

# 画像の空間フィルタによる情報処理と再構成

Information Processing of Image by Spatial Filter  
and Reconstruction

宮崎保光

Yasumitsu Miyazaki

## 1. はしがき

メディア分野のエレクトロニクスの展開は、1840年代の電信、その後、電話にはじまる、音声の伝達としての通信、写真電送によって進められた。1925年代には、ラジオ放送が開始され、一方、音声のレコード記録が発達し、1950年代には、テレビ放送が開始されているが、1960年代までは、人間の感覚世界へのパーソナルなエレクトロニクス応用は、耳と口に関係した、音の世界、音声、音響、音楽で主に展開されてきたに過ぎない。

通信技術の発展により、音よりも1000倍以上の情報容量が必要とされる画像の世界がパーソナルに用いられるようになったのは、1970年代以後である。1960年代には、大型コンピュータの発展により、音声のみならず、画像の情報処理、パターン認識が試みられるようになったが、ワークステーション、パーソナルコンピュータの発展により、画像が、音に換って、情報の主役になったのは、1980年代である。今日では、カラーテレビ放送、VTRの発達とともに、人間の目の感覚に対する視覚についても詳しく検討されてきている。コンピュータの発達により、図形のパターン認識も実用化されるようになってきている。

放送、通信、コンピュータのハードは、真空管、半導体回路、IC回路であるが、目に直接関わる光波の物理対象として、レーザが1960年に発明されて以来、光のコヒーレント性を用いた光ファイバ通信、ホログラフィ、光メモリ技術が高度に展開されるようになり、古典的な写真技術に大きなインパクトを与えてきた。

1970年代には、テレビ電話、ハイビジョン、レーザディスクが進展し、コンピュータの世界においても、パーソナルコンピュータ、スーパーコンピュータなど、小型から大型まで各種のタイプの情報伝送、処理機器をはじめ、画像入力センサー、液晶ディスプレイが開発されはじめた。

1980年代には、情報の発生、処理、伝送、記録は、音の世界から画像の世界に本格的に展開された。ワークステーション、パーソナルコンピュータも高度に発展し、分散処理システムが開始された。ニューメディアの世界の展開が始まり、画像の分野において、ビデオアート、コンピュータグラフィックス(CG)、コンピュータ援用デザイン(CAD)、コンピュータアート(CA)、など、かなり中広く多分野にわたり本格的に検討されるようになって

た。

1990年代には、パーソナルコンピュータも高機能となり、並列コンピュータ、ニューラルコンピュータも新しく展開されはじめた。また、ハイビジョン、光ファイバ通信、レーザディスク、コンピュータディスプレイも高度化し、ISDN(高度情報化ネットワーク)も発達が著しい。これらのメディアの発達により、編集、記録が、従来の映画より効率的で便利であるシステムが提供されつつある。文字、音、画像を、デジタル技術とソフト技術により一体化したマルチメディアの今後の発達は、新しい人間文化を創作し、効率的な新手段を提供することになると思われる。

## 2. エレクトロニクスを用いた画像処理

エレクトロニクスにより音声を伝送、処理、記録する技術は、かなりの高度化が進められてきたが、情報が音声にくらべ極めて多量である画像においては、伝送、処理、記録においても、画像信号を時間の系列信号として、技術が進められてきた。この場合は、高速な時間処理が必要となる。このため、デジタルで処理することは極めて難しく、動画については殆んどがアナログである。

大規模な画像シミュレーションを2次元画像として処理する場合、膨大な情報に対する高速処理が必要となり、時系列による逐次処理では効率が悪い。現在、超電導によるジョセフソン素子を用いたコンピュータ、VLSIによるスーパーコンピュータなど、ソフトについて各種の並列処理演算法が考案されているが、光波の空間的並列性および時間的高速性を活かした新しい論理、演算原理に基づいた光コンピュータが有望である。現在では、光コンピュータの基礎概念および設計方針はまだ確立されていないが、光コンピュータにおいては、情報を2次元のまま、直接、光により伝送したり、並列処理する方式が基本となると思われる。これまで、光ファイババンドルを用いた並列伝送は、N.S.Kapanyらにより研究が進められてきた<sup>1)</sup>。光ファイババンドルを用いて画像を送送する場合、ファイバの並びによる離散化雑音、ファイバ欠陥によるランダム雑音などによって画像が劣化する<sup>2,3)</sup>。しかしながら、これらの画像入力に対する処理は、

殆んど検討されていない。画像入力に、伝送途中に雑音が混入し、出力画像が乱れた場合、各種の空間フィルタ処理が有用であり、画像の再構成が可能である<sup>4-10)</sup>。光ファイババンドルにより良好な画像を伝送したり、乱れた画像を処理するには、伝送時などにより生じた雑音を、逆空間フィルタおよびウィナフィルタ、適応フィルタにより、除去し、歪を補正する必要がある<sup>11-13)</sup>。

筆者らは、良好な伝送画像を得ることおよび画像の並列処理を目的とし、雑音除去のための空間フィルタについて検討を行ってきた<sup>9,13)</sup>。とくに、修正したウィナフィルタによって、これらの雑音は除去可能であるが、画像のぼけが生じ、解像度が低下する。ぼけによる解像度の低下に対しては、解像度マスクを検討した。ここでは、空間フィルタとしてのウィナフィルタ、解像度向上のための解像度マスクの作成、それらのフィルタリング結果について示す。しかしながら、これらは、汎用性に欠け、限られた出力に対してのみ有効である。ここでは、拡張したウィナフィルタによる処理についても検討を行ない、雑音の重み係数の最適化についても示している。

### 3. 画像処理システム

図1に光ファイババンドルと画像処理システムの概略図を示す。スライド上の入力画像  $f_i(x, y)$  は、光ファイババンドルを用いて伝送する場合、光ファイバの並びによるファイバの周境界により決まる標本化関数  $s(x, y)$  や加法的なランダム雑音  $n(x, y)$  等によって劣化され、雑音を含む出力画像  $g_n(x, y)$  として出力される。

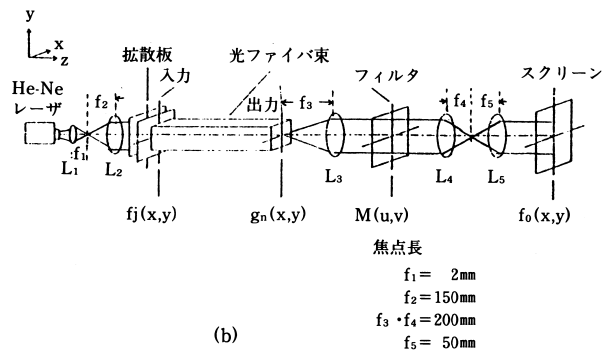
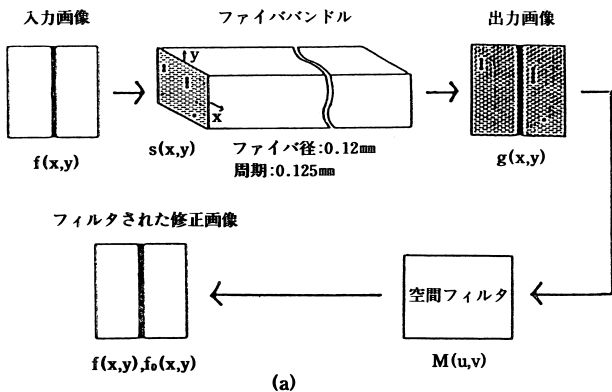


図1 システム概略図

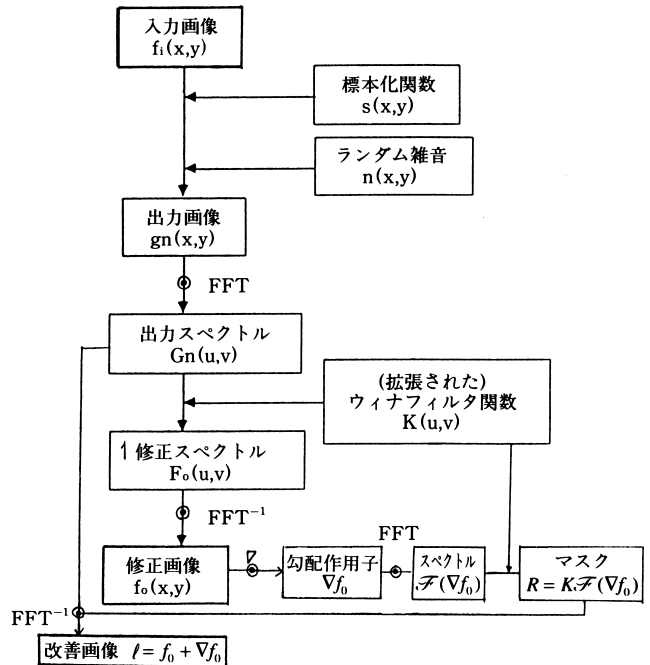


図2 フィルタリングアルゴリズム

図2に新しいフィルタリングアルゴリズムを示す。劣化した出力画像  $g_n(x, y)$  は

$$g_n(x, y) = f_i(x, y)s(x, y) + n(x, y) \tag{1}$$

で与えられる。ここで、 $f_i(x, y)$ ,  $s(x, y)$ ,  $n(x, y)$  はそれぞれ入力画像、ファイバの並びによる標本化関数、ランダム雑音を示す (図3-5)。

焦点距離  $f$  のレンズの前方、後方距離  $f$  に置かれた像は、つぎのフーリエ変換の関係にある。

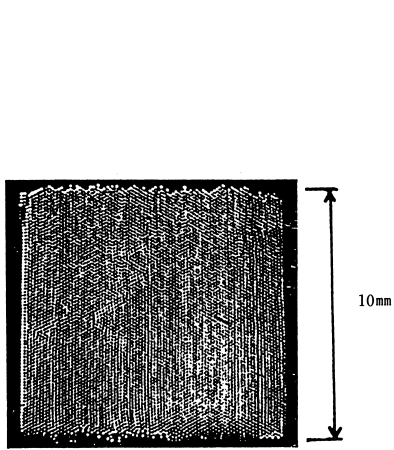


図3 光ファイババンドル断面  
(ファイバ径約 $d=120\mu\text{m}$ のもの)

空間周波数,  $f_c = \frac{1}{2d} = 4.17(\text{mm}^{-1})$

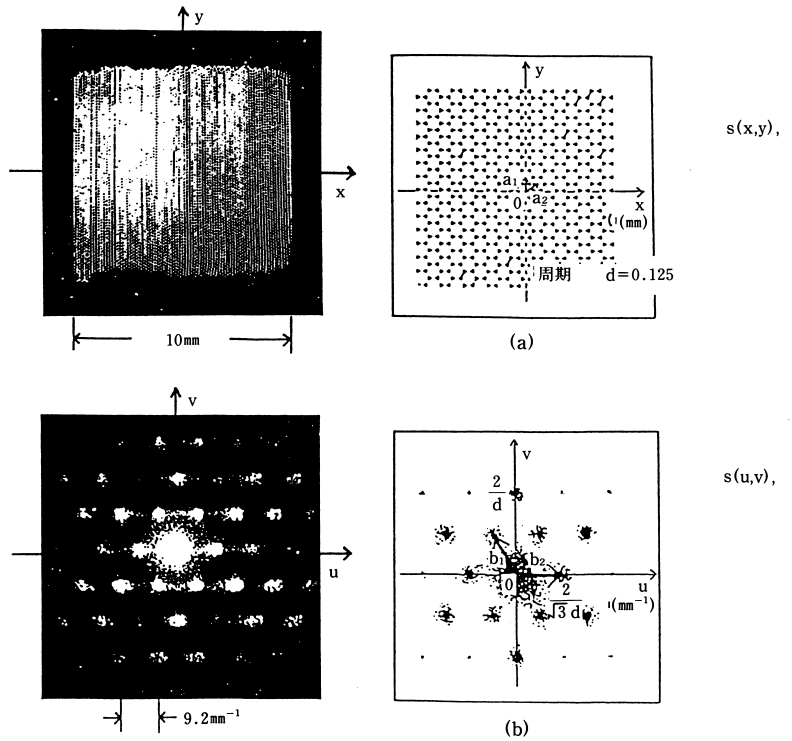


図4 ファイババンドル端面 $s(x,y)$ とそのスペクトル $S(u,v)$

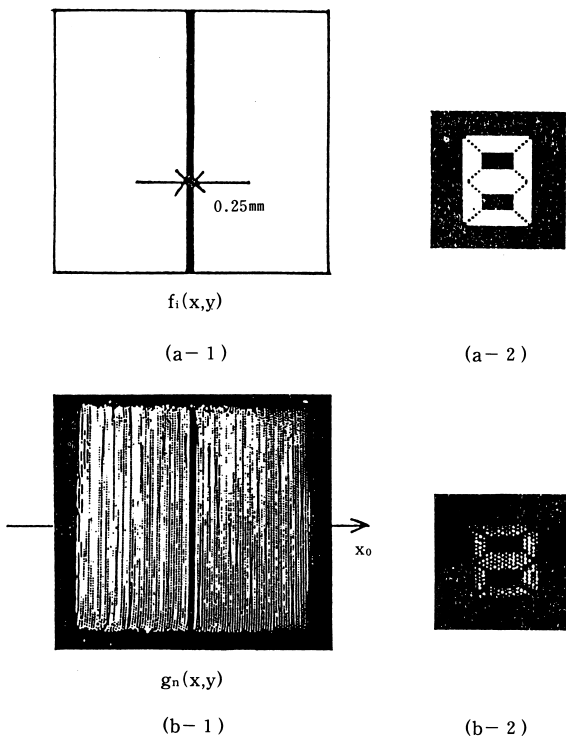


図5 ファイババンドルの入力 $f_i(x,y)$ と出力 $g_n(x,y)$

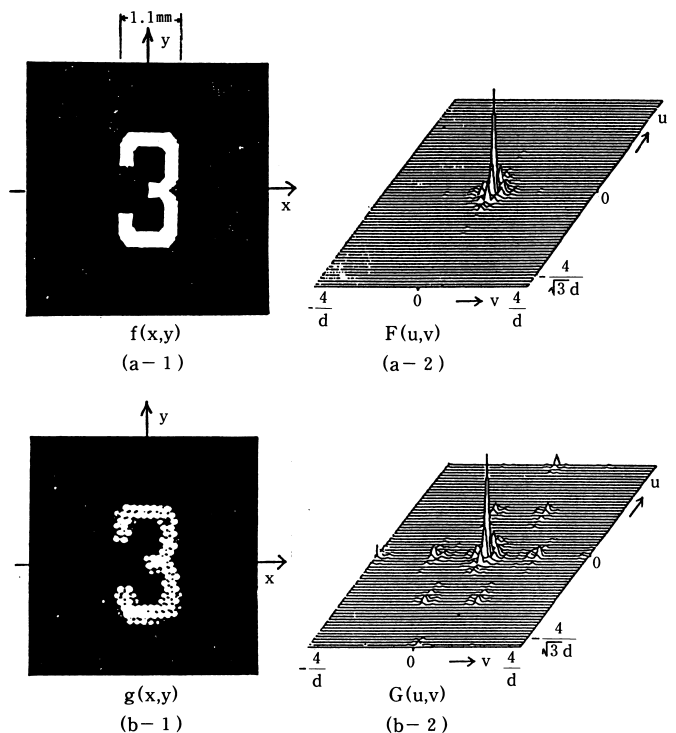


図6 ファイババンドルの入力画像 $f$ と出力画像 $g$ およびスペクトル $F,G$

像  $f(x, y)$  のフーリエ変換 (スペクトル) は、

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux) - j2\pi(vy)} dx dy \quad (2)$$

$$= \overline{\mathcal{F} f}$$

逆フーリエ変換は、

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(ux) + j2\pi(vy)} du dv \quad (3)$$

$$= \overline{\mathcal{F}' F}$$

図6は、入出力画像とスペクトルを示す。

ここでは、レンズ3によってこれをフーリエ変換し、瞳面において写真フィルム上の空間ウィナフィルタパターン  $M(u, v)$  を通し、フィルタリング処理を行う、レンズ4によって逆フーリエ変換し、スクリーン上に補正された修正画像  $f_o(x, y)$  を得る。画像処理を空間スペクトル面で行なう。

空間周波数  $(u, v)$  面において、ウィナフィルタ  $M(u, v)$  によってフィルタリングされたスペクトル  $F_o(u, v)$  は

$$F_o(u, v) = G_n(u, v) M(u, v) \quad (4)$$

となる。  $G_n(u, v)$  は  $g_n(x, y)$  のフーリエ変換である。これを逆フーリエ変換すると修正画像  $f_o(x, y)$  が得られる。ここで用いている空間フィルタ法は、フィルタ部分を薄膜型で実現でき、空間光変調器 (SLM) との組合せで、小型軽量化が可能な利点がある。図7、8、10、11は、フィルタの例を示す。

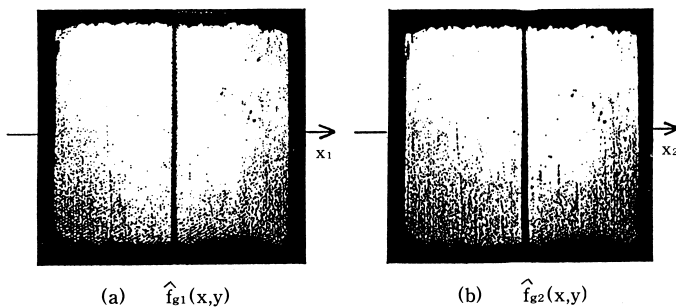


図9 画像出力  $g_n(x, y)$  (図5, (b-1)) に対する空間フィルタ  $F_1$ , および  $F_2$  によるフィルタリング結果の画像  $\hat{f}_{g1}, \hat{f}_{g2}$

今回サンプルとして使用している光ファイババンドルは、直径0.12mm、長さ1mのステップインデックス型光ファイバを六方配列した端面  $10 * 10 \text{mm}^2$  のものおよび径の小さいシングルモードファイバのバンドル (束) である。

図9はフィルタリング結果の例である。

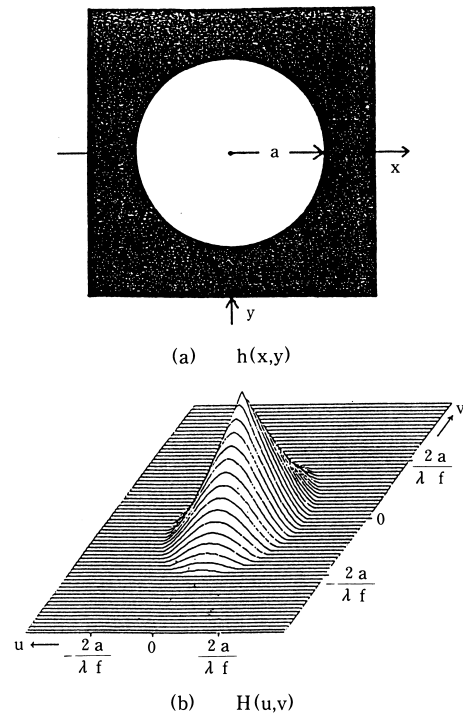


図7 円穴空間フィルタの  $h$  および光伝達関数  $OTF, H(u, v)$

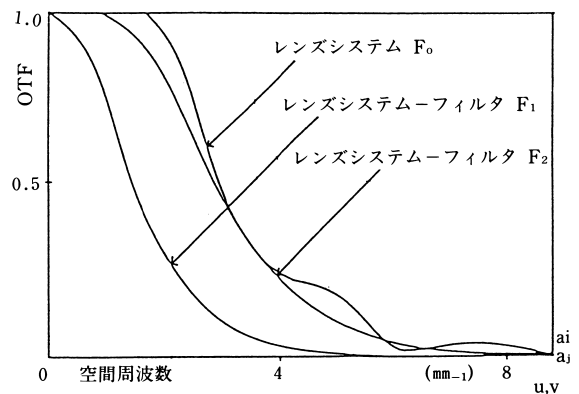


図8 円穴型空間フィルタの光伝達関数  $OTF, F_0, F_1, F_2$

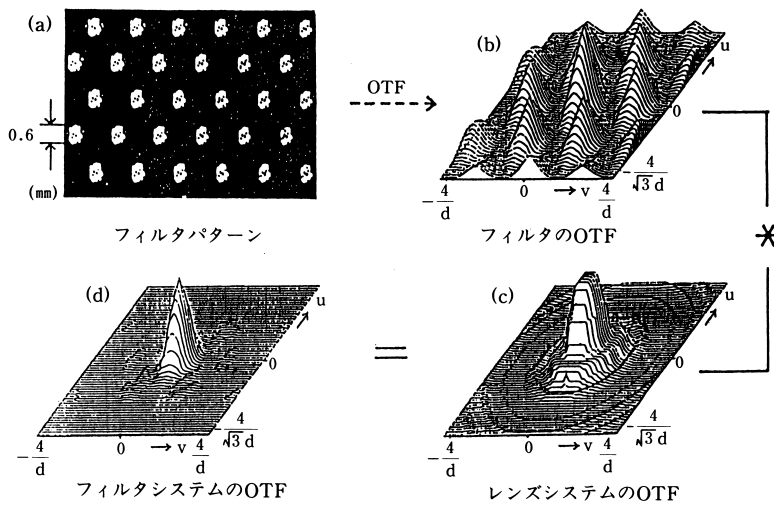


図10 フィルタシステムのOTF

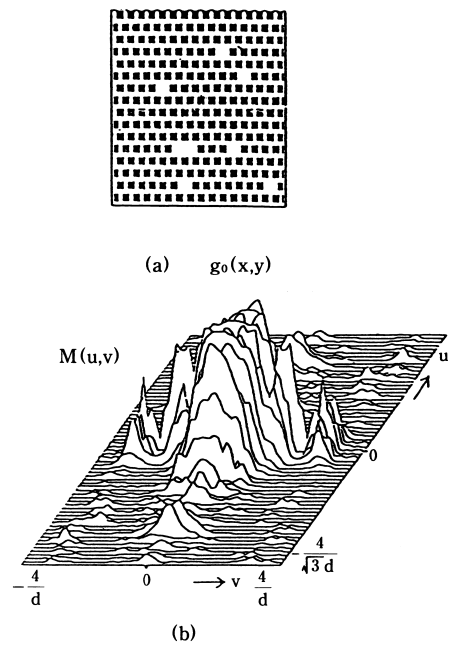


図11 ファイババンドル出力端面 $g_0$ とフィルタのOTF,  $M$

### 4. ウィナ空間フィルタ

画像復元問題においては、加法的雑音が無視できる場合には、逆フィルタをはじめ、これまでに様々な方法が提案されてきた<sup>5)6)7)</sup>。

ウィナフィルタは原画像と付加雑音の統計的分布が既知な時、原画像  $f_i(x, y)$  と補正した画像  $f_o(x, y)$  との差の平均二乗誤差

$$e^2 = E\{f_o(x, y) - f_i(x, y)\}^2 \tag{5}$$

が最小 (ウィナ規範) になるよう設計されるものである。

画像空間を  $L^2(R^2)$  とし、 $R^2$  の上の点  $\mathbf{r} = (x, y)$  での入力画像の光強度を  $f_i(\mathbf{r})$  とする。光ファイババンドルで伝送され劣化した画像  $g_n$  は、一般に、

$$g_n(\mathbf{r}) = \iint_{R^2} h(\mathbf{r} - \boldsymbol{\tau}) f_i(\boldsymbol{\tau}) d\mathbf{r}(\boldsymbol{\tau}) + n(\mathbf{r}) \tag{6}$$

で表される。ここで、 $g_n(\mathbf{r})$  は劣化した画像 (光ファイババンドルからの出力画像)、 $h(\mathbf{r})$  は光ファイババンドルの点像分布関数 (Point Spread Function: PSF) (あるファイバから他のファイバへの光の漏れなどを含む)、 $f_i(\mathbf{r})$  は原画像 (光ファイババンドルへの入力画像)、 $n(\mathbf{r})$  は確率場に属し、画像に加法的に作用する定常雑音、 $s(\mathbf{r})$  は標本化関数 (バンドル中のファイバの並

び) である。ここでPSFが既知で、移動不変であると仮定している。

ウィナフィルタは式 (5) で定義された誤差  $e^2$  を最小にするような修正画像  $f_o(\mathbf{r})$  を、出力画像  $g_n(\mathbf{r})$  の線形関数として、

$$f_o(\mathbf{r}) = \iint_{R^2} m(\mathbf{r} - \boldsymbol{\tau}) g_n(\boldsymbol{\tau}) d\boldsymbol{\tau} \tag{7}$$

のように得ようとするものである。

ここで、考えている場がすべて均一な確率場であると仮定すると、画像  $f, g$  の相互相関関数は、

$$R_{fg}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\sigma}) = \lim_{X, Y \rightarrow \infty} \frac{1}{4XY} \int_{-Y-X}^Y \int_{-Y-X}^X f(x, y) g(x + \boldsymbol{\tau}, y + \boldsymbol{\sigma}) dx dy \tag{8}$$

と示される。この定義を用いて、 $f_i(x, y)$  と  $g_n(x, y)$  の相互相関関数  $R_{fg}(x, y)$  および  $g_n(x, y)$  の自己相関関数  $R_{gg}(x, y)$  は、

$$R_{fg}(\mathbf{r} - \boldsymbol{\sigma}) = E\{f_i(\mathbf{r}) g_n(\boldsymbol{\sigma})\} \tag{9}$$

$$R_{gg}(\mathbf{r} - \boldsymbol{\sigma}) = E\{g_n(\mathbf{r}) g_n(\boldsymbol{\sigma})\} \tag{10}$$

と定義できる。式 (7) を式 (9) に代入し、関数  $m(\mathbf{r})$  に関して微分すると、直交射影の定理により、 $m$

( $\mathbf{r}$ ) が満足する条件として、

$$R_{fg}(\mathbf{r}) = \iint_{R^2} m(\mathbf{r} - \boldsymbol{\tau}) R_{gg}(\boldsymbol{\tau}) d\boldsymbol{\tau} \quad (11)$$

が求められる。式 (11) をフーリエ変換すると、求めるウィナフィルタの光伝達関数  $M(u, v)$  は、

$$M(u, v) = \frac{S_{fg}(u, v)}{S_{gg}(u, v)} \quad (12)$$

となる。ここで、 $S_{fg}(u, v)$ 、 $S_{gg}(u, v)$  はそれぞれ  $R_{fg}(x, y)$ 、 $R_{gg}(x, y)$  のフーリエ変換像であり、入力  $f_i(x, y)$  と雑音  $n(x, y)$  が無相関であれば、

$$S_{fg}(u, v) = H^*(u, v) S_{ff}(u, v) \quad (13)$$

$$S_{gg}(u, v) = |H(u, v)|^2 S_{ff}(u, v) + S_{nn}(u, v) \quad (14)$$

が言える。ここで、 $S_{ff}(u, v)$ 、 $S_{nn}(u, v)$  は入

力  $f_i(x, y)$  と雑音  $n(x, y)$  の自己相関関数のそれぞれのフーリエ変換像であり、Wiener-Khinchineの公式より、それぞれのパワースペクトルでもある。

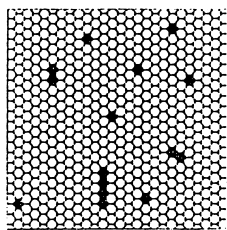
ここで、

$$S_{fg}(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} R_{fg}(x, y) e^{-j2\pi(ux) - j2\pi(vy)} dx dy \quad (15)$$

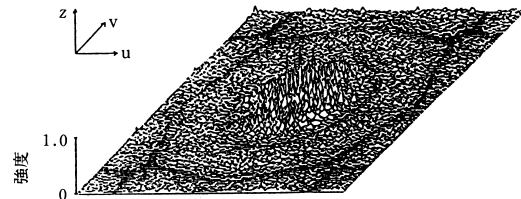
$H(u, v)$  は、PSFのフーリエ変換像であり、光ファイババンドルの光伝達関数 (Optical Transfer Function: OTF) でもある。すなわち、

$$H(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j2\pi(ux) - j2\pi(vy)} dx dy \quad (16)$$

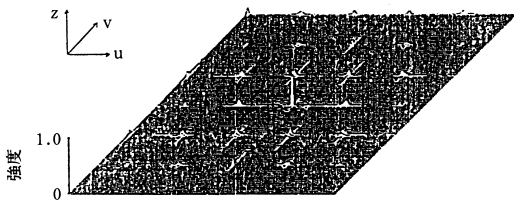
図12、13、14に、雑音のスペクトル、空間フィルタによる画像処理の例を示す。図15、16、17に、入出力画像とスペクトルを示す。



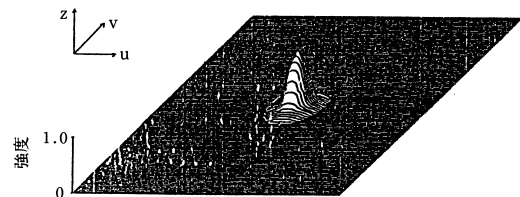
(a) モデル



(a) ランダム雑音のスペクトル  $N(u, v)$



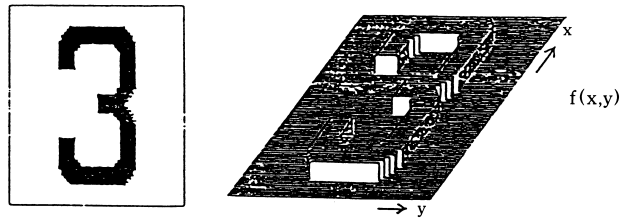
(b) (a)のスペクトル



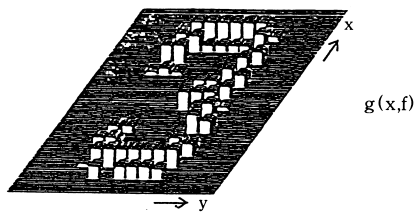
(b) 光ファイババンドルの光伝達関数  $H(u, v)$

図12 光ファイババンドル断面  $s(x, y) + n(x, y)$

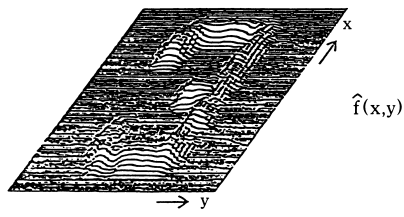
図13 光ファイババンドルにおけるランダム雑音のスペクトルとOTF



(a)

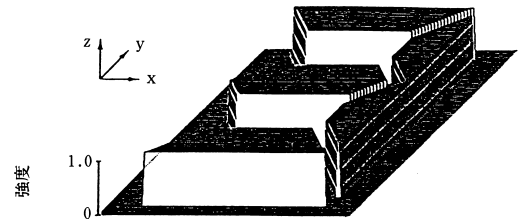


(b)

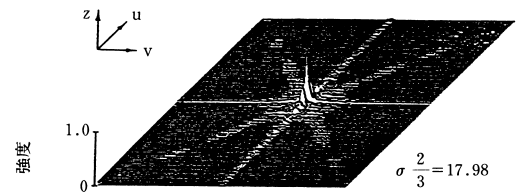


(c)

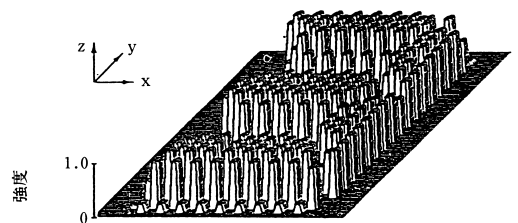
図14 画像入力f,出力g,フィルタリング結果f-hat



(a)入力画像 $f_{i3}(x,y)$

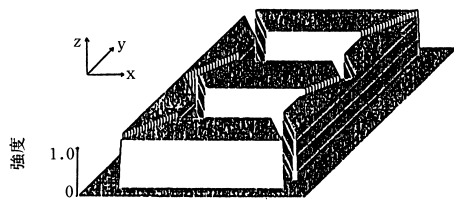


(b)入力のパワースペクトル $S_{r3}(u,v)$



(c)出力画像 $g_{n3}(x,y)$

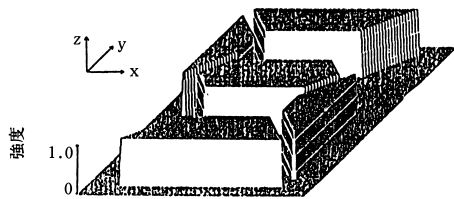
図15 入力'3'(j=3)の場合



(a)  $f_{i8}(x,y)$



$S_{r8}(u,v)$



(b)  $f_{i5}(x,y)$



$S_{r5}(u,v)$

図16 入力画像 $f_{ij}(x,y)$ と入力のパワースペクトル $S_{rj}(u,v)$ の比較



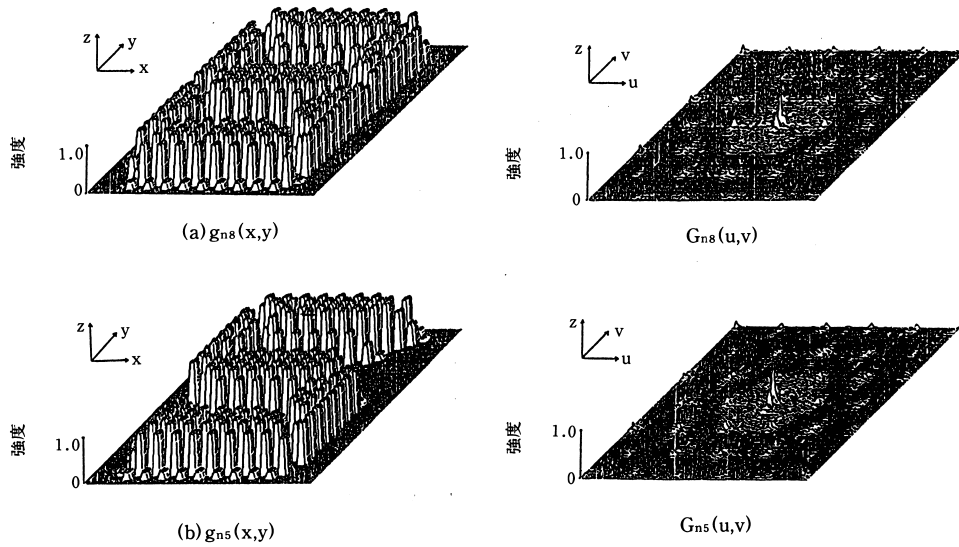


図17 出力画像 $g_{n_j}(x,y)$ と出力スペクトル $G_{n_j}(u,v)$

## 5. 改良型空間ウィナフィルタ

さらに、特性のよい空間フィルタを作成するため、ウィナフィルタの一般化を考える。

まず、次の2つの独立した変数 $\eta$ 、 $\mu$ を導入する。出力雑音の全二乗平均を、

$$\eta^2 = \iint_{-\infty}^{\infty} |N(u,v)M(u,v)|^2 dudv \quad (17)$$

入力画像と修正画像の差の平均二乗誤差を、

$$\mu^2 = \iint_{-\infty}^{\infty} |F_i(u,v) - M(u,v)H(u,v)F_i(u,v)|^2 dudv \quad (18)$$

で与える。ここで、 $N(u,v)$ はランダム雑音 $n(x,y)$ のスペクトル、 $M(u,v)$ は実現されるフィルタ関数、 $F_i(u,v)$ は入力画像 $f_i(x,y)$ のスペクトル、 $H(u,v)$ は光ファイババンドルの光伝達関数 (Optical Transfer Function:OTF) である。また、

$$|F_i(u,v)|^2 = S_{ff} \quad (19)$$

改善されたウィナフィルタはこれらを使って、

$$\lambda_1 \eta^2 + \lambda_2 \mu^2 = \text{minimum} \quad (20)$$

に従うよう定義される。ここで、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ はそれぞれの重み係数である。式(20)に式(17)と式(18)を代入し計算すると、改善されたウィナフィルタ関数 $M(u,v)$ が式(21)のように導出される<sup>6)</sup>。

$$M(u,v) = \frac{H^*(u,v)|F_i(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2|F_i(u,v)|^2 + \lambda_1/\lambda_2|N(u,v)|^2} \quad (21)$$

ここで、 $\lambda_1/\lambda_2 (= \lambda)$ は雑音の重み係数であり、変化させることによって、雑音をよく抑制するか ( $\lambda$ :大きい)、解像度を高めるか ( $\lambda$ :小さい)、目的に応じて選ぶことができる。これはWiener-Khintchineの公式を考慮すると、式(12)に雑音の重み係数 $\lambda$ を導入した形となっていることがわかる。

式(21)によってフィルタ関数を計算する場合、事前に入力画像のスペクトル $F_i(u,v)$ が必要となる。この場合には、どんな入力がある程度わかっている状態でフィルタリングを行うことになる。また、計算されたフィルタ関数は、計算に用いた入力スペクトルに対応する出力画像に対してのみ作用させるものであり、入力が未知の場合にも適用可能な汎用性に欠け、適用範囲が限られる。

ここでは、画像入力として、0~9の数字文字について述べる。図16の入力画像 (a)  $f_{i8}(x,y)$  (b)  $f_{i5}(x,y)$  に対するパワースペクトルは図16 (a)  $S_{f8}(u,v)$  (b)  $S_{f5}(u,v)$  のようになりに似た分布となっている。分散の面からみても、

$$\sigma_8^2 = 16.48 \quad (S_{f8} \text{の場合})$$

$$\sigma_5^2 = 15.64 \quad (S_{f5} \text{の場合})$$

となり、近い値をとる。これは、“8”や“5”以外の“0”……“9”についてもほぼ $\sigma^2 \approx 20$ 付近の値をとり、統計的に似た分布と言える。

## 6. 拡張型空間ウィナフィルタ

まず、入力と雑音のパワースペクトルの比 $L(u, v)$ を、ある入力画像 $f_{ij}(x, y)$  ( $j = 0, \dots, 9$ )のパワースペクトル $S_{fj}(u, v)$ を使って、

$$L(u, v) = \sum_j \left\{ \frac{S_{m_j}(u, v)}{S_{f_j}(u, v)} \right\} W_j \quad (22)$$

とする。ここで、 $W_j$ は入力の重み係数である。

これに、改善されたウィナフィルタでの雑音の重み係数 $\lambda_1/\lambda_2 = \lambda$ を導入し、式(21)に式(22)(13)(14)を代入すると、拡張されたウィナフィルタ関数 $K(u, v)$ は、

$$K(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + \lambda * L(u, v)} \quad (23)$$

と導出される。ウィナフィルタにおいては、本来、例えば、入力画像 $f_{i8}(x, y)$ に対する出力画像 $g_{n8}(x, y)$ は、 $W_8 = 1, W_j = 0$  ( $j \neq 8$ )の場合の $L_{(8)}$

( $u, v$ )を代入して計算されるフィルタ関数 $K_{(8)}(u, v)$ によってのみフィルタリング処理されるものである。しかし、前に述べたように、入力のパワースペクトルの分布が似ているものならば、雑音とのパワースペクトルの比である $L(u, v)$ をある値で近似させても、ある程度効果のあるフィルタ関数が導出されると思われる。 $L(u, v)$ の導出方法については、確率統計論的手法や反復による手法等が考えられるが、今回、 $j = 0 \dots 9$ のすべてのセグメントを含むと思われる $j = 8$ つまり、 $W_8 = 1, W_j = 0$  ( $j \neq 8$ )の場合の $L_{(8)}(u, v)$ を用いて計算したフィルタ関数 $K_{(8)}(u, v)$ によるフィルタリングシミュレーションを行った。

図12(a)に光ファイババンドル断面のモデル、図17(c)に図16(a)の入力画像 $f_{i8}$ に対するその出力画像

$g_{n8}$ を示す。また、 $K_{(8)}(u, v)$ の計算に用いた入力データである光伝達関数 $H(u, v)$ 、加法性ランダム雑音(図12(a)の黒い点状のもの)のスペクトル $N(u, v)$ をそれぞれ図13(a)(b)に示す。

図2は拡張されたウィナフィルタ関数によるフィルタリングアルゴリズムを示す。図22、23、24に実験例を示す。

## 7. フィルタリング結果と最適化

図18-21にフィルタリング結果を示す。図18にフィルタ関数 $K_{(8)}(u, v)$ 、図19に図17(a)の出力画像 $g_{n8}(x, y)$ に対するそのフィルタリング結果を示す。ファイバの並びによる標準化雑音や加法的なランダム雑音が除去されていることがわかる。雑音の重み係数 $\lambda_{(8)}$ に対する修正画像 $f_{o8}(x, y)$ の $a-b$ 断面における変化の様子により、改善の様子がしられる。

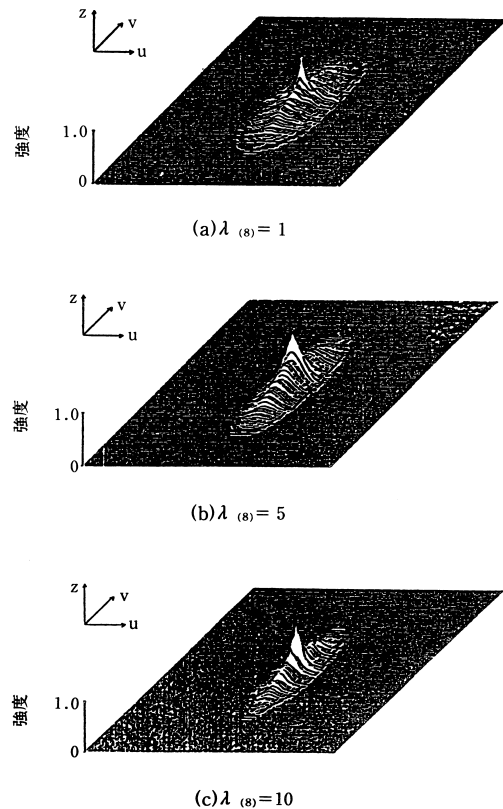


図18 フィルタ関数 $K_{(8)}(u, v)$   
( $W_8 = 1, W_j = 0$  ( $j \neq 8$ )の場合)

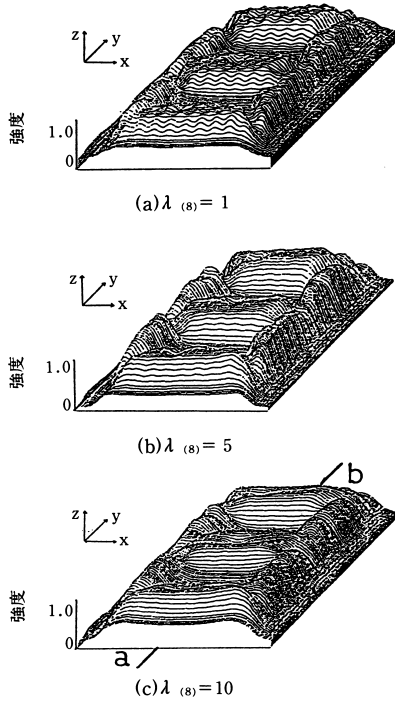


図19  $g_{n8}(x,y)$ に対する $K_{(8)}(u,v)$ によるシミュレーション結果 $f_{08}(x,y)$  ( $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$ の場合)

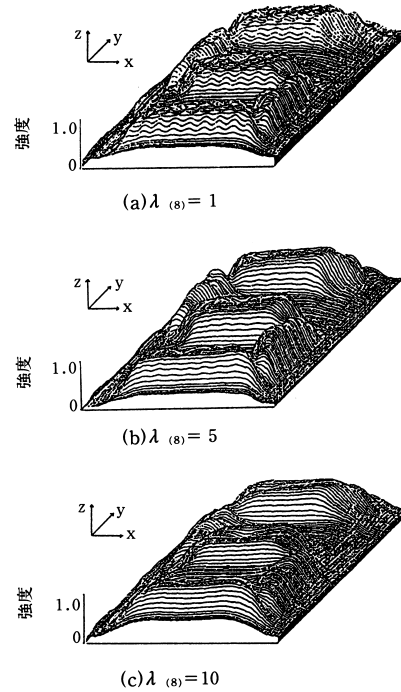


図21  $g_{n5}(x,y)$ に対する $K_{(8)}(u,v)$ によるシミュレーション結果 $f_{05}(x,y)$  ( $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$ の場合)

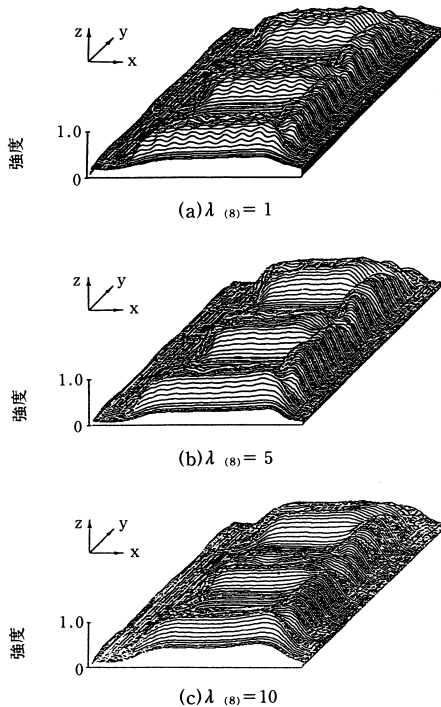


図20  $g_{n3}(x,y)$ に対する $K_{(8)}(u,v)$ によるシミュレーション結果 $f_{03}(x,y)$  ( $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$ の場合)

雑音の重み係数 $\lambda_{(8)}$ に対する修正画像 $f_{08}$ の変化の様子がわかった。そこで、この $\lambda_{(8)}$ の最適値を評価するために、次の3つの方法によって検討する。

これは画像全体に対するウィナ規範であり、式(5)の平均2乗誤差 $e^2$ による最も一般的な評価方法である。実際には、

$$e^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{f_0(i,j) - f_i(i,j)\}^2 \quad (24)$$

とする。但し、 $M$ と $N$ は縦方向と横方向の画素数(128)を表す。 $\lambda_{(8)}$ に対する画像全体の平均2乗誤差の変化を求めた。およそ $\lambda_{(8)} = 5$ 付近に最適値がくることがわかる。しかし、これだけでは(ランダム雑音による)大きな誤差が少しあるのか、(ぼけによる)小さな誤差が多くあるのか区別できない。そこで、次に、雑音除去と解像度向上に注目して評価する。

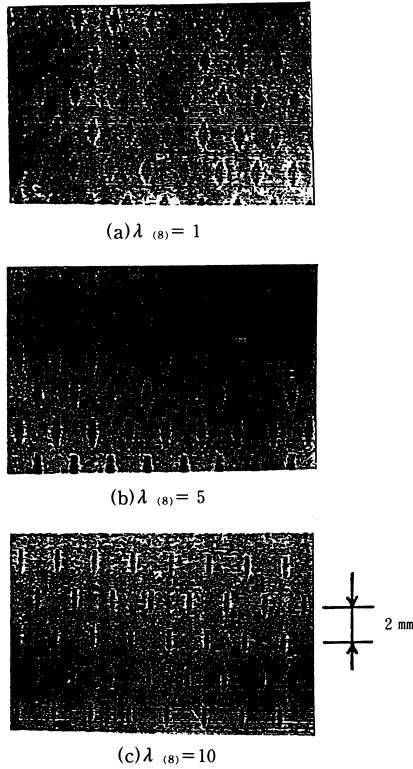


図22 実験用ハイブリッド型フィルタ  
( $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$  の場合)

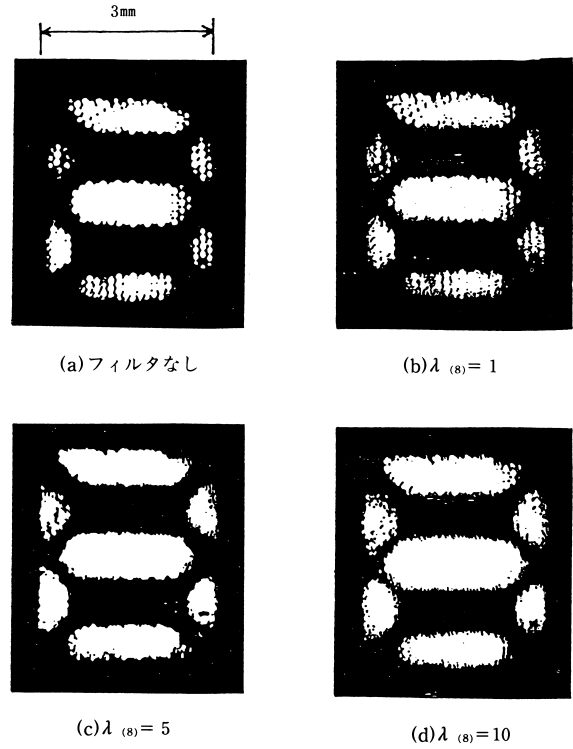


図23 図21,  $K_{(8)}$ のフィルタによる  
 $g_{n8}(x,y)$ に対する実験結果  
( $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$  の場合)

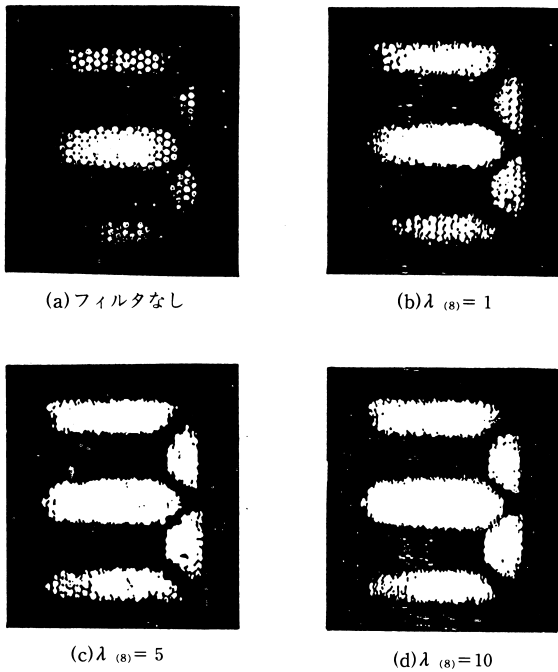


図24  $g_{n3}(x,y)$ に対する実験結果  
( $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$  の場合)

雑音がどの程度抑制されているかを評価するために、  
加法的ランダム雑音の部分のみの平均2乗誤差を、

$$e_n^2 = \frac{1}{V} \sum_V \{f_0(i,j) - n(i,j)\}^2 \quad (25)$$

と定義した。ここで、 $V$ は入力画像  $f_1$  と雑音  $n$  の重なり部分

$$\{V \cap f_1(i,j) \cap n(i,j)\} \quad (26)$$

である。 $\lambda_{(8)}$ に対する雑音部分の平均2乗誤差の変化を求めた。これにより、今回の場合、 $\lambda_{(8)}$ の大ききところで思ったより雑音が除去されていないことがわかる。

## 8. 解像度特性

ぼけに対する解像度の評価方法として、勾配の最大値

$$\max\{\nabla f_0(i,j)\} \quad (27)$$

に注目する。勾配が大きいということは、エッジが鋭いと考えられるので、解像度としても高いと評価できる。

$\lambda_{(8)}$ に対する最大勾配の変化を求めた。 $\lambda_{(8)} = 4$ 付近で最大となる。

拡張されたウィナフィルタ関数  $K(u, v)$  の汎用性を調べるために、 $W_8 = 1, W_j = 0 (j \neq 8)$  の場合の  $K_{(8)}(u, v)$  を入力が像“5”に対する出力が像  $g_{n5}(x, y)$  のスペクトル  $G_{n5}(u, v)$  に作用させた。図20、21 にシミュレーション結果を示す。 $g_{n8}(x, y)$  に作用させた場合に比べ、解像度的にやや低下がみられるが、良好にフィルタリングされていることが確認された。

改善されたウィナフィルタによるフィルタリングの際に生じるぼけによる解像度の低下に対して、解像度マスクなるものを提案し、解像度の向上に努めてきた<sup>3)</sup>。

まず、修正画像  $f_0(x, y)$  の勾配  $\nabla f_0(x, y)$  を使って、解像度向上のためにエッジを強調した改良画像  $l(x, y)$  を、

$$l(x, y) = f_0(x, y) + \nabla f_0(x, y) \tag{28}$$

と定義する。また、修正されたスペクトル  $F_0(u, v)$  は、

$$F_0(u, v) = G_n(u, v)M(u, v) \tag{29}$$

である。図1のシステムにおいてフィルタ部分で対数特性フィルム（ネオパンSS）を使用しており、これを考慮すると、

$$\begin{aligned} \log\{F_0(u, v)\mathcal{F}[\nabla f_0(x, y)]\} \\ \cong \mathcal{F}[f_0(x, y) + \nabla f_0(x, y)] \\ = \mathcal{F}[l(x, y)] \end{aligned} \tag{30}$$

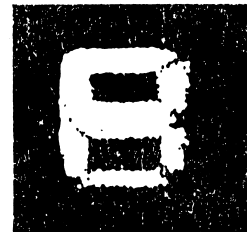
の関係が得られる。ここで、 $\mathcal{F}[\ ]$  はフーリエ変換演算子である。式 (28) (29) (30) により、

$$\begin{aligned} G_n(u, v)\{M(u, v)\mathcal{F}[\nabla f_0(x, y)]\} \\ = F_0(u, v)\mathcal{F}[\nabla f_0(x, y)] \\ = \mathcal{F}[l(x, y)] \end{aligned} \tag{31}$$

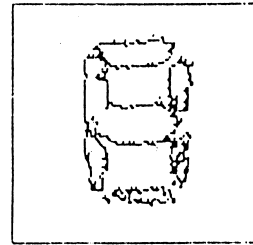
となる。つまり、空間周波数面で、劣化された出力のスペクトル  $G_n(u, v)$  に対して、式 (31) の  $\{ \quad \}$  の部分を作用させることによって、エッジの強調された改良画像  $l(x, y)$  の修正スペクトルが得られることがわかる。そこで、式 (31) の  $\{ \quad \}$  の部分を、

$$R(u, v) = M(u, v)\mathcal{F}[\nabla f_0(x, y)] \tag{32}$$

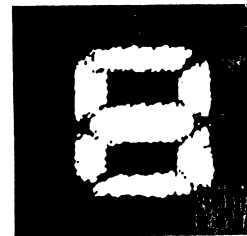
とし、新しいフィルタ関数  $R(u, v)$  として解像度マスクを作成し、フィルタ  $R$  により、改善されたウィナフィルタのみにくらべ、解像度の向上した改良画像が得られた。



(a) 修正画像  $f_0$



(b) 勾配  $\nabla f_0$



(c) 改良画像結果

図25 ウィナフィルタと勾配フィルタによる像再構成

図25に例を示す。この解像度マスクを拡張されたウィナフィルタと併用することによって、拡張されたウィナフィルタ関数  $K(u, v)$  を汎用的に他入力に作用させた場合に生じた解像度の低下をカバーし、良好な結果が得られる。

## 9. まとめ

雑音と入力のパワースペクトルの比を考慮したウィナフィルタおよび信号雑音比スペクトル近似することによってウィナフィルタを拡張し、それによるフィルタリングシミュレーションを行った。フィルタリング結果に対し、ウィナ規範、雑音除去、解像度向上について検討を行った。その結果、雑音の重み係数の最適値が、総合的にみておよそ、 $\lambda_{(8)} = 5$  付近であることがわかった。また、他入力に対する汎用性の点においては、入力のパワースペクトルが似た分布を持つ画像に対してならば、解像度的に多少の低下がみられるが、比較的良好な結果が得られた。解像度の低下に対しては、解像度マスクとの併用によって十分カバーできると思われる。すなわち、ウィナフィルタによる修正画像の勾配を計算し、フィルタパターンの再設計を行うことによって、十分に雑音が除去され、解像度も向上した画像が得られた。

今後の課題としては、評価関数で評価しながら、反復処理等によって、雑音の重み係数を最適な値に自動的に決定するシステムへの移行や、そのための空間光変調器を用いた適応的な処理系への移行が挙げられる。また、最適フィルタを設計し、平板マイクロレンズ等を用いて小型固体回路による検討を進める予定である。

Image characteristics transmitted by optical fiber bundles are studied for sampling disturbances due to clad boundaries of fibers, and irregularities and inhomogeneities of fibers. Image processing for disturbances and noises by spatial filters are discussed for computer simulations and experimental results. Modified Wiener spatial filters are evaluated and applied to reconstruction of disturbed 2D image signals, and also gradient spatial operator filters are shown for image processing of degraded image boundaries.

## 参考文献

- 1) N.S Kapany : "Fiber Optics" ,Acad.Press (1967)
- 2) Y.Miyazaki, and H.Takano: "Spatial Filter for Image Transmission by Optical Fiber Bundle" , Proceedings of the ISNCR-84,pp.381-386 (1984)
- 3) K. Kalantari, Y. Miyazaki, and M. Ito: "Amplitude Matched Filter For Image Transmission Type Graded-Index Optical Fiber",International Opto-electronics Conference,Tokyo (1986)
- 4) Z.B.Mohd.宮崎: "Spatial Noise Filtering for The Image Transmission System Optical Fiber Bundle" 信学技報, MW 86-135 (1987)
- 5) R.Gonzalez: "Digital Image Processing" , Addison-Wesley (1977)
- 6) G.Backus, and F.Gilbert:Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data, Phil.Trans. Roy.Soc. London 266.Ser.A,123-192 (1970)
- 7) 谷萩、加藤、篠崎: "2次元ウィナーフィルタに基づいた反復推定アルゴリズムによるぼけ画像の復元"、信学論 (D)、J66-D,12, (1984)
- 8) 神谷、宮崎: "光ファイババンドルを用いた画像伝送におけるフィルタリングシミュレーション"、昭63信学総全大. C-1-190
- 9) 神谷、宮崎: "光ファイババンドルを用いた画像伝送における空間フィルタとその解像度"、信学技報、OQE 88-97 (1989)
- 10) 高野、宮崎: "ステップインデックス型ファイババンドルを用いた画像伝送の信号雑音特性"、信学技報、SE84-18 (1984)
- 11) K. Kalantari, and Y. Miyazaki: "Spatial Image Transmission Characteristics in Graded-Index Optical Fiber",Trans.IEICE,vol.E70 No.11 pp.1140-1149(1987)
- 12) K.Kalantari. and Y.Miyazaki: "Spatial Wiener Filter for Restoration of Images Degraded by Transmission through a Single Long-Distance Graded-Index Optical Fiber" , Trans. IEICE, vol. E-72,No.3,pp.210-221 (1989)
- 13) 神谷、宮崎: "光ファイババンドルを用いた画像伝送における空間ウィナフィルタの最適化"、信学技報 OQE89 (1990)