計算することが可能になり、変換演算の高速化が見込まれる。これは図4に示すように、ホログラムを生成する位置を計算上の仮想的なレンズアレイの後側焦平面に限定した場合であり、このときのホログラム面上における物体光は、各要素画像を出発した物体光の完全なフーリエ変換となる<sup>8)</sup>。なお、ホログラム作成位置を限定したとしても、IP原画もしくはIPレンズアレイとホログラムの位置関係が限定されるだけであって、被写体とホログラムの相対位置は自由に設定できるため、三次元映像の記録と再生という本来の目的には全く影響がない。

ホログラム面上では、要素画像上における物体光のフーリエ変換により得られた光場が得られるが、これと参照光の複素和の振幅が求めるホログラムである。一方の参照光は、ホログラム法線に対して斜め情報から角度  $\theta$  で入射する平行光であると仮定すると、その振幅を  $|R|$  としたときに、次式で表現することができる。

$$R(x, y) = |R| \cdot \exp\left\{j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin\theta \cdot y\right\} \quad (3)$$

さらにここで、計算上の参照光がホログラムの法線方向から入射する場合 ( $\theta = 0$  の場合)、式(3)の虚部がゼロとなるので、物体光と参照光の複素和の振幅の2乗で表されるホログラムも、結局は定数項と物体光の実部の和に簡単化できる。つまり、参照光がホログラム法線方向から入射する平行光である場合には、IP画像を構成する全要素画像について二次元複素フーリエ変換を計算するだけで、IP-ホログラム変換が完了する。各フーリエ変換はおのの独立でよいから、分散メモリー型の並列計算が可能となり、変換の高効率化が見込まれる。

## 2.3 4K対応のリアルタイム変換装置

図5に4K対応のリアルタイム変換装置の外観を示す。リアルタイム変換装置は4台の演算用ワークステーション

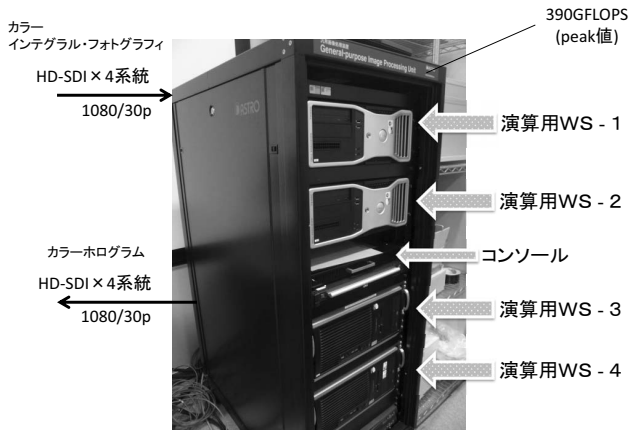


図5 4K 対応リアルタイム変換装置。

で構成される。各演算用ワークステーションには、IP カメラから来る 4K 画素のカラー映像を取り込むために HD-SDI の入力インターフェース (AstroDesign GG-163)、各要素画像の FFT をリアルタイムで求めるマルチコアの CPU (Intel Xeon 系)、および生成されたホログラムをホログラム再生装置に出力するための HD-SDI の出力インターフェース (AstroDesign GG-164) があり、4 台はすべて映像用の同期信号を用いて同期運転される。

具体的な IP-ホログラム変換の演算は、表 2 に示すように、入力となる IP カメラの各要素画像が  $16 \times 16$  画素であり、ホログラムに入射する仮想的な参照光はホログラムの法線方向から到来する平行光を仮定したため、当該サイズの 2D-複素 FFT を要素画像分 (32,400 回/フレーム) 計算すれば完了する。さらに、今回のシステムではフルカラーの IP-ホログラム演算に対応させるため、同様の演算を RGB 各チャンネルに対して行っており、1 フレームあたり 97,200 回の FFT を処理する。なお、FFT 部には汎用的な高速化ライブラリーである FFTW を使用した。各 PC ワークステーション内部の FFT 分割はマルチスレッド処理により行うが、ワークステーション間の分割は入出力インターフェースの段階からすでに分割されており、分散メモリー型である。このため、要素画像独立な演算が必須である。

また、リアルタイム変換装置の実装上の工夫として、IP カメラから入力される要素画像の垂直、水平、方向の物理的な位置ずれを吸収するために、各要素画像のメモリー上の配列を  $\pm 8$  画素の範囲で補正する仕組みを設けている。今回作成した 4K 対応のリアルタイム変換装置では、実際の IP 画像を入力し、ホログラムを出力するまでの処理がすべてリアルタイム (33 ミリ秒以内) におさまっており、動画像の処理をした場合に多少変動するが、実測値では 30 ミリ秒程度で変換処理が完了している。

### 3. 4K カラー動画電子ホログラムの再生装置

#### 3.1 カラーホログラムの再生原理

ホログラムの記録と再生には、本来、コヒーレントな光源 (レーザー光など) の利用が不可欠である。写真のホログラムでは、リップマンホログラムのように RGB の各レーザーで同一の被写体を複数回撮影し白色光再生 (インコヒーレント光再生) を実現したものが存在する。しかし、電子ホログラムの場合には乳剤の厚み方向の記録を利用することが不可能なため、基本的に 1 つの SLM に対して単一の波長のホログラムを表示する必要がある。カラーホログラムを再生するためには、一般的なカラーテレビと同様に、RGB 三原色のレーザーを用意し各色チャンネルに対して専用の SLM を用いてホログラム再生を行い、後にハーフミラー等でカラー合成する。電子ホログラムでも、DMD 方式の PC プロジェクターと同じく SLM は単板として時分割方式でカラー合成する方法も考えられるが、SLM に高速変調可能な素子が必要であり、今回のシステムでは SLM として液晶デバイスを用いる都合上、SLM  $\times 3$  板構成とした。

液晶素子を SLM として用いる場合、その画素ピッチの粗さゆえにホログラムの観察範囲が限定される問題が存在する。一般にホログラムに光を記録・再生可能な最大角度  $\phi$  (最大回折角) はコヒーレント光の波長と SLM の物理的な画素ピッチのみで決まる。これは画素ピッチ  $\Delta p$  および波長  $\lambda$  を用いて次のように表現できる。

$$\phi = 2 \cdot \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta p} \right) \quad (4)$$

ホログラムの照明光を法線方向から入射させる場合、ホログラム再生像を観察可能な視域角は垂直方向および水平方向に式 (4) の  $\phi$  で示される角度に限定される。実際にはホログラムの画素構造による高次の回折光が像として観察されるが、これは本来の再生像の範囲のもの以外の被写体の立体映像情報を含むものではない。

#### 3.2 妨害光の除去方法

平行光である照明光をホログラムの法線方向から入射させると、おもに 2 つの妨害成分が再生像と重なるため、観察時に問題となる。1 つ目は、ホログラムで変調されずそのまま通過した直接光成分である。2 つ目は、再生像と複素共役な関係にある共役光成分である。写真のホログラム再生の場合と異なり、電子ホログラムでは SLM の粗さゆえに式 (4) の  $\phi$  を大きくとることが不可能で、これら 2 つの妨害成分を何らかの方法で除去しなければならない。今回のシステムでは、ホログラムの垂直方向の視域角を  $\phi/2$  に制限する代わりに、これら 2 つの妨害成分を除去す

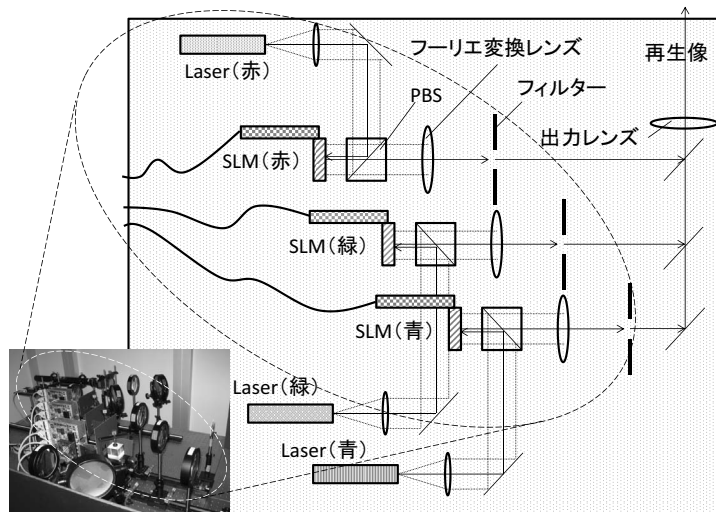


図6 4K対応の電子ホログラフィーディスプレイ.

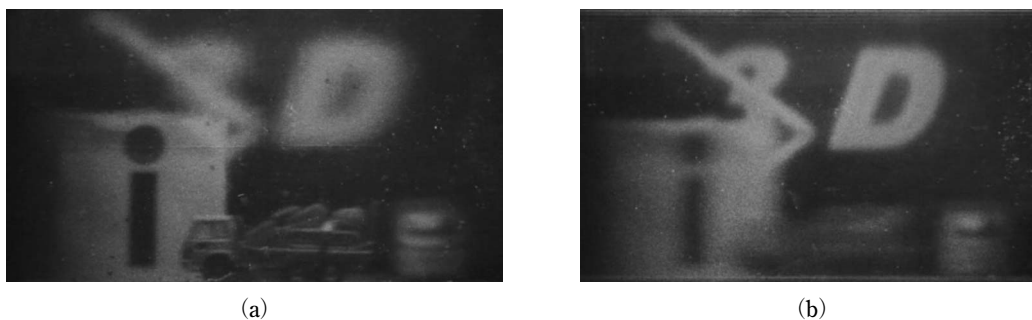


図7 表示された立体映像の例。(a)再生像の手前側にピン, (b)再生像の奥側にピン.

る方法を用いた.

妨害光の除去方法は、ハーフゾーンプレート法<sup>9)</sup>とシングルサイドバンド法<sup>10)</sup>を組み合わせたものであり、ホログラム計算時の前処理と、ホログラム再生時の光学フィルタリングによる後処理から構成される。まず、ホログラム生成時に垂直方向の視域角をあらかじめ $\varphi/2$ に制限しておく、次に、ホログラムを光学的に再生する際、SLMで変調された光場を一对のフーリエ変換レンズによりフーリエ変換する。このときに周波数領域において、本来の光は垂直方向に $\varphi/2$ の範囲に分布するため、それ以外の範囲を除去することで、直流成分(直接光成分)や共役光成分を適切に除去することができる。妨害光を除去された物体光(ホログラムが意図する再生像)は、逆フーリエ変換レンズを通して再び観察可能な立体映像に戻して出力する。

### 3.3 4K対応の電子ホログラフィーディスプレイ

図6に今回作成した4K対応の電子ホログラフィー表示装置のレイアウト図を示す。SLMとして反射型液晶表示デバイスであるLCOS(liquid crystal on silicon)プロセスで作られたJVC製4K-DILAを用いている。SLMは振幅変調を用いており、その4096×2160画素のうち、3840×

2160画素のエリアをホログラム面として用いた。動画の入力インターフェースは4系統のHD-SDI信号である。図ではRGBの各レーザーに対応するSLMがあり、SLMの出力側にフーリエ変換用の凸レンズがそれぞれ配置されている。フーリエ面にはホログラム再生像に対する妨害成分を除去するフィルターが配置されており、それらはハーフミラーで統合され、最終的に逆フーリエ変換用の凸レンズを経由して観察者に提示される。今回作成した電子ホログラフィーディスプレイでは、画素ピッチ4.8 $\mu\text{m}$ のLCOSを用いた。再生時の視域角は水平約5.3°、垂直約2.7°(波長:450nm時)である。

図7に4Kの電子ホログラフィーディスプレイで再生された立体映像の例を示す。これはIPカメラで撮影した被写体をリアルタイムにてホログラムへ変換して得られたもので、再生像サイズは、ほぼSLMと等しく約2cm(W)×1cm(H)、この像の場合で奥行約1~2cm(D)である。IPカメラの前の被写体のフルカラー立体映像が毎秒30フレームにて滑らかに得られた。図7(a)は再生像の手前側にピンを合わせて撮影した。ミニカーが鮮明に映っているが、背景はピンボケして写っている。図7(b)は再

生像の奥にピントを合わせて撮影した。こちらでは背景は鮮明だが、手前側の被写体はピンボケしている。このような像は、光線再生およびホログラフィーを用いた本システムの効果をよく表している。

本稿では、離れた場所にある被写体を立体映像として表示可能なリアルタイム実写動画ホログラフィーシステムについて紹介した。従来のホログラムの撮影では、振動排除の困難さや暗室の使用などの制約が問題であった。本システムでは4K解像度(3840×2160画素)のインテグラル・フォトグラフィーカメラを用いて立体像を高解像度で撮影し、そのデータをリアルタイムにホログラムへ変換することで、従来の問題を解決した。また、IP-ホログラム変換については、要素画像ごとに独立な並列演算を適用し、動画フルカラーホログラムで毎秒30フレームの変換速度を得た。

今後は、再生像の観察が可能な範囲(視域角)の拡大と撮影・表示可範囲の拡大が課題である。人間の視覚特性をすべて満足する原理的に忠実な立体映像の撮影、伝送、表示の技術が将来的に確立されていくことを期待する。

## 文 献

- 1) P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa and J. Underkoffler: "Electronic display system for computational holography," Proc. SPIE, **1212** (1990) 174-182.
- 2) 本田捷夫: "動画ホログラフィー通信・放送機構で行った研究を中心に", 映像情報メディア学会誌, **52** (1998) 904-907.
- 3) 三科智之, 山田光穂, 岡野文男: "画素構造をもつ空間光変調素子による高次回折光を用いたホログラフィの視域拡大", 映像情報メディア学会誌, **55** (2001) 688-695.
- 4) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM," Proc. SPIE, **1461** (1991) 291-302.
- 5) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama: "Three-dimensional video system based on integral photography," Opt. Eng., **38** (1999) 1072-1077.
- 6) 三科智之, 山本健詞, 大井隆太朗, 奥井誠人: "ホログラフィ入力に適したインテグラルフォトグラフィ撮影における要素画像間の重複記録低減に関する検討", 映像情報メディア学会誌, **62** (2008) 1132-1137.
- 7) T. Mishina, M. Okui and F. Okano: "Generation of holograms using integral photography," Proc. SPIE, **5599** (2004) 114-122.
- 8) 大井隆太朗, 三科智之, 奥井誠人, 野尻裕司, 岡野文男: "実写ホログラムの高速な計算方法の提案", 映像情報メディア学会誌, **61** (2007) 198-203.
- 9) 竹森民樹: "液晶パネルを用いた3次元表示—高速計算法", 映像情報メディア学会技術報告, **21**, No. 46 (1997) 13-19.
- 10) O. Bryngdahl and A. Lohmann: "Single-sideband holography," J. Opt. Soc. Am., **58** (1968) 620-624.

(2013年3月19日受理)