

空間周波数フィルタリング法の光学的雑音の抑制

伊 藤 進 一* 白 子 善 久**
川 田 直 克*** 草 野 充 春***

Optical Noise Suppression in a Spatial Filtering System

Shin-ichi ITOH, Yoshihisa SHIRAKO
Naoyoshi KAWADA and Mitsuharu KUSANO

The optical noise which is generated by the defects of the optical elements in a spatial filtering system degrades the output image. In the present report, the new type of the time-averaging optical noise suppressor is proposed and examined. This noise suppressor can successfully suppress the optical noises generated by the all components in the system without extinguishing the high spatial frequency component of about 100 lines/mm in the input image. In order to achieve such high resolving power, the Moiré pattern between the input plane the output one is used in an alignment of this system.

1. 序 論

レーザーが 1960 年代に実用化されると科学技術の各分野に大きな影響を及ぼした。画像記録、画像処理の分野でも従来適切な光源がなく不満足な形でのみ実現されていたホログラフィー、空間周波数フィルタリング法（または光再回折法）を実用可能なものにした。この分野におけるレーザー利用の根底にあるのはそのコヒーレンシーであり、これにより波動光学的理論で光を理想的単色光とみなして得られる各種計算結果が現実のものとなったのである。

本論文は空間周波数フィルタリング法に寄生する光学的雑音の抑制法に関する研究報告である。以下で空間周波数フィルタリング法について簡単に説明する。これは入力画像の振幅透過率分布を光学的にフーリエ変換してその変換面に処理用フィルターを挿入して再度光学的フーリエ変換する

ことによって希望する処理画像を得る方法である。第 1 段階の光学的フーリエ変換で使用する光学系は、平面光波—入力画像—空間—凸レンズ—空間—観測面（フーリエ変換面）である。ここでレンズの焦点距離と第 1, 第 2 の空間の間隔はすべて f とする。入力画像の振幅透過率分布 $g_1(\mathbf{r}_1)$ と観測面の振幅分布 $g_2(\mathbf{r}_2)$ は、付録で導入した空間演算子 S_f およびレンズ演算子 $\mathcal{L}_{1/f}$ をこの光学系に対応させることにより結びつけることができる。

$$g_2(\mathbf{r}_2) = S_f \mathcal{L}_{1/f} S_f g_1(\mathbf{r}_1)$$

ここで $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ はそれぞれ入力面および観測面上の光軸を原点とする位置ベクトルである。 S_f をフーリエ変換演算子として付録に示した関係式 (A 7) と (A 6) を利用すると次のようになる。

$$g_2(\mathbf{r}_2) = (\mathcal{F}_f^{-1} \mathcal{L}_{1/f} \mathcal{F}_f) \mathcal{L}_{1/f} \times (\mathcal{L}_{1/f}^{-1} \mathcal{F}_f \mathcal{L}_{1/f}^{-1}) g_1(\mathbf{r}_1)$$

$\mathcal{L}_{1/f} \mathcal{L}_{1/f}^{-1} = 1$ に注意すると、

$$g_2(\mathbf{r}_2) = \mathcal{F}_f^{-1} \mathcal{L}_{1/f} \mathcal{F}_f^2 (\mathcal{L}_{1/f}^{-1} g_1(\mathbf{r}_1))$$

\mathcal{F}_f^2 は反転 ($\mathbf{r}_1 \rightarrow -\mathbf{r}_1$) を行い、 $\mathcal{L}_{1/f}^{-1}$ が偶関数であることを用いると、

$$g_2(\mathbf{r}_2) = \mathcal{F}_f^{-1} \mathcal{L}_{1/f} \mathcal{L}_{1/f}^{-1} \mathcal{F}_f^2 g_1(\mathbf{r}_1)$$

* 写真工学科助教授 ** 写真工学科 51 年度卒業

*** 同科 52 年度卒業

昭和 53 年 9 月 27 日受理

$$\begin{aligned}
 &= \mathcal{F}_f^{-1} \mathcal{F}_f^2 g_1(\mathbf{r}_1) \\
 &= \mathcal{F}_f g_1(\mathbf{r}_1)
 \end{aligned}$$

となり、上述の光学系はフーリエ変換作用をすることが示された。さらにフーリエ変換面にフィルター F を挿入し再度フーリエ変換をすることによって得られる出力画像の振幅分布 $g_3(\mathbf{r}_3)$ は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 g_3(\mathbf{r}_3) &= \mathcal{F}_f F \mathcal{F}_f g_1(\mathbf{r}_1) \\
 &= (\mathcal{F}_f F * \mathcal{F}_f^2 g(\mathbf{r}_1)) \\
 &= (\mathcal{F}_f F * g(-\mathbf{r}_1))
 \end{aligned}$$

ここで(*)はコンボリューションを表わす。このように実空間ではコンボリューションに対応している画像処理の場合には、単にフーリエ変換面にフィルターを挿入することによって行うことができ、これが空間周波数フィルタリング法の大きな利点となっている。

適当なフィルターを用いることにより、ボケの修正、コントラストの修正、位相物体の検出、特定画像の抽出、微分等が可能である。

2. 光学的雑音

ところでレーザー光の高度の可干渉性は一方で以上のような有用な画像処理を可能にするが、他方で非干渉光が見逃がしていたフーリエ変換レンズの微少な欠陥によっても光を回折させる。この回折像は出力画面上に雑音となって分布し処理画像の画質の低下を引き起す。この欠陥とはゴミ、傷、気泡、コーティングの不完全性等である。これらはレンズ製作過程でどうしても生ずるものである。雑音の形状は欠陥が一つの点であれば同心円状の回折パターンになるが通常欠陥は無数に存在するのでこれらが重畳して出力画面の全面に分布する乱雑なパターンになっている。この雑音は空間周波数フィルタリング法の重大な欠陥であり、これを低減することは実用化に際して重要なので、各種の雑音抑制法が考案されている。

Thomas¹⁾ は入力画像に入射するコリメートされたレーザービームを光軸に対して斜めに置かれ

た光学平面を通過させ、露光中に光学平面を回転させる方法を提案している。この方法によると出力画面上で出力画像は静止しているが、光学的雑音は露光中に移動するので平均化されて抑制されることになる。しかしながらフーリエ変換面における像は、露光中に回転するのでこれに追従して処理用フィルターも移動させなければならない。これは極めて技術的に困難である。

Grebowsky ら²⁾ はフーリエ変換レンズを回転させることにより雑音抑制を試みた。この方法によると欠陥自身が移動し出力画面上で雑音は平均化される。処理された画像が静止しているためには、レンズを正確に光軸の回りに回転させなくてはならないが、多数のレンズで構成されているフーリエ変換レンズに対してこのような操作を行うことは実際上不可能であろう。

Nelson³⁾ は、多数のレーザーを光源として用いることを提案している。これはそれぞれの光源に対応して生ずる光学的雑音が相互に重なって大きな雑音は目立たなくなることを利用している。しかしこのためには十分多数の光源を用いなくてはならない。またフーリエ変換面に光源の数と同じだけのフーリエ変換像が生じるので画像処理用のフィルターはそれぞれの変換像に対して製作しなければならず、さらに使用可能なフィルターの大きさも制限を受ける。これらの事情により実用化はやはり難しい。

1974 年に Horner⁴⁾ によって用いられた方法は以上に述べた方法とは異なり実現が容易なこと、フーリエ変換像は移動しないこと、途中のすべての光学部品から発生する光学雑音が抑制されるという点で極めて優れた方法である。この方法の要点は入力画像および出力画像を記録するフィルムを光軸に対して垂直に互いに反対方向に正確に等しい距離だけ移動しつつ露光することである。この同期的操作によって出力フィルム上で処理された入力画像は静止し、一方光学的雑音はそれとは異なる動きをするので結局平均化されて抑制されることになる。またこの移動中もレーザー光は入

力画像に対して常に垂直に入射するためにフーリエ変換像は静止しているので処理用フィルターの使用法も従来のものと変らない。

3. 高解像力雑音抑制法

Horner の方法は優れた方法であるが限界もある。それは入力画像と出力画像記録フィルムの同期の移動にシャフトとギアを用いているためにそれらのたわみとバックラッシュ等によって完全な同期がとれない点にあり、入力画像は出力フィルム上をわずかではあるが移動し従って高い空間周波数成分は消えてしまう。Horner⁴⁾ の実験では限界周波数として 35本/mm を得ている。これは露光中における出力フィルム上での入力画像の移動量がほぼ $10\ \mu\text{m}$ であることを示しているが、シャフトおよびギアを用いてこれ以上の精度を求めることは困難であろう。

私達はこの点を解決し高い空間周波数も再現できる方法を考案した。この方法は本質的に Horner の方法の改良であって、図 1 に示すような装置を

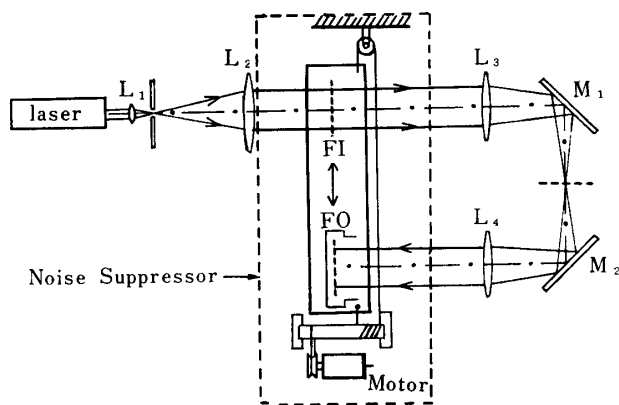


図 1 雑音抑制装置の概要

用いて実現される。この方法の基本となる考えは、空間周波数フィルタリング装置全体を鏡 (M_1, M_2) を用いることによって二つに折り曲げ入力フィルム (FI) および出力画像記録用のフィルム (FO) を装着したカメラを同一の台の上にしっかりと取り付けてモーターにより移動させながら露光することにある。このようにすると Horner の方法と同様の原理で雑音が抑制できるが、入力画像と出

力画像記録用フィルムは装置の構造上ほぼ完全な同期化された移動が行えるので高い空間周波数も消えることなく再現できることが期待できる。

詳しく本実験の装置について述べる。使用したレーザーは 15 mW He-Ne レーザーで波長は 6328 Å である。レーザービームの横断面内の光量の不均一性も雑音となるので短い焦点距離のレンズ (L_1) を用いてその焦点面上に集光する。良く知られているように焦点面上には、レンズに入射する直前のビームの横断面内の振幅分布のフーリエ変換像があらわれる。ピンホールを用いて中心部だけ通すことによって均一な光量分布を持った光が得られる。これをレンズ L_2 により平行光線にして入力フィルムに照射する。入力フィルムはスライド用マウントに取り付けられ、さらに上下左右に移動可能な台に固定されている。フーリエ変換用レンズ L_3, L_4 は焦点距離 500 mm, 有効径 100 mm のアクロマートレンズである。二つのレンズの焦点距離は 0.05% 程度の精度で等しくなっている。これにより入力画像と出力画像の寸法が高い精度で等しくなる。鏡 M_1, M_2 は大きさ 100 mm × 150 mm で全面で数波長の平面度を持っている。レンズ L_3, L_4 , 鏡 M_1, M_2 はマイクロメーターによって位置の微調整が可能である。入力フィルム (FI) およびカメラは鉄製の台に固定されている。この台にはボールベアリングが取り付けられていて、鏡面仕上げをした光学ベンチ上をモーターによって移動できるようになっている。以上の装置全体は振動の影響をさけるために重量各 200 kg の 2 本の光学ベンチ上に取り付けられている。

光学系の調整にはモアレ縞を用いる方法を考案した。このために、入力画像および出力画像記録用の一眼レフカメラのピントグラスとしてそれぞれ 30本/mm および 31本/mm の格子を記録した乾板を用いた。雑音抑制装置を作動しつつピントグラス上に見えるこれらの格子間のモアレ縞を顕微鏡により観察する。もし調整が不完全であればモアレ縞は移動するのでレンズ L_3, L_4 , 鏡 $M_1,$

M_2 を動かして微調整する.この方法によると移動量を約 $2\mu\text{m}$ 以下に抑えることが可能であるので 100 本/mm 程度の微細な像の再現も期待できる.

4. 実験結果

以上の装置による雑音抑制の効果をみるために格子を記録した入力フィルムを用いて実験を行った.この装置のフーリエ変換用レンズの F 数が5であることから回折によって決まる処理可能な格子の本数は 1 mm 当り

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{2F\lambda} = \frac{1}{2 \times 5 \times 6328 \text{ \AA}} \cong 160 \text{ 本/mm}$$

までである.そこで 30, 60, 90, 120 本/mm の格子を用意した.このために白黒のチャート原画を,一般撮影において 1000 本/mm の解像力を持つ Agfa-Gevault 社の 10 E 75 フィルムを用いて距離を変えて撮影を行った.120 本/mm の格子はカメラのレンズ自体の限界から十分なコントラストのものを作ることができなかった.

以上の入力画像を用いて実験を行った.30,

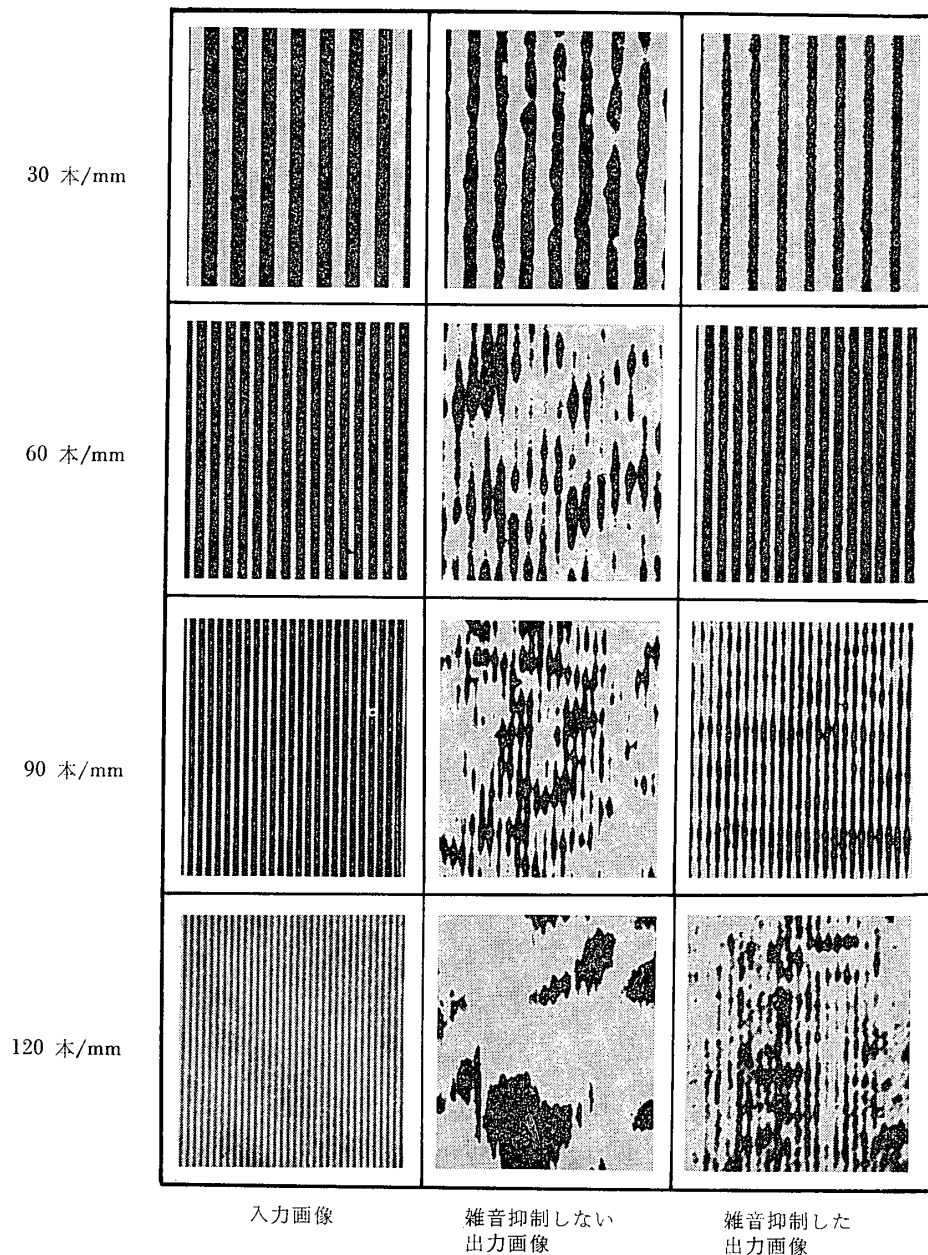


図 2 格子像入力の場合の雑音抑制の効果

60, 90, 120 本/mm の各格子に対して先ず雑音抑制処理を行わずに撮影を行った。次に雑音抑制装置を作動させてその効果を見た。使用したフィルムは、Fuji HR-II である。雑音抑制処理の効果を十分にあげるには露光中の移動距離をある程度大きくとって寸法の大きな雑音も平均化して消去する必要がある。しかし移動距離が大き過ぎるとフーリエ変換レンズ周辺の収差の存在する領域を利用することになり高い空間周波数成分は消えてしまう。そこでモアレ縞による前述の方法で歪の生じない領域を確認しておく。この領域は光軸を中心にして 20 mm 程度である。この領域をフィルムが横ぎる時間は 0.5~4 秒であるからこれを露光時間としてフィルムに最適露光量が与えられるようにレーザー光の光量を ND フィルターにより加減する。

それぞれの格子に対する撮影結果を入力画像と共に図 2 に示す。雑音抑制処理をしない出力画像は、光学的雑音のために乱れている。特に 90 本/mm, 120 本/mm の場合は雑音が著しく、120 本/mm では格子像は雑音によって覆われほとんど見えなくなっている。このような出力画像も雑音抑制装置を作動させることによって格子像が復元されているのがわかる。30 本/mm, 60 本/mm の場合その効果はほぼ完全であるが、90 本/mm, 120 本/mm では格子像の乱れは残っている。特に 120 本/mm では格子像の再現はやや不十分である。これは使用した空間周波数フィルタリング装置の MTF 自身の低下している領域に入っているためであろう。以上の実験からここで採用した雑音抑制法は入力画像の 100 本/mm 程度の高い空間周波数成分も維持しつつ雑音抑制が可能であることが示された。この値は Horner の方法の約 3 倍に達している。

5. 結 論

今回使用した空間周波数フィルタリング法の光学的雑音抑制装置の持つ利点を要約する。

(1) 簡単な装置によって光学系のすべてのレ

ンズ、鏡から発生する光学的雑音を抑制することができる。

(2) その構造上 100 本/mm 程度の入力画像の情報も失わずに雑音抑制が可能である。

(3) フーリエ変換像は静止しておりかつ余分な位相項が付け加わることがない。

(4) モアレ法を用いることによって装置の微調整が容易にできる。

(5) 装置が二つ折になっているので小型にでき操作が容易である。

このような利点を持つが、限界もある。すなわち光学的雑音は平均化することによって抑制されたのであってこれは全画面上に一樣に分布するバックグラウンドを形成し画像のコントラストを低下させている。この点についての改良が今後の方向であると考えている。

謝 辞

この研究の間に林一男教授に数々の激励をいただきました。ここに感謝の意を表します。

付 録

ある振幅透過率分布を持つ 2 次元開口に垂直に単色平面波を照射する。このとき生ずる回折波が空間を伝播したり、レンズにより位相変換を受けたりする様子を以下で演算子を用いて記述することを試みる。これにより光学変換の記述が簡略化されたり計算が簡単になったりする場合がある。

回折現象はキルヒホッフ積分によって表わされる。開口の振幅透過率分布を $g_1(\mathbf{r}_1)$ 、光の波数を k 、開口と観測面までの距離を z とする。開口の拡りが、 z に比して十分小さいとするとフレネル近似を用いることができ、観測面の振幅分布 $g_2(\mathbf{r}_2)$ は

$$\begin{aligned} g_2(\mathbf{r}_2) &= \frac{e^{ikz}}{z} (e^{i(k/2z)\mathbf{r}_1^2} * g_1(\mathbf{r}_1)) \\ &= \frac{e^{ikz}}{z} e^{i(k/2z)\mathbf{r}_2^2} \int e^{-i(k/z)\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2} e^{i(k/2z)\mathbf{r}_1^2} \\ &\quad \times g_1(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1 \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

となる．ここで開口と観測面の間の空間を $g_1(\mathbf{r}_1)$ を $g_2(\mathbf{r}_2)$ へ移す演算子 $S_z(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2)$ とみなすことにすると

$$g_2(\mathbf{r}_2) = S_z(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2) g_1(\mathbf{r}_1) \quad (\text{A } 2)$$

(A 1) と (A 2) を比較することにより

$$S_z(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2) g_1(\mathbf{r}_1) = h_{1/z}(\mathbf{r}_2) \mathcal{F}_z(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2) \times h_{1/z}(\mathbf{r}_1) g(\mathbf{r}_1) \quad (\text{A } 3)$$

ただし、 $h_{1/z}(\mathbf{r}) = e^{i(k/2z)r^2}$ であり、 $\mathcal{F}_z(\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2)$ はフーリエ変換を表わす．ここで重要でない因子 e^{ikz}/z は無視した．混乱が起きないならば (A 3) の関係は単に次のように書くことにする．

$$S_z = h_{1/z} \mathcal{F}_z h_{1/z}$$

次にレンズの位相変換作用について考える．凸レンズは近似的に平面波を収束する球面波に変換する．焦点距離を f とするとレンズ直後の平面における振幅はフレネル近似を用いて次のように与えられる．

$$\frac{e^{-ikR}}{R} = \frac{1}{f} e^{-ikf} e^{-i(k/2f)r^2}$$

ここで \mathbf{r} は平面上の光軸を原点とする位置ベクトルであり、 $R = \sqrt{f^2 + \mathbf{r}^2}$ である．任意の振幅分布 $g(\mathbf{r})$ を持つ光がレンズに入射した場合にはレンズ背後の振幅分布はレンズを演算子 $\mathcal{L}_{1/f}$ とみなすと

$$\mathcal{L}_{1/f} g(\mathbf{r}) = e^{-i(k/2f)r^2} g(\mathbf{r})$$

で与えられる．重要でない因子は無視した．すると

$$\mathcal{L}_{1/f} = e^{-i(k/2f)r^2} = h_{1/f}^{-1} \quad (\text{A } 5)$$

が成立する．演算子 S , \mathcal{L} , \mathcal{F} の間に次の諸関係を導くことができる．

$$S_\alpha = \mathcal{L}_{1/\alpha}^{-1} \mathcal{F}_\alpha \mathcal{L}_{1/\alpha}^{-1} \quad (\text{A } 6)$$

$$S_\alpha = \mathcal{F}_\alpha^{-1} \mathcal{L}_{1/\alpha} \mathcal{F}_\alpha \quad (\text{A } 7)$$

$$S_\alpha S_\beta = S_{\alpha+\beta} \quad (\text{A } 8)$$

$$\mathcal{L}_{1/\alpha} \mathcal{L}_{1/\beta} = \mathcal{L}_{1/\alpha+1/\beta} \quad (\text{A } 9)$$

(A 6) 式は次のように書き直すことができる．

$$\mathcal{L}_{1/\alpha} S_\alpha \mathcal{L}_{1/\alpha} = \mathcal{F}_\alpha$$

左辺は直ちに、レンズ-空間-レンズに対応させることができ、この光学系がフーリエ変換をすることがわかる．これは本文中で与えたものとは異なる光学的フーリエ変換法を与える．

参考文献

- 1) C. E. Thomas, Appl. Opt. **10**, 517 (1968).
- 2) G. J. Grebowky, R. L. Hermann, H. B. Paul, and A. R. Shulman, Appl. Opt. **10** 438 (1971).
- 3) patent
- 4) J. L. Horner, Appl. Opt. **13**, 2244 (1974).