

ホログラフィによる仮想物体の3D表示の基礎研究

Fundamental research on 3D display of virtual object using holography

古賀 隼一†
Shun-ichi Koga

築地 浩‡
Hiroshi Tsukiji

徳島 尚生†
Hisao Tokushima

野口 義夫†
Yoshio Noguchi

1. まえがき

計算機合成ホログラム (以下 CGH) では、全て計算でホログラムを作製するため、画素間隔、画素数などを任意のパラメータとして与えることができ、仮想物体の CGH の作製が可能である。CGH は光学系で再生できることから、将来の理想的な 3D 表示ディスプレイとして期待され、多くの研究がなされている [1, 2]。しかし、光学系で再生する場合は、空間光変調素子等を使用する必要があり、その解像度や大きさ、またコストなどの面から、現時点では被写体が限定されるという問題もある。本論文では、仮想物体の CGH を作製し、光学系を用いることなく、計算機のみで任意の視点からの再生像を求め 3D 表示を行うための基礎研究を行っている。

2. フレネル CGH の作製

本論文では、物体を点光源の集合とみなして、フレネル CGH を作製している。1つの点光源からの物体光を球面波、参照光を平面波として CGH 面での光強度分布を計算すると、式 (1) となる。物体を構成する全ての点光源について、式 (1) の値を計算して加算することで、フレネル CGH が得られる [3, 4]。

$$I(x_0, y_0) = a_1^2 + \frac{a_2^2}{z_2^2} + \frac{2a_1 a_2}{z_2} \cos \left[k \left\{ \frac{(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2}{2z_2} - (x_0 \cos \alpha_{x1} + y_0 \cos \alpha_{y1}) + z_2 \right\} \right] \quad (1)$$

ここで a_1 は平面波の振幅、 $\cos \alpha_{x1}$, $\cos \alpha_{y1}$ は平面波の伝播方向の方向余弦、 a_2 は球面波の振幅、 k は波数、 (x_2, y_2, z_2) は点光源の位置、 (x_0, y_0) は CGH 面での位置である。

3. フレネル CGH の再生

作製したフレネル CGH を計算機で再生する場合に、以下のフレネル・キルヒホッフの回折積分式を用いる [5]。

$$u(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} I(x_0, y_0) \frac{e^{jk r}}{r} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

$$r = \sqrt{z_i^2 + (x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (3)$$

式 (3) をフレネル近似し、式 (2) に代入して変形すると、式 (4) が得られる。

$$u(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda z_i} e^{jk[z_i + (x_i^2 + y_i^2)/2z_i]} \iint_{-\infty}^{\infty} I(x_0, y_0) e^{jk \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_i} - j2\pi \left(\frac{x_0 x_i}{\lambda z_i} + \frac{y_0 y_i}{\lambda z_i} \right)} dx_0 dy_0 \quad (4)$$

式 (4) はフーリエ変換の形のため、FFT を利用することで高速な計算が可能である。

4. 再生像の立体視

作製したフレネル CGH から、一般の 3D 表示と同様に任意の視点 (水平方向のみ) で得られる再生像の表示法を提案する。ここで、光学系で再生した場合、通常は虚像 (真の像) を観察するため、FFT を用いて計算する時点で、虚像のみを得ている。再生像を光軸に対して左右から見込み角 θ (以下では右を正、左を負とする) で覗き込むということは、視点を z 軸に固定すると、CGH を y 軸を中心に θ 回転させ、参照光も同様に θ 回転させ、CGH を作製した際と同じ入射角にすることで実現できる。しかし、FFT を利用するため、任意の z' での断層画像しか得られない。そのため、焦点の位置となる断層画像以外については、図 1 のように、奥行き表現のため x 軸方向への調整が必要である。

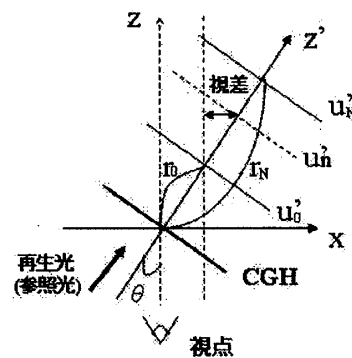


図 1 視差による断層画像の移動

無限遠方から見た調整量は式 (5) で求められる。

$$x'_n = x_n - n \left(\frac{(r_N - r_0)}{N} \sin \theta \right) \quad (5)$$

ただし $n = 0, 1, 2, \dots, N$

ここで r_0 は焦点の位置、 r_N は N 枚目の断層画像までの距離である。

上記より、調整した断層画像を式 (6) に従い加算することで立体的表示を行う。

$$Image(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{2^{n+1}} u'_n(x'_n, y_n, z_n) \right\} + \frac{1}{2^N} u'_N(x'_N, y_N, z_N) \quad (6)$$

† 佐賀大学大学院工学系研究科生体機能システム制御工学専攻

‡ 佐賀大学理工学部電気電子工学科

5. 物体モデルと作製した CGH

図2に本論文でシミュレーションを行った物体のモデルと座標系を示す。焦点はずれによるボケ像が得られるような平面物体を15×15画素で構成し、図2のP1に配置し、また同じ平面物体をP2に配置している。

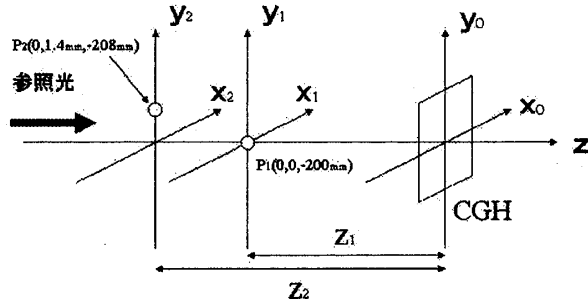


図2 物体モデル

また、CGHの作製に用いた各パラメータを表1に示す。

表1 パラメータ

Dimension of object	15×15 pixels
z-Position of object1 (P1)	-200mm
z-Position of object2 (P2)	-208mm
Pixels of hologram	256×256
Pixel pitch	17.8μm
The angle of incidence	$\frac{\pi}{2}$ (inline-mode)
Wavelength	633nm

6. 再生結果

図2のモデルのフレネルCGHを作製し、上記の理論に基づき、式(5)、(6)において、 $r_0=200\text{mm}$, $r_N=208\text{mm}$, $N=2$ とし、見込み角 $\theta=0^\circ, 10^\circ, -6^\circ$ で再生した結果を図3, 4, 5に示す。ただし、再生像を鮮明にするためにコントラスト調整を行っている。

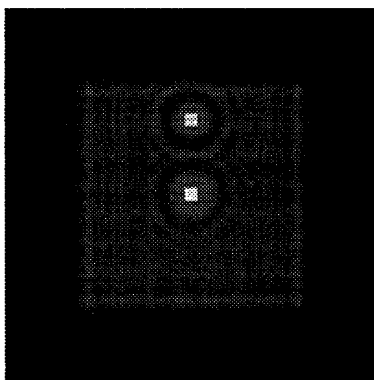


図3 $\theta = 0^\circ, r_0=200[\text{mm}]$ での再生像

通常の再生法の場合、図3に示すように正面像のみで、奥行きは表現できない。しかし本手法では、視点を正面から左右へ移動する角度を与えれば、図4, 図5に示すように、それぞれ光学系で再生する場合と同じように、奥行きを持つ再生像を表現できることが確認された。

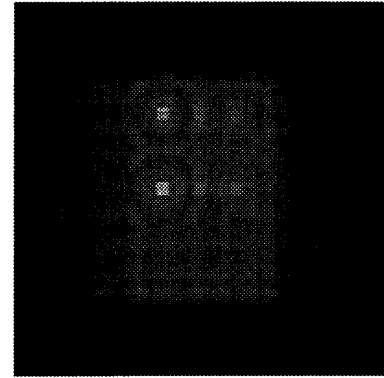


図4 $\theta = 10^\circ$ での再生像

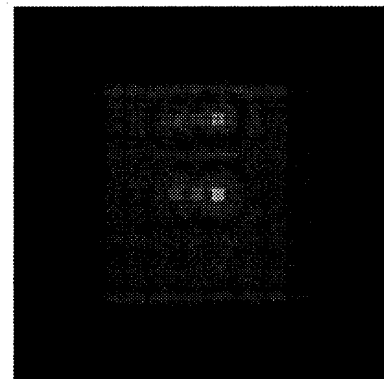


図5 $\theta = -6^\circ$ での再生像

7. むすび

本論文ではホログラフィによる仮想物体の3D表示法の基礎的な検討を行った。その結果、計算機で左右から覗き込んだ場合の再生像を表現することができた。本文中ではインライン型CGHの再生のみを紹介したが、オフアキス型で作製したCGHの場合でも、解像度の設定上、画質は落ちるが再生可能であることを確認した。

今後の課題としては、計算時間の短縮、CGHの回転による再生像の劣化等が挙げられる。

参考文献

- [1] 高野邦彦, 佐藤甲癸: "液晶パネルと白色光源を用いたカラーホログラフィ立体動画表示装置", 映像情報メディア学会誌 Vol.55,NO.10,pp.1308~1314 (2001)
- [2] 山口健, 吉川浩: "全方向視差のインタラクティブホログラフィックテレビジョン", 映像情報メディア学会技術報告 Vol.29,NO.48,pp.13~16 (2005)
- [3] 村田和美: "ホログラフィ入門", pp.30~31, 朝倉書店 (1976)
- [4] 木下健治: "シミュレーションによるCGH再生像の検討", 映像情報メディア学会技術報告 Vol.29,NO.48,pp.9~12 (2005)
- [5] 飯塚啓吾: "光工学 新訂増補版", pp.36~41, 共立出版 (1983)