

3-3 電子ホログラフィの視域角拡大技術

3-3 Viewing-Zone-Angle Expansion of Electronic Holography Reconstruction System

妹尾孝憲 三科智之 山本健詞 大井隆太郎 栗田泰市郎

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

要旨

電子ホログラフィは、3次元の被写体から出る光の位相と振幅を、参照光に対する干渉縞として電子的に記録・再生する技術で、被写体光の持つ全ての情報を再生出来る為、理想的な立体映像表示手段となる。しかし、広い視域角を実現する為には、光の波長と同程度の画素サイズの表示素子が必要である。現在入手可能な液晶パネル等の干渉縞表示デバイスの画素サイズは光の波長の10～20倍である為、表示された干渉縞で回折可能な光の角度は2～3度であり、十分な視域角を確保できないという課題がある。本稿では、複数の視域の異なる干渉縞を並列に表示して、再生されるホログラム光をハーフミラーで重ね合わせるにより、不要光を除去しながら広い視域角を実現する方法について述べる。

Electronic holography system records and reconstructs electronically the amplitude and the phase of three dimensional object light as the interference pattern with a reference light. This pattern is called as fringe pattern or hologram. As holography can reconstruct all information of original object light, it can be an ideal three-dimensional display system. In order to realize a wide viewing-zone-angle, a display with very small pixel size, which is comparable to light wave length, is required. As currently available pixel size of display such as liquid crystal display panel is about 10-20 times larger than the wave length of light, the maximal diffraction angle of such display is only 2-3 degree. This angle is not sufficient for the observation of reconstructed holographic images. In this paper, novel viewing-zone-angle expansion method together with the elimination of undesirable lights is described. This method displays plural fringe patterns in parallel and overlaps reconstructed holographic lights with half-mirrors.

【キーワード】

電子ホログラフィ, 干渉縞, 表示デバイス, 画素サイズ, 視域角

Electronic holography, Fringe pattern, Display device, Pixel size, Viewing zone angle

1 まえがき

人間の能力の限界を打破する手段として、機械による交通手段や通信手段が発達して来た。交通手段の発達によって、人は今や世界中はおろか宇宙にまで移動できる様になった。通信手段に関しても、世界中や宇宙からでも、音声のみならず高精細なフルカラー大画面映像での双方向コミュニケーションが可能になった。このコミュニケーシ

ョン手段の能力を更に高める為に、超臨場感コミュニケーションが研究されている[1]。超臨場感コミュニケーションでは、これまでの平面映像に奥行きを与えた立体映像による、より高い臨場感のコミュニケーションを目指している。

立体映像の実現手段としては、左右の目に被写体の見える角度が僅かに異なった別々の映像を届ける2眼立体映像方式や、これを拡張した裸眼で観視可能な多眼立体映像方式、3次元の被写体映

像をその厚みも含めて空間に構成する体積表示方式、3次元の被写体から出る光の全ての情報である、光の振幅と位相を参照光に対する干渉縞として記録再生するホログラフィ方式などがある[2]。人が立体視を行うときの手掛りには、左右の眼球の網膜に映る映像のわずかなずれである両眼視差や、被写体に向けた両眼球の廻旋運動による輻輳角の変化や、目の水晶体のピント調節に使われる毛様体活躍筋の緊張度合いや、立体の被写体が動いたり被写体の周りを観視者が動いた時に見える方が変わって立体感を感じる運動視差などがある[3]。

ホログラフィ方式は、この全ての立体視の手掛りを再現する為、自然でリアルな立体映像を再生可能で、人間の視覚機能に負担を掛けない理想的な立体映像表示手段として期待されている[4]。このホログラフィをコミュニケーション手段に用いる為に、電子的にホログラフィを記録・再生する電子ホログラフィの研究が、近年盛んに研究されている[5][6]。

電子ホログラフィでは、電子的な表示素子に干渉縞を表示する為に干渉縞のデジタルデータが必要になる。干渉縞の電子的な取得方法には、写真乾板の代わりに CCD (Charge Coupled Device) などの電気的な撮像素子を用いて、直接的に干渉縞を撮影する方法[6]や、被写体の3次元の空間情報から計算する CGH (Computer Generated Hologram) の方法[7]などがある。前者は、高品質な実物体の干渉縞を取得出来るが、暗室とレーザー光が撮影に必要なため、人体の撮影や屋外での撮影には不適當である。一方、後者は、計算で干渉縞を生成する為、空間情報があれば、さまざまな被写体の干渉縞をレーザなしで取得出来る。

このように、電子ホログラフィを用いると、立体映像の情報は電子データとして表されるので、ホログラフィの動画化やネットワークを通じての伝送が可能になる。このため、電子ホログラフィは超臨場感コミュニケーションの有力な実現手段として大きく期待されている。

しかし、電子ホログラフィの実現に向けては多くの困難な課題がある。本稿では、重要な課題の1つである電子ホログラフィの視域と、それを拡大するために開発した技術について報告する。

2 電子ホログラフィの視域

電子ホログラフィでは、図1に示す様に被写体から一様に拡散する光が構成する球面波の位相を干渉縞の幅に変換して記録する。これを再生する時には、記録された干渉縞に光を当てて、記録時の被写体光の方向に光を回折させる事により、被写体の立体像を得る。この記録された干渉縞をホログラムと言う。図の赤線は、光の位相の周期を表している。光の広がり角が大きくなる程、周辺干渉縞の間隔は狭くなる。立体映像の視域を広く取る為には、広い範囲に広がる光の干渉縞を記録再生する必要がある。その為には、非常に狭い間隔の干渉縞まで再生出来る表示デバイスが必要になる。

干渉縞を表示するデバイスの画素ピッチ p と光の波長 λ が与えられると、そのデバイスで再生可能な光の最大回折角 ϕ は、図2から次の様に与えられる。画素ピッチ p の表示デバイスで表示可能な干渉縞の最小間隔は、図2に示す様に2画素で

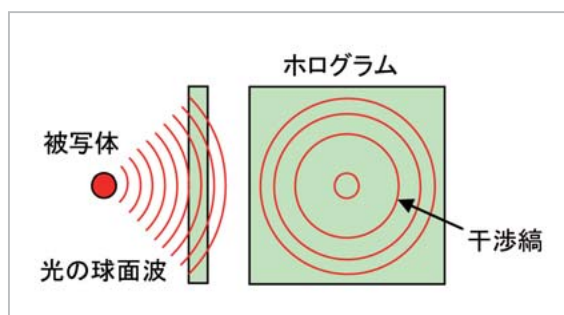


図1 ホログラフィと干渉縞

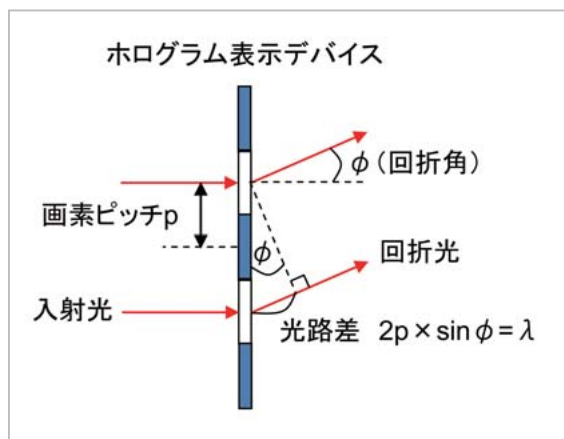


図2 ホログラム再生光の回折角

1 周期の干渉縞である。この様に 1 画素おきに光の通過する部分と光を遮断する部分が並ぶと、小さな隙間 p に入る光はホイヘンス-フレネルの原理により、同じ波長の点光源になる。これらの光は、隣の画素から出た光と位相が揃う時に互いに強め合い、それ以外では弱められるので、結果として入射光はある方向に曲げられることとなる。その時、入射光と出射光のなす角度 ϕ は、図 2 より、次式となる。

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

ϕ より小さい回折角の光を再生するには、多数の画素を使って干渉縞の間隔を広げれば良い。

図 3 に示す様に回折光は、反対側にも曲げられるので、画素ピッチ p の表示デバイスで再生可能な光の広がり範囲は、 2ϕ となる。これが、表示デバイスで表示可能な電子ホログラフィの視域角である。

出射光は波長 λ の整数倍の光路差の時にも強めあうので、(1) 式の角度 ϕ のほぼ整数倍の方向にも回折光が出るが、これらは高次回折光と呼ばれ、基本回折光が折り返された光になり、新たな情報は載せられない。

現在入手可能なホログラム表示デバイスとしては液晶表示素子やマイクロミラーアレー等があるが、これらの表示デバイスの画素サイズは、光の波長 λ の 10~20 倍程度 (約 5~10 μm) である。従って、これらの表示デバイスで表示可能な電子ホログラフィの視域角 2ϕ は、3~6 度程度である。

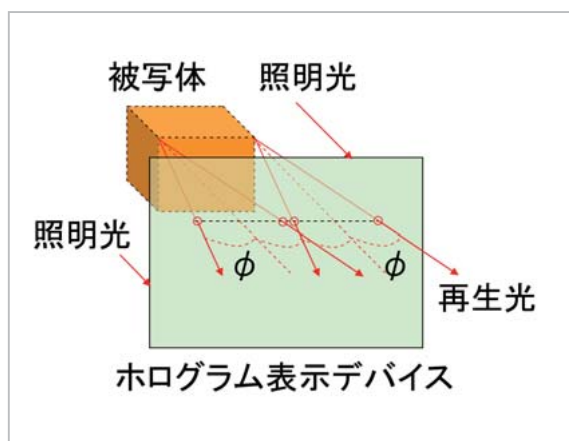


図 3 ホログラフィの視域角 2ϕ

3 電子ホログラフィの視域拡大

3.1 視域拡大ホログラムの作成

電子ホログラフィの視域角を拡大するには、レンズを使う方法が提案されているが、像が小さくなる [8]。図 4 に示す様に被写体光の視域を分割し、それぞれ視域の異なる干渉縞からなるホログラムを作成して、再生光を重ねあわせれば良い。ここで検討するホログラムは、球面波として一様拡散する物体光に、平坦な波面を持つ平行光を重ね合わせて得られる干渉縞を記録したものを扱う。1 枚のホログラムは、 2ϕ の視域しか再生出来ないので、図 4 の中央の視域のホログラムの参照光は、ホログラム面に垂直に当てれば良いが、上下の視域のホログラムを得るには、参照光の傾きをそれぞれ $+2\phi$ 、 -2ϕ に傾ける必要がある。

この様に、ホログラム面に参照光を垂直に当てて作成したホログラムを、インラインホログラムと呼び、参照光を傾けて照射して作成されたホログラムをオフアクシスホログラムと言う。オフアクシスホログラムを使うと、参照光と物体光の傾きの差が小さくなるので干渉縞の縞間隔が広くなり、ホログラム面に対して大きな入射角度の物体光でも折り返しなく記録再生出来る [9]。参照光を傾けないで干渉縞を作り、これを干渉縞の幅より広い表示画素間隔でサンプリングを行って、低域に折り返えされた干渉縞を作成し、この再生光の中から高次回折光として得られる元の物体光を再生する方法もある [10][11]。

3.2 インラインホログラムの作成

インラインホログラムを計算機内で作成するには、図 5 に示す様に、ホログラム面に垂直に当た

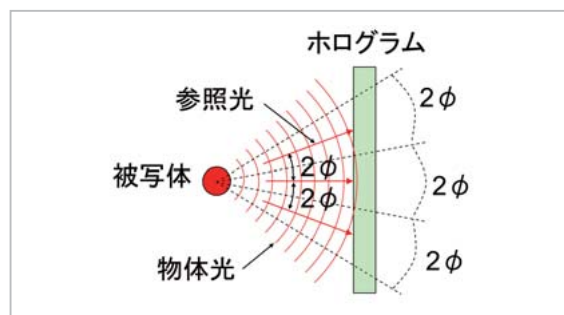


図 4 ホログラフィの視域拡大

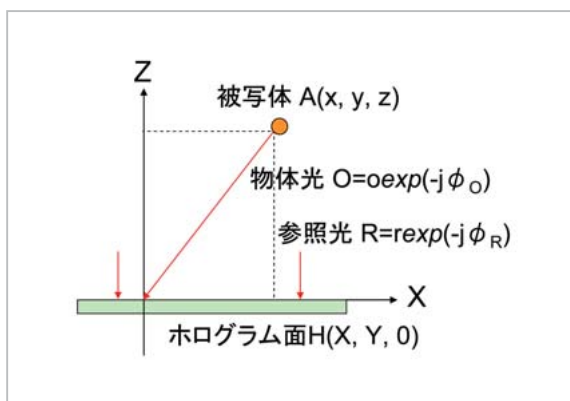


図5 インラインホログラム

る振幅 r の参照光 $R = r \exp(-j\phi_R)$ の位相 ϕ_R は場所によらず一定なので、

$$\phi_R = 0 \quad (2)$$

とおける。被写体から出る振幅 o 、初期位相 0 (ゼロ) の物体光 $O = o \exp(-j\phi_O)$ のホログラム面上での位相 ϕ_O は、被写体点 $A(x, y, z)$ からホログラム面上の点 $(X, Y, 0)$ までの距離で決まり、次式で与えられる。ここで、 λ は光の波長である。

$$\phi_O = 2\pi \frac{\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2}}{\lambda} \quad (3)$$

この式は、電子ホログラフィの様に物体光の拡散角が十分小さい場合は、次式のように近似出来る。ここで、 $k = 2\pi/\lambda$ である。

$$\phi_O \cong k(z + \frac{\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2}}{2z}) \quad (4)$$

実際には、物体光の初期位相は不定であるが、(5)式に示す干渉縞の値は、物体光の初期位相によって、干渉縞の初期位相(物体光が垂直にホログラム面に当たる部分の位相)のみが変化し、干渉縞の幅は不変であるので、これを再生した光は、物体光の初期位相に無関係に同じ方向に回折される為、ここでは簡単の為、物体光の初期位相を 0 とした。

これは、別の見方をすると、物体光と同じ初期位相を持つ参照光との位相差をホログラム面上で記録したものが干渉縞であると見なしても良い事を示す。参照光の初期位相が 0 でない場合は、干

渉縞の初期位相が変化するのみで、干渉縞の間隔は変化しないので、同じ再生光が得られる。

干渉縞 H は、ホログラム面に物体光 $O = o \exp(-j\phi_O)$ と参照光 $R = r \exp(-j\phi_R)$ が同時に照射された時に出来る光の干渉の強さを濃淡の縞模様として記録したものであり、次式で表される。ここで、 $*$ は複素共役を表す。

$$\begin{aligned} H(X, Y, 0) &= |O + R|^2 = (O + R)(O^* + R^*) \\ &= |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R \\ &= o^2 + r^2 + or \exp(-j\phi_O + j\phi_R) \\ &\quad + or \exp(j\phi_O - j\phi_R) \\ &= (o^2 + r^2) + or[\exp\{-j(\phi_O - \phi_R)\} \\ &\quad + \exp\{j(\phi_O - \phi_R)\}] \\ &= (o^2 + r^2) + 2or \cos(\phi_O - \phi_R) \end{aligned} \quad (5)$$

この式で、第1項 o^2 と第2項 r^2 は、物体光と参照光のそれぞれのパワーに比例した一樣な値であり、干渉縞のレベルのオフセット値となる。第3項は、物体光の振幅 r に比例し、インラインホログラムの場合は $\phi_R = \text{一定}$ であり、先の議論で $\phi_R = 0$ として良いので、物体光の位相 ϕ_O を \cos に変換した値となり、 2π の周期で繰り返すパターンとなる。この周期が、図2のリング状の干渉縞を作りだす。干渉縞を直接記録する場合は、第1項と第2項を削除する事が出来ず、干渉縞のコントラストは上がらないが、計算機でホログラムを生成するCGHでは、第1項と第2項を削除する事が可能で、インラインホログラムの干渉縞として、次式で表す値を記録すれば良く、コントラストの高いホログラムを生成出来る。

$$H(X, Y, 0) = 2or \cos \phi_O \quad (6)$$

これを記録する場合は、 H の値が負にならない様にオフセット値を(6)式に加えて記録する。

3.3 オフアクシスホログラムの作成

オフアクシスホログラムの場合は、図6に示す様に、参照光を X 軸方向に $\theta = 2\phi$ 傾けるので、位相 ϕ_R は、ホログラム面上の位置 $(X, Y, 0)$ により変化し、次式で表される。

$$\phi_R = \frac{2\pi}{\lambda} X \sin \theta = kX \sin \theta \quad (7)$$

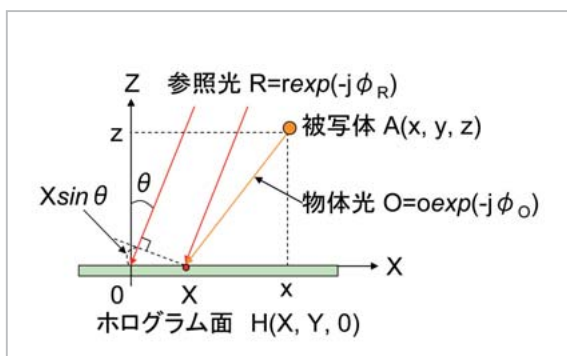


図6 オフアキシスホログラム

一方、物体光の位相 ϕ_o は、インラインホログラムの場合と同様に(4)式で与えられるので、この2つの光の干渉で生じる干渉縞の値 H は、(5)式から第1項と第2項のオフセット項を削除して、

$$H(X, Y, 0) = 2or \cos(\phi_o - kX \sin \theta) \quad (8)$$

で与えられる。この場合の $X=0$ の基準点は、何処にとっても構わないが、1つの被写体点から出る拡散光で作られる干渉縞全体では、同じ基準点を用いる必要がある。(6)式や(8)式で与えられる干渉縞は正負の値を取るが、ホログラム表示デバイスでは、負の振幅は表示出来ないので、(8)式の値が負にならない様にオフセット値を加えた値を記録する。

4 視域拡大ホログラフィの再生

4.1 インラインホログラムの再生

ホログラムの再生は、(8)式の干渉縞 H の表示された表示デバイスに、参照光と同じ照明光 $R = r \exp(-j\phi_R)$ を当てて行う。この時再生される光は、次式で表される。

$$\begin{aligned} RH &= r \exp(-j\phi_R) \times 2or \{1 + \cos(\phi_o - \phi_R)\} \\ &= 2or^2 \exp(-j\phi_R) + or^2 \exp(-j\phi_R) \\ &\quad [\exp\{-j(\phi_o - \phi_R)\} + \exp\{j(\phi_o - \phi_R)\}] \quad (9) \\ &= 2or^2 \exp(-j\phi_R) + or^2 \exp(-j\phi_o) \\ &\quad + or^2 \exp\{j(\phi_o - 2\phi_R)\} \end{aligned}$$

(9)式の第1項は、照明光が透過して来た光であり、不要光となる。第2項は、物体光の振幅が r^2 倍された光であるが、元の被写体像を形成する

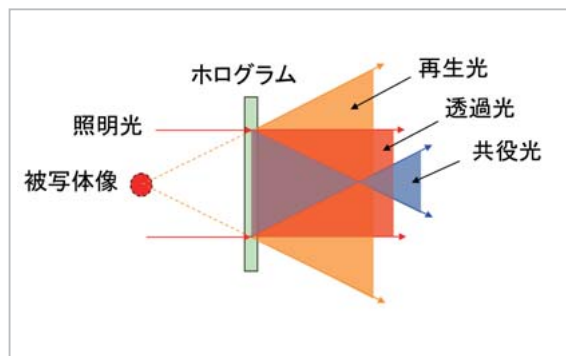


図7 インラインホログラムの再生光

ので、再生光と呼ばれる。第3項は、照明光の2倍の位相を基準とした、再生光に対して共役位相を持つ光であり、共役光と呼ばれ、不要光となる。

インラインホログラムの再生の場合は、 $\phi_R = 0$ と見なせるので、

$$\begin{aligned} RH &= or^2 + or^2 \exp(-j\phi_o) \\ &\quad + or^2 \exp(j\phi_o) \quad (10) \end{aligned}$$

と表せる。この中で、必要なのは第2項の再生光のみであり、その他の光は不要である。これらの光を図示すると、図7の様になり、再生光に重なるので、ホログラフィ映像の観察の妨げになる。

4.2 不要光の除去

図7に示した様に、インラインホログラムでは、不要光が再生光に重なり再生像観察の妨害となるので、これを取り除く必要がある。干渉縞の1点から出た再生光と不要光は、互いに光の角度が異なるので、これを利用して不要光を取り除く事が出来る。その為に、凸レンズをホログラムからその焦点距離 f だけ離れた位置に置く。この様にすると、図8に示す様に、ホログラムから出た光は、その方向によって、レンズの前方の焦平面上の異なる点に集光するので、ここに遮光板を設置して、不要光のみを取り除くことが出来る。これをシングルサイドバンド法と呼ぶ[11]。

しかし、このままでは、ホログラム面から見て水平方向より上側に拡散する物体光は再生出来るが、下側に拡散する光は遮光板に遮られ、逆に下方向に拡散する物体光の共役光が上方向に発生して、遮光板を通過し再生光に重なる問題がある。

そこで図9に示す様に、ホログラム作成時に、被写体から拡散する光を、水平より上側に拡散する光のみに制限して、ホログラムを作成する。この方法をハーフゾーンプレート法と言う[12]。この方法では、垂直方向の視域は半分になるが、水平方向には左右両側に拡散する物体光が使えるので、水平視域は元のままである。

この様にして作ったホログラムに図8の不要光

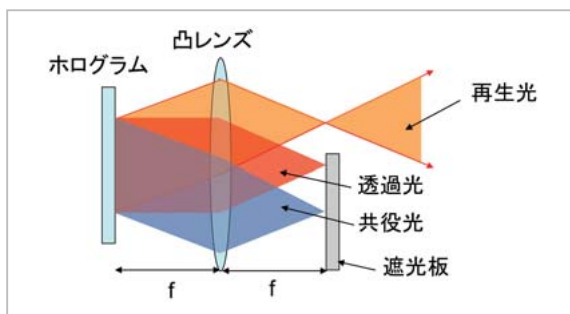


図8 レンズと遮光板による不要光除去

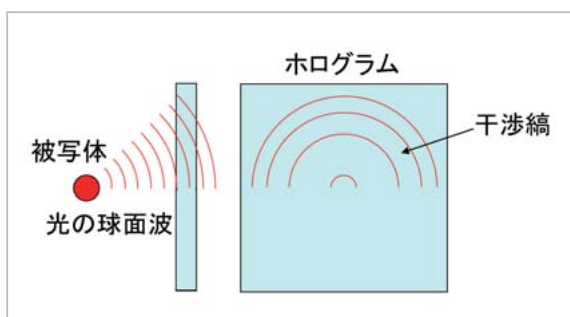


図9 ハーフゾーンプレート法によるホログラム

除去を適用すれば、ホログラムから下側に出る物体光はないので、その様な光は全て共役光と見なして除去出来る[12]。又、干渉縞から下向きに出る再生光はないので、上向きに出る共役光もない。これで、不要光を除去出来るが、再生光は、凸レンズによってフーリエ変換されているので、これを元に戻す必要がある。

その為に、図10に示す様に、遮光板から更に焦点距離 f だけ離れた位置に、同じ凸レンズを置く。この様にすると、2つのレンズは、リレーレンズを構成し、被写体をどの位置に置いても、その像は、元の被写体位置からレンズの焦点距離の4倍の距離だけ前進した位置に等倍のサイズで出来る[13]。図10のシングルサイドバンド法によって再生される像位置とそのサイズは以下の式より導ける。まず、凸レンズ1から左に距離 D 離れた位置にある、レンズの光軸上に立つ高さ Y の被写体 A は、レンズ1の右側 d の距離に高さ y の倒立像 a を作る。この時、被写体から出た光軸に平行な光はレンズの右側焦点を通り、被写体から出てレンズ中心を通る光は直進するので、この2つの光線で構成される緑のハッチを掛けた2つの三角形は相似形となり、次式が成り立つ。

$$\frac{y}{Y} = \frac{d}{D} \quad (11)$$

又ブルーの2つの三角形も相似形となるので、

$$\frac{y}{Y} = \frac{d-f}{f} \quad (12)$$

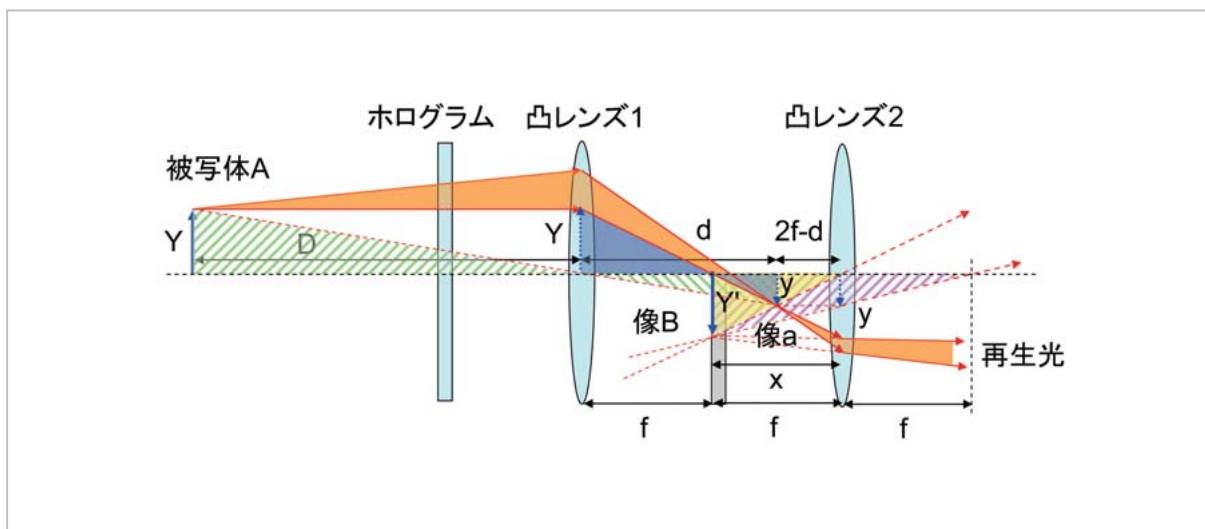


図10 シングルサイドバンド法とリレーレンズによる不要光除去光学系

が成り立つ。この2式より、 d は次の様に求まる。

$$d = \frac{Df}{D-f} \quad (13)$$

これより、像 a の高さ y は、(11) 式より、

$$\frac{y}{Y} = \frac{d}{D} \quad (14)$$

となる。

次に、レンズ2により、この倒立像 a の虚像 B が、レンズ2から距離 x の位置に高さ Y' で出来る。この時、倒立像 a は、レンズ2から距離 $(2f-d)$ の位置にあるが、同様にして、ピンクのハッチの中にある2つの三角形と黄色で塗られた部分にある2つの三角形はそれぞれ相似形であるので、次式が成り立つ。

$$\frac{y}{Y'} = \frac{f}{x+f} = \frac{2f-d}{x} \quad (15)$$

これより、

$$x = \frac{f(2f-d)}{d-f} \quad (16)$$

$$Y' = \frac{yx}{2f-d} = \frac{yf}{d-f}$$

と出力像 B の位置 x と高さ Y' が求まる。これに、(13) 式と (14) 式で与えられる倒立像 a の位置 d と高さ y を入れると、

$$x = D - 2f$$

$$Y' = y \frac{(D-f)}{f} = \frac{fY}{D-f} \frac{D-f}{f} = Y \quad (17)$$

となり、等倍の像が出来ることが分かる。

図10より、被写体 A から像 B までの距離は、被写体 A からレンズ2までの距離 $(D+2f)$ から、レンズ2から像 B までの距離 $x = D - 2f$ を引けば良いので、

$$(D+2f) - x = (D+2f) - (D-2f) = 4f \quad (18)$$

となり、像 B は、被写体 A からレンズの焦点距離 f の4倍の距離だけ前進した位置に出来る事が分かる。従って、このリレーレンズのことを $4f$ 光学系とも呼ぶ。

4.3 オフアクシスホログラムの再生

オフアクシスホログラムの再生は、図6に示したオフアクシスホログラムに左又は右に角度 $\theta = 2\phi$ 傾けた照明光を当てればよい。その時に再生される光は、(9) 式で示され、透過光と共役光の不要光を含む。これらの光は、垂直方向には、図8に示したインラインホログラムと同じ方向に出る光であるので、インラインホログラムと同じ $4f$ 光学系で除去出来る。インラインホログラムの場合と異なるのは、遮光板に空けた窓の位置を再生光の水平方向に応じて左、または右に寄せることのみである。窓の移動量は、図8を参照して、焦点距離 f のレンズの左側焦平面にホログラムを表示した場合、レンズに届く角度 $\theta = 2\phi$ のオフアクシス参照光は、レンズの外周方向に $f \tan \theta$ ずれ、レンズの右側焦平面上でレンズ中心から $f \tan \theta$ ずれた位置に集光する。ホログラムから出た再生光は、この位置を中心に広がっているので、窓位置の中心をレンズ中心から $f \tan \theta$ だけずらせば良い。窓の大きさは、再生光の広がる範囲がインラインホログラムと同じであるので、同じ大きさで良い。

4.4 視域角拡大光学系

視域角拡大の為には、インラインホログラムの両脇に出来るオフアクシスホログラムも再生する必要がある。図4に示した様に、被写体が点であれば、インラインホログラムとオフアクシスホログラムを横並べに表示すれば良いが、被写体が広がりを持つ場合は、図11に示す様に、オフアクシスホログラムとインラインホログラムを互いに重ね合わせる必要がある。

各ホログラムの表示には、個別の表示パネルを必要とするので、時分割で表示するか、空間的に離れた位置に配置したホログラム表示パネルから出る光を光学的に重ね合わせる必要がある。時分割表示では、全視域を表示する為の時間が増え、動画を表示する場合のフレームレートが下がるので、ここでは空間分割表示の方法を検討する。

図12に、視域を空間分割して3倍に拡大した光学系の構成を示す。夫々のホログラム表示パネルに、インラインホログラムと、左右のオフアクシスホログラムを表示し、不要光除去の為の $4f$

光学系の出力像が互いに重なり合う様に、ハーフミラーを配置している。4f 光学系は、視域毎に遮光板の位置が異なる為、それぞれの視域毎に配置しているが、4f 光学系の出力レンズは全視域で共用している。

5 光学実験

以上の検討結果を適用して視域角を3倍に拡大した電子ホログラフィ再生装置を試作し、ホログラム像の再生実験を行った結果を以下に示す[9]。

5.1 インテグラルフォトグラフィのホログラム変換

実験用の被写体は、図13に示す様な“I”及び

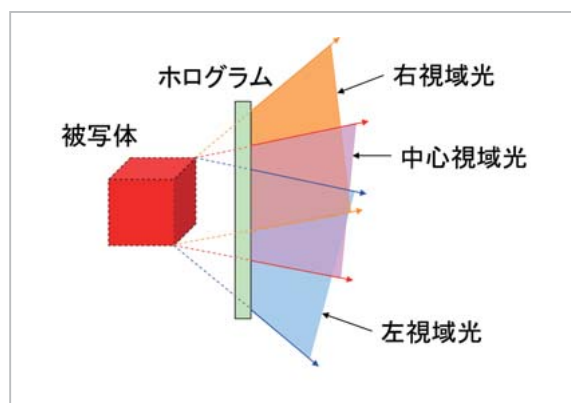


図11 視域の重ね合わせ

“P”の文字の形をした積み木である。電子ホログラフィの撮影は、通常は暗室でレーザー光を照明光として撮影するが、超臨場感コミュニケーションに応用する為には、自然光下で撮影された実写映像の電子ホログラフィ化が必要となるので、ここでは、自然照明光下で撮影可能なインテグラルフォトグラフィ(IP)映像[14]を用いて、それからホログラムが作成された。尚、このIP撮影は、NHK放送技術研究所の協力を得て行われた[15]。

インテグラルフォトグラフィは、図14に示す様に、通常のカメラの前に小さなレンズを2次元アレー状に並べたレンズアレーを用い、レンズアレーの後ろ焦平面上に出来る微小な映像(IP映像)群を通常のカメラで撮影する。撮影された映像の各画素は、図14に示した様に、被写体の各点から出た光線の方向を微小レンズアレーの右側焦点面でサンプリングしたものに相当する。この考え方は、前節で述べた電子ホログラフィが、被写体から出た光線の方向を干渉縞の縞間隔に変換して記録したのと同じと見なせる。従って、この光線の方向を保持して再生すれば、再生光線は元の被写体点を通り、そこに立体像を形成する。その為、インテグラルフォトグラフィでは、撮影に用いたのと同じレンズアレーを、レンズの焦点距離だけスクリーンから離れた位置に置く事で、各画素の光線の方向を再現する。

この光線再生方法によって生成される立体映像

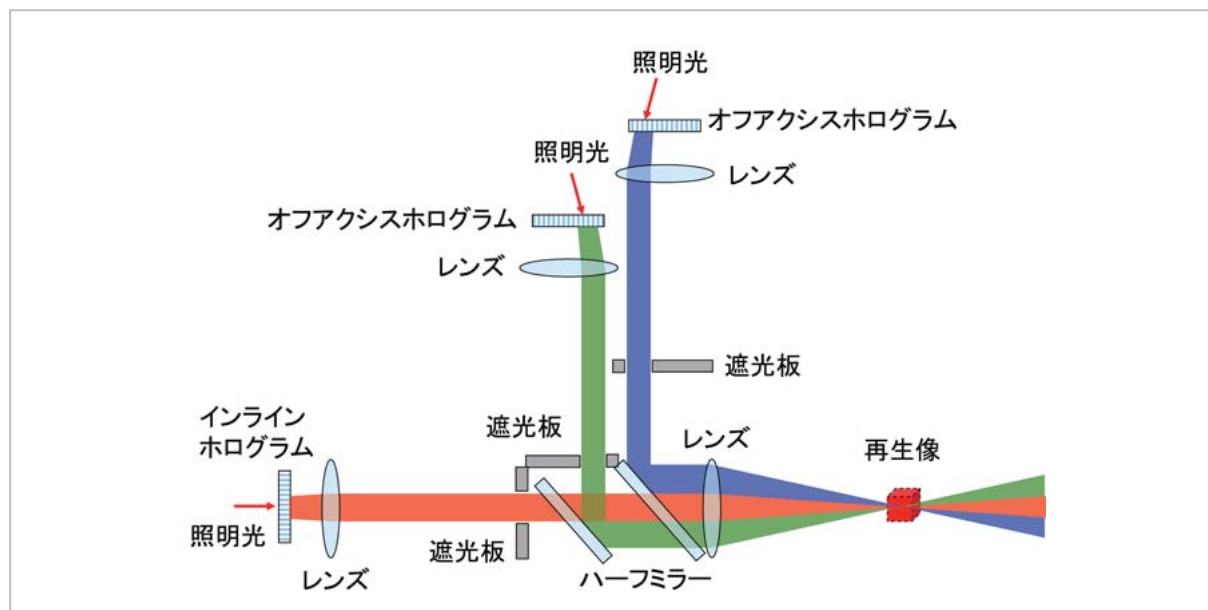


図12 視域角を拡大した光学系の構成



図 13 被写体

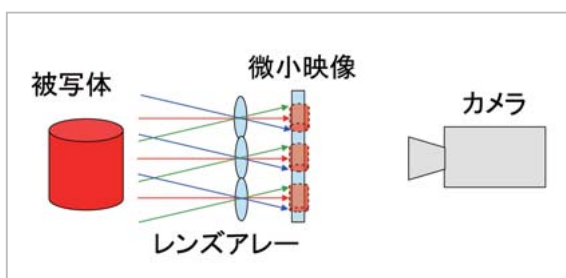


図 14 インテグラルフォトグラフィ(IP)の撮影

は、自然光での立体映像撮影が可能であるので、これを用いる事で、実写映像のホログラフィ再生が可能になる。

具体的には、インテグラルフォトグラフィの再生光線の光路上にホログラム面を置いて、図 15 に示した様に、再生された光の位相を参照光の位相との干渉縞として記録すれば、インテグラルフォトグラフィで再生された映像のホログラムを得ることが出来る [16]。以上の処理は、インテグラルフォトグラフィ映像があれば、全て計算機内で行える [17]。

5.2 インテグラルフォトグラフィ映像の視域角拡大

インテグラルフォトグラフィ映像の視域角拡大は、以下の様にして行う。IP 映像の各画素位置は、図 14、又は図 15 に示した様に、光線の方向に対応するので、IP 撮影の際に、拡大した視域角に対応する光線までを各 IP 画像が撮影出来る様に、IP レンズのサイズ D と焦点距離 f を選ぶ。例えば、最大回折角 ϕ のホログラム表示デバイスを使って視域角を 3 倍に拡大したい場合は、

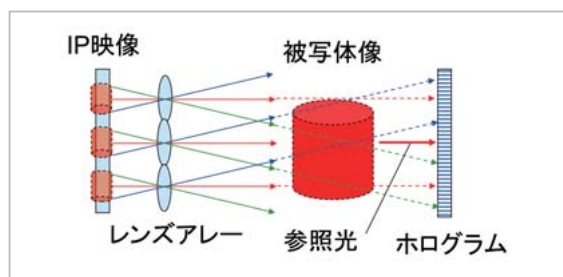


図 15 IP 映像のホログラム変換

図 16(a) に示す様に、

$$\tan(3\phi) = \frac{D/2}{f} \quad (19)$$

を満たすように IP レンズの直径 D と焦点距離 f を決める。この IP レンズで撮影された IP 画像は、図 16(b) に示す様に、レンズ中心 $1/3$ の領域 (図の赤部分) には、視域角 $\pm \phi$ の光線が撮影されており、周辺 $1/3$ の領域 (図の緑、又は青部分) には、視域角 $\phi \sim 3\phi$ の光線が撮影されている。

この様にして撮影された IP 画像の画素を、中心視域の画素と周辺視域の画素に分け、中心視域の画素から、インラインホログラムを作成し、周辺視域の画素からオフ軸ホログラムを作成して、図 12 の視域拡大光学系のホログラム表示デバイスに表示する。図 16 に示した様に、IP 画像は水平・垂直に等しい視域を持つが、ここでは視覚特性に重要な、水平視域のみを 3 倍に拡大する為、垂直方向の周辺視域画素は使わない。

5.3 再生実験

撮影に使われた IP カメラ [15]、及びホログラム表示に使用された液晶パネルの仕様を表 1、表 2 に示す。IP 撮影では、被写体の奥行き範囲が広い場合は、被写体とレンズアレーの間に凸レンズ (奥行き制御レンズ) を配置して、レンズアレー上に被写体の実像を形成し、この実像を IP レンズを通して撮影することもある。撮影された被写体像の奥行きは、レンズアレーの左側 5 mm (文字 “I”)、28 mm (文字 “P”) であり、像の高さは 37 mm である。

撮影された IP 画像のサイズは、表示する液晶パネルの約 5 倍 ($52 \mu\text{m}/10.4 \mu\text{m}$) あるので、IP 画像再生時に、 $1/5$ に縮小し、この時、再生光線

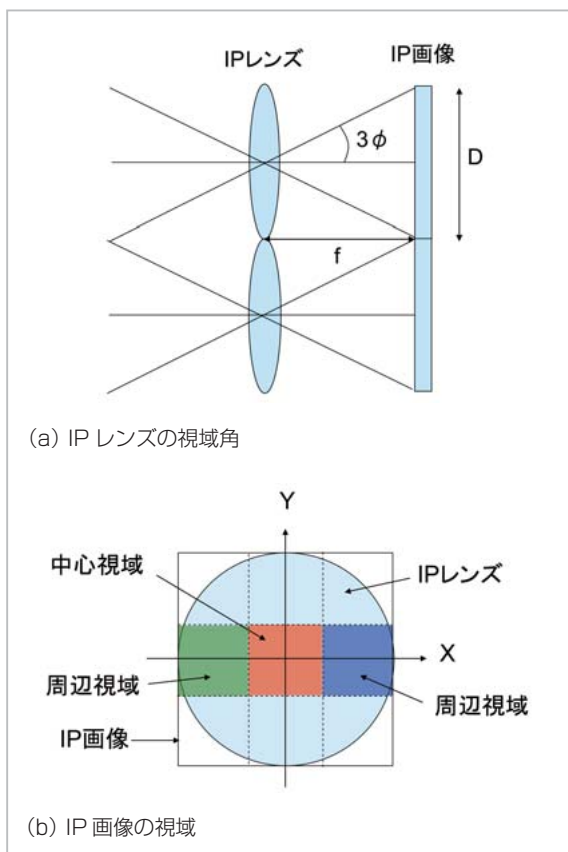


図 16 IP 画像の視域分割

IPレンズの焦点距離	2.65mm
IPレンズの数	54(H) × 63(V)
IP画像の画素数	21(H) × 21(V)
IP画像の画素間隔	52 μm

画面サイズ	対角0.7インチ
画素数	1400(H) × 1050(V)
画素間隔	10.4 μm

の広がり角度が、液晶パネルで表示可能な視域角 ($10.5^\circ = 3 \times 2 \sin^{-1}[632.8 \text{ nm} / (2 \times 10.4 \mu\text{m})]$) になる様に、再生用 IP レンズの焦点距離を 1.2 mm とした。このため、再生される立体映像の縦倍率 ($0.45 = 1.2 \text{ mm} / 2.65 \text{ mm}$) と横倍率 ($0.2 = 10.4 \mu\text{m} / 52 \mu\text{m}$) がずれ、やや奥行きが強調された映像が再生される。又、再生される光線



図 17 視域の左側から撮影したホログラム映像



図 18 視域の右側から撮影したホログラム映像

の間隔は、約 0.5° 間隔 ($10.5^\circ / 21$ 画素) となる。

図 17、図 18 に、再生された視域拡大電子ホログラフィの再生映像を示す。図 17 は、再生映像を左側から撮影したものであるが、文字“I”が左手前にある為に、文字間隔が狭まって見える。図 18 は、右側から撮影したもので、逆に文字間隔が広がって見える。

視点位置を変えると、それに応じて文字の見え方が変わり、空間像がそれぞれの奥行位置に結像されている事が確認された。視域角は実測で約 8° あり、視域拡大効果が確認された。再生像は、文字“I”の大きさが水平 3 mm、垂直 7.5 mm であり、結像位置は液晶パネルの後方 2 mm であった。文字“P”の大きさは、水平 5 mm、垂直 6 mm であり、結像位置は液晶パネルの後方 12 mm であった。再生映像の“I”と“P”の奥行差 (10 mm) は、IP 映像の奥行差 (23 mm) の約 0.43 倍であり、又サイズ比は $0.2 (= 7.5 \text{ mm} / 38 \text{ mm})$ であり、縦倍率、横倍率ともにほぼ正しく再現された。

以上より、視域角拡大手法の有効性が確認された。

6 むすび

超臨場感コミュニケーションを実現する有力な手段として、電子ホログラフィによる立体映像を検討している。電子ホログラフィは、光の振幅と位相の情報を再生出来るので、自然界で我々が実物体を見たときと同じ光の場を再現出来る。そのため、ホログラフィ映像は、立体視の手掛りである両眼視差、輻輳、焦点調節、運動視差、画像要因の全てを持ち、自然で疲れない立体映像を提供可能である。しかしながら、現在入手可能なホログラフィ表示デバイスの解像度が不十分である為、視域が狭い、不要光が再生光に重なるなどの問題があった。本節で報告した視域角拡大技術を用いれば、広い視域が得られると共に、不要光も除去され、高品質な電子ホログラフィ映像が得られる。

参考文献

- 1 榎並和雅, 奥井誠人, 井ノ上直己, "NICTにおける超臨場感コミュニケーションの研究戦略," 第228回研究会講演予稿, 画電学会 06-03 (映情学会 Vol. 30, No.58) (信学会 Vol. 106, No. 338) (電気学会 EDD-06-75~85), pp. 1-6, 2006年11月.
- 2 本田捷夫, "高度立体動画像通信プロジェクト最終成果報告書," 通信・放送機構, 1997年9月.
- 3 増田千尋, "3次元ディスプレイ," 産業図書, 1990年5月.
- 4 D. Gabor, "A New Microscopic Principle," Nature, 161, pp. 777-778, 1948.
- 5 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. SPIE1212, pp. 174-182, 1990.
- 6 N. Hashimoto, S. Morokawa, and K. Kitamura, "Real-time Holography Using the High-resolution LCTV-SLM," Proc. SPIE, 1461, pp. 291-302, 1991.
- 7 Y. Flauel, T. J. Naughton, O. Matoba, E. Tajahuerce, and B. Javidi, "Three-Dimensional Imaging and Processing Using Computational Holographic Imaging," Proc. IEEE, Vol. 94, No. 3, pp. 636-653, Mar. 2006.
- 8 KK. Maeno, N. Fukaya, and O. Nishikawa, "Electro-holographic Display Using 15 Mega Pixels LCD," Proc. SPIE, Vol. 2652, pp. 15-23, 1996.
- 9 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-ホログラム変換を用いた実写入力電子ホログラフィ," 映情学誌, Vol. 62, No. 10, pp. 1565-1572, 2008.
- 10 T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, "Viewing-zone enlargement method for sampled hologram that uses high-order diffraction," Applied Optics, Vol. 41, No. 8, pp. 1489-1499, 2002.
- 11 O. Bryngdahl and A. Lohmann, "Single-sideband holography," J. Opt. Soc. Am, Vol. 58, pp. 620-624, 1968.
- 12 竹森民樹, "液晶パネルを用いた3次元表示—高速計算法—," 映情学技法, Vol. 21, No. 46, AIT, pp. 13-19, 1997.

実験では、実写映像の電子ホログラフィ再生が可能な、インテグラルフォトグラフィを電子ホログラフィに変換する方式を用いたが、この方式を用いる事により、実時間動画映像の伝送と電子ホログラフィ再生も可能となり、超臨場感コミュニケーションの実現に一歩近づける。

今後は更に、高解像度・広視域のフルカラー電子ホログラフィ映像の実現が期待される。

謝辞

本実験で用いた被写体のインテグラルフォトグラフィ映像は、インテグラルフォトグラフィ-ホログラム変換に関するNHK放送技術研究所との共同研究により、NHK放送技術研究所から提供を受けたものです。ここに関係された方々に深く感謝致します。

- 13 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," Applied Optics, Vol. 38, No. 17, pp. 3703–3713, 1999.
- 14 M. G. Lippmann, "La Photographie Integrals," Compt. Rend, Vol. 146, pp. 446–451, 1908.
- 15 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.
- 16 R. V. Pole, "3D Imagery and Holograms of Object Illuminated in White Light," Appl. Phys. Letter, Vol. 10, No. 1, pp. 20–22, 1967.
- 17 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," 映情学誌, Vol. 61, No. 2, pp. 198–203, 2007.



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



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



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



おおいりょうたろう
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



くりたたいちろう
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