

透明な表面レリーフ計算機合成ホログラム

Transparent Surface-relief Computer-generated Hologram

○東田 諒¹, 三浦 雅人¹, 信川 輝吉¹, 山口 祐太¹, 青島 賢一¹, 船橋 信彦¹, 山口 雅浩²
NHK技研¹, 東京科学大学²

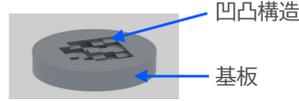
背景

計算機合成ホログラム(CGH)



- 物体で反射した光の伝搬を計算機上でシミュレーションして生成したホログラム
- 暗室環境やレーザー光の照射が不要で任意の仮想物体の記録が可能

表面レリーフ型回折光学素子



- 基板表面の微小な凹凸構造により、入射光の位相を変調
- 光の回折によって所望の光波を再生

表面レリーフ型CGH

- CGHの位相分布を凹凸構造で再現することで、CGHを光学的に再生
- 特徴
- 回折効率が高い
 - 波長選択性がない
- 設計波長以外の光も回折し、透明基板に形成しても凹凸部は不透明

従来課題

透明なCGHから仮想物体を再生したり、実物に重畳したりすることが困難

本研究の目的

透過型表面レリーフCGHの透過率を制御し、透明なCGHを実現する

手法

CGHの符号化

- 物体光 (表示したい物体の光)

$$O(x, y) = A_O(x, y)e^{j\phi_O(x, y)}$$

- 参照光 (性質が既知の光)

$$R(x, y) = A_R(x, y)e^{j\phi_R(x, y)}$$

従来手法(キノフォーム型)

振幅成分を一定とみなす

$$H_P(x, y) = \arg [O(x, y)R^*(x, y)] \\ = \phi_O(x, y) - \phi_R(x, y)$$

理論的な回折効率は100%

効率の制御は不可能

今回の手法(位相ホログラム型)

アナログの位相ホログラムの再生原理を採用

$$H_I(x, y) = \frac{\gamma_p}{2} \times \Re [O(x, y)R^*(x, y)] \\ = \frac{\gamma_p}{2} A_O(x, y) A_R(x, y) \cos[\phi_O(x, y) - \phi_R(x, y)]$$

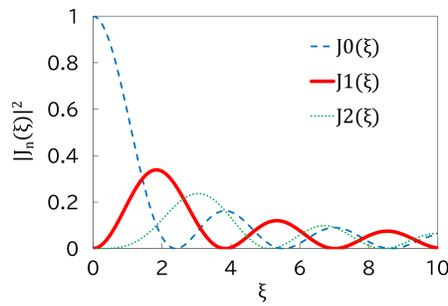
CGHの位相成分に物体光の振幅成分 $A_O(x, y)$ を含める位相変調量を決定する係数 γ_p を定義

位相ホログラム型の再生原理

1次回折像

$$[e^{jH_I(x, y)}R(x, y)]_{+1} \\ = A_R(x, y) J_1\left[\frac{\gamma_p}{2} A_O(x, y) A_R(x, y)\right] e^{j\phi_O(x, y)}$$

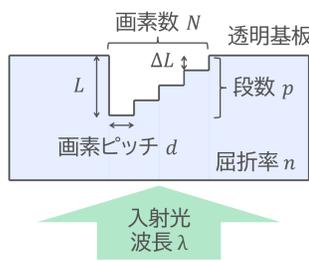
$J_1(\xi)$ は1次の第1種ベッセル関数



$\xi \approx 1.84$ の時、1次回折像の強度が最大となり、回折効率は33.9%

- 最大位相変調量は、 $2 \times 1.84 = 1.17\pi$ であり、 2π 変調しなくてよい
- 位相変調係数 γ_p により、回折効率の制御が可能

凹凸構造による位相変調



最大位相変調量 ϕ を変調する凹凸構造を形成

- 最大段差深さ $L = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)}\phi$
- 段差幅 $\Delta L = \frac{L}{p}$

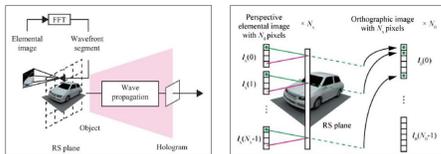
- 従来より最大段差深さ L を低くすることで、表面散乱を抑える
 - 効率を下げるには、 γ_p により、さらに L を低くする
- 散乱を抑え、回折効率を制御することで、CGHの透過率を制御する

実験

CGHの生成

深い奥行きに写実的な3D像を表示可能な正射影光線一波面変換法を使用
多視点画像群からCGHを生成

S. Igarashi et al., Opt. Lett. 41(7), 1396-1399 (2016).

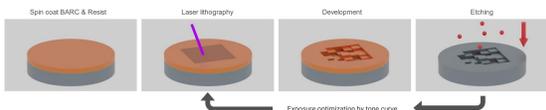


CGHの作製

- グレースケールレーザー直接描画 (DWL 66+; Heidelberg Instruments)
- 反応性イオンエッチング (RIE-10NR; Samco)

により、合成石英基板上に作製

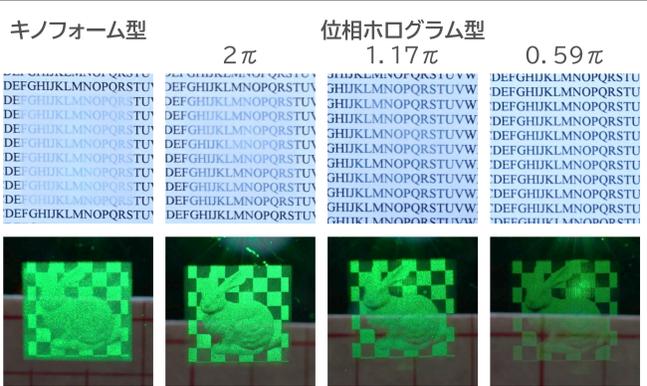
R. Higashida et al., Opt. Exp. 32(25), 44742-44753 (2024).



キノフォーム型と位相ホログラム型 ($\frac{\gamma_p}{2} = 2\pi, 1.17\pi, 0.59\pi$) で符号化したCGHを作製

- CGHの裏に、英字を印刷した紙を配置し、透過性を評価
- CGHの裏半分に方眼紙を配置し、CGHの光学再生像を評価

画素数: 16k × 16k
画素ピッチ: 1 μm
階調数: 32
入射光波長: 532 nm
入射角: 垂直15.4°



- 従来より、英字が識別されやすくなり、透過性が改善
- 1.17π, 0.59πの場合、CGHはほぼ透明

- 今回の手法では、再生像と実物の同時観察が可能
- γ_p により、明るさの制御に成功
- 2πの場合は、背景ノイズが増加
- 物体光の振幅成分を用いることで再生像が高画質化

従来と今回の比較

	キノフォーム	位相
透過率	低い	高い
明るさ	明るい	暗い
効率制御	不可能	可能
画質	低い	高い
共役像	なし	あり

高解像度のCGHの作製

画素数: 128k × 128k
画素ピッチ: 0.5 μm
階調数: 32
入射光波長: 532 nm
入射角: 垂直15.4°



- 高解像度で透明なCGHから3D像の再生に成功

まとめ

- CGHの位相分布に、物体光の振幅成分を含め、係数によって位相変調量を決定するCGHの符号化方法により、透過型表面レリーフCGHの透過率を制御した。
- 本手法により、透明なCGHから高画質な3D像を再生し、実物に重畳するような映像表現が可能となった。