



Title	電子計算機による焦点はずれ像の修正
Author(s)	前田, 純治; Maeda, Junji; 村田, 和美 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 81, 69-76
Issue Date	1976-08-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41375
Type	departmental bulletin paper
File Information	81_69-76.pdf



電子計算機による焦点はずれ像の修正

前田 純治* 村田 和美*
(昭和 51 年 3 月 27 日受理)

Restoration of Defocused Images Using a Digital Computer

Junji MAEDA and Kazumi MURATA
(Received March 27, 1976)

Abstract

Photographic images degraded by defocusing were restored by using a digital computer. Spatial frequency filtering was used digitally in order to restore the defocused images. The Wiener filter on the basis of the optimum filtering theory and the inverse filter were implemented in the actual restoration experiments. Some theoretical analysis was discussed and the experiments were performed for the images of binary and continuous tone objects. These experimental results show that the Wiener filter is applicable for the digital restoration of defocused images.

1. 緒 言

近年電子計算機を用いたデジタル画像処理が盛んになって来た。これは融通性があり且つ精度の高い処理が行なえるという計算機の特長を活かしたものである。我々はこの特長を利用して、光学系による撮影に際し焦点はずれによって不鮮明に記録された画像を、電子計算機を用いて修正する実験を行なったので報告する。

焦点はずれ像の場合、その結像系の OTF (Optical Transfer Function) は正、負の値を取りながら振動する場合が多く、空間周波数フィルタリングを用いてこのような像の修正を行なうには正、負にわたって振幅を持つフィルターが必要になる。このため焦点はずれ像の修正を光学的フィルタリングによりアナログ的に行なう場合は、修正フィルターの作製に技術的困難が伴う^{1,2)}。この点、計算機の処理の場合は容易に望みのフィルターが得られるという大きな利点を持つ。我々は焦点はずれ像を修正する空間周波数フィルターとして、Wiener フィルター (又は最小自乗平均誤差フィルター³⁾) を用いることにより比較的良好な修正結果を得ることができた。この Wiener フィルターは、焦点はずれ光学系の OTF の逆数の形を持つインバース・フィルターの欠点を補う性質を持っている。

本実験における焦点はずれ系は線形で、しかも範囲を限定したのでシフトインバリエントと考えることができるから、以下の議論はこれらの条件の下で行なわれる。

2. 理 論

図 1 は焦点はずれ光学系を示す。O' 面に焦点が合っている結像系 L によって物体面 O にあ

* 工学部応用物理学科 応用光学講座

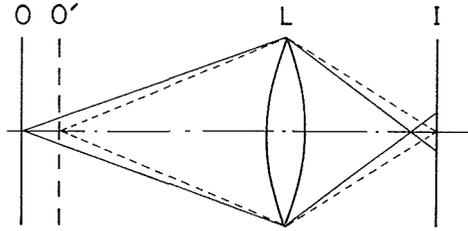


図 1 焦点はずれ光学系

る物体が結像記録されることにより、像面 I に焦点はずれ像が生ずる。物体面、像面の座標をそれぞれ (ξ, η) , (x, y) とすると、結像系が線形でシフトインバリエントという条件の下では、焦点はずれ像 $g(x, y)$ は

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n(x, y) \quad (1)$$

と書き表わすことができる。ここで $f(\xi, \eta)$ は物体の幾何学的像分布、 $h(x - \xi, y - \eta)$ は焦点はずれ光学系の点像分布関数を表わす。また $n(x, y)$ は、実験装置による雑音、フィルムの粒状性、および像に重畳するバックグラウンド雑音を含む未知の空間的雑音で、ここでは像に対し加法的であると仮定した。我々の実験の目的は、記録された焦点はずれ像から物体の幾何学的像にできる限り近い修正像を得ることである。

空間周波数面の座標を (u, v) とし、焦点はずれ像、物体の幾何学的像、点像分布関数、および空間的雑音のフーリエ変換をそれぞれ $G(u, v)$, $F(u, v)$, $H(u, v)$, および $N(u, v)$ とすると、(1) 式は空間周波数面で

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

と書ける。

この焦点はずれ像をインバース・フィルター $1/H(u, v)$ を用いて修正を行なうと、修正像 $f'(x, y)$ は

$$\begin{aligned} f'(x, y) &= \mathbf{F}^{-1}[G(u, v)/H(u, v)] \\ &= f(x, y) + \mathbf{F}^{-1}[N(u, v)/H(u, v)] \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで \mathbf{F}^{-1} は逆フーリエ変換の操作を表わす。(3) 式から明らかなように、このインバース・フィルターは $H(u, v) = 0$ の空間周波数で定義されておらず、またその付近では $H(u, v)$ が小さな値を持つため修正像において雑音が強調されてしまう。また、OTF の $H(u, v)$ は空間周波数が増すとその値が減少するが、雑音のスペクトル $N(u, v)$ はほぼ一定の分布を持つと考えられるため、高周波領域では雑音が増加してしまうという欠点を持つ。アナログ処理の場合はインバース・フィルターを作製する際、フィルムの非線形性のため $1/H(u, v)$ を近似的にしか実現できない。従って上記の雑音強調の効果が比較的少なく、良好な修正が行なわれると考えられる。一方、デジタル処理においては正確に $1/H(u, v)$ の合成が行なわれるため、雑音強調の効果が顕著に現われることが予想される。このためインバース・フィルターの使用はデジタル処理には適さない。そこで、雑音の影響を考慮したものとして、最適線形フィルタリングの理論から導かれる次のようなフィルターを考える。

まず $f(x, y)$ および $n(x, y)$ を不規則過程と考え、両者が定常な Gauss 過程であると仮定する。更に、これらが互いに統計的に独立で平均 0 であると仮定する。(この仮定は公式の簡単化のためのものであり、 $f(x, y)$ および $n(x, y)$ からそれぞれの実際の平均値を減じることにより達

成可能な仮定である。) このとき、次式のような線形な推定値

$$\hat{f}(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') q(x-x', y-y') dx' dy' \quad (4)$$

において、この推定値 $\hat{f}(x, y)$ と物体の幾何学的像 $f(x, y)$ との自乗平均誤差

$$\varepsilon = E[\{\hat{f}(x, y) - f(x, y)\}^2] \quad (5)$$

を最小にするように荷重関数 $q(x, y)$ を選ぶとき最適な推定値が得られる。ここで $E[\]$ は期待値を表わす。(4) 式は $\hat{f}(x, y)$ および $q(x, y)$ のフーリエ変換 $\hat{F}(u, v)$ および $Q(u, v)$ を用いて

$$\begin{aligned} \hat{f}(x, y) &= F^{-1}[\hat{F}(u, v)] \\ &= F^{-1}[G(u, v)Q(u, v)] \end{aligned} \quad (6)$$

と表わすことができる。これは、上のように選ばれた荷重関数 $q(x, y)$ のフーリエ変換 $Q(u, v)$ を修正フィルターとして焦点はずれ像のスペクトル $G(u, v)$ に作用させることにより、自乗平均誤差が最小になるという意味で最適の修正が行なわれることを示している。従って、この $Q(u, v)$ の波形を持つフィルターを最小自乗平均誤差フィルター又は Wiener フィルターと呼ぶ。

(5) 式を空間周波数面で表わすと

$$\varepsilon = \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left| Q(u, v) - \frac{H^*(u, v)\Phi_f(u, v)}{\gamma(u, v)} \right|^2 \gamma(u, v) + \frac{\Phi_f(u, v)\Phi_n(u, v)}{\gamma(u, v)} \right\} dudv \quad (7)$$

となる。ここで * は複素共役を表わし、 $\gamma(u, v) = |H(u, v)|^2 \Phi_f(u, v) + \Phi_n(u, v)$ である。また、 $\Phi_f(u, v)$ 、 $\Phi_n(u, v)$ はそれぞれ物体および雑音のポワースペクトル密度を表わす。この (7) 式から ε を最小にするフィルターとして

$$Q(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \Phi_n(u, v)/\Phi_f(u, v)} \quad (8)$$

が得られる³⁾。(8) 式で分母の第 2 項は丁度 SN 比の逆数に相当している。従って、SN 比が ∞ に近づくと、即ち雑音が非常に少なくなると、 $Q(u, v)$ は $1/H(u, v)$ 即ちインバース・フィルターに近づくと性質を持っている。 $H(u, v) = 0$ の空間周波数でも $Q(u, v) = 0$ となるためフィルターは定義され、またその付近での雑音の強調も少ない。更に、高周波領域での雑音の増加もインバース・フィルターと比較するとかなり少ないことが予想される。このように Wiener フィルターではインバース・フィルターの欠点を取り除かれているので、計算機によるデジタル処理に適していると考えられる。

さて、(8) 式により実際に Wiener フィルターを合成するには、焦点はずれ光学系の点像分布関数 $h(x, y)$ 、物体と雑音のポワースペクトル密度 $\Phi_f(u, v)$ および $\Phi_n(u, v)$ が既知でなければならない。我々の実験では点像分布関数のみが測定可能で既知であるが、ポワースペクトル密度は未知であるので、SN 比 $\Phi_f(u, v)/\Phi_n(u, v)$ をパラメーターとして変化させることにより最適の Wiener フィルターを推定した。

3. 実験方法

焦点はずれ像はカメラの焦点を物体距離 60 cm に合わせておいて、実際の物体を 72 cm の位置において焦点はずれとして絞り F/4 で撮影したものを用いた。点像分布関数は、十分細かい線物体を同時に結像し、その像の強度分布をマイクロフォトメーターでトレースすることによりその拡がりやを決定した。

図2は本実験における焦点はずれ像の修正の過程を示すブロック図である。焦点はずれ像は Flying Spot Scanner 型デジタル画像入力装置⁴⁾によってデジタル化され、コンピュータに入力される。このときサンプル点は 128×128 点、量子化は 64 レベルとした。デジタル処理は北大大型計算機センターの FACOM 230-75 により行なわれた。入力された焦点はずれ像は 2次元 FFT (高速フーリエ変換) を用いてスペクトルに変換する。一方、点像分布関数のフーリエ変換である OTF から予め設定された $\Phi_r(u, v)/\Phi_n(u, v)$ を用いて修正フィルターを合成する。この修正フィルターを焦点はずれ像のスペクトルにかけ合わせ、これを逆フーリエ変換後、デジタル画像出力装置⁴⁾にて表示することにより修正像が得られる。

Wiener フィルターを合成する際、 $\Phi_r(u, v)/\Phi_n(u, v)$ の値をパラメーターとして種々変化させてみたところ、ほぼ 100 前後の値が最適であることがわかった。この値を 10 以下とすると、低周波部分が多く通過するフィルターとなるためぼけ量の十分な修正が行なわれず、また逆にこの値を 250 以上にとると、高周波部分が非常に多く通過するフィルターとなるためぼけ量の修正は行なわれるが、同時に高周波領域の雑音を過度に増加させてしまうという結果が得られた。

4. 実験結果と考察

ジームンスターおよび中間調を含む人物写真の 2 種類の物体の焦点はずれ像について修正実験を行なった。図3はジームンスターの焦点はずれ像で、いったんコントラストが消滅してから像の反転(偽解像)が見られる。図4は Wiener フィルターを用いてこの焦点はずれ像を修正した結果であり、像の反転が良く修正されており、またコントラストが回復して放射上の幅の部分の輪郭が明確になっていることがわかる。この修正に用いた Wiener フィルターは、一様な円板状の点像分布関数を用いて合成した。これは本実験の結像光学系は焦点はずれが大きいため収差が無視できると仮定し、また回折の影響も考えなくて良い、即ち幾何光学的近似が成立することを仮定したためである。また $\Phi_r(u, v)/\Phi_n(u, v) = 100$ にとった。用いた Wiener フィルターは回転対称であるので図5にその片断面図を示す。(a) 図が修正フィルターの絶対値部分即ち振幅フィルターを表わし、(b) 図が修正フィルターの偏角部分即ち位相フィルターを表わしている。

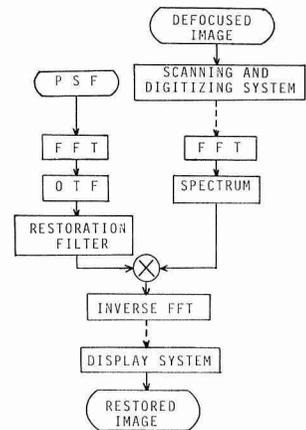


図2 修正過程のブロック図

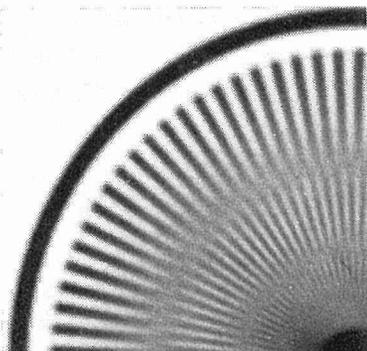


図3 焦点はずれ像

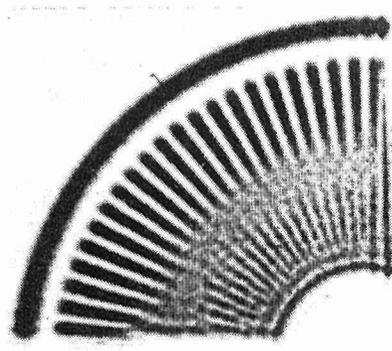
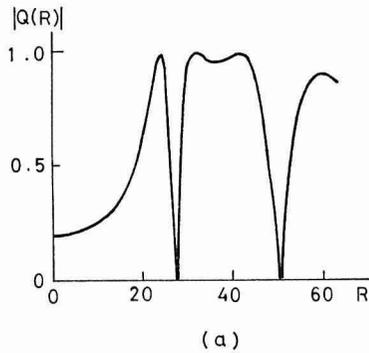
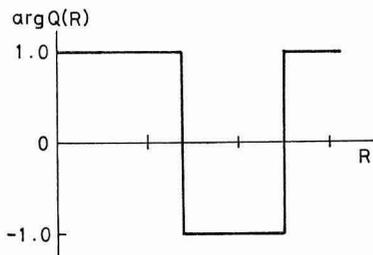


図4 図5の Wiener フィルターによる修正像



(a)



(b)

図5 Wiener フィルター ($\phi_f/\phi_n=100$)
 (a) 振幅フィルター
 (b) 位相フィルター

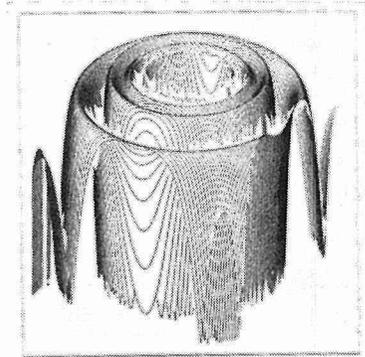


図6 図5(a)の振幅フィルター

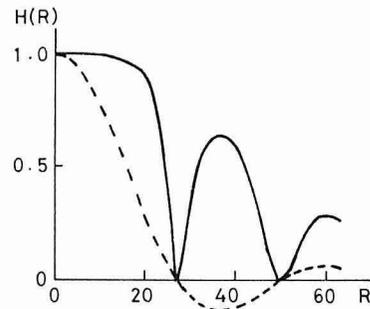


図7 修正前(---)および修正後(—)のOTF



図8 焦点はずれ像



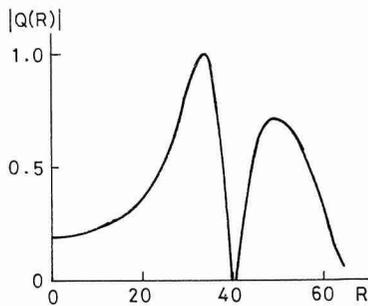
図9 図10の Wiener フィルターによる修正像

(a), (b) 図共に横軸の R は計算機上での動径座標でありサンプル点を示している。(a) 図の縦軸は規格化した相対値であり, (b) 図の縦軸は偏角が 0 のところを 1.0 , π のところを -1.0 とした。図6は図5の(a)図の振幅フィルターの形状を3次的に示したものである。図7に修正前後の OTF を示す。破線が修正前, 実線が修正後の OTF である。この図から像の反転が修正されていることがわかり, また高周波領域が強調されていることから輪郭が明確になることが理解される。尚図4の修正像においてジューメンスタースターの空間周波数の高い部分を覆っているのは, デジタル画像入力装置の分解能以上の空間周波数をカットすることにより aliasing 誤差を

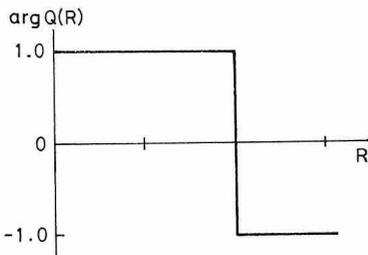
避けているためである。

図8は人物写真の焦点はずれ像である。これをジーンズスターの場合と同一の Wiener フィルターを用いて修正したところ、ぼけ量の十分な修正が行なわれず、しかも高周波領域の雑音の強調も幾分見られた。これは点像分布関数として単純な円板関数を仮定したためと思われるので、その影響を和らげるため我々は Gauss 型に近い点像分布関数を仮定し、 $\Phi_f(u, v)/\Phi_n(u, v)=100$ として Wiener フィルターを合成した。図9はこの Wiener フィルターによる修正像である。図8の焦点はずれ像と比較すると、人物の眼の部分或いは服装の部分などでコントラストが回復しており、比較的良好な修正がなされていることがわかる。このとき用いた Wiener フィルターの振幅、位相フィルターの片断面図を図10に、振幅フィルターの3次元表示を図11に、また修正前後の OTF を図12にそれぞれ示す。

図9の修正像を見るとまだ幾分高周波領域の雑音が強調されている。我々は $\Phi_f(u, v)/\Phi_n(u, v)=$ 一定としたことにこの原因があるだろうと考え、 $\Phi_f(u, v)/\Phi_n(u, v)=100 \exp(-63/R)$ として Wiener フィルターを合成してみた。即ち、雑音のスペクトルはほぼ一定の分布を持つが、一方物体のスペクトルは高周波領域で減少することを考慮したものである。ここで R は計算機上での動径座標である。この単調減少する SN 比を用いて合成した Wiener フィルターの振幅、位相フィルターの片断面図を図13に、振幅フィルターの3次元表示を図14に示す。図13(a)と図10(a)の振幅フィルターを比較すると、図13(a)の方は低周波部分の通過が若干増加し、高周波部分の通過が押さえられていることがわかる。図13の Wiener フィルターを用いて修正を行なった結果を図15に示す。この修正像を図9の修正像と比較すると、確かに高周波領域の雑音の強調が



(a)



(b)

図10 Wiener フィルター ($\Phi_f/\Phi_n=100$)

- (a) 振幅フィルター
(b) 位相フィルター

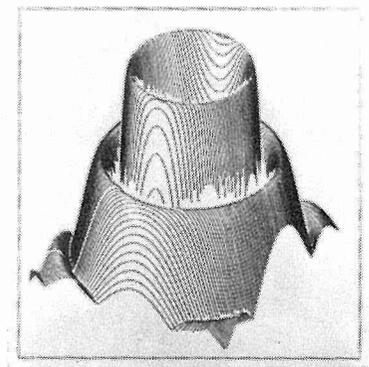


図11 図10(a)の振幅フィルター

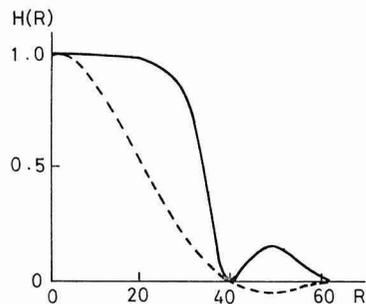


図12 修正前 (---) および修正後 (—) の OTF

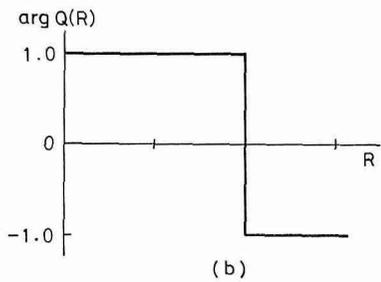
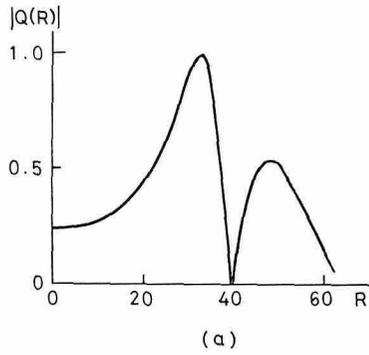


図 13 Wiener フィルター
 $(\phi_f/\phi_n=100 \exp(-63/R))$
 (a) 振幅フィルター
 (b) 位相フィルター

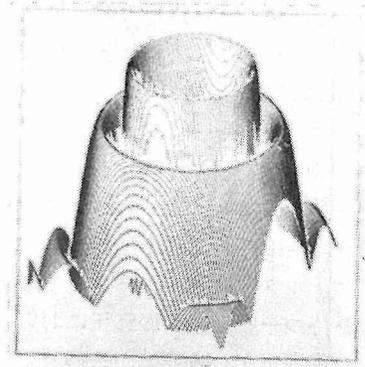


図 14 図 13 (a) の振幅フィルター



図 15 図 13 の Wiener フィルターによる修正像

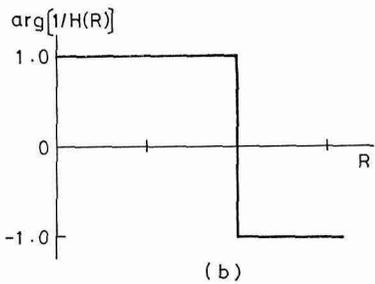
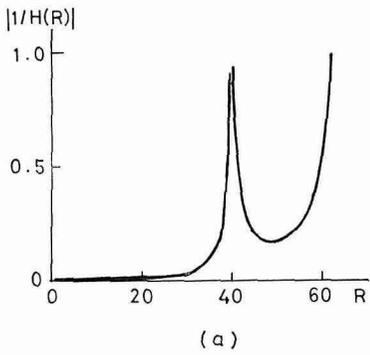


図 17 インバース・フィルター
 (a) 振幅フィルター
 (b) 位相フィルター

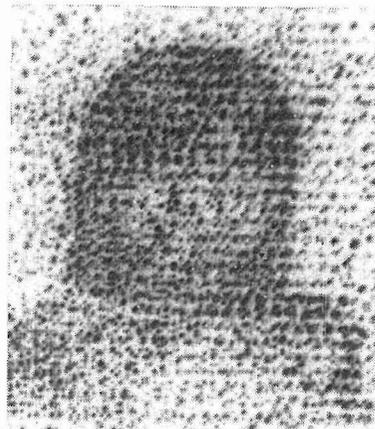


図 16 図 17 のインバース・フィルターによる修正像

少なくなっており、より良好な修正がなされていることがわかる。

Wiener フィルターによる修正と比較するためインバース・フィルターによる修正を行なった結果を図 16 に示す。このインバース・フィルターは $\phi_f(u, v)/\phi_n(u, v)=100000$ として合成された Wiener フィルターによって近似したもので、図 17 にその振幅、位相フィルターの片断面図を示す。図 16 の修正像を見ると、高周波領域の雑音が極度に強調されて逆に像が劣化されてしまっており、予想通りインバース・フィルターはデジタル処理に適さないことがわかる。

以上の実験結果から、Wiener フィルターによる焦点はずれ像の修正の有効性が確かめられた。Wiener フィルターの合成にあたっては、点像分布関数の形状が最も重要な意味を持つこと、特に中間調を持つ一般の写真の修正においてそうであることがわかった。また SN 比の $\phi_f(u, v)/\phi_n(u, v)$ の選択が次に重要で、このパラメーターは特に高周波部分の通過特性に効くため、焦点はずれ像の輪郭の明確化と高周波領域の雑音の強調の程度に影響を与えることがわかった。

5. 結 言

電子計算機によるデジタル処理を用いた焦点はずれ像の修正について報告した。計算機上での空間周波数フィルタリングによる修正が行なわれ、インバース・フィルターの欠点を補う Wiener フィルターが用いられた。Wiener フィルターは、その理論的導出にあたって物体を定常な Gauss 過程と仮定する難点があり、また実際の合成に際して点像分布関数および物体と雑音のパワースペクトル密度が何れも既知でなければいけないという制限を持っている。それにもかかわらず、2種類の物体の焦点はずれ像について比較的良好な修正結果が得られ、焦点はずれ像の修正に Wiener フィルターを用いる有効性が確かめられた。

最後に、本研究においてソフトウェアの面で御協力頂いた馬場直志君と塩昭夫君に御礼申しあげる。

参 考 文 献

- 1) Tsujiuchi, J.: "Progress in Optics," 2 (1963) p. 131, North-Holland Pub. Co.
- 2) Stroke, G. W. and M. Halioua: Phys. Letters 33 A (1970) p. 3.
- 4) Helstrom, C. W.: J. Opt. Soc. Amer. 57 (1967) p. 297.
- 5) 村田和美, 前田純治, 板谷英朗: 北大工学部研究報告, 74 (1974) p. 53.