擬似ランダム位相を用いた計算機ホログラムの生成

安河内 大貴^a 三崎 友樹^a 古賀 陽介^a 楊 世淵^a

^a九州工業大学

1. はじめに

本論文では、干渉タイプの振幅ホログラムにおける再生像のスペックル除去法を示す。一般に、ホログラムによって再生される像を誤差なく再生するには、原物体の大きさに対して十分なサンプル点数のホログラムが必要となる。一方、原物体の大きさに対して十分に大きくはないホログラムを用いる際、誤差を低減するため物体光にランダム位相を加えることで、再生像を鮮明に再生することが可能である。しかし、ランダム位相を加えるとスペックルと呼ばれる黒い斑点のノイズが現れてしまう。そこで、擬似ランダム位相を用いることで、このスペックルの除去を行う。これによって、ホログラムのサンプル点数が小さくともスペックルの少ない鮮明な再生像を再生することが可能となる。

2. 原理

計算機ホログラムは、コンピュータによって光の回折・干渉を計算し、ホログラム面上の干渉縞を求めるものである。コンピュータを用いて計算する利点は、光学的にホログラムの干渉縞の記録を行うよりも、振動や参照光の角度の変化等の外的要因に影響されないことである。

ホログラムに記録される干渉縞は、物体光の振幅情報を記録したものである。物体光にランダム位相を加えて生成したホログラムを用いて再生した像が、より鮮明に再生されるようになる。一方、物体光にランダム位相を加えて像の再生を行った場合、再生像にスペックルと呼ばれるノイズが発生する。

2.1 計算機ホログラムの生成

計算機ホログラムにおけるホログラム面上の干渉縞 $I(x, y)$ は、以下の物体光 $O(x, y)$ と参照光 $R(x, y)$ で表すことができる。

$$I(x, y) = |R(x, y) + O(x, y)|^2 \quad (1)$$

$$R(x, y) = a_R \exp[j(kx \sin \theta_R)] \quad (2)$$

$$O(x, y) = \sum_{p=1}^N \frac{a_p}{r_p} \exp[j(kr_p + \varphi_p)] \quad (3)$$

$$r_p = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + z_p^2} \quad (4)$$

Fig.1. Interference Hologram

ここで、 a_R は参照光の振幅、 N は原物体のサンプル点数、 a_p は物体光の振幅、 φ_p は物体光の初期位相を表す。ただし、 $a_R = |O(x, y)|_{\max}$ 、 $-\pi \leq \varphi_p < \pi$ とする。

また、再生光 $O'(x_p, y_p)$ は透過光 $T(x, y)$ により次のように表される。

$$O'(x_p, y_p) = \sum_{i=1}^{N'} \sum_{j=1}^{N'} \frac{T(i, j)}{r(i, j)} \exp[-jkr(i, j)] \quad (5)$$

$$T(x, y) = I(x, y) \times R(x, y) \quad (6)$$

ここで、 N' はホログラムのサンプル点数とする。

2.2 スペックルの発生要因

Fig.2 のように、右下の点を基準とし、隣接する 4 点の位相を $\varphi(x, y)$ 、 $\varphi(x - 1, y)$ 、 $\varphi(x - 1, y - 1)$ 、 $\varphi(x, y - 1)$ とする。サンプル点間の位相差を次のように定義する。

$$\Delta\varphi_1(x, y) = \varphi(x, y) - \varphi(x - 1, y) \quad (7)$$

$$\Delta\varphi_2(x, y) = \varphi(x - 1, y) - \varphi(x - 1, y - 1) \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_3(x, y) = \varphi(x - 1, y - 1) - \varphi(x, y - 1) \quad (9)$$

$$\Delta\varphi_4(x, y) = \varphi(x, y - 1) - \varphi(x, y) \quad (10)$$

上記の式より

$$\sum_{i=0}^3 \Delta\varphi_i = 0 \quad (11)$$

が成り立つことは明らかである。ただし、 $-\pi \leq \varphi < \pi$

Fig.2. Principle of speckle generation

であるので、 $-2\pi < \Delta\varphi_i < 2\pi$ となり位相差が 2 周期に渡ってしまう。そこで、 $\Delta\varphi_i$ の値の範囲を 1 周期分の $-\pi \leq \Delta\varphi_i < \pi$ に修正(wrapping)する。 $\Delta\varphi_i$ を wrapping したものを $\Delta\tilde{\varphi}_i(x, y)$ とすると

$$\sum_{i=0}^3 \Delta\tilde{\varphi}_i(x, y) = 0, 2\pi, -2\pi, -4\pi \quad (12)$$

となり、位相差の和が $2\pi, -2\pi, -4\pi$ となる時スペックルが発生する。つまり、位相差が $-\frac{\pi}{2} \leq \Delta\varphi_i < \frac{\pi}{2}$ の範囲を超えて存在するときスペックルが発生することとなる。したがって、位相差が $-\frac{\pi}{2} \leq \Delta\varphi_i < \frac{\pi}{2}$ となる範囲のランダム位相を選択することでスペックルの除去が可能である。

3. シミュレーションと結果

3.1 ホログラムサンプル点数の再生像への影響

原物体のサンプル点数を変化させずにホログラムのサンプル点数を変化させた時の再生像の比較を行った。以下にその条件を示す。

・原物体サンプル点数	64pixel×64pixel
・原物体ホログラム間距離	3.0m
・参照光の波長	632nm
・参照光の入射角	15°
・物体光の位相	ゼロ位相

ただし、ホログラム実際のサイズが 1.9cm となるようホログラムサンプル点数とホログラムピクセルサイズを変動させるものとする。

Fig.3 より、原画像サイズが同じであれば、ホログラムサンプル点数がより大きいほど再生像を鮮明に生成できることが確認できた。

3.2 ランダム位相と擬似ランダム位相の影響

よりサンプル点数の小さいホログラムで鮮明な像を再生するために、3.1 のシミュレーションで明瞭ではな

Fig.3. Simulation

Fig.4. Simulation

かったホログラムサンプル点数 380pixel×380pixel のシミュレーション結果に着目した。条件は 3.1 と同様とし、ランダム位相なし、ランダム位相を加えたもの、擬似ランダム位相を加えたものを比較した。

Fig.4 より同じホログラムサンプル点数であってもランダム位相を加えることで、再生像が明瞭化されることが確認できた。スペックルの完全除去は行えていないが、擬似ランダム位相を用いると、スペックルの数が低減していることが確認できた。

4. 結論

このシミュレーションによって、同じ大きさ(サンプル点数)のホログラムを用いて再生像を生成する場合、よりホログラムの小さい(サンプル点数の少ない)もので再生するにはランダム位相を用いることが効果的である。一方で、ランダム位相を用いるとスペックルが発生する。このスペックルの除去に擬似ランダム位相を用いることで、スペックルの除去を行った。

しかし、擬似ランダム位相を用いたシミュレーション結果では完全にスペックルを除去することが出来なかった。これは、ホログラムを再生する際に新たなスペックルが発生することや、フーリエ変換を用いて計算を行っていないことから、スペックルの完全除去が出来なかったと考えられる。この問題を解決するためには、繰り返し法の導入が効果的であると考えられる。

文 献

- (1) Seung-Cheol, Eun-Soo Kim : "Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method", APPLIED OPTICS, Vol.47, No.19, 2008
- (2) Yuki Misaki, Yosuke Koga, Shiyuan Yang : "Generation of Pseudo Random Phase Distribution of Laser Light", Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, Vol.2, No.2, pp.62-65, 2014