

ホログラムの情報量低減と奥行き表示

Information Reduction in Hologram and Display of Visual Depth

濱田 裕介 佐藤 邦弘 藤井健作 森本雅和
Yusuke Hamada Kunihiro Sato Kensaku Fuji Masakazu Morimoto

1. まえがき

ホログラフィは、人間が立体感を覚える要因をすべて満たす画像を再生できる理想的な3次元画像表示技術である。音響光学素子(AOM)を用いた動画ホログラフィの実験が1990年ごろにMITで初めて行われ¹、液晶パネル(LCD)による動画ホログラフィの実験がいくつかのグループによって報告されている^{2,4}。ところで、通常のホログラムは3次元画像の再生に必要な量をはるかに超える情報を含んでおり、実時間ホログラフィの実現のためにはホログラム情報量の大幅な低減が不可欠である。

現在までに情報量を低減するいくつかの方法が提案されている⁵⁻⁸。そのうちで、情報量の大幅な低減が可能なサンプリング法がホログラフィック・ディスプレイにとって特に有用であると見なされている。⁸この方法では、原画ホログラムのごく微小な領域をサンプリングして記録し、再生用の2次ホログラムは微小ホログラムを転写して作成する。この際、微小ホログラムを瞳より小さく取ると、転写の際に生じる2次ホログラムの不連続性のために再生画像の解像度が低下するという問題が生じる。また、微小ホログラムの転写によって3次元画像の奥行きが失われてしまう。

本論文では、このようなサンプリング法の問題点を解決するために、以下のようなフーリエ変換ホログラムを用いた新たな方法を提案する。まず、解像度の低下の問題に関しては、空間周波数帯の重ね合わせを行うことにより、解像度を保ったままで大幅に情報量を低減できることを示す。次に、奥行き情報が失われる問題に関しては、視野を分割することで3次元画像の奥行きを表示できることを示す。計算機ホログラムを用いた画像再生実験を行い、これらの方法の特徴と利点を明らかにする。

2. フーリエ変換ホログラムを用いた情報量低減

2.1 重ね合わせによる情報量低減

画像の周波数成分を記録するフーリエ変換ホログラムは、面上でホログラムを移動してもフーリエ変換面付近に再生される画像の位置が変化しないという特徴を持っている。サンプリング法では、この位置の不変性を利用してフーリエ変換ホログラムからサンプリングした微小ホログラムを転写して再生用の2次ホログラムを作成する。この場合、再生画像の解像度は転写した微小ホログラムの幅で決まり、転写の際に生じる2次ホログラムの不連続性が主な原因となって解像度の低下が生じる。

ところで、幅 NT の原画ホログラムを幅 T に分割し、分割されたすべてのホログラムを重ね合わせると、幅 T の微小ホログラムが得られる。このとき、原画ホログラムの画像情報は微小ホログラムの中に集積される。得られた微小ホログラムを転写することにより連続的で周期的な2次ホログラムを作成でき、サンプリング法で生じる不連続性による解像度の低下を避けることができる。

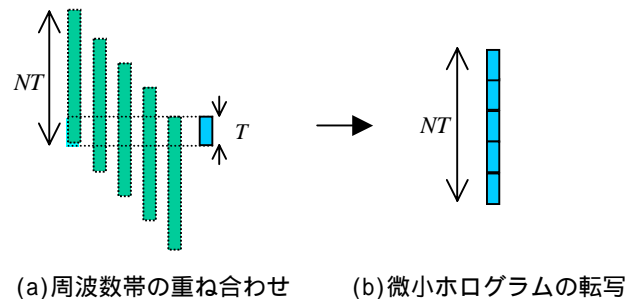


図1 重ね合わせ法による2次ホログラムの作成

重ね合わせ法における2次ホログラムの作成手順を、図1に示す。まず、図1(a)のように微小分割したフーリエ変換ホログラムを多数枚重ね合わせて幅 T のホログラムを得る。このとき、元のホログラムに対して微小ホログラムが持つ情報は $1/N^2$ に低減される。図1(b)のように得られた微小ホログラムを転写して連続的な2次ホログラムを作成する。

次に、作成した2次ホログラムから再生される画像の特徴について述べる。ホログラムから z_r だけはなれたフーリエ変換面上の座標 (x, y, z_r) にある点が放つ物体光強度を $I_o(x, y, z_r)$ とすると、2次ホログラムから再生される再生光強度 $I_r(x, y, z_r)$ は、

$$I_r(x, y, z_r) = I_o(x, y, z_r) \cdot W(x) \cdot W(y) \quad (1)$$

となる。ここに $W(x)$ は重み関数であり、

$$W(x) = \frac{\sin^2\left(\lambda \frac{x}{L} \cdot \frac{T}{2} \cdot N\right)}{\sin^2\left(\lambda \frac{x}{L} \cdot \frac{T}{2}\right)} \quad (2)$$

と表される。重ね合わせによる情報量低減の結果、2次ホログラムからはフーリエ変換面上で空間サンプリングされた物体像が再生される。

$N=5$ のときの関数 $W(x)$ の空間分布を図2に示す。このときの空間サンプリングの周期 T_s は、

$$T_s = \frac{z_r}{T} \cdot \lambda \quad (3)$$

となり、2次ホログラムの周期 T に反比例する。空間サンプリングされる点の広がり Δx は、

†兵庫県立大学 工学研究科

$$\delta = \frac{z_r}{NT} \cdot \lambda \quad (4)$$

となり，原画ホログラムの幅 NT に反比例する．再生される点像の広がり δ は，微小ホログラムではなくて原画ホログラムの幅から決まることになる．したがって，2次ホログラムからぼけの小さい輪郭のはっきりした画像が再生されることになる．

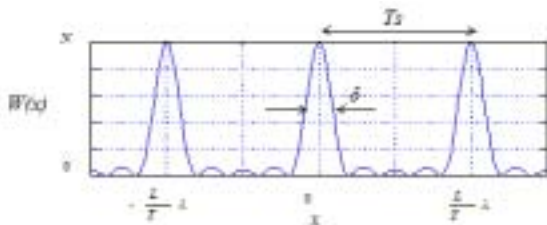


図2 重み関数 $W(x)$

2.2 視野分割による奥行き表示

2次ホログラム作成の際に，微小ホログラムの幅を瞳の幅以下にすると，奥行き情報が失われて変換面上に張り付いた平面画像が再生される．ところで，ホログラムは多重記録が可能であり，2枚以上のホログラムを重ねて，異なる画像を同時に再生することができる．記録する物体が存在する視野を分割し，各視野の物体を別々に記録する．それぞれのホログラムを重ね合わせて1枚のホログラムを作成すると視野全体にある物体を再生することができ，物体の奥行き表示が可能である．

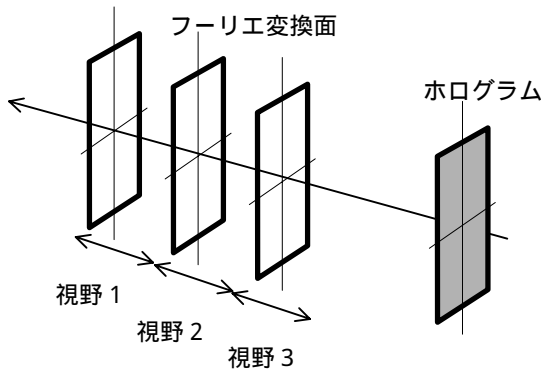


図3 視野とフーリエ変換面

再生用ホログラムの作成手順を以下で示す．図3に示すように，視野をホログラムと平行な面で分割し，各視野に対応するフーリエ変換面に記録する．それぞれのホログラムの情報量を低減し，重ね合わせて各2次ホログラムを作成する．2次ホログラム複数枚を重ね合わせて再生用3次ホログラムを作成する．このホログラムからは，変換面上の複数枚の画像からなる3次元画像が再生される．再生像は，もとの物体と同じ位置に再生され，両眼視差などをす

べて満足したものとなる．

ところで，記録する物体がフーリエ変換面から離れると，再生される像にぼけが生じる．ホログラム面からの物体の距離を z_o ，変換面の距離を z_r とすると，再生画像のぼけ δ_d は

$$\delta_d \cong \left| \frac{z_o - z_r}{z_r} \right| \cdot NT \quad (5)$$

となる．このぼけの大きさは，フーリエ変換面の枚数や，ホログラムの幅 NT を変えることによって調整できる．

3. 画像再生実験

原画ホログラムを数値計算で求め，これを用いて再生用のホログラムを作成した．計算した干渉縞データを PC から出力して駆動ボードを用いて画素間隔 $10.4 \mu\text{m}$ の反射型 LCD 表示パネルに表示した．再生用照明光には波長 $0.65 \mu\text{m}$ の半導体レーザーを用いた．

3.1 2次元画像の再生

まず，重ね合わせによる情報量低減に関する実験では，2次元物体モデルとして，「3D」の文字を点光源で構成し，ホログラム面から 100cm の位置に記録面と平行に配置した．このモデルに対して，計算した原画ホログラムと情報量を低減した2次ホログラムを用いて画像再生実験を行った．

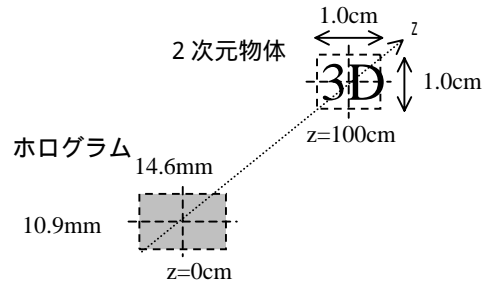
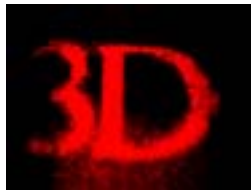


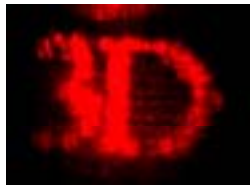
図4 2次元物体モデル

図5 (a)は原画ホログラムからの再生結果を示す．フーリエ変換面上に鮮明な画像が再生される．図5 (b)はサンプリング法により情報量を低減した2次ホログラムからの再生像であり，図5 (c)は重ね合わせ法によるものである．共に微小ホログラムの幅が 1mm であり，原画ホログラムと比べて $1/192$ に情報量が低減されている．重ね合わせ法ではサンプリング法と比較して，解像度の低下が小さく，画像のぼけが改善されたことが分かる．光強度のむらも小さく，輪郭のはっきりした像が再生されている．

図5 (d)と図5 (e)は微小ホログラムの幅を 0.5mm にしたときの結果であり，このときの情報量の低減比は $1/768$ になる．図5 (e)においては，空間サンプリングされた画像が再生されており，空間サンプリングの間隔は計算で求めた理論値によく一致する．仮に幅 6cm の原画ホログラムの場合を考えると，微小ホログラムの幅を 1mm に取ると情報量を $1/3600$ まで低減できることになる．



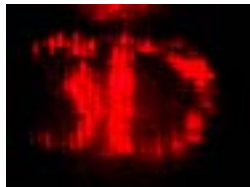
(a) 原画ホログラム
(10.9mm × 14.6mm)



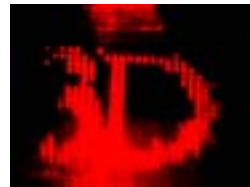
(b) サンプリング法
(周期 $T=1.0\text{mm}$)



(c) 重ね合わせ法
(周期 $T=1.0\text{mm}$)



(d) サンプリング法
(周期 $T=0.5\text{mm}$)



(e) 重ね合わせ法
(周期 $T=0.5\text{mm}$)

図5 再生2次元画像

3.2 3次元画像の再生

視野分割による奥行き表示の実験では、3次元物体モデルとして点光源で直方体を構成し、図6のようにホログラムと垂直に配置した。視野を10個に分割し、それぞれにフーリエ変換面を設け、10枚のホログラムを計算した。10枚のホログラムに対して情報量の低減を行い、10枚を重ね合わせて再生用ホログラムを作成した。

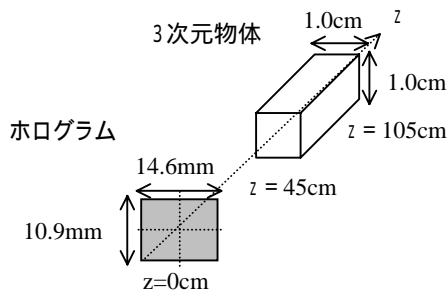


図6 3次元物体モデル

図7は、左右に視点を変えて撮影した3次元画像である。左右の視点の移動に対して連続的に画像が変化することが分かる。上下の視点の移動に対しても、左右の場合と同様に連続的な画像の変化を確認できた。この再生画像は焦点調節による体感も満足させ、原画ホログラムからの再生画像と同様に人間が感じるここのできる立体感をすべて満足させる。



(a)左 (b)中央 (c)右

図7 異なる視点から見た再生3次元画像

4. むすび

フーリエ変換ホログラムの重ね合わせを行って、解像度を保ったままで大幅に情報量を低減する方法を提案し、画像再生実験を行ってその特徴と利点を示した。重ね合わせ法では、サンプリング法に比べて再生画像を鮮明に保ちながら情報量を低減できる。また、再生画像の奥行きを表示するために、視野を分割して複数枚のホログラムに記録する方法を提案した。大幅に情報量を低減しても、この方法により3次元画像の奥行きを表示できることを示した。

両眼視可能な広いホログラムに対しては、再生画像の解像度を低下させずに1/1000程度かそれ以下に低減できると予測される。今後は実際の物体を記録したホログラムに適用してこのことを確かめる必要がある。また、情報量低減と2次ホログラムの作成を実時間で処理する方法を開発することが、今後の課題として残されている。

文献

1. P. St. Hilaire, S. A. Benton, and M. Lucente, "Synthetic aperture holography: a novel approach to three-dimensional displays", J. Opt. Am, vol,9,pp.1967-1977, 1992.
2. N. Hashimoto, K. Hoshino, and S. Morokawa, "Improved real-time holography system with LCDs", Proc. SPIE, vol,1667, pp. 2-7, 1992.
3. K. Sato, "Characteristics of kinoform by LCD and its application to display the animated color 3D image", Proc. SPIE, vol,2176, pp. 42-49, 1994.
4. 佐藤邦弘, "カラー電子ホログラフィ", 画像ラボ, vol.14, pp.52-55, 2003
5. K. A. Haines and D. B. Brumm, "Holographic Data Reduction", Appl. Optics, vol7, pp.1185-1189, 1968.
6. D. Fritzler and E. Marom, "Reduction of Bandwidth Required for High Resolution Hologram Transmission", Appl. Optics, vol,8, pp.1241-1243, 1969.
7. C. B. Burckhardt, "Information Reduction in Hologram for Visual Display", J. Opt. Am, vol,58, pp.241-246, 1968.
8. L. H. Lin, "A Method of Hologram Information Reduction by Spatial Frequency Sampling", Appl. Optics, vol,7, pp.545-548, 1968.