

インテグラルフォトグラフィー撮影を用いた 実写カラーホログラフィー表示システム

山本 健 詞

Real-Time Color Electronic Holography System with Integral Photography Camera

kenji YAMAMOTO

This tutorial presents the issues encountered when holography is converted to electronic form and describes a system prototyped to combat those issues. More specifically, this tutorial addresses the issues of hologram data acquisition, the viewing zone angle being narrowed down due to the inadequate resolution of electronic devices that display hologram data, and unnecessary beams causing interruption. It also describes a color electronic holography system prototyped based on a 4K video system. This system is designed so that an integral photography camera is used to take ray information, with the data obtained being used to calculate hologram data. The system is therefore characterized by the fact that it can take real ray information under a natural light without using a laser beam.

Key words: electronic holography, hologram, integral photography (IP), 3D imaging

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再現できれば大変有用であろう。テレビはその一例で、視聴者は家庭で海外の絶景を楽しむことができるし、過去の出来事をニュース番組で知ることができる。最近になり商品化され始めた立体テレビでは、通常のテレビが二次元のみの映像を提示するのに対して、右眼用と左眼用の映像を提示できる二眼式立体表示のため、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いえると同時に、二眼式ではまだまだ不自然さがあるため、立体表示技術のさらなる発展が望まれている。

立体表示の品質を向上させるために、さまざまな方式が検討されている。たとえば、2つの視点の映像を提示するのではなく、多くの視点の映像を提示する、多眼式といわれる方式がある。また、2本以上の光線を瞳に提示することで輻輳と調節の不一致を防ぐ超多眼方式もある。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本化方式もある。これ

らさまざまな立体映像方式のひとつに、究極の方式と考えられているホログラフィー方式がある。

ホログラフィーは、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。そのため、ホログラフィー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と期待されている。テレビなど不特定の人々がさまざまな環境で視聴するシステムでは、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、ホログラフィーは理想的な方式と考えられる。従来は、ホログラフィー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ーを実現する電子ホログラフィーの研究がなされるようになってきている。本稿では、この電子ホログラフィーを将来の放送やコミュニケーションに利用しようとした際に発生する課題と、開発した実写カラーホログラフィー表示システムについて解説する。

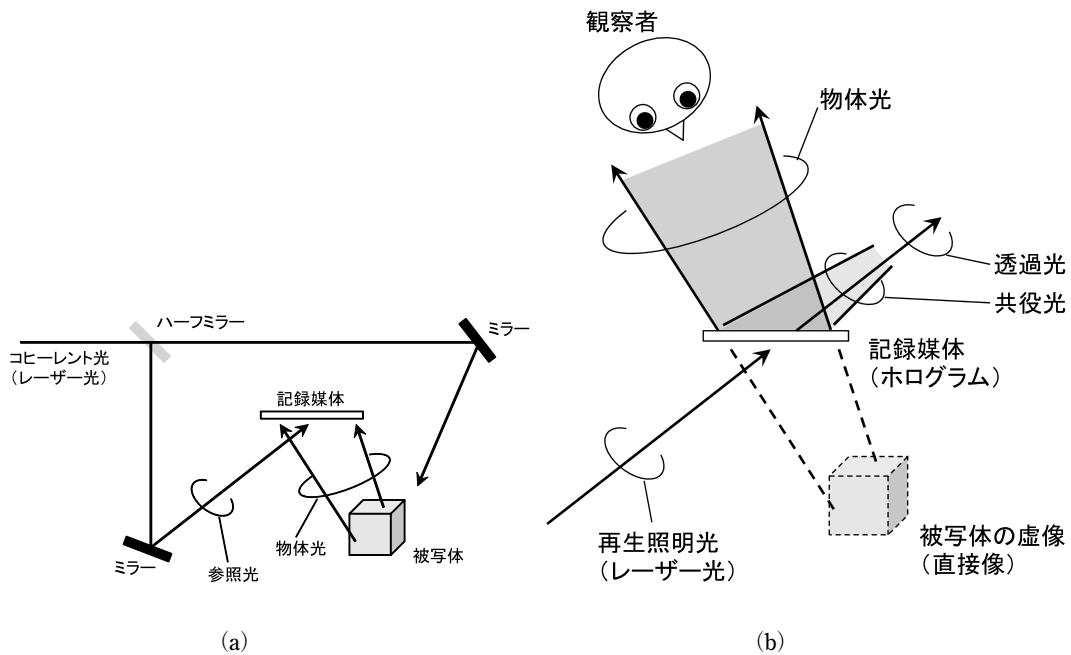


図1 ホログラフイーによる立体映像技術。(a) 記録, (b) 再生.

1. 電子ホログラフイーの課題

電子ホログラフイーは、図1 (b) に示したホログラフイーの再生技術において、記録媒体の代わりにホログラムデータを電子デバイスに表示して、動画像を表示する技術である。電子ホログラフイーを立体ディスプレイで用いる際には、次の2つが重要な課題になる。

1つ目の課題は、ホログラムデータをいかに取得するかという課題である。この課題に対する直接的な方法として、ホログラフイーの原理どおりに干渉縞を撮影する方法がある。つまり、図1 (a) において記録媒体として CCD (charge coupled device) などの電子撮像デバイスを用いる方法で、理想的なホログラムデータを直接取得する方法である。しかしながらこの方法には、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を撮影できないといった問題や、例えば人物の表情といった自然な環境下での撮影が望ましい対象の撮影には向かないといった問題がある。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、被写体に制限がなく、かつ、暗室でなくてもホログラムデータを取得できることが望ましい。

2つ目の課題は、ホログラムデータを表示する電子デバイスの画素間隔 (画素ピッチ) が広いことに起因する課題である。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。物体光と参照光とがなす角度の最大角 ϕ_M は、画素間隔 p と光の波長 λ を用いて以下のように表わされる。

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

つまり、参照光の進行方向を中心に角度が ϕ_M 以内 (合計で $2\phi_M$ 以内) の進行方向の物体光を再生できる。物体光が再生される領域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、この領域を視域とよぶ。また、 $2\phi_M$ を視域角とよぶ。たとえば光の波長 λ を 633 nm とすると、ホログラム用写真乾板におおよそ相当する分解能 500 line/mm (つまり画素間隔 p が $1 \mu\text{m}$) では視域角は 37 度、現状のプロジェクター用表示デバイスに相当する画素間隔 p が $10 \mu\text{m}$ では視域角は 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に、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イーの2つ目

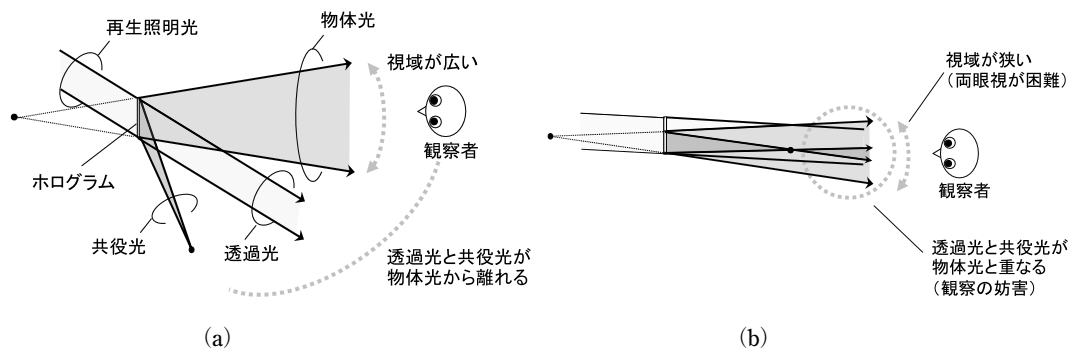


図2 ホログラフィーの再生。(a) 狭ピッチな画素間隔の表示デバイスの場合、(b) 広ピッチな画素間隔の表示デバイスの場合。

の課題として挙げられる。

2. 電子ホログラフィーの技術

2.1 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、先述のとおり、記録媒体に電子撮像デバイスを用いてホログラフィーの原理どおり取得する方法がある。表示技術で用いる電子ホログラフィーと区別するため、ここではこの方法をデジタルホログラフィーとよぶことにする。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¹⁾。顕微鏡用途の研究が多いなかで、佐藤らは数 cm のさいころのホログラムデータを高品質にカラーで取得することに成功している²⁾。栗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³⁾。デジタルホログラフィーは高品質な取得が可能である反面、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およ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、たとえば人物を撮影するほどの大きなホログラムを取得するのは困難である。また、デジタルホログラフィーにとって自然光はノイズになるために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。

デジタルホログラフィーのほかには、計算機合成ホログラム (CGH; computer-generated hologram) とよばれる方法がある。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して扱う方法がある。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、並列計算機や専用ハードウェアによる高速化^{4,5)}、アルゴリズムの改良による高速化^{6,7)} など、計算時間を短縮する検討がさまざま報告されている。また、被写体を面の集合として扱うことで、よりリアルやアートな被写体を表示しようという試みも報告されている⁸⁻¹¹⁾。CGH では被写体の制約は原理的にないが、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、自然光下にある被写体のホログラムを取得するため、カメラアレイで撮影した映像からホログラムを計算する方法^{12,13)} や、インテグラル・フォトグラフィー (IP) で撮影した映像からホログラムを計算する方法も検討されている¹⁴⁻¹⁶⁾。IP は、多数の微小なレンズを平面上に並べた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ひとつである。本稿で紹介するシステムはこの IP を使っている。

2.2 表示技術

先述のとおり、ホログラムデータを表示するデバイスの分解能が不足しているために、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ー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^{17,18)} と、再生時のシングルサイドバンド法¹⁹⁾ とを組み合わせると妨害

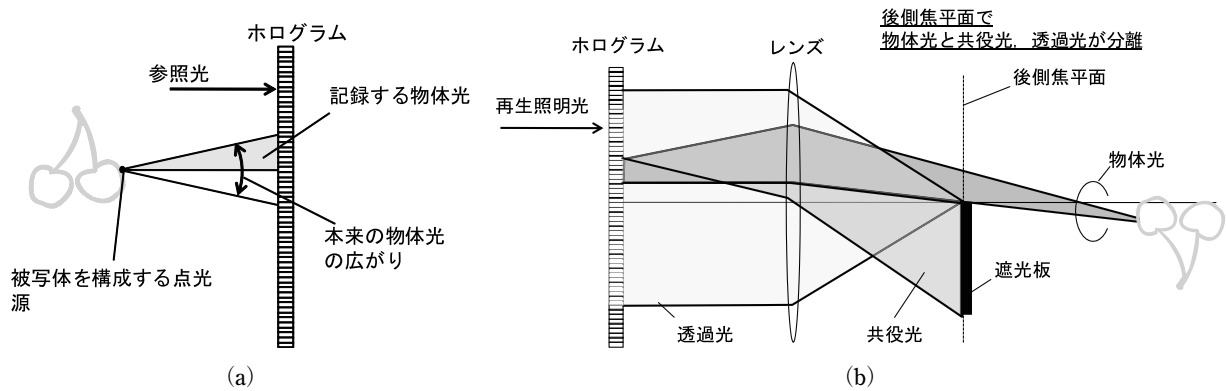


図3 妨害光の除去。(a) 記録時のハーフゾーンプレート処理, (b) 再生時のシングルサイドバンド法。

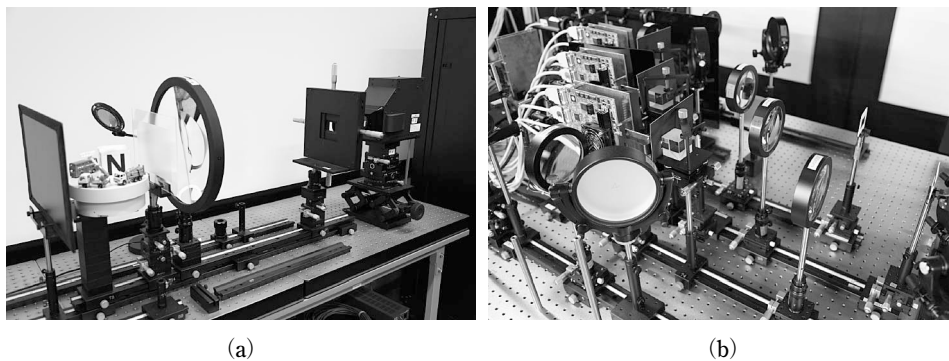


図4 4K映像システムを用いた電子ホログラフィーシステムの外観。(a) ホログラムデータ取得ブロック, (b) 表示ブロック。

光の除去す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に制限する処理ともいえる。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。本稿で紹介するシステムは、この方法で妨害光を除去している。

視域の拡大という課題でも、やはり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。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^{20,21)}、時分割で視域を切り替えたり^{22,23)}、複数枚の表示デバイスを用いたり^{24,25)} することなども検討されている。

3. 電子ホログラフィーシステム

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で外観を示した電子ホログラフィー

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1秒あたり30秒の画像を表示する。つまりリアルタイムで動作する。

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 L_0 と4Kビデオカメラの間に、フィールドレンズ L_1 、開口 A_2 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た。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。限られた総画素数において要素レンズの個数と要素画像の画素数をいかにするかは、設計において重要である。ここでは、後段の二次元フーリエ変換で二次元高速フーリエ変換を用いたいことや、解像度をさほど損なわないこと、光線の方向数もさほど少なくしたくないことを総合的に考慮して、上記の個数と画素数を選んだ。

IP映像からホログラムへの変換は、IPの表示系における光波分布を算出することで行った^{16,26,27)}。具体的には各要素画像ごとに以下を計算してホログラムを生成した。ま

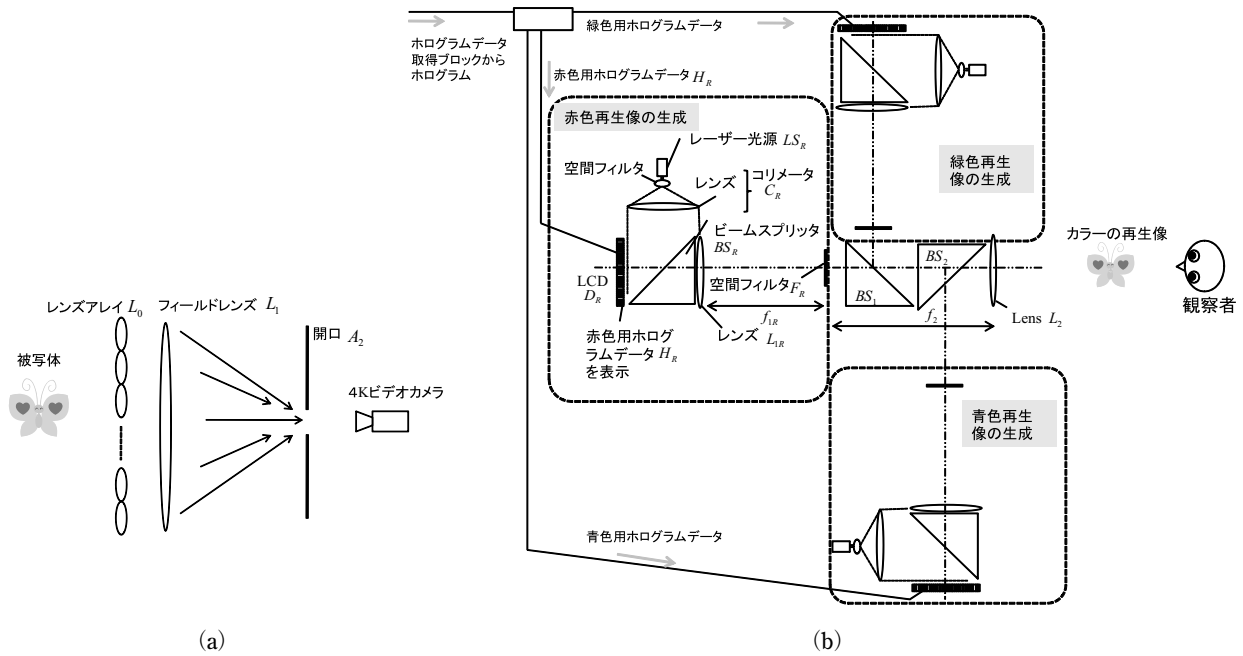


図5 4K映像システムを用いた電子ホログラフィーシステム。(a) ホログラムデータ取得ブロック、(b) 表示ブロック。

ず、撮影した要素画像のうち、上向きの光線を表している上半分、または下向きの光線を表している下半分をハーフゾーンプレート処理として削除する。上下のどちらかは、表示ブロックでの空間フィルターと合わせる。次に、一様分布のランダムな位相を要素画像に付加した後に二次元フーリエ変換を施す。求められた物体光の光波分布から、参照光をインラインの平行光としてホログラムを計算する。最後に、ホログラムを要素画像と同じ位置に置く。以上の計算により、IPの表示系における、レンズアレイ直後の位置のホログラムを生成している。この計算により、RGBそれぞれを再生するホログラムを1秒間に30枚ずつ生成している。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だが、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^{28,29)}にある開口 A_2 をフィールドレンズ L_1 の後側焦平面に、レンズアレイを構成する各レンズによる撮影画角とフィールドレンズの焦点距離で決まるサイズの開口を設けることで、重複記録をなくすことはできないものの低減されている。

レンズアレイ L_0 の各要素レンズは正確に格子状に並んでいるが、 L_1 とビデオカメラのレンズの幾何ひずみのために、撮影した画像では要素画像が正確に格子状に並んで

いない。そのため事前に要素画像の位置を抽出して補正している。抽出には、平行光とテンプレートマッチングによる要素画像の相対位置の算出と、再生画像の観察による要素画像の絶対位置の算出を併用した方法を用いた³⁰⁾。この補正をしない場合、立体像が二重に見えてしまうという問題が発生してしまう。

図5 (b) に表示ブロックを示した。表示デバイスとして4Kの液晶パネルを3枚用いている。再生像をカラーにするため、RGBごとの再生像をつくりだす3つの部分と、それらを重ねる部分で構成される。図5 (b) の左側には赤色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ー 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ー BS_R を通して液晶パネル D_R に当てる。 D_R にはホログラムデータ 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ー BS_R とレンズ L_{1R} を通過させ、空間フィルター 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妨害光である透過光と共役光は通過しない。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、液晶パネル 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、再生像が浮いて見える。赤色以外の再

表1 表示ブロックの仕様.

f_{1R}, f_{1G}, f_{1B} : レンズ L_{1R}, L_{1G}, L_{1B} の焦点距離	300 [mm]
f_2 : レンズ L_2 の焦点距離	300 [mm]
LCD D_R, D_G, D_B の解像度	3840(W) × 2160(H) [pixels]
LCD D_R, D_G, D_B の画素間隔	6.8 [μ m]
レーザー(赤, 緑, 青)の波長	633 [nm], 544 [nm], 475 [nm]

生像も、赤色と同様に生成される。ビームスプリッター 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 の右側に浮いて見える。各光学素子の詳細を表1に示した。

実験結果を図6に示した。被写体として、3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250 mm 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。立体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」はぼけて写るべきである。2枚目はその逆で、ミニカーはぼけ

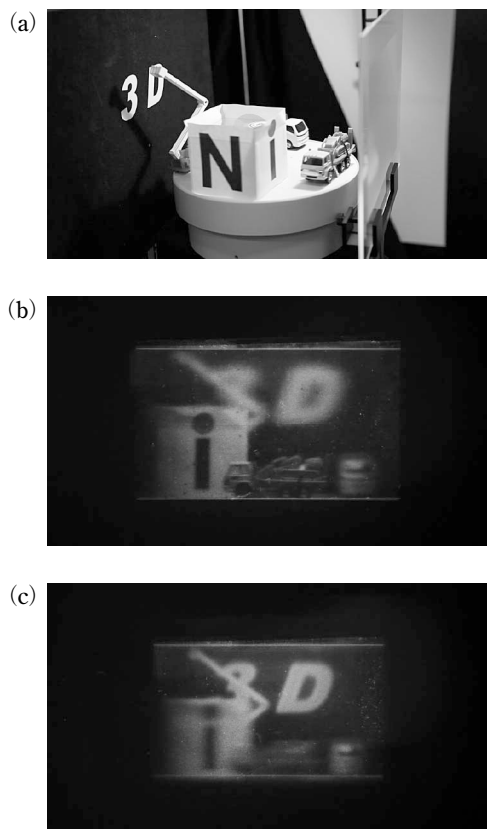


図6 実験結果. (a) 被写体, (b) 手前にあるミニカーをフォーカスして再生像を撮影, (c) 奥にある文字「3D」をフォーカスして再生像を撮影.

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。予測通りの結果を得られていることから、立体像が再構築されていることがわかる。

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ー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 μ m であるため、2 cm の再生像で4.0度の視域角を実現できている。

以上、電子ホログラフィーの代表的な課題と、それらに対する対策について述べた。また、実物体を記録して表示できる電子ホログラフィーとして、IP映像を撮影してホログラムに変換して観察者に提示する4K映像システムを用いた電子ホログラフィーシステムについて述べた。現在は、撮影したIP映像を拡張した後にホログラムに変換する手法などを検討している³¹⁾。

写真や印刷などによる静止画像のホログラムの中には、本物と見分けがつかないほど自然な立体像を再現できているものがある。電子ホログラフィーはこれを動画像にする技術であるが、その技術的なハードルは高く、研究開発はまだ初期の段階である。本稿では2つの代表的な課題を紹介したが、それ以外にも大画面化やスペck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状況である。今後は、これらの課題も含めて着実に研究開発していく必要がある。

文 献

- 1) N. Hashimoto, S. Morikawa and K. Kitamura: "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM," *SPIE Pract. Holography*, **1461** (1991) 291-302.
- 2) K. Maejima and K. Sato: "Development of one-shot color digital holography," *SPIE Pract. Holography*, **7233** (2009) 72330U.1-72330U.8.
- 3) 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 2010* (2010) p. DMA6.
- 4) T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba and T. Sugie: "Specialpurpose computer HORN-5 for a realtime electroholography," *Opt. Express*, **13** (2005) 1923-1932.
- 5) S. Matsuda, T. Fujii, T. Yamaguchi and H. Yoshikawa: "Fast generation of computergenerated hologram by graphics processing unit," *SPIE Pract. Holography*, **7233** (2009) 72330I.1-72330I.10.
- 6) R. P. Muffoletto, J. M. Tyler and J. E. Tohline: "Shifted Fresnel diffraction for computational holography," *Opt. Express*, **15** (2007) 5631-5640.
- 7) K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 4607-4614.
- 8) K. Matsushima and S. Nakahara: "Extremely high-definition full-

- parallax computergenerated hologram created by the polygon-based method,” *Appl. Opt.*, **48** (2009) H54–H63.
- 9) K. Wakunami and M. Yamaguchi: “Calculation of computer-generated hologram for 3D display using light-ray sampling plane,” *SPIE Pract. Holography*, **7619** (2010) 76190A.
 - 10) K. Yamamoto, T. Senoh, R. Oi, T. Mishina and T. Kurita: “Hologram generation using rendering in computer graphics and wave propagation,” *International Conference on 3D Systems and Applications 2010* (2010) pp. 118–121.
 - 11) K. Yamaguchi, T. Ichikawa and Y. Sakamoto: “Calculation method for cgh considering smooth shading with polygon models,” *SPIE Pract. Holography*, **7957** (2011) 795706.
 - 12) M. Kinoshita and Y. Sakamoto: “Computer-generated holograms at an arbitrary viewpoint synthesized from multi-view images,” *SPIE Pract. Holography*, **7233** (2009) 72330Z.1–72330Z.8.
 - 13) K. Yamamoto, R. Oi, T. Senoh, Y. Ichihashi and T. Kurita: “Holographic stereogram using camera array in dense arrangement,” *SPIE Pract. Holography*, **7957** (2011) 795703.
 - 14) R. V. Pole: “3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light,” *Appl. Phys. Lett.*, **10** (1967) 20–22.
 - 15) M. O. T. Mishina and F. Okano: “Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography,” *Appl. Opt.*, **45** (2006) 4026–4036.
 - 16) 大井隆太郎, 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論文誌*, **61** (2007) 198–203.
 - 17) 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** (1997) 13–19.
 - 18) K. Yamamoto, R. Oi, T. Mishina and M. Okui: “Half-zone-plate processing for objects on both sides of hologram display,” *SPIE Pract. Holography*, **6912** (2008) 69120Q.
 - 19) O. Bryngdahl and A. Lohmann: “Single-sideband holography,” *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 620–624.
 - 20) Y. Hayashi and Y. Takaki: “Horizontal resolution enhanced hologram to increase horizontal viewing angle,” *SPIE Pract. Holography*, **6912** (2008) 69120I.
 - 21) H. Kang, N. Ohmura, T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, S.-C. Kim and E.-S. Kim: “Method to enlarge the hologram viewing window using a mirror module,” *Opt. Eng.*, **48** (2009) 075801.
 - 22) T. Mishina, F. Okano and I. Yuyama: “Time-alternating method based on singlesideband holography with half-zone-plate processing for the enlargement of viewing zones,” *Appl. Opt.*, **38** (1999) 3703–3713.
 - 23) T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, Y. Ichihashi and T. Kurita: “Full-color wide viewing-zone-angle electronic holography system,” *OSA Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2011* (2011) p. DTuA3.
 - 24) 三科智之, 大井隆太郎, 洗井 淳, 岡野文男, 奥井誠人: “視域拡大法を適用させたインテグラルフォトグラフィーホログラム変換を用いた実写入力電子ホログラフィー”, *映像情報メディア学会論文誌*, **60** (2008) 1565–1572.
 - 25) T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi and T. Kurita: “Wide viewing-zone-angle full-color electronic holography system using very high resolution liquid crystal display panels,” *SPIE Pract. Holography*, **7957** (2011) 795709.
 - 26) K. Yamamoto, T. Mishina, R. Oi, T. Senoh and T. Kurita: “Real-time color holography system for live scene using 4K2K video system,” *SPIE Pract. Holography*, **7619** (2010) 761906.
 - 27) 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*, **56** (2010) 19–29.
 - 28) 三科智之, 山本健詞, 大井隆太郎, 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論文誌*, **62** (2008) 1132–1137.
 - 29) 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*, **26** (2009) 680–690.
 - 30) K. Yamamoto, T. Mishina and M. Okui: “Calibration of elemental images in integral photography capture for electronic holography,” *OSA Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2009* (2009) p. DWA4.
 - 31) Y. Ichihashi, R. Oi, T. Senoh, K. Yamamoto and T. Kurita: “Methods for generating 8k holograms from 4k integral photography images,” *3rd International Conference on 3D Systems and Applications* (2011) pp. S6–3.

(2011年7月11日受理)