

カラーコンピュータホログラフィにおける 波長誤差の補正アルゴリズム

Lee Chang-Joo 西 寛仁 松島恭治
関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科
〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

Compensation Algorithm for Wavelength Errors in Full-Color Computer Holography

Chang-Joo Lee Hirohito Nishi Kyoji Matsushima
Department of Electrical, Electronic and Information Engineering, Kansai University
Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan
E-mail: k608208@kansai-u.ac.jp (C.-J. Lee)

Abstract When a sampled wavefield is transmitted and reconstructed using a different wavelength from that of the original wavefield, the reconstructed holographic image changes from the original one. This chromatic aberration causes a severe color bleeding in the full color holographic image. It is presented in this paper that the effect of wavelength change is similar to optical refraction. Furthermore, a method based on numerical field propagation is proposed to compensate this chromatic aberration. The proposed algorithm is verified by numerical simulations.

Keyword Computer-generated hologram, Digital holography, Sampled wavefield

1. はじめに

ホログラフィー技術は現在、ヘッドマウントディスプレイや半導体の分析、顕微鏡など様々な分野で使われている[1-4]。その中でも計算機合成ホログラム(Computer-generated hologram, 以下 CGH)は、計算機を用いて作成されるホログラムであるため、物理的に実在する物体が必要なく、架空の物体の光をデジタル的に計算して深い奥行きのある 3D 映像を作成できる技術である。近年ではコンピューティング技術の向上により、数百から数千億画素規模の全方向視差高解像度 CGH を計算できるようになった[5]。

このようなコンピュータホログラフィー技術を 3D ディスプレイに適用したホログラフィックディスプレイの開発が進められ、Beyond 5G 時代に向けて、ホログラフィック映像の伝送や放送も構想されつつある。

しかし、ホログラフィック映像は通常のデジタル画像とは異なり、被写体や 3D モデルの物理的な大きさや奥行きを記録しているた

め、ホログラフィック映像の送信側のパラメータとそれを受信して再生する様々な再生機器のパラメータに相違があると、その誤差により再生像の歪みやノイズが生じる。そのため、近い将来、それを補正することが重要になると予想される。

本研究では、ホログラフィック映像通信で、CGH の干渉縞そのものではなく、Fig.1 に示すように、標本化された光波データ(複素振幅分布)を送受信することを想定する。これは、干渉縞データの伝送では、再生機器は干渉縞生成に用いた参照光などのパラメータと同一のパラメータで再生しなければならず、自由度が低いためである。本研究では、光波データの再生時に標本数および標本間隔は変わらないが、波長だけがわずかに異なる光源を用いて光学再生することを想定し、その場合に発生する問題を分析し、発生する誤差を補償する手法を報告する。なお、以下では、このような波長変化で生じる映像の変化を色収差と呼んでいる。

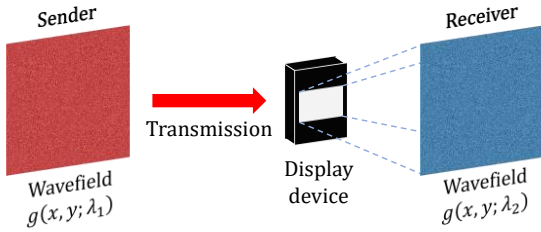


Fig. 1 ホログラフィック映像の伝送

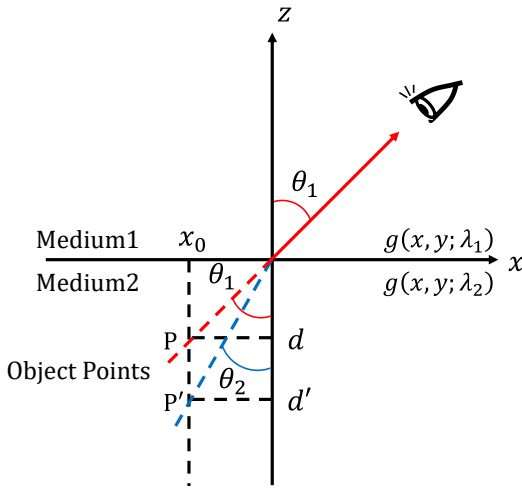


Fig. 2 波長変化による屈折の効果

2. 屈折のアナロジーによる色収差補正の原理

いま, Fig.1 に示す通り, 伝送された波長 λ_1 の離散的な光波データを $g(x, y; \lambda_1)$ とし, その位相と振幅を変えずに波長 λ_2 で再生する. すなわち,

$$g(x, y; \lambda_1) = g(x, y; \lambda_2) \quad (1)$$

とする. これは, Fig.2 に示すように, $(x, y, 0)$ 平面にある異なった媒質の界面で生じる屈折現象を, 表面反射を無視して波動光学的に取り扱う場合と同じである[6]. 例えば水中では, よく知られているように, 深さ $z = -d$ にある点 P' は, 実際より浅い点 $P(z = -d)$ の位置にあるように見える. そのため, 本来の光波データの波長と異なる波長の光を用いて光波を再生する際に発生する色収差は, Fig.3 に示すように光軸方向のシフトとなると考えられる. 単色の再生であれば, この現象は大きな問題

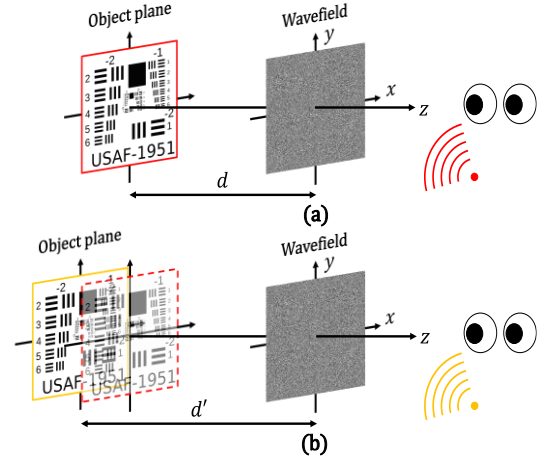


Fig. 3 波長変化による色収差

にならないが, RGB の3波長のカラー映像の場合は, 波長ごとにシフト量が異なるため, 色ずれの原因となるため, その誤差を補償する必要がある.

Fig.2 に示した現象は, 上下の媒質の屈折率を n_1, n_2 とすると, スネルの法則

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

により解析できる. ここで波長と屈折率の関係は

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1}, \quad \lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (3)$$

であり, λ_0 は真空中での波長である. 式(3)の屈折率を式(2)に代入し, さらに $\sin \theta_1$ と $\sin \theta_2$ をFig.2 から幾何学的に求めて式(2)に代入して d' に対して解くと,

$$d' = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} d \sqrt{1 + \left(\frac{x_0}{d}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2\right]} \quad (4)$$

が得られる. ここで, d は元の光波データが与えられた平面とそれが再生する平面物体との距離(以下, 物体距離)であり, d' は波長変化でシフトした物体距離である.

このような光軸方向の位置シフトを補償するために, 式(4)で得られた d' と d の差を求めて, $g(x, y; \lambda_2)$ を数値的に伝搬する. 距離の差を

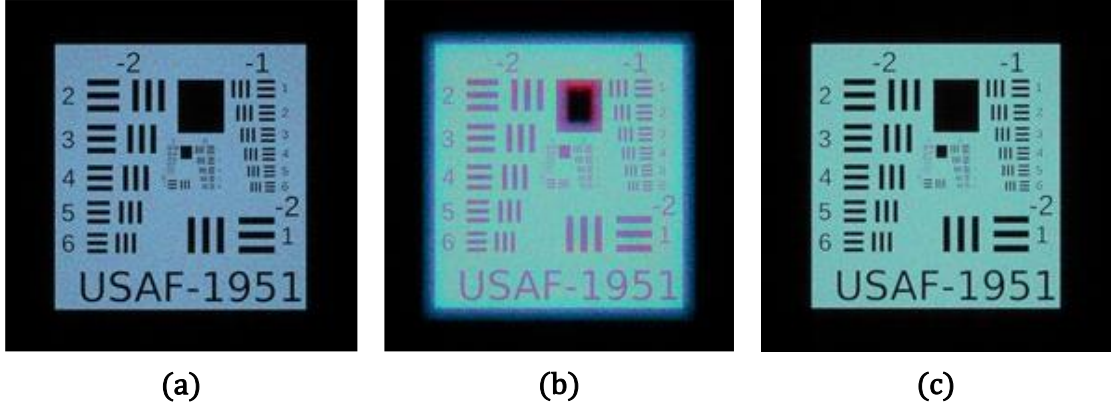


Fig. 4 波長変化による色収差補正シミュレーション

$$\Delta d = d - d'$$

と定義すると,

$$\Delta d = d \left[1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{1 + \left(\frac{x_0}{d} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^2 \right\}} \right] \quad (5)$$

となる. 物体のサイズが物体距離に比べて小さく, $x_0^2 \ll d^2$ と見なせる場合や, 波長変化量が小さく, $\lambda_1 \approx \lambda_2$ の場合には, 式(5)は

$$\Delta d \approx d \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad (6)$$

と近似できる. これを用いて, 補正した光波を

$$g'(x, y; \lambda_2) = \mathcal{P}_{\Delta d} \{ g(x, y; \lambda_1) \} \quad (7)$$

として求める. ここで, $\mathcal{P}_{\Delta d} \{ \}$ は z 軸方向への距離 Δd の数値的な伝搬演算を表す.

なお, ここでは $(x, 0, z)$ 平面で解析を行ったが, y 軸方向に広がりがある場合も同様の解析結果となる.

3. シミュレーション結果

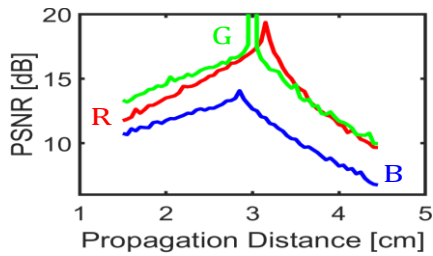
提案した手法を用いて色収差が補正されることを確認するためのシミュレーションを行った. シミュレーションパラメータを Table 1 に示し, 白色の平面物体に対して求めた 3 波長の光波データを物体距離 d だけ逆伝搬した

Table 1 シミュレーションパラメータ

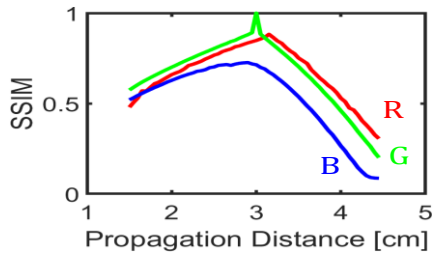
| | |
|-----------------|-----------------|
| サンプリング数 | 8192×8192 |
| サンプリング間隔 [μm] | 0.8×0.8 |
| 物体サイズ [mm] | 3.3×3.3 |
| 物体距離 d [cm] | 3.0 |
| 波長セット RGB1 [nm] | (640, 532, 457) |
| 波長セット RGB2 [nm] | (608, 532, 480) |

シミュレーション結果を Fig.4 に示す. (a) は光波データの波長セット RGB1 と同じ波長で逆伝搬した再生像であり, 元の物体像が鮮明に再生されている. 一方, (b) は波長セット RGB1 の光波データを, 波長セット RGB2 を用いて逆伝搬した再生像である. R と B の波長が変わっているため, これらの波長では, 逆伝搬で鮮明な再生像が得られる位置が変わり, 色にじみが生じている. Fig.4(c) は, RGB2 波長セットにおいて式(7)を用いて光波データを補正し, RGB の光波 $g'(x, y; \lambda_2)$ を距離 d 逆伝搬した結果である. (b) に比べると色にじみのない像を確認できる.

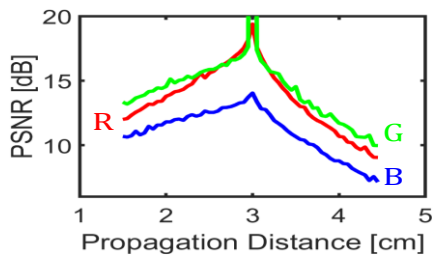
この手法による色収差補正の正確さを定量的に評価するため, 逆伝搬距離を変えて Peak Signal-to-Noise Ratio (以下 PSNR) と Structural Similarity Index Measure (以下 SSIM) を評価した. 比較のための原画像には Fig.4(a) を用いた. 1.5cm から 4.5cm まで距離を変えながら逆伝搬した場合を評価した結果を Fig.5 に示す. (a) と (b) は, それぞれ補正をしない場合の PSNR と SSIM である. G の波長を変えていない



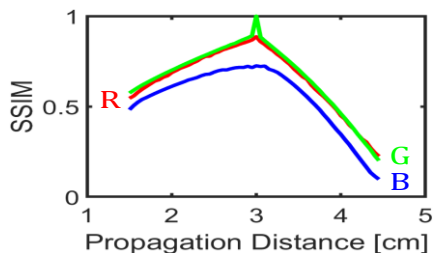
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 波長変化による色収差の定量的評価

め、GのPSNRのピーク値は3cmで極大となり、グラフの範囲から外れたため略している。RとBに対するPSNRのピークはRが3.15cm、Bが2.85cmに現れており、SSIMのピークもRが3.15cm、Bが2.85cmで現れている。これは理論通りであり、波長変化によってR、Bの再生像が鮮明になる逆伝搬距離が変化したことが確認できた。

Fig.4(c)と(d)は提案手法によって色収差を補償した結果であり、PSNRとSSIMのピーク位置が全て3cmに移動したことが確認できる。R、Gに比べてBのPSNRおよびSSIMの絶対値が低い理由は、R、Gに比べてBが波長変化による色調の変化が激しいためである。このシミュレーションにより、提案した手法により色収差を補正できることが確認できた。

4. まとめ

光波データを本来とは異なる波長の光を用いて再生した時に発生する色収差を補正するため、波長変化による光波の変化を屈折現象のアナロジーによって解析し、光波データを光軸方向へ平行伝搬することで、波長誤差による色収差を補償した。逆伝搬して得られる再生像をPSNR/SSIMを用いて定量的に評価した結果、平面物体についてはこの補正によって色収差を低減できることを確認した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費22H03712および国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究(06801)の助成を受けたものである。

文献

- [1] N. Padmanaban, Y. Peng, and G. Wetzstein, "Holographic near-eye displays based on overlap-add stereograms," *ACM Trans. Graph.* **38**, 214 (2019).
- [2] V. R. Besaga, N. C. Gerhardt, and M. R. Hofmann, "Digital holography for spatially resolved analysis of the semiconductor optical response," *Appl. Opt.* **60**, A15–A20 (2021).
- [3] H. Byeon, T. Go, and S. J. Lee, "Deep learning-based digital in-line holographic microscopy for high resolution with extended field of view," *Opt. Laser. Technol.* **113**, 77–86 (2019).
- [4] S. H. Jeon and S. K. Gil, "Secret key sharing cryptosystem using optical phase-shifting digital holography," *Curr. Opt. Photonics* **3**, 119–127 (2019).
- [5] K. Matsushima: *Introduction to Computer Holography*, (Springer, 2020).
- [6] 西, 松島: "ポリゴン法CGHにおける屈折光のレンダリング手法", 3次元画像コンファレンス2022, 10-1 (2022).