

計算機合成ホログラムの無線伝送システムにおける 伝送エラーが光波分布へと与える影響の解析

Analysis of Transmission Errors for Light-Wave Distributions in Wireless Transmission System of Computer-Generated Holograms

山口 一弘[†]
Kazuhiro Yamaguchi

水戸部 将也[‡]
Masaya Mitobe

坂本 雄児[‡]
Yuji Sakamoto

1. 研究背景

計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram: CGH) はホログラフィの記録過程に基づいた光波の物理現象を計算機の数値シミュレーションを行うことで生成されたホログラムである。シミュレーションにより得られた CGH データを高解像度の写真乾板や光空間変調素子 (SLM) などに出力することにより、ホログラムが作製される。

本研究では、生成された CGH データを表示装置へと伝送する場合に生じる伝送エラーについて、計算機シミュレーションにより伝送エラーが光波分布へと与える影響を評価した。

2. 計算機合成ホログラムの無線伝送システム

2.1. CGH 計算・表示

CGH 計算として一般的な点光源充填法 [1] では、物体を点光源の集合体としてとらえ光波計算を行なう。点光源充填法では、作製したいホログラムへと到達する光波分布は以下の式で表される。

$$u(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{r_i} e^{j(kr_i + \phi_i)} \quad (1)$$

ここで、 $u(x, y)$ はホログラム上の 2 次元の光波分布、 N は点光源の数、 a_i と ϕ_i はそれぞれ i 番目の点光源の振幅と位相、 r_i は点光源とホログラム上の座標 (x, y) との距離を表す。この光波分布は物体光と呼ばれ、点光源の集合で表される仮想の物体から発せられる光波情報を持ち、この物体光を再現することで仮想物体を表示することが可能となる。この光波分布に対して、参照光の光波分布 $r(x, y)$ との干渉を計算し、

$$h(x, y) = |u(x, y) + r(x, y)|^2 \quad (2)$$

として、干渉縞の光波分布 $h(x, y)$ が得られる。この $h(x, y)$ が CGH データとなる。そしてこの CGH データを高解像度な SLM などの表示機器に表示し、参照光を照射することで式 (1) の物体光を再現できる。

2.2. CGH の伝送モデル

これまでの CGH の表示システムでは、数値計算によって得られた CGH データは、無劣化の状態で計算装置から表示装置へと伝送されるのが一般的であった。しかしながら、データの伝送時には伝送エラーによるデー

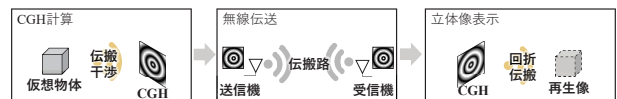


図1 CGHの無線伝送システム

タの損失が生じる場合があり、CGH システムにおいても CGH の伝送について検討する必要があった。文献 [2] では CGH の伝送を想定したエラー検出および訂正アルゴリズムを提案しており、伝送エラーが生じる場合の再生像の画質改善について報告している。これらの研究では伝送エラーによって引き起こされる画質劣化についての詳細な検討はなく、今後 CGH 伝送のための伝送方式やエンコーディング方式を検討するためには、伝送エラーによる光波分布および再生像に与える影響の解析が必要不可欠である。

2.3. 光波分布の解析

そこで筆者らは、伝送エラーによる影響を電子ホログラフィを用いた光学再生像によって比較を行い、主観評価による結果を報告した [3]。本研究では、CGH の無線伝送システムを構築し、伝送エラーが生じた CGH から再生された光波分布がどの程度劣化するかを検討するために、疑似的な伝送エラーを与えた CGH を用いて計算機シミュレーションにより光波分布の SNR (Signal to Noise Ratio) を測定した。

図1に CGH の無線伝送システムにおけるブロック図を示す。式 (1) と (2) によって生成された CGH データは無線伝送装置へと渡され、送信機から受信機へと無線伝搬路を通り送られる。受信された CGH データは表示装置へと渡され、受け取った CGH データを用いて像再生が行なわれる。このとき、無線伝搬路の品質に応じて受信後の CGH データに誤りが生じる場合がある。

ここで受信した CGH データにいくらかの伝送エラーが生じた場合について考える。ある矩形の開口 (サイズ: $d \times d$) からの光波は、

$$I_e(x, y) = \frac{A^2}{\lambda^2 z^2} \text{sinc}^2\left(\frac{dx}{\lambda z}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{dy}{\lambda z}\right) \quad (3)$$

の強度分布となる [4]。ここで、 A は開口透過時の光波の振幅、 λ は光波の波長、 z はホログラムからの伝搬距離を表し、 $\text{sinc}(x) = \sin x/x$ である。伝送エラーにより、ホログラム上のある画素値が変化すると、式 (3) により再生された物体光へとノイズとなって表れることが予測される。このため、本研究ではこの伝送エラーによって生じるノイズの光波分布への影響を解析する。

[†] 諏訪東京理科大学 経営情報学部

[‡] 北海道大学大学院 情報科学研究科

表 1 計算機シミュレーションのパラメータ

パラメータ	値
ピクセル数	256 × 256 (pixels)
ピクセルピッチ	1.0 × 1.0 (μm)
波長	625 (nm)
伝搬距離 z	0.5~10.0 (mm)

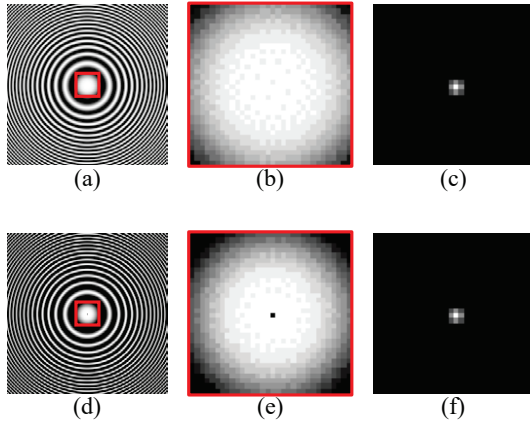


図 2 フレネルゾーンプレートによる光波分布の比較

3. 計算機シミュレーション

3.1. セットアップ

計算機シミュレーションのパラメータを表 1 に示す。CGH のピクセル数は 256×256 ピクセル、ピクセルピッチは 1.0×1.0μm、波長は 625 nm とし、CGH からの伝搬距離は 0.5~10.0 mm とした。また、CGH データは 1 ピクセルあたり 8bit へと量子化することを想定している。CGH から再生された光波の比較には、以下の式で表される SNR (Signal to Noise Ratio) を用いた [5]。

$$\text{SNR}_z = \frac{\iint_D |f(x, y; z)|^2 dx dy}{\iint_D |f(x, y; z) - \alpha f_0(x, y; z)|^2 dx dy},$$

$$\alpha = \frac{\iint_D f(x, y; z) f_0^*(x, y; z) dx dy}{\iint_D |f_0(x, y; z)|^2 dx dy} \quad (4)$$

ここで、 SNR_z は CGH からの距離 z において測定した SNR であり、 $f_0(x, y; z)$ は伝送エラーがない CGH から再生された理想状態の光波分布、 $f(x, y; z)$ は伝送エラーがある CGH から再生された光波分布である。

3.2. 光波分布の比較

CGH から再生された光波が伝送エラーの影響によりどの程度劣化するかを比較するため、フレネルゾーンプレートにより SNR を測定した。フレネルゾーンプレートは、 $z = -1$ mm に配置した 1 点のみの点光源を用いて計算され、 $z = 0$ mm の位置で参照光との干渉計算を行い作成された CGH である。

図 2 にフレネルゾーンプレートによる光波分布 ($z =$

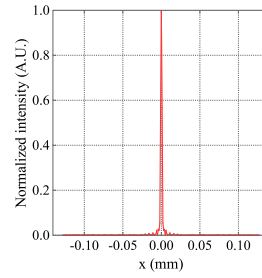


図 3 光波分布の差分

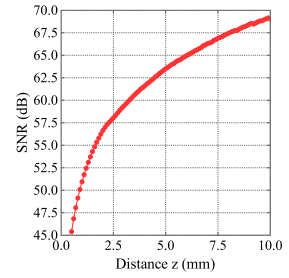


図 4 距離対 SNR 特性

1.0 mm) の一例を示す。(a) は伝送エラーのない理想状態の CGH, (b) はその拡大図, (c) は (a) の CGH より計算された光波の強度分布 $|f_0(x, y; z)|^2$ の一部である。ここで、この CGH に対して、 $(x, y) = (0, 0)$ に 1 ピクセル分の伝送エラー (8 bit 相当) が生じたと仮定し、(d) は伝送エラーを付与した CGH, (e) はその拡大図, (f) は (d) の CGH より計算された光波の強度分布 $|f(x, y; z)|^2$ の一部である。(c) と (f) を比較すると、1 画素分の伝送エラーによる影響はほぼないように見えるが、光波の差分 $|f_0(x, y; z) - f(x, y; z)|^2$ をプロットした図 3 から、少なからず影響が生じていることがわかる。このときの SNR は 50.9 [dB] であった。

図 4 に CGH からの距離を変えた場合の SNR の変化を示す。CGH からの距離が遠いほど、伝送エラーによる光波分布への影響は少なくなる傾向がわかる。

4. まとめ

本研究では、計算機合成ホログラムの無線伝送時に生じる伝送エラーが与える影響について、計算機シミュレーションにより再生された光波分布の評価を行った。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16K16104 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] J. P. Waters, "Holographic Image Synthesis Utilizing Theoretical Methods," *Appl. Phys. Lett.* **9**(11), 405–407 (1966)
- [2] L.-C. Lin, "An Error Detection and Recovery Algorithm for the Transmission of Digital Holography over Noisy Channels," *Optics Communications*, **281**, 1008–1016 (2008)
- [3] 山口 一弘, 渡邊 良亮, 野崎 亜弥, 坂本 雄児, "伝送エラーが電子ホログラフィの再生像へ与える影響," *映像情報メディア学会誌*, **70**(5), J105–J113 (2016)
- [4] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics (3rd ed.)," Roberts & Company Publishers (2004)
- [5] K. Matsushima, H. Schimmel, F. Wyrowski, "Fast Calculation Method for Optical Diffraction on Tilted Planes by Use of the Angular Spectrum of Plane Waves," *J. Opt. Soc. Am. A*, **20**(9), 1755–1762 (2003)