

# 3 立体映像技術

## 3 3D-Image Technology

### 3-1 4K 映像システムを用いた電子ホログラフィシステム

#### 3-1 Electronic Holography System Using 4K Video System

山本健詞 三科智之 妹尾孝憲 大井隆太郎 栗田泰市郎

YAMAMOTO Kenji, MISHINA Tomoyuki, SENOH Takanori, OI Ryutarou, and KURITA Taiichiro

#### 要旨

ホログラフィを電子化する場合の問題点とそれらを解決するアプローチを紹介するとともに、それらの改善のために試作したシステムについて述べる。具体的には、ホログラムデータを取得する際の課題と、ホログラムデータを表示する電子デバイスの分解能が不足していることに起因して、視域が狭くなる課題、不要光による妨害が起こる課題について述べる。そして、これらの課題改善のために超高精細 4K 映像システムを利用して試作したカラー電子ホログラフィシステムについて述べる。このシステムは、インテグラル・フォトグラフィ方式のカメラで撮影し、得られたデータからホログラムデータを計算で算出する。そのため、レーザー光を用いずに自然光の下で実写撮影できる点が特長である。また、4K の表示デバイスを用いて表示装置を構成したことにより、従来よりも広い視域を実現できている。

We explain the issues that occur when we use electronic holography for three-dimensional (3-D) imaging, and introduce some approaches to solve these issues at first. Exactly speaking, we explain the capture of hologram data, the enlargement of viewing zone, and the elimination of unnecessary light. We will show our developed system which uses 4K video system to improve these issues. This system captures 3-D objects using integral photography, generates hologram, and displays reconstructed color 3-D objects. All blocks of this system work in real time. Because of narrow-pitch 4K display devices, the viewing area is larger than our previous system. In addition, this system captures 3-D objects under natural light without laser beam on account of integral photography, which is one of the advantages of this system.

#### [キーワード]

電子ホログラフィ, ホログラム, インテグラル・フォトグラフィ (IP), 立体映像  
Electronic holography, Hologram, Integral photography (IP), Three-dimensional imaging

#### 1 まえがき

遠い場所で起こっていることや過去に起こったことを、今この場で起こっているかのように臨場感のある再現ができれば、その技術は大変有用で

あろう。テレビはその一例で、視聴者は、海外に行かなくても海外の絶景を楽しむことができるし、ニュース番組を見れば過去の出来事を知ることができる。最近になり商品化され始めた立体テレビでは、通常のテレビが2次元の映像を提示で

きるのみに対して、右眼用と左眼用の映像を提示できる二眼式立体表示ため、視聴者は飛び出しているように知覚することができる。ますます臨場感を再現できるテレビになりつつあると言える。同時に、二眼式ではまだまだ不自然さがあるため、立体表示技術に関してさらなる発展が望まれている。

立体表示の品質を良くすることで臨場感を高めようと、多数の方式が検討されている。たとえば、二眼式のように2つの視点の映像を提示するのではなく、さらに多くの視点の映像を提示する多眼式と言われる方式がある。また、複数のスクリーンを奥行き方向に重ねて、被写体の奥行きと一致したスクリーンで表示する奥行き標準化方式という方式もある。これらの様々な立体映像方式の1つに、究極の方式と考えられているホログラフィ方式<sup>[1]</sup>がある。

ホログラフィは実際に物体が存在する場合と同じ光の状態を再現できる技術であるため、ホログラフィで再生される立体像を見た場合、両眼視差、輻輳、調節、運動視差など、人間が立体感を知覚するために必要な生理的要因をすべて再現できる。テレビなど不特定の人々が様々な環境で使う装置では、なるべく眼に負担をかけない立体表示であるべきなので、ホログラフィは理想的な方式と考えられる。従来は、ホログラフィは写真や

印刷などにより静止画像を扱うものが中心であったが、近年は動画像を取り扱うべく、電子的な手段でホログラフィを実現する電子ホログラフィの研究がなされるようになってきている<sup>[2]–[9]</sup>。

本稿ではこの電子ホログラフィとそれに関するNICTの研究について述べる。最初にホログラフィによる立体表示について概要を述べる。その後、ホログラフィを電子化する場合の課題を整理し、課題に対するアプローチを撮影技術と表示技術の順に説明する。そして、課題を改善するために超高精細な4K映像システムを利用して試作したカラー電子ホログラフィシステムについて述べる。

## 2 ホログラフィによる立体表示

ホログラフィは、空間中を伝搬する光を干渉や回折現象を使って記録し、再生する技術である。立体表示に使う場合、被写体で反射された光を記録して、その後に再生することで、被写体の立体像を再現することになる。

記録では、図1(a)のようにコヒーレント光(レーザー光)を2つに分けて、一方を被写体に照射し、もう一方を記録媒体に照射する(これを参照光と呼ぶ)。被写体を照射した光は被写体で反射され(これを物体光と呼ぶ)、記録媒体に到達す

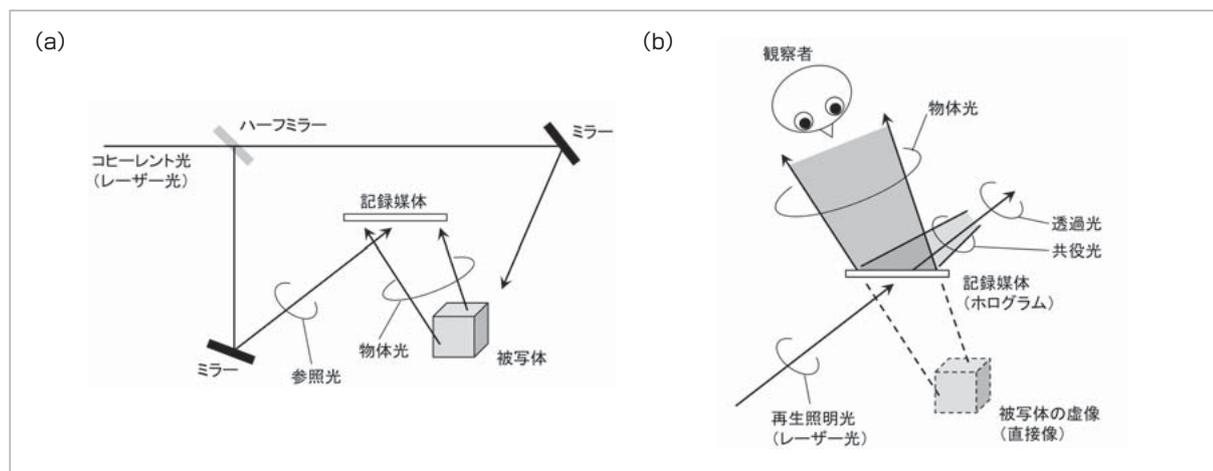


図1 ホログラフィによる立体像の再生

(a) 記録

物体光と参照光との干渉縞を記録媒体に記録する。干渉縞が記録された媒体をホログラムと呼ぶ。

(b) 再生

ホログラムに再生照明光を照射すると、記録されていた物体光が再生されて、被写体が存在していた位置に虚像が結像する。

る。記録媒体では、参照光と物体光が干渉して明暗の縞模様ができる(これを干渉縞と呼ぶ)。この干渉縞を記録することで、物体光の状態をとらえたことになる。被写体が動かなければ干渉縞は一定の縞模様になるが、動くとき干渉縞は変化する。そのため、記録媒体として電子撮像デバイスを用いれば、干渉縞が変化する様子を記録できるので、被写体の動きを記録できることになる。記録媒体上において、物体光の複素振幅分布を  $O(x, y)$ 、参照光の複素振幅分布を  $R(x, y)$  とすると、記録する干渉縞  $H(x, y)$  は次の式で表現できる。

$$H(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 \\ = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y) \quad (1)$$

ここで、 $O^*(x, y)$ 、 $R^*(x, y)$  はそれぞれ  $O(x, y)$ 、 $R(x, y)$  の複素共役を表す。この干渉縞を記録した媒体をホログラムと呼ぶ。また、本稿の中では、干渉縞の電子情報をホログラムデータと呼ぶ。電子ホログラフィにおいては、電子撮像デバイスはホログラムデータを取得するためのデバイスと言える。

再生では、図1(b)のようにホログラムに参照光と同じ光(レーザー光)を当てる(これを再生照明光と呼ぶ)。再生照明光はホログラムの干渉縞で回折されて、物体光と同じ光を含んだ光になる(これを再生光と呼ぶ)。この過程を式で表現すると、再生光  $U(x, y)$  は次の式となる。

$$U(x, y) = H(x, y)R(x, y) \\ = (|O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2)R(x, y) \\ + O(x, y)|R(x, y)|^2 + O^*(x, y)R^2(x, y) \quad (2)$$

ここで、式(2)右辺の第2項は、参照光の強度  $|R(x, y)|$  を一定とすると、物体光  $O(x, y)$  に比例した光となる。これは、全体の強度は参照光の強度で変わるものの、被写体からの光をそのまま再現できることを示している。つまり、被写体の存在していた場所に被写体の虚像(これを直接像と呼ぶ)を結ぶ光が再生されるため、観察者にはあたかもその場所に被写体が存在するかのように見える。

式(2)右辺には、他の項も含まれている。第1項は再生照明光  $R(x, y)$  に比例する光である。ホログラムを通過する光と捉えることができるので、透過光と呼ばれている。第3項は物体光と位

相共役な光で、共役光と呼ばれている。これらの2つの光は直接像とは異なるため不要な光であるが、原理上発生してしまう。そこで、これらを取り除くなど、直接像の観察に妨害とならないように処置する必要がある。

### 3 電子ホログラフィの課題

電子ホログラフィでは、ホログラムデータを電子表示デバイスに表示してホログラムにする。そのため、ホログラムデータを如何に取得するかが1つ目の課題となる。直接的に撮影する方法としては、図1(a)において記録媒体(電子撮像デバイス)としてCCD(Charge Coupled Device)などのイメージセンサーを用いる方法がある。この方法はホログラフィ本来の技術であり、理想的なホログラムデータの取得が可能であるが、暗室内でレーザー光を被写体に照射する必要があるため、風景など大きな物体や、自然な環境下での撮影が望ましい人物の表情の取得には向かないといった問題もある。また、自発光する物体は撮影できないといった問題もある。放送やコミュニケーションに使うためには、被写体に制限なく、かつ、暗室でなくてもホログラムデータを取得できる方法の研究開発に取り組むのが望ましいと言える。

2つ目の課題として、ホログラムデータを表示するデバイスの分解能が低い、すなわち画素間隔(画素ピッチ)が広いことに起因する課題が挙げられる。表示するデバイスの画素間隔により、表示できる干渉縞の空間周波数の上限が決まることと、干渉縞の空間周波数は、物体光と参照光とがなす角度が大きくなるほど高くなることから、表示するデバイスの画素間隔が、物体光と参照光とがなす角度の最大角を決めることになる。画素間隔  $p$  と、物体光と参照光とがなす角度の最大角  $\phi_M$  は、光の波長  $\lambda$  を用いて以下のように表わされる。

$$\phi_M = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2p}\right) \quad (3)$$

式(3)は、画素間隔  $p$  の表示デバイスであれば、参照光の進行方向を中心に角度が  $2\phi_M$  以内の進行方向の物体光を記録再生できることを示している。物体光が再生される範囲内に視点を置く

と被写体の再生像が観察できることから、この範囲を視域と呼ぶ。視域を角度で表した視域角は、画素間隔  $p$  の表示面では  $2\phi_M$  になる。たとえば光の波長  $\lambda$  を  $632.8\text{ nm}$  とすると、分解能  $500$  本/mm のホログラム用写真乾板に相当する画素間隔  $1\ \mu\text{m}$  では  $36$  度、現状のプロジェクタ用表示デバイスに相当する  $10\ \mu\text{m}$  では  $3.6$  度となる。前者のような狭ピッチの画素間隔の場合、図 2 (a) のように視域を広くできるために両眼で立体視することが容易になる。また、物体光と共役光、透過光の進行方法に角度差を付けられるため、再生像を観察する際に、共役光と透過光が観察者の眼に入らないように配置することも容易になる。

その一方で、後者のような広ピッチの画素間隔の場合、図 2 (b) のように視域が狭いため両眼での立体視が困難になる。また、物体光と共役光、透過光の進行方法に角度差を付けられないため、再生像を観察する際に、共役光と透過光が観察者の眼に入り、妨害光となる。ホログラムデータを表示する電子デバイスは、現状ではこの状況に相当する。そのため、妨害光の除去と視域の拡大が、電子ホログラフィの 2 つ目の課題として挙げられる。

## 4 電子ホログラフィの技術

### 4.1 ホログラムデータ取得技術

ホログラムデータの代表的な取得方法とし

て、デジタルホログラフィと呼ばれる直接取得と、計算で生成する方法がある。直接取得は、図 1 (a) に示す従来からの通常のホログラム生成過程において、記録媒体に電子撮像デバイスを用いて干渉縞を映像信号として取得する方法である。実際の物体光が記録された干渉縞をそのまま記録するために、高品質なホログラムデータを取得できることが特長である。橋本らは、撮像デバイスとして CCD を使用してホログラムデータを取得し、それを液晶パネルに表示してリアルタイムの像再生を行った [3]。顕微鏡用途の研究が多なかで、佐藤らは、数 cm のサイコロのホログラムデータを高品質に取得することに成功している [10]。粟辻らは、高速度カメラで用いられている撮像デバイスを使い、高速度でのホログラムデータ取得に成功している [11]。直接取得は高品質な取得が可能という利点がある反面、記録できる干渉縞の空間周波数やホログラムの大きさが、電子撮像デバイスの画素間隔及び画素数で制限されてしまうという問題もある。そのため、现阶段の電子撮像デバイスの性能では、大きなホログラムを取得するのは困難な状況である。また、直接取得にとって自然光はノイズになるため、暗室での撮影になる点も問題であり、これらに対する今後の研究が期待される。

計算で生成する方法は、計算機合成ホログラム (CGH, Computer-Generated Hologram) と呼ばれている。被写体の空間的な位置情報などから計算でホログラムを生成する方法であり、さまざまな

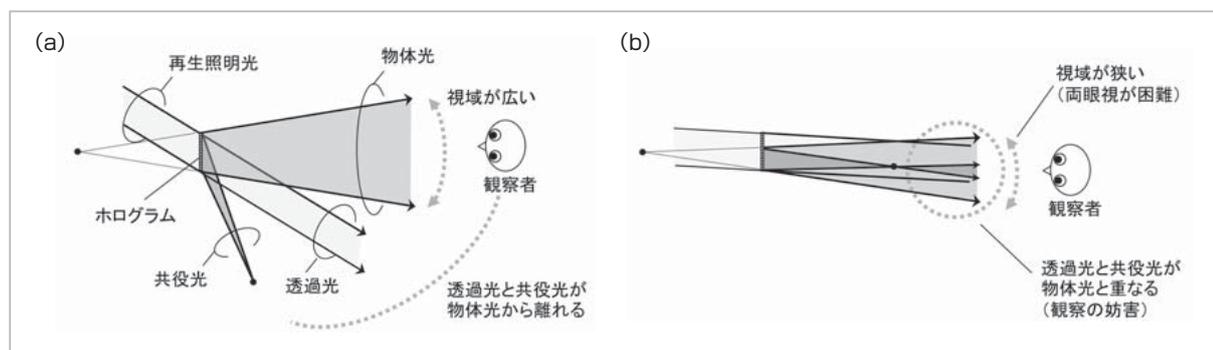


図 2 ホログラフィの再生

(a) 狭ピッチな画素間隔の表示デバイスの場合

視域が広い。透過光、共役光の進行方向と、物体光の進行方向に角度差を付けられるため、観察者は物体光のみを見ることが出来る。

(b) 広ピッチな画素間隔の表示デバイスの場合

視域が狭い。透過光、共役光の進行方向と物体光の進行方向に角度差を付けられないため、物体光に透過光、共役光が重なってしまう。そのため、透過光、共役光が妨害光になる。

方法が検討されている。なかでも代表的なものに、被写体を点光源の集合と扱う方法がある。これは、まずは個々の点光源から発した光が伝搬してホログラム面で作る光波分布を個々に計算し、次にそれらの光波分布をすべて加算し、最後に参照光との干渉を計算することでホログラムデータを得るというものである。この際の光の伝搬計算は膨大な計算量になるため、並列計算機を使った高速化や、専用のハードウェアによる高速化[12][13]、アルゴリズムの改良による高速化[14][15]など、計算時間を短縮する検討が報告されている。CGHでは、被写体の制約は原理的にはないが、実物の空間情報を取得することが容易ではないため、CG (Computer Graphics) データを使う場合が多い。

これらに対して、インテグラル・フォトグラフィ (IP) 方式[16][17]で撮影した映像からホログラムを計算する、すなわち IP 画像からホログラムに変換する方法も検討されている[18]–[20]。IP は、多数の微小なレンズが平面上に並んだレンズアレイを使って被写体を撮影・表示する技術で、空間像を再構成できる立体映像技術の1つである。この IP 撮影・変換技術に関しては、本特集号の文献[21]にて詳細に述べる。

## 4.2 表示技術

電子ホログラフィではホログラムデータを表示するデバイスの分解能が不足するために、妨害光の除去と視域の拡大が重要な課題となる。妨害光

の除去という課題では、オフアクシスホログラフィがよく知られている。これは、物体光と参照光との角度を大きくすることで、図 2 (a) に示すように、共役光と透過光を観察者の眼から遠ざけて妨害を回避する方法である。干渉縞の空間周波数が高くなるため、写真乾板のような分解能の高いホログラム面の場合に用いられる方法である。

分解能が低い、すなわち画素間隔が広いホログラム面の場合、記録時のハーフゾーンプレート処理[22]と、再生時のシングルサイドバンド法[23]を組み合わせる方法がよく知られている。ハーフゾーンプレート処理とは、図 3 (a) に示すように、被写体を構成する点光源からの光の広がりを、点光源を通り参照光の進行方向を含む平面で分割して、一方の光のみで干渉縞を記録する処理である。換言すれば、本来の物体光の広がりを半分制限する処理とも言える。シングルサイドバンド法とは、図 3 (b) に示すように、ハーフゾーンプレート処理されたホログラムに再生照明光を当てて生成した再生光のうち、妨害光である透過光と共役光を遮光板により除去する方法である。

視域の拡大という課題に対しても、表示デバイスの分解能を高める、すなわち表示デバイスの画素を狭ピッチ化することが重要である。しかし、その他の方法として縦方向の視域を横方向に振り替えることで横方向の視域を広げたり[24][25]、時分割で視域を切り替えたり[26]、複数枚の表示デバイスを用いたり[27]するなど、様々な方法も検討されている。

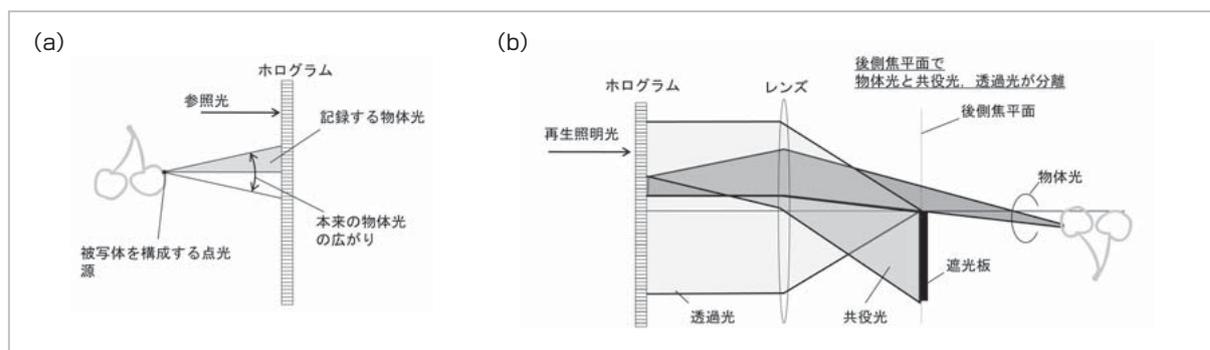


図 3 妨害光の除去

(a) 記録時のハーフゾーンプレート処理

点光源からの光の広がりを、点光源を通り参照光の進行方向を含む平面で分割して、一方の光のみで干渉縞を記録する処理。

(b) 再生時のシングルサイドバンド法

ハーフゾーンプレート処理されたホログラムであれば、再生光をレンズに通すと、物体光と共役光、透過光の通過領域が後側焦平面で分離する。後側焦平面に遮光版を置くことで、共役光と透過光を取り除くことができる。

妨害光の除去と視域拡大に関しては、本特集号の文献[28]にて詳細に述べる。

## 5 試作した電子ホログラフィシステム

これらの課題を改善するために、800万画素(3840×2160画素)の超高精細な4K映像システムを利用して、図4で示した外観の電子ホログラフィシステムを試作した。システムはホログラムデータ取得ブロックと表示ブロックで構成されており、いずれも30fps[frame/second]で動作する。

図5(a)にホログラムデータ取得ブロックを示した。これは、被写体をIPで撮影し、そこからホログラムを計算するブロックである。レンズアレイL0と4Kビデオカメラの間に、フィールドレンズL1、開口A2を置いた。レンズアレイを構成する各レンズのサイズ、および焦点距離は、表示ブロックにて表示できる視域角のみを撮影できるように設計してある。レンズアレイは240×135

個の要素レンズで構成し、各要素レンズで16×16ピクセルの要素画像が撮影できるようにした。ホログラムの計算では、カラー表示のために、RGBそれぞれの成分を再生するホログラムを1秒間に30枚生成している。つまり、1秒間に90枚のホログラムを計算している。

IPでは、要素画像間での重複記録の回避が重要な課題になる。つまり、要素レンズを通った光は受光素子の対応する部分に到達して、対応する要素画像のみに反映されるべきところが、隣の部分にも到達して、隣の要素画像にも反映されてしまうという問題である。この問題に対策するため本装置では文献[29]、[30]に述べた方法として開口A2を設けている。

図5(b)に表示ブロックを示した。表示デバイスとして4Kの液晶パネル(LCD)を3枚用いている。カラーにするため、RGBそれぞれ用の似通った3つの部分と、その後段で、RGBの再生像をビームスプリッタでまとめてカラーの再生像を合成する部分で構成される。図5(b)の左側には赤色用の装置が描かれている。その動作は以下のとおりである。まず、レーザー光源から発した光をコリメータ $C_R$ で必要な幅の並行光にする。次に、偏光ビームスプリッタ $BS_R$ を通してLCD $D_R$ に当てる。 $D_R$ には赤色用のホログラムデータ $H_R$ を表示しているのので、 $D_R$ で反射されたレーザー光は物体光、透過光、共役光を含むようになる。すべての光をビームスプリッタ $BS_R$ とレンズ $L_{1R}$ を通過させ、空間フィルタ $F_R$ に到達させる。 $F_R$ は $L_{1R}$ の焦点距離 $f_{1R}$ に配置してあり、光軸と、光軸の上側または下側の光を遮断するようにしてある。そのため、物体光は通過するが、不要な光である共役光と再生照明光は通過しない。レンズ $L_2$ は、 $F_R$ から焦点距離 $f_2$ だけ離して置いてある。 $f_{1R}$ と $f_2$ とを同じにしているため、 $L_{1R}$ と $L_2$ とで4-f光学系を構成している。その結果、LCD $D_R$ を出た物体光は、原理上無ひずみで $4f_2$ だけ移動することになる。つまり、図5では $L_2$ の右側に、再生像が浮かんで見える。赤色以外の再生像も、赤色と同様に生成される。ビームスプリッタ $BS_1$ と $BS_2$ で再生像は合成される。その結果、妨害光のないカラーの再生像が $L_2$ の右側に浮かんで見える。

実験結果を、図6に示した。被写体として、3

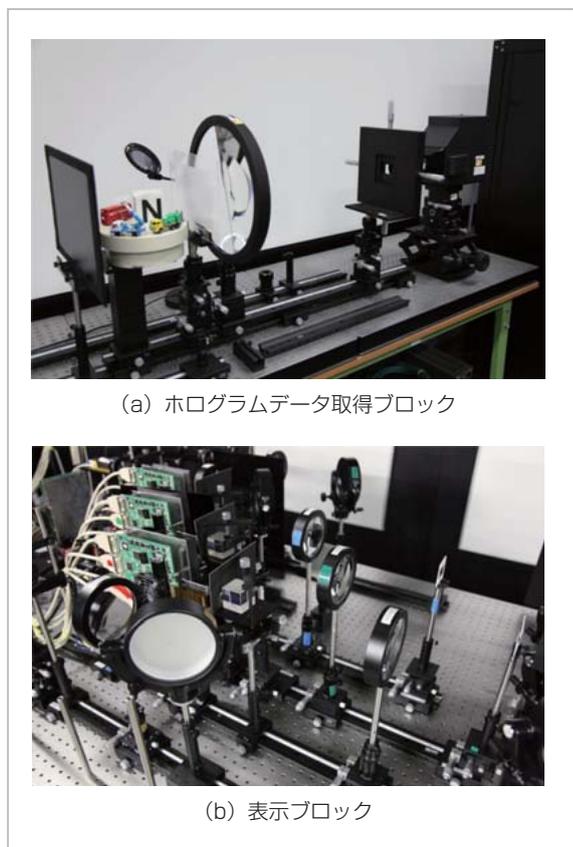


図4 4K映像システムを用いた電子ホログラフィシステムの外観

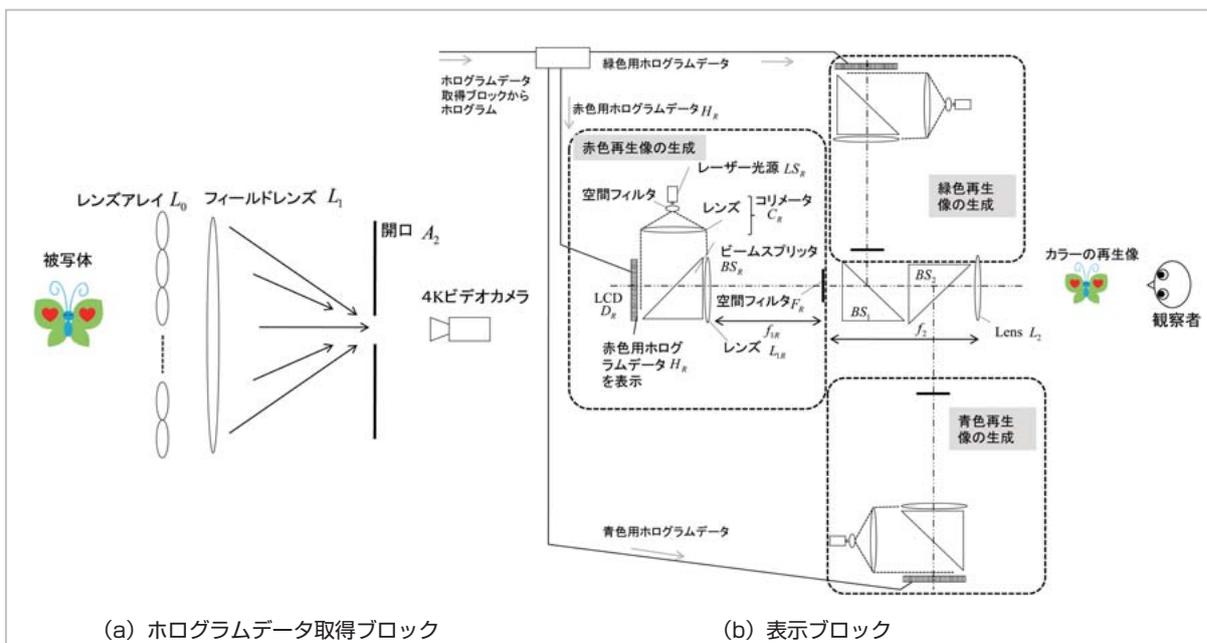


図5 4K映像システムを用いた電子ホログラフィシステム

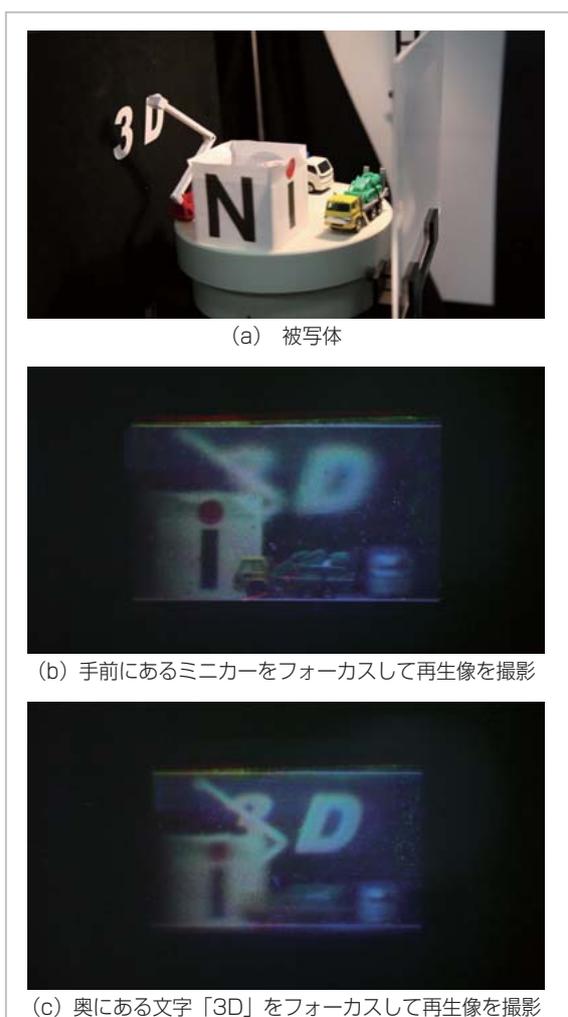


図6 実験結果

台のミニカーと「N」「I」「C」「T」と4面に書いたブロックをテーブルの上に載せて、レンズアレイ直後に置いた。また、レンズアレイから約250mm離れた位置に「3D」と書いた平面を置いた。

2枚の画像をビデオカメラで撮影した。1枚目は前方にフォーカス、2枚目は後方にフォーカスしての撮影である。3次元像が再構築されているならば、1枚目では、手前のミニカーははっきりと写り、奥の「3D」はボケて写るべきである。2枚目はその逆で、ミニカーはボケて写り、「3D」ははっきりと写るべきである。実験結果を図6(b)(c)に示した。見ての通り、予測通りの結果を得られていることから、3次元像が再構築されていると判定した。

このシステムにより、レーザー光を用いずに自然光の下で被写体を撮影してホログラムを生成し、再生像をリアルタイムでホログラフィ表示することが可能となった。また、4Kの表示デバイスの画素ピッチは $6.8\mu\text{m}$ であるため、 $4.0^\circ$ という視域を実現できている。

## 6 むすび

電子ホログラフィの代表的な課題と、それらに対する研究の現状について述べた。また、実物体を記録して表示できる電子ホログラフィとし

て、IP 画像を撮影してホログラムに変換し、観察者に提示する、4K 映像システムを用いた電子ホログラフィシステムについて述べた。本装置により、リアルタイム実写入力と従来より広い視域ができていることを確認した。

電子ホログラフィの研究はまだ初期の段階であり、ここで紹介した課題以外にも大画面化やスペックル雑音、装置の小型化など取り組むべき課題が山積している。これらについても今後は取り組んでいきたい。

## 参考文献

- 1 D. Gabor, "A new microscopic Principle," *Nature* 161, pp. 777–778, 1948.
- 2 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, pp. 174–182, 1990.
- 3 N. Hashimoto, S. Morokawa, and K. Kitamura, "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM," *Proc. SPIE* 1461, pp. 291–302, 1991.
- 4 K. Maeno, N. Fukaya, and O. Nishikawa, "Electro-holographic display using 15 Mega pixels LCD," *Proc. SPIE* 2652, pp. 15–23, 1996.
- 5 高野, 金子, 南, 佐藤, "白色光によるカラーホログラフィ立体テレビの検討," 3次元画像コンファレンス 2000, pp. 179–182, 2000.
- 6 T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, "Viewing-zone enlargement method for sampled hologram that uses high-order diffraction," *Appl. Opt.* Vol. 41, No. 8, pp. 1489–1499, 2002.
- 7 山口, 吉川, "インタラクティブホログラフィックテレビジョン—イメージ型による高速化とレインボウホログラムを用いたフルカラー化," 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 5, pp. 153–158, 2006.
- 8 K. Yamaguchi and Y. Sakamoto, "Computer-generated holograms considering background reflection on various object shapes with reflectance distributions," *Proc. of SPIE*, Vol. 7619, pp. 091–0911, 2010.
- 9 K. Wakunami and M. Yamaguchi, "Calculation of computer-generated hologram for 3D display using light-ray sampling plane," *Proc. of SPIE*, Vol. 7619, pp. 0A1–0A10, 2010.
- 10 Y. Iwayama, K. Maejima, and K. Sato, "Single-shot digital holography applying spatial heterodyne method," *Proc. of SPIE*, Vol. 7619, pp. 0F1–0F8, 2010.
- 11 Y. Awatsuji, K. Ito, Y. Shimozato, T. Kakue, M. Fujii, T. Tahara, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "20000-Frames-per-Second Phase-Shifting Digital Holography," *OSA Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, DMA6*, 2010.
- 12 T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie, "Special-purpose computer horn-5 for a realtime electroholography," *Optics Express* 13, pp. 1923–1932, 2005.
- 13 S. Matsuda, T. Fujii, T. Yamaguchi, and H. Yoshikawa, "Fast generation of computer-generated hologram by graphics processing unit," *Proc. of SPIE*, Vol. 7233, pp. 011–0110, 2009.
- 14 R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, and J. E. Tohline, "Shifted Fresnel diffraction for computational holography," *Optics Express* 15, pp. 5631–5640, 2007.
- 15 K. Matsushima, "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," *Applied Optics*, Vol. 44, No. 22, pp. 4607–4614, 2005.
- 16 M. G. Lippmann, "La photographie integrals," *Compt. Rend.* Vol. 146, pp. 446–451, 1908.
- 17 F. Okano, J. Arai, H. Hoshino, and I. Yuyama, "Three-dimensional Video System Based on Integral Photography," *Opt. Eng.* Vol. 38, No. 6, pp. 1072–1077, 1999.
- 18 R. V. Pole, "3-D Imagery and Holograms of Objects Illuminated in White Light," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 10, No. 1, pp. 20–22, 1967.

- 19 T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, "Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography," *Appl. Opt.* Vol. 45, No. 17, pp. 4026–4036, 2006.
- 20 大井, 三科, 奥井, 野尻, 岡野, "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*, Vol. 61, No. 2, pp. 198–203, 2007.
- 21 大井隆太郎, 妹尾孝憲, 山本健詞, 栗田泰市郎, "インテグラルフォトグラフィを入力として用いたホログラムの生成技術," *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 3-2, 2010.
- 22 竹森, "液晶パネルを用いた3次元表示 –高速計算法–," *映情学技報*, Vol. 21, No. 46, AIT pp. 13–19, Aug. 1997.
- 23 O. Bryngdahl and A. Lohmann, "Single-sideband holography," *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 58, pp. 620–624, 1968.
- 24 Y. Hayashi and Y. Takaki, "Horizontal resolution enhanced hologram to increase horizontal viewing angle," *Proc. of SPIE*, Vol. 6912, pp. 011–018, 2008.
- 25 H. Kang, N. Ohmura, T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, S. Kim, and E. Kim, "Method to enlarge the hologram viewing window using a mirror module," *Optical Engineering*, Vol. 48, 075801, 2009.
- 26 T. Mishina, F. Okano, and I. Yuyama, "Time-alternating method based on single-sideband holography with half-zone-plate processing for the enlargement of viewing zones," *Appl. Opt.* Vol. 38, No. 17, pp. 3703–3713, 1999.
- 27 三科, 大井, 洗井, 岡野, 奥井, "視域拡大法を適用させたインテグラルフォトグラフィ–ホログラム変換を用いた実写入力電子ホログラフィ," *映像情報メディア学会誌*, Vol. 62, No. 10, pp. 1565–1572, 2008.
- 28 妹尾孝憲, 三科智之, 山本健詞, 大井隆太郎, 栗田泰市郎, "電子ホログラフィの視域角拡大技術," *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 3-3, 2010.
- 29 三科, 山本, 大井, 奥井, "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*, Vol. 62, No. 7, pp. 1132–1137, 2008.
- 30 K. Yamamoto, T. Mishina, R. Oi, T. Senoh, and M. Okui, "Crosstalk Elimination Using an Aperture for Recording Elemental Images of Integral Photography," *J. Opt. Soc. Am. A* Vol. 26, No. 3, pp. 680–690, 2009.



やまもと けんじ  
**山本健詞**

ユニバーサルメディア研究センター  
超臨場感基盤グループ主任研究員  
博士(工学)  
電子ホログラフィ、3次元画像工学



みしな ともゆき  
**三科智之**

ユニバーサルメディア研究センター  
超臨場感基盤グループ特別研究員  
博士(工学)  
電子ホログラフィ、立体映像



せの おたかのり  
**妹尾孝憲**

ユニバーサルメディア研究センター  
超臨場感基盤グループ専攻研究員  
工学博士  
電子ホログラフィ、立体映像



おおい りゅうたろう  
**大井隆太郎**

ユニバーサルメディア研究センター  
超臨場感基盤グループ主任研究員  
博士(科学)  
光波伝播解析、ホログラフィ、3次元撮像技術、イメージセンサー



くり たないちろう  
**栗田泰市郎**

ユニバーサルメディア研究センター  
超臨場感基盤グループグループリーダー 博士(工学)  
テレビシステム、動画信号処理、ディスプレイ表示方式と画質、フレキシブルディスプレイ、立体映像