

デジタルホログラフィにおけるスペックルノイズ低減手法

Reduction technique of speckle noise in digital holography

菅原裕一

吉川宣一

Yuichi Sugawara

Nobukazu Yoshikawa

1. はじめに

デジタルホログラフィは、干渉縞を CCD などの撮像素子に記録するため、物体の三次元情報をデジタル情報として取得することができる。そのため、物体の強度や位相情報を計算機上で容易に計算することができる。

デジタルホログラフィのようなコヒーレントな光源を使った画像生成系では、スペックルノイズと言われる粒状のノイズが生じてしまうことにより、画像の品質が下がってしまうことが問題とされている。

本論文では、ホログラムを分割してサブホログラムを作成し、各々からの再生像の強度を足し合わせることでランダムに分布するスペックルノイズを低減する方法を提案する。以下、この手法を分割重ね合わせ法と呼ぶことにする。

2. デジタルホログラフィ

記録面上での参照光の振幅を $A(x, y)$ 、物体光の振幅を $B(x, y)$ 、参照光と物体光の位相差を $\Delta\phi(x, y)$ とすると、記録されるホログラムは次式で与えられる。

$$I(x, y) = |A(x, y)|^2 + |B(x, y)|^2 + A(x, y)B(x, y)\exp(-i\Delta\phi(x, y)) \quad (1)$$

この式の最終項に物体の三次元情報が含まれている。物体がホログラム面から有限の距離にある場合、物体光はフレネル回折として扱えるため、像を再生するには以下のフレネル回折積分を用いる。

$$g(X, Y) = FR[I(x, y)] = \frac{-\exp(-ikz)}{i\lambda z} \iint I(x, y) \times \exp\left[-\frac{ik}{2z}\{(X-x)^2 + (Y-y)^2\}\right] dx dy \quad (2)$$

ここで、 $FR[]$ はフレネル演算子、 (X, Y) は再生面、 (x, y) はホログラム面の座標を表しており、 λ は光源の波長、 z は再生距離、 k は波数 ($k = 2\pi/\lambda$) である。実際の計算は式(2)を離散化したものを用いる。

従来、ホログラムは写真乾板などに記録しており、ホログラムの作成には現像などの化学プロセスが必要であった。また、像の再生はレーザーを用いて光学的に行う必要があった。デジタルホログラフィでは撮像素子を用いてホログラムを記録して数値的に再生できるため、ノイズ除去や波面の位相分布の抽出などのさまざまな処理が計算機上で可能になり、数値的な解析も容易に行える。

3. スペックルノイズの低減

3.1 従来法

スペックルノイズを低減する手法として、物体光の条件をわずかに変えて複数枚のホログラムを記録し、それらの再生像の加算平均を求める手法がある。異なる物体照明条件下では、得られる再生像には異なるスペックル分布がのっている。この分布はランダムなので、多数のサンプルをとって統計平均をとれば、理想的な場合では平均化されてノイズはほとんど無視できるようになる。しかし、異なる時間で複数枚のホログラム撮影が必要のため、対象物体が静止していなければならないことが問題とされている。

その他には、画像処理的手法として平滑化フィルタやメディアンフィルタを使う方法がある。

3.2 分割重ね合わせ法

1枚のホログラムを複数枚に分割したサブホログラムの作成を考える。 $L \times L$ 画素の大きさの CCD で記録したホログラムを $I(x, y)$ とし、そのホログラムを $N \times N$ 分割して $m \times m$ 画素 ($m = L/N$) の大きさのサブホログラム $\hat{I}_{p,q}(x, y)$ を作成する。ホログラムの性質より、サブホログラムからでも全体像の再生が可能である。それぞれのサブホログラムから求めた再生像の強度を足し合わせた合成再生像は、以下の式で表される。

$$g(x, y) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N |FR[\hat{I}_{p,q}(x, y)]|^2 \quad (3)$$

サブホログラムは相対的にもとのホログラムより大きさが小さくなるため、1枚のサブホログラムからの再生像にのっているスペックルノイズの大きさは、もとのホログラムのそれよりも大きくなってしまい、再生像の画質は低下する。しかし、多数のサブホログラムからの再生像の強度を加算することにより、インコヒーレント結像の効果が現れる。つまり分割重ね合わせの方法はコヒーレント結像とインコヒーレント結像の中間の、部分コヒーレント結像の性質が表れると考えられ、スペックルノイズ低減の効果が期待できる。

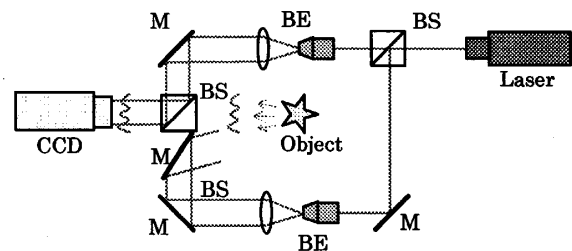


図1: 実験装置

4. 実験および結果

実験装置を図1に示す。光源は波長 532nm の YAG レーザー、CCD カメラは 1024×1024 画素、12bit グレyscale である。対象物体は CCD 正面の距離 50cm の場所に配置する。対象物体には 1cm 立方のサイコロと白黒のラインを持つテストパターンを用いた。

実験結果を図2に示す。(a)は分割を行わない通常の再生像、(b)から(d)が分割重ね合わせ法からの再生像で、それぞれ $N=2,4,8$ のときを示しており、画像サイズは 512×512 画素である。図3は分割数を変化させたときの、サイコロ中央の白色部の分散を表している。なお、再生強度の平均値にはほとんど変化がなく、サイコロ中央部でおよそ 5.7 であった。

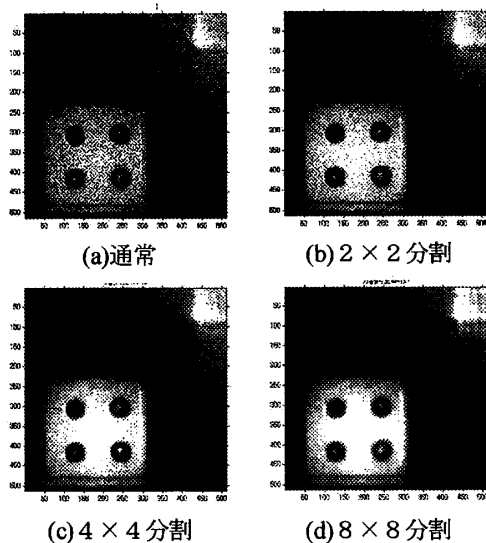


図2：再生像

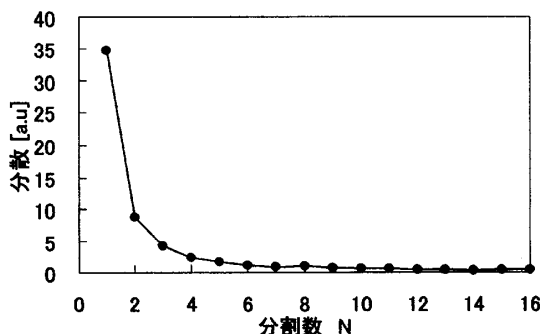
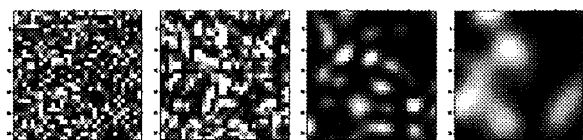


図3：分割数と分散の関係 ($N \times N$ 分割)

図3より、分割数を増やすにつれて分散が減少しており、スペckルノイズが抑制されていくのが分かる。しかし、分割数が多すぎると、再生像がぼけてしまうという結果になった。これは、分割数が多くなるにつれて、サブホログラムからの再生像の分解能が低下したことが原因と考えられる。1枚のサブホログラムからの再生像には図4のようなスペckルノイズが見られ、その大きさは分割数を増やすにつれて大きくなっている。再生像から算出したスペckルノイズの平均の大きさは、通常再生ではおよそ 0.30mm、2×2分割で 0.37mm、4×4分割で 0.85mm、8×8分割で 2.6mm



(a) 通常 (b) 2×2分割 (c) 4×4分割 (d) 8×8分割

図4：1枚のサブホログラムからの再生像 (白色部拡大：30×30画素)

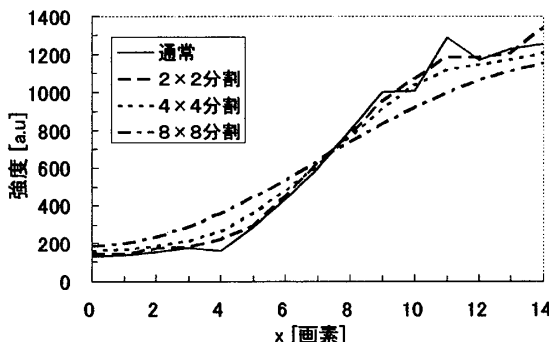


図5：断面図の比較

となった。この大きさが大きすぎると、強度加算によるスペckルノイズ抑制効果が薄れてしまうと考えられる。

白と黒のラインを持つテストパターンに分割重ね合わせ法を適用し、白黒境界部の断面についての比較を行った結果を図5に示す。これを見ると、分割数を増やすにつれて境界がぼけていくのが分かる。すなわち、分割数は大きければよいのではなく、適切な値があると考えられる。今回の実験では $N=4$ のときに最もバランスが取れた再生像が得られた。

一般的な画質改善手法であるメディアンフィルタや平滑化フィルタを用いた場合、高周波成分を除去することはできるが、その結果はスペckルノイズの持つ極端に振動した値に影響されてしまい、物体そのものが持っている高周波成分も失ってしまう。例えば、図2に示すようなサイコロの目の中の光沢などの細かい点は、周りの影響を受け消えてしまう可能性がある。しかし、分割重ね合わせ法では周辺画素の影響を受けないため、このような細かい点も失うことなくスペckルノイズを低減することができる。

5. まとめ

1枚のホログラムを分割して複数枚のサブホログラムを作成し、各々の再生像の強度を足し合わせる、分割重ね合わせ法を提案した。そして、実験によりスペckルノイズが低減することを確認した。

参考文献

- [1] U.Schnars and W.Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction", *Appl. Opt.* 33,179-181 (1994).
- [2] 後藤和也, 「デジタルホログラフィの再生像における画質改善に関する研究」, 埼玉大学 (2006)
- [3] 鶴田匡夫, 「応用光学」, 培風館 (1996)
- [4] 谷田貝豊彦, 「光とフーリエ変換」, 朝倉書店 (1992)