



局所的統計量を用いたデジタル画像復元フィルター

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大嶺, 治樹, 安部, 嘉一, 土手, 康彦 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/726

局所的統計量を用いたデジタル画像復元フィルター

大 嶺 治 樹・安 部 嘉 一・土 手 康 彦

DIGITAL IMAGE RESTORATION USING LOCAL STATISTICS

HARUKI OHMINE, YOSHIKAZU ABE, YASUHIKO DOTE

Abstract

This paper reports a new algorithm for the restoration of defocused and noised image. To overcome signal-to-noise ratio problems, a nonstationary image model was introduced. The restoration filter consists of two domain processings. The first processing is for an adaptive noise reduction in the image domain. The second is for the image restoration in frequency domain. The proposed algorithm have a merit that edges in the degraded image is restored sharp without loss of the effect of the noise suppression. The restoration effects of our method were visualized by computer simulations and compared with the ones by the popular Wiener filter. The introduction of fast Fourier transformation shortened the total time for the processings.

1. はじめに

近年、光学機器及び計算機の発達により画像利用に関する応用分野はますます増えている。身近なところではカメラ、VTRに代表されるものから、光学顕微鏡、電子顕微鏡などのマイクロな分野、天体写真や衛星によるリモートセンシング等のマクロな分野まで幅広く応用されている。さらには計算機による画像計測やパターン認識などもさかんに研究されている。このように画像利用に関する応用分野は今後さらに増えるものと予想される。

全ての画像利用の分野において、もっとも基本的なことは鮮明な画像を得ることである。ぼけや雑音によって劣化した画像は人間にとっても計算機にとっても好ましいものではない。画像復元とは、ぼけや雑音によって劣化した観測画像から元の画像、即ち原画像を推定しそれを再生することである。デジタル的にこれを行うことを目的として構成されるのが、デジタル画像復元フィルターである。ハードウェアの構成に著しく依存する光学的な処理に比べ、処理の柔軟性と精度という面で勝っており、現在画像復元と言えばほとんどが計算機によるデジタル処理をさす。復元処理における難しさは、第一に系の性質によるもの、第二に雑音対策、第三に処理すべきデータが膨大な量になることである。これまで数多くの画像復元の方法が提案されてきたが、そのほとんどは線形理論に基づき構成されていた¹⁾²⁾³⁾。代表的な復元フィルターであるウィナーフィルター、あるいはそれに基礎をおく改良フィルターでは線形性のみならず画像全体に広義定常性を

仮定している。この仮定では画像の局所的統計量は全く考慮されておらず、処理は簡単なものとなるが雑音対策という観点からは一般に満足する結果を与えてくれない。本来、画像には対象物とその背景といった無相関なものが混在するのが普通であり、これらに対し広義定常性の仮定をするのは若干の無理がある。我々がここで提案するデジタル画像復元フィルターは画像の非定常性を考慮し、局所的統計量として非定常平均 (nonstationary mean) とその分散 (nonstationary variance) を用いて構成される。これにより画像の個々の点における性質を考慮した処理が可能となり従来の方法と比較して解像度-雑音比の向上が図れた。

2. 画像劣化モデル

本研究で扱う画像観測系は図1のようなものである。ここでHはレンズを含む画像観測系(カメラなど)である。g(x,y)を観測画像、f(x,y)を原画像、n(x,y)を雑音とするとこの系は以下のように表される。

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y,x',y') f(x',y') dx' dy' + n(x,y) \quad (1)$$

ここでh(x,y,x',y')は点ひろがり関数(PSF: Point Spread Function)である。PSFが位置によらず不変の場合[空間不変(Spatially Invariant)], PSFはh(x-x',y-y')と差形の関数で表されるので式(1)は次のようなたたみ込み積分の形を取る。

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-x',y-y') f(x',y') dx' dy' + n(x,y) \quad (2)$$

計算機による処理を考え式(2)を次のように離散化する。

$$g(x,y) = \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{m-1} h(x-k,y-l) f(k,l) + n(x,y) \quad (3)$$

この離散フーリエ変換を求めると以下ようになる。

$$G(\omega_1, \omega_2) = H(\omega_1, \omega_2) F(\omega_1, \omega_2) + N(\omega_1, \omega_2) \quad (4)$$

以上のことより画像観測系の行列表現は

$$g = Hf + n \quad (5)$$

となる。ここでfは原画像f(x,y)のm×m個の標本点における値から作られるN次元ベクトル(N=m×m)である。

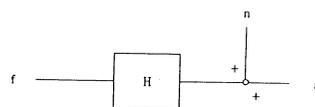


図1 画像観測系のモデル

$$f = [f(0,0), f(0,1), \dots, f(m-1, m-1)]^T \quad (6)$$

同様に g, n は $g(x,y), n(x,y)$ より作られる N 次元ベクトルである。

$$g = [g(0,0), g(0,1), \dots, g(m-1, m-1)]^T \quad (7)$$

$$n = [n(0,0), n(0,1), \dots, n(m-1, m-1)]^T \quad (8)$$

また H は劣化を表す $N \times N$ 次正方形行列である。ここでベクトル f, g, n が属する空間を画像空間と呼び R^N で表す。我々が扱う画像観測系は、PSF の空間不変性から劣化 H はテーパーリッツ (Toeplitz) 行列であらわすことができる。

3. 画像モデルと復元フィルター

3. 1 画像モデル

画像 $f(x,y)$ を確率過程としたとき、その平均、共分散の 1 次及び 2 次のモーメントによって f を特徴づけられるので、これを画像モデルとして採用する。

即ち画像 f は

$$E \{f\} = \mu \quad (9)$$

$$E \{(f - \mu)(f - \mu)^T\} = \Sigma \quad (10)$$

というモデルによって表される。これまでに提案されている画像復元フィルターのほとんどはこの画像モデルに対し広義定常性を仮定していた。

$$\text{即ち 平均ベクトル: } \mu = \text{const.} \quad (11)$$

$$\text{共分散行列: } \Sigma = aI \quad (a = \text{const.}, I \text{ は } N \text{ 次単位行列}) \quad (12)$$

この仮定により画像復元は DFT を用いて全て空間周波数領域のみの演算で行うことができ、計算時間の短縮化が図れるという特徴があるが、このモデルでは平均及び分散は一定とするため画像の統計的性質の位置依存性は考慮されていない。この種の代表的な画像復元フィルターとしてはウィナーフィルターが有名であるが、復元結果は必ずしも満足する結果を与えない。例えば画像に鋭いエッジが含まれている場合、エッジの推定精度に力点をおくと画像の滑らかな部分で雑音の影響が目立ち、雑音の抑制に力点をおくとエッジの部分がだらけてしまい全体としての推定精度は悪くなる。

この点を克服し、かつ処理の簡便さを失わない方法として非定常平均、非定常分散による画像モデル (Nonstationary mean, nonstationary variance image model) が提案されている⁴⁾⁵⁾。

このモデルでは、画像の平均及び分散は、画像の局所的な平均、及び局所的な分散で置き換えられる。具体的には μ は画像の大まかな特徴を与えるように移動平均によって置き換えられる。

$$\mu(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{k=-p}^p \sum_{l=-p}^p f(k,l) \quad (13)$$

この対角成分は、次の非定常平均で置き換えられる。(具体的にはエッジ等の情報を表す。)

$$\sigma^2(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{k=-p}^p \sum_{l=-p}^p \{f(k,l) - \mu(x,y)\}^2 \quad (14)$$

このようにこのモデルでは画像の統計的性質の位置依存性が考慮されているので、画像の個々の点における統計量をモデルに反映させることが出来る。従って本研究では画像復元フィルター構成のための画像モデルとしてこの非定常平均、非定常分散画像モデルを採用する。

3. 2 画像復元フィルター

2章で述べたように劣化を伴う画像観測系は、

$$g = Hf + n \quad (5)$$

と表せる。我々の目的は観測画像 g より真の画像 f を推定することである。ここで劣化関数 H は線形空間不変であり、雑音 n は平均 0、分散 σ_n の定常な雑音と仮定し、両者ともあらかじめ与えられるとする。画像復元の際に留意しなければならないのは次の 3 点である。

① 評価基準の設定

一般に劣化 H の逆はほとんどの場合存在しない。つまり同じ観測データを与えるような原画像が無数に存在するのが普通である。したがって、復元画像としてその無数の候補の中からどれを選ぶかという問題がある。

② 雑音対策

復元操作は減衰した周波数成分を復元するため、わずかな雑音成分も強調されてしまう。従って雑音に対する敏感さを和らげるための正則化 (regularization) を施す必要がある。観測画像に雑音に加わっている場合には考慮しなければならない問題である。

③ 簡便なアルゴリズムの開発

処理すべきデータ量が一般に膨大になるため、実用的であるには処理時間を考えた簡便なアルゴリズムを開発する必要がある。

①の問題に対する解決策の一つは推定誤差の最小分散推定を用いることである。推定画像 \hat{f} と原画像 f との誤差の 2 乗の期待値が最小となるような \hat{f} を推定画像として定める。

$$\begin{aligned}
 J &= E \{ (f - \hat{f})^T (f - \hat{f}) \} \\
 &= \text{tr} E \{ (f - \hat{f})^T (f - \hat{f}) \} \rightarrow \min
 \end{aligned} \tag{15}$$

ここで tr は行列のトレースを表す。これまでの方法では推定式として

$$\hat{f} = Mg \tag{16}$$

が仮定されてきたが、ここでは定数項を付け加えより一般的な推定式として

$$\hat{f} = Mg + a \tag{17}$$

を仮定する。解はこの評価式を最小にするものとして一意に定められ、 M, a はそれぞれ

$$M = \Sigma H^t (H \Sigma H^t + \Sigma_n)^{-1} \tag{18}$$

$$a = \mu - MH\mu \tag{19}$$

となる。ここで

$$E \{ f \} = \mu \tag{20}$$

$$E \{ (f - \mu) (f - \mu)^t \} = \Sigma \tag{21}$$

$$E \{ n \} = 0 \tag{22}$$

$$E \{ nn^t \} = \Sigma_n \tag{23}$$

である。

推定式的具体形は、

$$\hat{f} = \Sigma H^t (H \Sigma H^t + \Sigma_n)^{-1} (g - H\mu) + \mu \tag{24}$$

である。ここで(24)式は

$$E \{ Hf \} = \mu_g \tag{25}$$

$$E \{ (g - \mu_g) (g - \mu_g)^t \} = H \Sigma H^t + \Sigma_n = \Sigma_g \tag{26}$$

を用いて

$$\hat{f} = H^{-1} \{ (\Sigma_g - \Sigma_n) \Sigma_g^{-1} g + \Sigma_n \Sigma_g^{-1} \mu_g \} \quad (27)$$

とできる。この式を次のように書き直す。

$$\hat{g} = (\Sigma_g - \Sigma_n) \Sigma_g^{-1} g + \Sigma_n \Sigma_g^{-1} \mu_g \quad (28)$$

$$\hat{f} = H^{-1} \hat{g} \quad (29)$$

ここで μ_g , Σ_g は非定常平均, 非定常分散画像モデルで与えられるものとする

$$\mu_g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{k=-p}^p \sum_{l=-p}^p g(x-k, y-l) \quad (30)$$

$$\sigma_g^2(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{k=-p}^p \sum_{l=-p}^p \{ g(x-k, y-l) - \mu_g(x, y) \}^2 \quad (31)$$

で表される。従って(29)式は画像空間において

$$\hat{g}(x, y) = \frac{\sigma_g^2(x, y) - \sigma_n^2}{\sigma_g^2(x, y)} g(x, y) + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_g^2(x, y)} \mu_g(x, y) \quad (32)$$

とすることができる。

また(30)式で H^{-1} は空間周波数領域では

$$M(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{H(\omega_1, \omega_2)} \quad (33)$$

で表される逆フィルターとして知られている。もしも劣化系が無雑音で $H(\omega_1, \omega_2)$ が零になる点を持たなければ, 復元画像は完全に原画像に等しくなる。しかし $H(\omega_1, \omega_2)$ が零点を持つとその周波数成分に対しフィルターは設定できなくなる。更に劣化像に僅かな雑音が重畳しただけで $H(\omega_1, \omega_2)$ の値の小さな周波数成分で雑音が強調され良好な復元像が得られないという困難も生ずる。したがってここでは H^{-1} のかわりに正則化を施した $(H^t H + \gamma I)^{-1} H^t$ を用いる。 γ は正則化パラメーターである。

$$\hat{f} = (H^t H + \gamma I)^{-1} H^t \hat{g} \quad (34)$$

さらに H が線形空間不変であることから, 空間周波数領域における表現は

$$\hat{F}(\omega_1, \omega_2) = \frac{H(\omega_1, \omega_2)^*}{|H(\omega_1, \omega_2)|^2 + \gamma} \hat{G}(\omega_1, \omega_2) \quad (35)$$

となる。ここで*は複素共役を表す。

以上より局所的統計量を用いた画像復元フィルターは画像空間において

局所的統計量を用いたデジタル画像復元フィルター

$$\hat{g}(x,y) = \frac{\sigma_g^2(x,y) - \sigma_n^2}{\sigma_g^2(x,y)} g(x,y) + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_g^2(x,y)} \mu_g(x,y) \quad (32)$$

空間周波数領域において

$$\hat{F}(\omega_1, \omega_2) = \frac{H(\omega_1, \omega_2)^*}{|H(\omega_1, \omega_2)|^2 + \gamma} \quad (35)$$

となる。

画像空間における処理は画像の平滑化と考えることが出来る。現実の処理においては観測画像の局所的分散と雑音の分散に応じて適応的に平滑化（観測画像の局所的分散と雑音の分散が同程度の場合は画像を平滑化し、観測画像の分散が雑音の分散より十分の大きい場合は平滑化を行わない）を行う。一方空間周波数領域における処理では正規化を施したPSFの逆フィルタリングを行い、減衰した周波数成分の復元を図ることになる。

4. 実験及び実験結果

本研究の画像復元フィルターの効果を評価するため計算機によるシミュレーション実験を行った。実験に用いた画像は図3(a)図4(a)のものである。画像の大きさは64×64である。図では3次元で表されているが高さ方向は信号の強さを表している。

次式の2次元ガウス型PSFで劣化した画像に雑音を加えて観測画像とした。

$$h(x-x', y-y') = \frac{1}{2\pi\delta} e^{-\frac{1}{2\delta} [(x-x')^2 + (y-y')^2]} \quad (36)$$

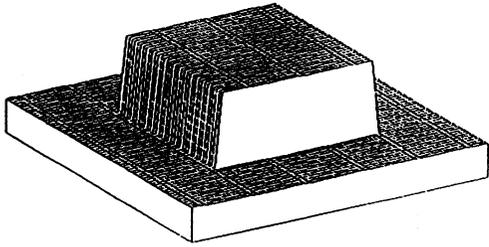
観測画像を図3(b)、図4(b)に、それぞれの実験に用いたPSF、雑音の分散などは表1に示す。本フィルターの復元結果と比較するため、ウィナーフィルターによる復元も試みた。ウィナーフィルターでは、推定式は

表1 各種パラメーター

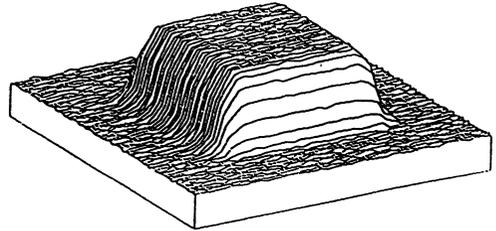
	実験1 (図3)	実験2 (図4)
PSF	$\delta = 2.0$	$\delta = 3.0$
雑音の分散	$\sigma_n = 0.004$	$\sigma_n = 0.009$
正規化パラメーター	$\alpha = 0.005$ (c)	$\alpha = 0.005$ (c)
	$\alpha = 0.0005$ (d)	$\alpha = 0.0008$ (d)
	$\gamma = 0.0005$ (e)	$\gamma = 0.0008$ (e)



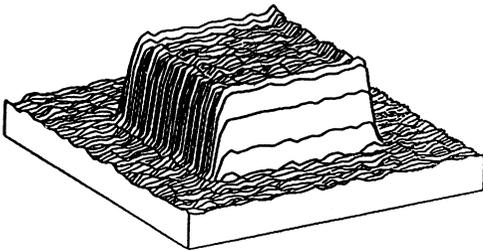
図2 復元処理フロー



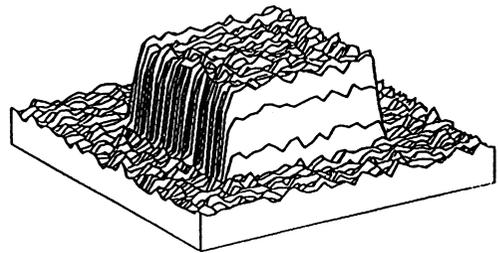
(a) 原画像



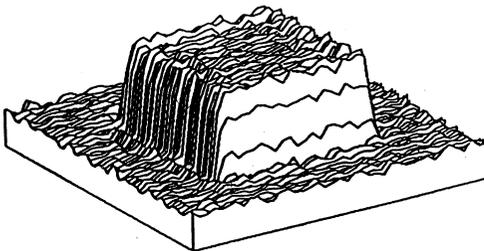
(b) 観測画像



(c) ウィナーフィルターによる復元
($\alpha=0.005$)

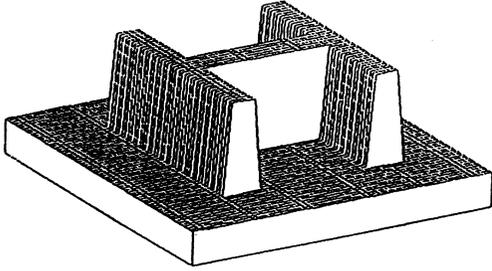


(d) ウィナーフィルターによる復元
($\alpha=0.0005$)

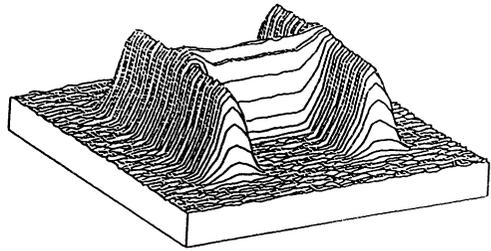


(e) 本研究による復元
($r=0.0005$)

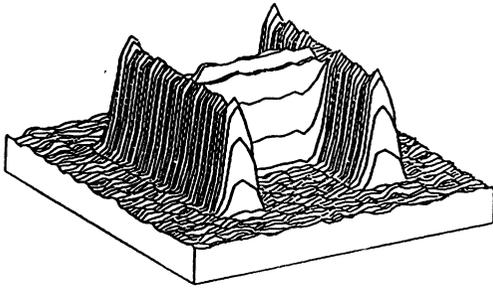
図3 復元実験1



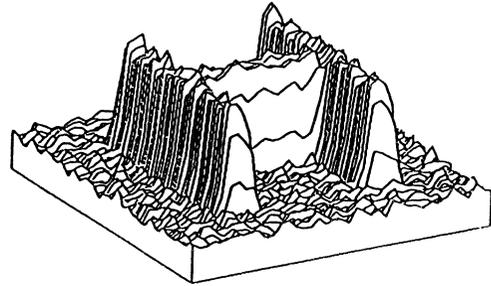
(a) 原画像



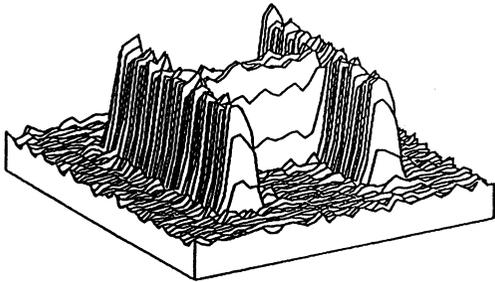
(b) 観測画像



(c) ウィナーフィルターによる復元
($\alpha=0.005$)



(d) ウィナーフィルターによる復元
($\alpha=0.0008$)



(e) 本研究による復元
($\gamma=0.0008$)

図4 復元実験2

$$\hat{f} = M_w g \quad (37)$$

空間周波数領域における M_w は

$$M_w(\omega_1, \omega_2) = \frac{H(\omega_1, \omega_2)^*}{|H(\omega_1, \omega_2)|^2 + \Phi_n(\omega_1, \omega_2) / \Phi_f(\omega_1, \omega_2)} \quad (38)$$

と表される。ここで Φ_n, Φ_f はそれぞれ雑音、及び画像のパワースペクトラムである。ウィナーフィルターを構成するためには原画像及び雑音のパワースペクトラムがあらかじめ各周波数に対して正しく知られていなければならないが、実際にはこれらを正しく推定することは難しいので Φ_n / Φ_f の項は S/N 比の逆数として一定値で与えられる。従って実験では α をパラメータとして

$$M_w(\omega_1, \omega_2) = \frac{H(\omega_1, \omega_2)^*}{|H(\omega_1, \omega_2)|^2 + \alpha} \quad (39)$$

とした式(35)及び式(39)よりわかるように空間周波数領域においてはこれらは同じ働きをする。両式において、パラメータ γ, α は空間周波数領域での帯域を制限するものであり、パラメータの値が小さいほど高い周波数領域まで復元が可能となる。

ウィナーフィルターによる復元結果を図 3(c), 図 4(c)及び図 3(d), 図 4(d)に示す。

また本方法による復元結果を図 3(e), 図 4(e)に示す。ここで非定常平均項と、分散は $p = 2$ として求めた。

周波数領域での復元は両者とも FFT を用いている。画像復元過程のフローチャートを図 2 に示す。

5. まとめ

以上、局所的統計量を用いた画像復元フィルターについて画像モデルと復元フィルターの構成及び実験結果について述べた。3章で述べた3つの問題点に対して本研究では以下のようにして解決を図った。

- ①の評価基準については最小分散推定を用いて解を一意に決定している。
- ②の雑音対策については画像空間での処理が雑音抑制の働きをしている。
- ③については処理時間は画像空間では局所演算のみで処理を行い、空間周波数領域では FFT アルゴリズムを用いることができるため、従来の方法との比較でも若干の処理時間の増加ですむ。

本研究により導かれた画像復元フィルターの特徴は復元フィルターの構成に局所的統計量を反映させ、観測画像の雑音を適応的に抑制している点である。空間周波数領域における処理は正規化を施した PSF の逆フィルタリングによる復元と見なすことができ空間不変型フィルターとして特に目新しいものではないが、実験結果からもウィナーフィルターと比較して雑音を抑制しつつ、

エッジ等もよく復元されていることが確認できた。非定常平均の取り方 (31), (32) 式の p の取り方) により復元結果がどの様に変化するか, また最適な p の与え方等については今後の課題である。

参考文献

- 1) 土井康弘, 安藤 繁 画像処理論, 昭晃堂, 1981
- 2) 小川英光, 佐藤 誠 画像処理アルゴリズムの最新動向: 12画像復元, O plus E No.78, .5, 1986
- 3) 一岡芳樹 最近のデジタル画像修正, 光学, 第10巻第3号, 6, 1981
- 4) 近藤 浩, 神田一伸 非定常平均値を用いたデジタル画像復元フィルターの構成 信学研資, IE86-56, 9, 26, 1986
- 5) DARWIN T. KUAN, ALEXANDER A. SAWCHUK, TIMOTHY C. STRAID, PIERRE CHAVEL "Adaptive Restoration of Image with Speckle", IEEE Trans. acoust. Speech. Signal Processing, vol ASSP-35, No. 3, March, 1987