

3-2 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

3-2 Hologram Generation Technique Using Integral Photography Method

大井隆太郎 妹尾孝憲 山本健詞 栗田泰市郎

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

要旨

実写空間を対象としたホログラムの作成を行う際には、基本的に被写体にコヒーレント光を照射して反射してくる光と参照光との干渉を記録しなければならない。しかしこの方法では、暗室内における撮影が必須となるなど、超臨場感通信に用いる事を考えた場合には制約が多い。一方で光学的なホログラムの分野では、1度目の露光で被写体を多数のレンズを通して撮影したインテグラル画像を撮影し、2度目の露光で先のインテグラル画像からホログラムを作成するホロコーダホログラム法が既に知られている。電子的なホログラムの生成においても、この2段階の撮影を用いることにより自然光下で撮影された被写体の電子データとしてのホログラム作成が可能になり、ホログラム撮影の適用範囲が広がる事が期待される。筆者らはホロコーダホログラムの電子化において、ホログラム作成位置をインテグラルレンズアレイの後側焦点面に配置することにより、1度のフーリエ変換によりインテグラル画像に記録された立体画像情報をホログラム面における物体光の複素振幅分布に変換する方法を提案した。この方法を用いる事によって、インテグラル画像を構成する全ての要素画像をそれぞれ独立に変換処理することが可能になり、多数のレンズを擁する高解像度のインテグラル画像においても、並列計算による高速な変換が可能となる。実験では、コンピュータグラフィックスにより作成された4096×2048画素のインテグラル画像を入力とし、提案法を用いて生成したホログラムから、被写体の3次元像の再生が可能であることを確認したので、その詳細について紹介する。

Basically, it is necessary to capture the interference pattern of the coherent reference-beam and the coherent object-beam that refracts from objects in order to capture a hologram of the real-scene. However, there are many restrictions in that method when applying for an ultra-realistic communications. For instance, recording a hologram in the darkroom becomes indispensable.

In the field of optical hologram generations, a Holocorder-hologram was already known. According to the method, the first exposure takes an integral image of objects through a number of lenses. Then the second exposure records a hologram from the previously recorded integral image. If that 2-step hologram recording method was applied for an electronic hologram generation, a real-scene electrical hologram recording under the natural lighting environment would be possible. And as a result, holography is expected to be used in the real-scene communications.

Authors proposed a method of converting the integral image to the complex amplitude of object-beam on the hologram plane using numerical Fourier transform. The hologram plane should be arranged on the back-focal-plane of the integral lenses in the computerization of the Holocorder-hologram. In our method, each elemental image of the integral photography is converted into each elemental hologram, independently. Thus, a faster transform by a parallel computation becomes possible even in a high-resolution integral image that has many elemental lenses.

In the experiment, we generated a hologram of 4096×2048 pixels using proposal method from the same resolution of integral image. The integral image was also computer-generated.

By a numerical reconstruction of the hologram, it was confirmed that the 3-D objects was reconstructed correctly. In this paper we introduce the detailed conversion method.

[キーワード]

ホログラム, インテグラルフォトグラフィ, 計算機合成ホログラム, 実写, リアルタイム
Hologram, Integral photography, Computer generated hologram, Real scene, Real-time

1 はじめに

ホログラフィ技術は、物体から発せられた光の波面を正確に記録再生することが可能であり、人間が立体感を知覚する両眼視差、運動視差、調節など全ての手がかりを満足する表示方法である[1]。このため立体映像の記録再生方法として理想的であると言われている。しかしながら、ホログラムには波長程度の細かさを持つ干渉縞を記録・再生する必要があり、その困難さから、現状では写真フィルムや電子線描画された特殊な金属箔を用いる限られた分野において実用化されているにすぎない。実写ホログラムの記録・伝送・再生の全ての過程を電子的かつ容易に行うことができるようになれば、超臨場感通信分野に大きな進歩をもたらすことができるものと期待されている。本論文ではこのうち、特に実写ホログラムを電子的に記録する技術について提案する。多数の凸レンズで構成されるレンズ板を通して被写体を撮影するインテグラルフォトグラフィによって、水平・垂直視差を含む被写体の3次元情報を記録することができる事が知られている[2]。このインテグラル撮影法によって得たデータに対して、適切な初期位相を付加してから要素ごとに独立にフーリエ変換を施すことによりホログラム面における物体光の複素振幅を得て、ホログラム(干渉縞パターン)を電子データとして生成することが可能であることを確認したので[3]、その方法について述べる。

2 被写体像の3次元的な記録方法

2.1 ホログラムによる記録

実写ホログラムの生成は、それが写真技術であるのか、CCD/CMOSなど電子的なイメージセンサを用いる技術であるのかに関わらず、撮影時に

被写体から反射したコヒーレント光と参照光の干渉縞を撮影する必要がある。このためにホログラムの撮影は、振動が極めて少なくかつ暗室である特殊な環境においてなされる必要があった。

一方で被写体の構造が既知なコンピュータグラフィックス(CG)を原画とする際には、計算機内において、CG物体から反射してきたコヒーレントな物体光を作成し、同じく計算により得られる参照光との複素和を算出することで任意のホログラムを生成することが可能である。この方法は計算機合成ホログラム Computer Generated Hologram (CGH)として既に知られており[4]、仮に実写物体およびシーンの完全な構造モデルとテクスチャがリアルタイムかつ容易に得られるならば、CGHの手法によるホログラム生成が可能である。しかしながら、ホログラムに適用可能なレベルの詳細かつ忠実な実写構造モデル・テクスチャを得るということは、現状では非常に困難である。

他方、被写体をきわめて多数の視点位置から撮影することにより水平視差、垂直視差、および被写体/シーンを構成する物点の結像を含む3次元情報を得ることができていることが知られており、インテグラルフォトグラフィと呼ばれている[2]。さらに、この多視点撮影された画像を原画として用いることで、被写体のホログラムを光学的に得るホロコダホログラムが過去に光学技術として提案された[5]。この方法では、静止したインテグラル画像とホログラム記録面を用いることで、自然光下で撮影された実写静止画のホログラムを作成することができる。しかし、ホログラムの作成時に非常に精度の良い多数のレンズを含む光学系が必要としたことから、実用化には至らなかった。また、電子メディアとして応用する際には、やはり暗室内における露光が必要であることから、その適用範囲に限界があった。

2.2 インテグラルフォトグラフィによる記録

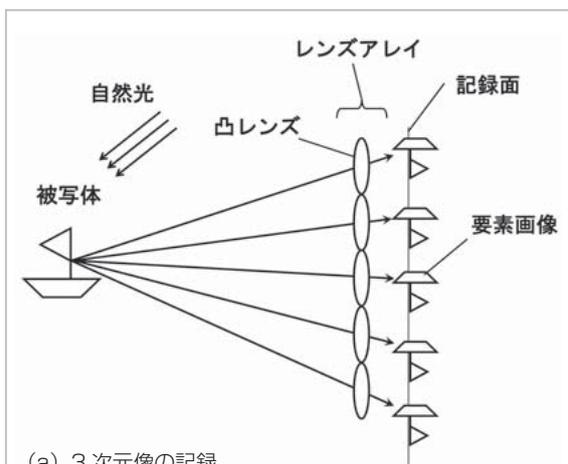
インテグラルフォトグラフィ自体も被写体像の3次元的な記録再生を行うための方法の1つである。これは光線再生型の3次元記録技術であり、通常のテレビジョンの撮影と同様に自然光(インコヒーレントな光)を被写体に照射した状態で撮影を行う。

屋外での撮影においては太陽光の影響があるために、インコヒーレント光による撮影は必須条件である。図1にインテグラルフォトグラフィによる立体映像の記録と再生の原理を示す。撮影時には図1(a)に示すように被写体を多数の凸レンズ(要素レンズ)で構成されるレンズアレイを通して記録する。この時、記録面には被写体を異なる角度から観測した微小な像(要素画像)が多数記録される。記録面は各レンズの焦点距離の位置に配置することで、要素画像を構成する画素は対応する

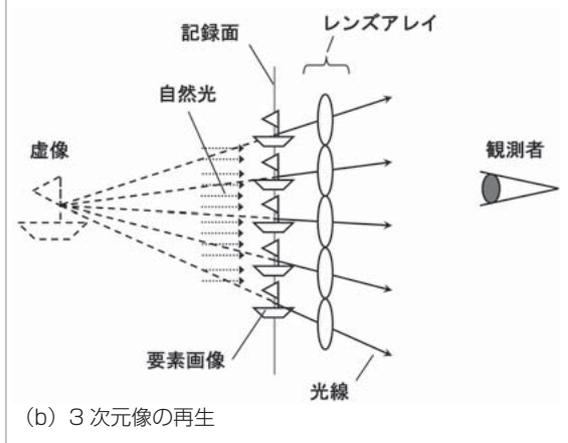
要素レンズを通った平行光線の方向に対応することになる。同様に、被写体表面の1点から発せられた光はレンズアレイを構成する要素レンズの数と同数でサンプリングされる。つまり要素レンズの数が記録される光線数に対応する事が分かる。

次に図1(b)に示すように記録時の要素画像を反転した後に、撮影時に被写体が存在した方向から同じく自然光(インコヒーレント光)で照明する。この時、撮影時と同一の配列のレンズアレイを通すと要素画像から出た光がレンズアレイによって屈折し、記録時の被写体から出た光線と等価な光線が再生されてくる。

インテグラルフォトグラフィでは水平垂直視差と、被写体の結像位置を再現することが可能であるが、再生される光線の幅はレンズアレイを構成する凸レンズの径を下回ることは出来ない。そのため、再生される被写体像はレンズアレイを構成しているレンズの直径程度のボケを持ったものとなる[6]。



(a) 3次元像の記録



(b) 3次元像の再生

図1 インテグラルフォトグラフィによる記録と再生

3 インテグラルフォトグラフィを用いたホログラムの生成

3.1 インテグラルフォトグラフィからの変換

インテグラル撮影された記録面からホログラムを作成する際には、まず図2に示すようにコヒーレント光を用いて記録面を照明することで、コヒーレントな物体光を再生する。さらに照明に用いたものと可干渉な参照光をホログラム面に照射すれば、ホログラム記録面にはコヒーレントな物

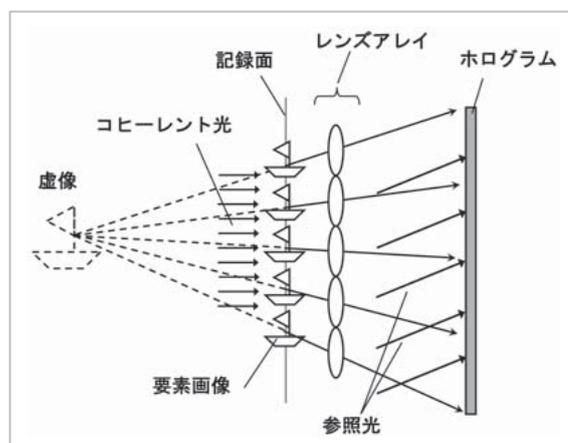


図2 ホロコダホログラムによる記録

体光と参照光との複素和の絶対値の2乗が振幅ホログラムとして記録される。このようにして記録されたホログラムからは、もとの被写体の3次元像を再生することができる[5]。

このプロセスを光学的に行うためには、位置精度の高いレンズアレイが必要となり、さらにコヒーレント光(レーザー)を用いたホログラムの露光プロセスが必要であった。ホログラムの生成プロセスを計算処理によって置き換えることで、露光のための暗室を必要とせずにホログラムを作ることが出来る[7]。

一般に、光学的なホログラムの作成過程をCGHに置き換える場合には、物体光の伝播をフレネルキルヒホッフ回折積分式のフレネル領域における近似によって追跡する方法が用いられる。

ここでは、図3に示すようなアパーチャとスクリーンを仮定して、複素振幅 $\Psi(x, y)$ を持つ波が開口を通過して距離 z だけ離れた位置のスクリーンを照明する際、スクリーン上に作られる複素振幅分布 $\Psi'(x', y')$ は次の式で表わされる。

$$\Psi'(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot \Psi(x, y) \cdot \frac{1}{j\lambda r} \cdot e^{-jkr} dx dy \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z^2} \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

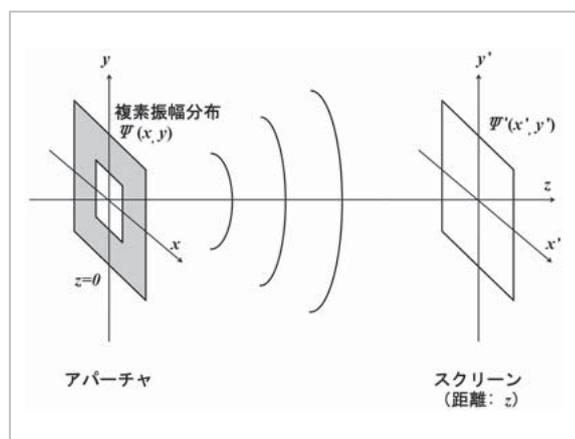


図3 フレネル領域における光の回折と伝播

ここで、開口関数 $f(x', y')$ は開口部を1、遮蔽部を0とした関数、 λ は光源の波長である。 r を z について1次の項まで展開すると次式になる。

$$r \approx z + \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2z} \quad (4)$$

さらに、3次の項が波長に対して十分に小さく

$$\lambda \gg \frac{\{(x' - x)^2 + (y' - y)^2\}^2}{8z^3} \quad (5)$$

であるときに式(4)の近似が成立して次式が得られる。

$$u(x', y') = \frac{1}{j\lambda z} e^{-jkz} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \cdot e^{-jk \frac{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}{2z}} dx dy \quad (6)$$

ここで $g(x, y)$ は開口部における複素振幅分布(被変換データ)である。また、 $u(x', y')$ はスクリーン上に作られる複素振幅分布(変換データ)である。

インテグラルフォトグラフィを用いたホログラムの作成過程を図4に示す。はじめに、要素画像が $g_0(x_0, y_0)$ なる複素振幅を持つとすると、これがレンズアレイの焦点距離 f だけ伝播して凸レンズの入射面に形成する $g_1(x_1, y_1)$ の光分布を求める。これは式(6)を用いて

$$g_1(x_1, y_1) = \frac{1}{j\lambda z} e^{-jkf} \iint_{-\infty}^{\infty} g_0(x_0, y_0) \cdot e^{-jk \frac{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}{2f}} dx_0 dy_0 \quad (7)$$

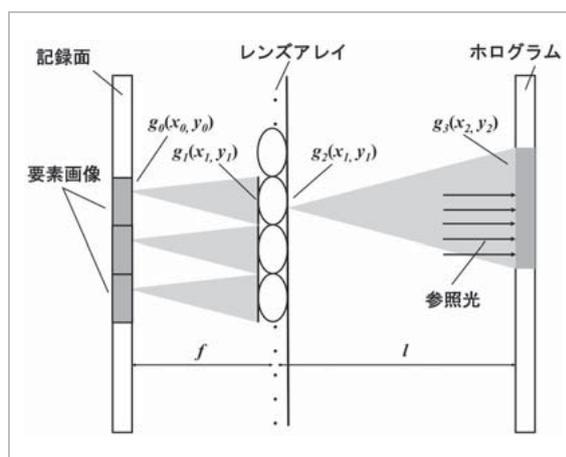


図4 インテグラル画像をもとにしたホログラムの生成

と表すことができる。つぎに、凸レンズの射出面に形成される光分布 $g_2(x_1, y_1)$ を求める。これは、レンズ入射面の光分布に対して振幅は変わらず位相のみが変化する

$$g_2(x_1, y_1) = g_1(x_1, y_1) \cdot e^{jk \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}} \quad (8)$$

となる。ここまでの計算は各要素画像について独立に求める事が可能である。さらにレンズアレイから距離 l だけ離れた位置に配置されたホログラム面の光分布 $g_3(x_2, y_2)$ を求める。これは再び式(6)を用いて

$$g_3(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda z} e^{-jkz} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} g_2(x_1, y_1) \cdot e^{-jk \frac{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2}{2l}} dx_1 dy_1 \quad (9)$$

となる。式(9)の計算は要素画像毎ではなく、必ずホログラム面全体に対して行う必要がある。

最後に式(9)により得られた複素振幅分布 $g_3(x_2, y_2)$ と参照光との和(複素和)の絶対値の2乗をとると、振幅ホログラムが得られる。

ここで、注目すべき点は、ホログラム位置とレンズアレイの距離 l は任意であり、ホログラム作成位置はレンズアレイの直後でも、レンズアレイから遠く離しても良いということである。

具体的な計算では式(7)および式(9)を最低でも2回計算する必要がある、このフレネル変換の計算量が支配的である。一方の凸レンズによる位相成分の変調である式(8)の計算量はそれと比較すると無視できるほど小さい。

さて、式(6)に示したフレネル変換を能率よく計算するためには、これをフーリエ変換の組合せに変形してからFFTを適用する解法[8]が知られている。ここでは、定数項 $\frac{1}{j\lambda z} \exp(-jkz)$ を無視してコンボリューション積分を用いて式(6)を書くと

$$u(x', y') = g(x, y) * p(x, y) \quad (10)$$

となる。ここで伝達関数 $p(x, y)$ は

$$p(x, y) = e^{-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}} \quad (11)$$

となる。 $u(x', y')$ 、 $g(x, y)$ 、 $p(x, y)$ のフーリエ変換をそれぞれ $U(\xi, \eta)$ 、 $G(\xi, \eta)$ 、 $P(\xi, \eta)$ とおけば

$$U(\xi, \eta) = G(\xi, \eta) \cdot P(\xi, \eta) \quad (12)$$

となる。従って、 $g(x, y)$ と $p(x, y)$ のフーリエ変換を求め、両者の積を逆フーリエ変換すれば $u(x', y')$ が得られる。伝達関数のフーリエ変換は解析的に求めることができ、

$$P(\xi, \eta) = e^{j\pi\lambda z(\xi^2 + \eta^2)} \quad (13)$$

であるから、フレネル変換である式(9)は実際には $g_2(x_1, y_1)$ のフーリエ変換と $P(\xi, \eta)$ を掛けたものにフーリエ逆変換を施す2回のFFTによって計算できる。この計算方法では変換データ $g_3(x_2, y_2)$ は被変換データ $g_2(x_1, y_1)$ と同一のサンプリング間隔と開口幅に得られる。

インテグラルフォトグラフィを用いたホログラムの生成過程では、図4におけるレンズアレイの射出面からホログラム面までの物体光伝播の計算において、ホログラム面と同じサイズのフレネル変換を用いなければならない、仮にFFTを用いた高速な演算を用いたとしても、結局その計算には多くの時間がかかる。

3.2 並列計算が容易な変換方法

インテグラルフォトグラフィを用いたホログラムの作成過程において、ホログラム作成位置が特別な位置である場合には、画質を損なうことなく変換をより効率良く行うことが可能である。図5に示すように、単一の要素画像のみがホログラム

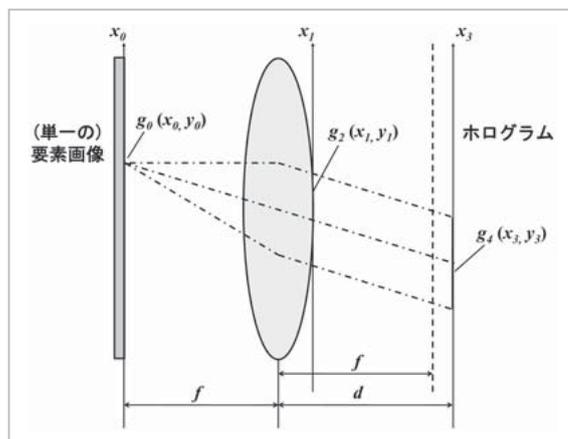


図5 レンズの後側焦点面前後における光分布

面に形成する複素振幅分布を $g_4(x_3, y_3)$ とする。さらに、ホログラム面がレンズ射出端から距離 d だけ離れた後側焦点面の近傍にあるとし、位相項を次式で定義される関数 h を用いて

$$h(x, y; d) \equiv e^{-jk \frac{x^2 + y^2}{2d}} \quad (14)$$

と表記すると、ホログラム面にレンズ直後の複素振幅分布が作る光場は式 (6) を変形して次のように書ける。

$$g_4(x_3, y_3) = \frac{e^{-jk d}}{j\lambda d} \cdot h(x_3, y_3; d) \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} g_2(x_1, y_1) \cdot h(x_1, y_1; d) \cdot e^{jk \frac{x_1^2 + y_1^2}{d}} dx_1 dy_1 \quad (15)$$

さらに、要素画像からレンズ入射端までのフレネル変換および、レンズによる位相変調をあらわす式 (7)、(8) を代入すると、単一の要素画像がホログラム面に作る光場は次のように書ける。

$$g_4(x_3, y_3) = \frac{e^{-jk(f+d)}}{\lambda^2 f d} \cdot h(x_3, y_3; d) \times \iint_{-\infty}^{\infty} g_0(x_0, y_0) \cdot h(x_0, y_0; f) \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_1, y_1; d) \cdot e^{j2\pi \left[x_1 \left(\frac{x_0 + x_3}{\lambda f} + \frac{y_0 + y_3}{\lambda d} \right) + y_1 \left(\frac{y_0 + y_3}{\lambda f} + \frac{y_0 + y_3}{\lambda d} \right) \right]} dx_1 dy_1 dx_0 dy_0 \quad (16)$$

ここで $h(x_1, y_1; d)$ のフーリエ変換は式 (13) の関係から

$$\exp \left\{ j\pi \lambda d \left[\left(\frac{x_0}{\lambda f} + \frac{x_3}{\lambda d} \right)^2 + \left(\frac{y_0}{\lambda f} + \frac{y_3}{\lambda d} \right)^2 \right] \right\} = h \left(\left(\frac{x_0}{\lambda f} + \frac{x_3}{\lambda d} \right) \left(\frac{y_0}{\lambda f} + \frac{y_3}{\lambda d} \right) \right) \cdot \frac{-1}{\lambda^2 d} \quad (17)$$

となるので、式 (17) を式 (16) へ代入して定数項を省略すると

$$g_4(x_3, y_3) = h(x_3, y_3; d) \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} g_0(x_0, y_0) \cdot h(x_0, y_0; f) \cdot h \left(\left(\frac{x_0}{\lambda f} + \frac{x_3}{\lambda d} \right) \left(\frac{y_0}{\lambda f} + \frac{y_3}{\lambda d} \right) \right) \cdot \frac{-1}{\lambda^2 d} dx_0 dy_0 \quad (18)$$

となる。さらに $(x_3^2 + y_3^2)$ を含む項は打ち消し合うので

$$g_4(x_3, y_3) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_0(x_0, y_0) \cdot e^{-j \frac{k}{2f} (x_0^2 + y_0^2) \left(1 - \frac{d}{f} \right)} \cdot e^{jk \frac{x_0 x_3 + y_0 y_3}{f}} dx_0 dy_0 \quad (19)$$

を得る。ここで、式 (19) はホログラム面が焦点面上に有る $d=f$ の時に、積分内の $(x_0^2 + y_0^2)$ を含む項も消去できて、要素画像の配置された前側焦点面における光分布の位相項までを含めた完全なフーリエ変換 [9] が後側焦点面に形成される。この複素振幅分布が即ち求めたい物体光であるため、ホログラム面を後側焦点面とした場合には凸レンズ前後の光伝播を式 (7)、(8)、(9) にもとづい

て演算する代わりに、要素画像の複素振幅を要素毎にフーリエ変換することでホログラム面の複素振幅を直接求めることができる。

図 6 に提案するホログラムの生成方法を示す。レンズアレイは焦点距離 f の凸レンズにより構成されるものとする、図 6 の方法を用いる場合のホログラム面の光分布 $g_4(x_3, y_3)$ は式 (19) を用いて結局、次式によって得ることができると分かる。

$$g_4(x_3, y_3) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x_0, y_0) \cdot e^{j2\pi \frac{x_0 x_3 + y_0 y_3}{\lambda f}} dx_0 dy_0 \quad (20)$$

最後に得られた光分布 $g_4(x_3, y_3)$ と参照光との和 (複素和) の絶対値の 2 乗をとることで、振幅ホログラムが得られる。

式 (20) において、フーリエ変換として FFT 演算を用いることができ、レンズアレイから距離 l だけ離れた任意の位置でホログラムを作成する場合と比較して、より効率よく演算を行うことができる。また、その際にホログラム面上に形成される光分布 $g_4(x_3, y_3)$ を、もともになる要素画像 $g_0(x_0, y_0)$ と同一のサンプリング間隔および開口幅の上に得れば、ホログラム面上に要素画像が作る物体光は互いに重なることはなく、かつホログラム全体を隙間無く敷き詰める状態となって現れる。つまり、ホログラム面上の物体光の演算は、要素画像ごとに完全に独立して行うことが可能になり、分散メモリ型の計算機上での並列計算が可能であることを示している。並列演算を行う際には最大で要素画像の数 (レンズ数と等しい) まで演算単位を分割することができるので実装上の高速化

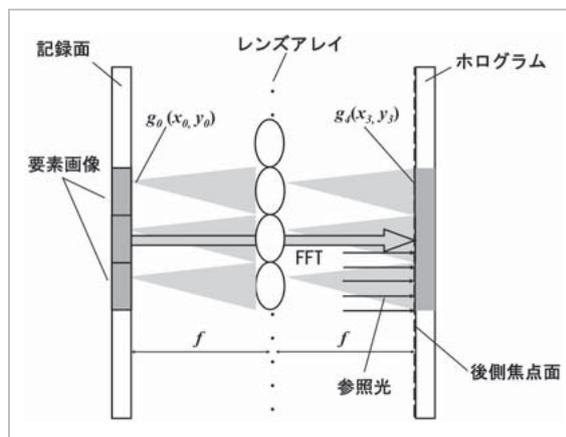


図 6 並列計算が容易なホログラムの生成方法

が期待できる。

なお、ホログラム作成位置をインテグラルレンズの後側焦点面に限定しても、インテグラル撮影された要素画像とホログラムの両者の位置関係が固定されるにすぎない。通常のインテグラル撮影では被写体をレンズアレイからある程度離れた任意の位置に配置して撮影を行うため、上記の変換方法によって生成されたホログラムから再構成される被写体像も当然にホログラム面から離れた任意の位置に3次元的に結像させることが可能である。つまり立体映像の記録と再生の機能としてみた場合には、提案するホログラム生成方法によって特段に制約は生じない。

3.3 初期位相について

インテグラルフォトグラフィ技術を用いて撮影された要素画像には、光の振幅のみが記録されており、厳密な意味での位相情報は記録されていない。このため、変換式(20)における要素画像の複素振幅分布 $g_0(x_0, y_0)$ を得るためには、適切な初期位相を与える必要がある。CGHにおいては被写体表面がランバート反射モデルに従うと仮定してランダム位相^[10]を重畳することが良く行われており、インテグラル撮影された要素画像の初期位相も同様にランダム位相を初期位相とした。従って、要素画像表面における物体光の複素振幅分布 $g_0(x_0, y_0)$ はインテグラル撮影された要素画像の輝度分布 $A(x_0, y_0)$ を用いて次のように表される。

$$g_0(x_0, y_0) = A(x_0, y_0) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot \text{rnd}(x_0, y_0)} \quad (21)$$

ただし、式(21)において $\text{rnd}(x_0, y_0)$ とは区間 $[0, 1)$ 上の一様乱数である。

3.4 カラー立体像への対応

以上の議論では単一波長 λ のコヒーレント光を用いた場合について述べてきた。ホログラフィ技術では被写体の立体像を1つの波長のみで記録することが基本である。しかし、テレビジョン放送と同様に赤、緑、青3色のコヒーレント光を用いてホログラムを記録し、再生時にも同一波長のコヒーレント光で照明することで、カラーのホログラフィ立体像を再構成することができる。

インテグラル撮影された原画から、提案方法に

よってホログラムを生成する場合においても全く同様である。インテグラル撮影時のカラーカメラにおけるRGBの各色フィルタの中心波長付近のコヒーレント光を用いて、3原色に対応するホログラムに変換することで、カラーホログラムの作成が可能である。

4 離散化にともなう要素画像の最適な設計

インテグラル撮影された原画からホログラムを生成する際に、FFTなどの離散的な数値計算を使用する場合、実装上はインテグラルレンズの焦点距離および要素画像のサンプル点数など種々の設計値を決定する必要がある。

一般的に用いられる離散フーリエ変換(DFT: Discrete Fourier Transform)のアルゴリズムによれば、被変換関数を $g(m, n)$ とし、フーリエ変換面 $j-k$ でのフーリエスペクトルを $G(j, k)$ とすると両者の関係は次式で表される。

$$G(j, k) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g(m, n) \cdot e^{j2\pi \left(\frac{jm}{M} - \frac{kn}{N} \right)} \quad (22)$$

一方で、インテグラル撮影された要素画像からホログラム面上における光分布を求める式(20)を、有限の開口で離散的にサンプルされたデータとしてフーリエ変換するために、水平および垂直のサンプル点数をそれぞれ M 個、 N 個、サンプリング間隔を Δp として書き直すと次式になる。

$$g_4(x_4 \Delta p, y_4 \Delta p) = \sum_{x_4=1}^M \sum_{y_4=1}^N g_0(x_4 \Delta p, y_4 \Delta p) \cdot e^{j2\pi \frac{x_4 x_4 + y_4 y_4}{\lambda f} \Delta p^2} \quad (23)$$

ここで、要素画像とこの要素画像から計算される要素ホログラムの大きさ(開口)およびサンプリング間隔が等しく、要素ホログラムは互いに重ならず、かつホログラムを隙間無く敷き詰めることを条件とすると、式(22)および式(23)の位相項の比較から次の関係式が導かれる。

$$M \cdot \Delta p^2 = \lambda \cdot f \quad (24)$$

$$N \cdot \Delta p^2 = \lambda \cdot f \quad (25)$$

このことから、インテグラルフォトグラフィで記録された原画からホログラムを生成する過程の計算

上のレンズ焦点距離 f は、原画のサンプリング間隔 Δp 、計算波長 λ およびサンプリング点数 M または N によって決まることが分かる。

以降は簡単のため、水平と垂直のサンプリング間隔は等しく $M=N$ であり、開口幅も等しく $N\Delta p$ の矩形であるとして、話を進める。

式 (20) として FFT を用いてホログラム面上の物体光の複素振幅分布を求めることを考えた場合、 N を 2 のべき乗に選ぶことで効率よく変換を行うことができる。一例としてインテグラル画像からホログラムを生成する時のパラメータとして、表 1 に示す値を用いた場合、計算上のインテグラルレンズの焦点距離 f は式 (25) の関係から 0.582 mm であると分かる。

インテグラルフォトグラフィにおいては、撮影時のレンズ口径と再生時のレンズ口径の比が再生される像の横倍率(像高の倍率)となり、かつ撮影時のレンズ焦点距離と再生時の焦点距離の比が再生時の縦倍率(奥行きの倍率)となることが知られている。従って、仮に図 7 に示すようにインテグラル撮影時の要素レンズの焦点距離が 12 mm であったとすれば、撮影時のレンズピッチ(口径)として 1.583 mm が最適設計値となり、この時のホログラム再生像は立体像として無歪みになる。ま

た、この場合にインテグラル撮影によって被写体を見込む視角度は約 7.54 度である。

5 計算機シミュレーションによるホログラムの生成と再生

計算機シミュレーションにより、インテグラル撮影された原画から提案法に基づいてホログラムを生成し、さらに再生する実験を行った。

5.1 インテグラル画像の準備

ここでは原画の準備として、図 8 に示した配置図のように 2 層の奥行きを持つ被写体を模した CG から、計算によって水平 4096 画素×垂直 2048 画素のインテグラル画像を作成した。表 2 にインテグラル画像の作成の際に使用したパラメータを示す。ここでは、レンズの焦点距離、開口ともに表 1 の設定値のそれぞれ 10 倍となるように選んだ。また、図 9 に作成した原画を示す。原画には要素レンズの配列構造が現れていることが分かる。また、被写体の距離に応じて、要素画像中に現れる被写体像が変化している様子が見られる。

表 1 ホログラム生成時の設定例

サンプリング間隔: Δp	4.8 μm
水平垂直サンプリング点数: N	16
計算波長: λ (He-Ne 赤)	633 nm
レンズ口径: $N\Delta p$	0.0768 mm
計算上のレンズ焦点距離: f	0.582 mm

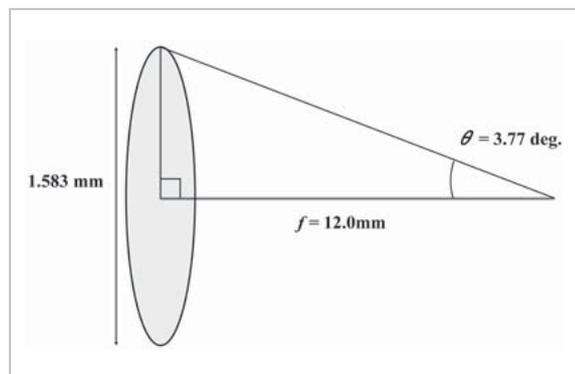


図 7 インテグラル撮影における要素レンズの設計例

表 2 インテグラル画像記録時のパラメータ

レンズの焦点距離: f	5.82 mm
レンズの開口径: D	0.768 mm
要素画像サイズ: N	水平 16 × 垂直 16
要素画像の個数	水平 256 × 垂直 128
総画素数	水平 4096 画素 × 垂直 2048 画素

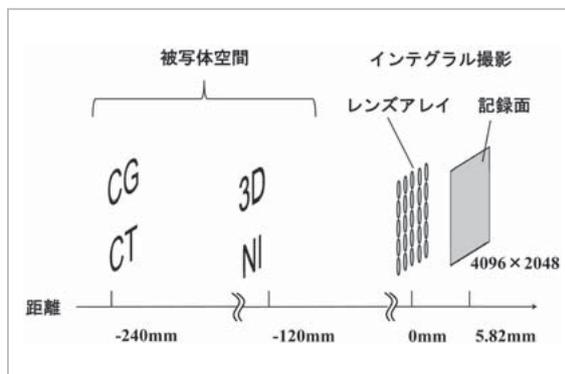


図 8 インテグラル画像記録時における被写体の配置図



図9 実験で使用したインテグラル画像(4096 × 2048 画素)

表3 ホログラム生成時のパラメータ

ホログラム総画素数	水平 4096 画素 × 垂直 2048 画素
画素ピッチ: Δp	4.8 μm (水平・垂直)
要素ホログラムサイズ	水平 16 × 垂直 16
波長: λ	633 nm (He-Ne 赤)
レンズ焦点距離: f	0.582 mm (計算値)
参照光	平行光 (インライン)

5.2 ホログラムの生成

次に図 10 に示したアルゴリズムに従い、ホログラムデータへの変換を行った。まず、16×16 画素を単位として構成される要素画像に対して 0 ~ 2 π のランダムな位相を付加し、次に直流成分を画像中央とする 2 次元 FFT を施した。得られたデータはホログラム記録面における物体光の複素振幅分布であり、これらは要素画像独立に求めた。さらに、得られた物体光と参照光の干渉縞を計算した。ここで、参照光は、ホログラムに垂直な方向から入射すると仮定した。角度 θ で入射するオフ軸ホログラムにおける計算上の参照光 $R_{(y)}$ は次式で与えることができる。ここで、 k は波数 ($k=2\pi/\lambda$) である。

$$R_{(y)} = |R| \cdot e^{jk \cdot \sin \theta \cdot y} \quad (26)$$

ホログラムに垂直に入射する光では式 (26) に $\theta = 0$ を代入して得られる全画面で一定振幅の参照光となり、結局のところホログラムは物体光の実部のみを取り出したものと変わらない。表 3 にホログラム生成時に使用した設定値を示す。また、図 11 に得られたホログラムを示す。

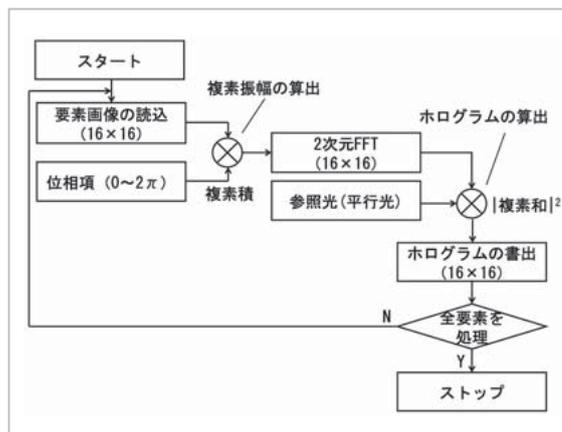


図10 インテグラル画像からホログラムを生成する処理

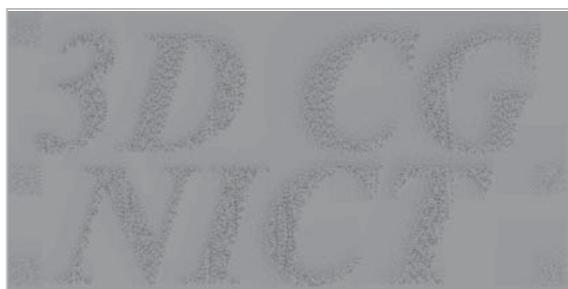


図11 生成されたホログラムパターン (直流 = 127)

5.3 ホログラムの再生

以上の方法で得られたホログラムを、計算機再生によって再生して像を観測した。ここでは、ホログラム記録面から距離 $-z$ だけ離れた平面上における結像の様子を再現している。図 12 にホログラム面から 2 つの異なる距離において再生されたホログラム再生像を示す。図 12 (a) は、ホログラム面に近い距離における再生像を示している。図 8 において、インテグラル記録面に近い位置に配置された被写体がシャープに結像しているが、記録面から遠方に配置された被写体はボケて再生されている。逆に図 12 (b) では記録面から遠方に配置された被写体はシャープに結像しているが、記録面に近い距離に配置された被写体はボケて再生されている。これらの結果は被写体空間の 3 次元的な構成が、提案するホログラム生成法によって正しく維持されていることを示している。ここでは、ホログラム生成時のレンズ焦点距離および開口がインテグラル画像のそれぞれ 10 分の 1



(a) 距離 12.58 mm における再生像



(b) 距離 24.58 mm における再生像

図 12 ホログラムの再生像（ホログラム面から一定距離における結像の様子）

となっており、被写体までの距離が、倍率に伴って縮小されていることが分かる。図 8 に示した被写体と再生されたホログラム像の位置の比較から、被写体の縦倍率と横倍率の比も正しく保存されたことが確認できた。

6 まとめ

インテグラルフォトグラフィを用いた電子的なホログラムの生成方法について述べた。インテグラル撮影法によって得られたデータに対して、初期位相を付加してから要素ごとに独立にフーリエ変換を施すことによりホログラム面における物体光の複素振幅分布を得ることができ、結果的にホログラムを高速に生成することができる。

さらに、インテグラル画像からホログラムへの変換プロセスにおいて、高速フーリエ変換 (FFT) を用いるために最適なレンズアレイの焦点距離と要素画像のサンプリング間隔の関係について明らかにした。

実験では、CG 作成による 4096×2048 画素のインテグラル画像を用いて、提案法によるホログラムの生成および再生を行った。得られた再生像の観測結果から、被写体空間の奥行き関係を正しく再現した 3 次元像が得られることを確認した。

今後、実写ホログラムの記録・伝送・再生の全ての過程を電子的かつ容易に行うことができるようになれば、超臨場感通信分野に大きな進歩をもたらすことができるものと期待される。

参考文献

- 1 大井隆太郎, 奥井誠, "実写を入力としたフレネルホログラムの空間表示," 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 30, No. 43, pp. 3-6, 2006.
- 2 M. G. Lippmann, "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief," Journal of Physics, 4 serie, VII, pp. 821-825, 1908.
- 3 大井隆太郎, 三科智之, 奥井誠人, 野尻裕司, 岡野文, "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.
- 4 B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Computer generated binary holograms," IBM Journal of Research and Development, 13, pp. 160-167, 1969.
- 5 R. V. Pole, "3-D Imagery and holograms of objects illuminated in white light," Applied Physics Letter, 10, pp. 20-22, 1967.
- 6 J. Arai, H. Hoshino, M. Okui, and F. Okano, "Effects of Focusing on the Resolution Characteristics of Integral Photography," Journal of Optical Society of America, Vol. 20, No. 6, pp. 996-1004, 2003.
- 7 T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, "Generation of holograms using integral photography," in Three Dimensional TV Video and Display III, Proc. SPIE5599, pp. 114-122, 2004.
- 8 松尾優, 山根国義, "レーダホログラフィ," pp. 80-81, 電子通信学会, 1980.
- 9 山口一郎, "応用光学," pp. 189-201, 応用物理学会編, オーム社, 1998.
- 10 A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms generated by computer," Applied Optics, 6, 1739-1748, 1967.



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



まつの たかひこ
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



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



くりやま たいしろう
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