

輝度変調方式によるブレ画像修復

西 一 樹[†] 千葉 聡[†] 津田 啓太郎[†]

撮像過程において被写体の輝度を時間的に変調させることによって、手ブレや被写体の動きにより生じた画像のブレを修復可能にする新たな撮像方式を提案する。通常の一輝度の下での移動被写体の撮影では、被写体本来が有する高周波情報が失われるため、これによるブレ画像は不可逆的なものとなる。これに対し提案方式では、たとえ撮像時にブレが生じて移動方向への空間的な輝度変調がかかり、これにより撮像画像データには被写体の高周波情報が保持されるため、復元処理により修復が可能になる。本稿では、その詳細な原理と、LED 照明を用いた輝度変調によるブレ画像修復実験を紹介する。

Motion-Blurred Image Restoration based on Intensity Modulation

KAZUKI NISHI,[†] SATOSHI CHIBA [†] and KEITARO TSUDA[†]

A new imaging system for recovering a target image from the blurred version caused by the camera swinging or the object motion is proposed. The brightness of the moving target is modulated by diffusion signals such as a chirp signal or a M-sequence, and then the target image can be restored without attenuation of high frequency components and amplification of noise through the recovering process. Some experimental results for image deblurring based on Intensity modulation using an LED illumination are shown.

1. はじめに

カメラ撮影での手ブレや被写体の動きによって生じる画像のブレ歪みは、露光時間（シャッター開口時間）を短くすることで未然に防ぐことができる。特に被写体の輝度が低く十分な SN 比が確保できない場合には、ストロボ照明により高輝度かつ短時間の露光を実現することで画像ブレが回避できる。しかしながら、照明光の届く範囲に被写体が存在せず十分な照度を与えることが困難な状況も少なくない。このときの手ブレによる画像劣化を如何に軽減するかが、高画素化を進めるデジタルカメラ開発においての重要課題の一つになっている。

これを軽減するための技術として、ジャイロセンサや加速度センサにより検出した手ブレ変位に基づいて、それをキャンセルする方向にレンズ系や撮像素子の位置を物理的にずらすことによって常に撮像面上で静止像を得る方法が実用化されている。この技術はすでに多くの市販カメラに導入されているが、精密な機械制御を要するため壊れ易

く、大きな揺れ幅や早い動きの手ブレには対応できないという問題がある。

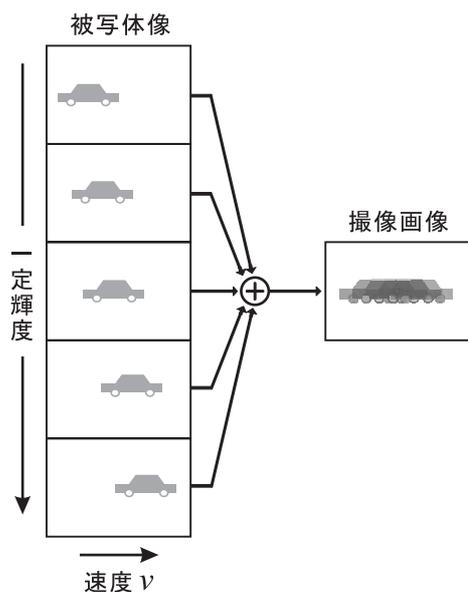
これとは別に、物理現象の瞬間をとらえるなどの特殊用途では、撮像素子や画像メモリの高性能化により、撮影速度を飛躍的に向上させた高速度カメラも開発されているが、高速化にともなう露光量不足を補うために強い照明光を必要とするなどの利用上の制約がある。

本稿では、これらを補完するような撮像技術、すなわち被写体の輝度が比較的低い状態であっても、揺れ幅の大きな手ブレあるいは被写体の高速な動きによるブレ歪みが軽減もしくは補正可能な画像処理技術の開発を目指す。そのために、入射光量もしくは撮像素子の利得を広帯域信号で変調し、輝度を変化させながらブレを生じさせることにより、高周波情報が保持された撮像画像を得た上で、これを逆フィルタ処理することによって高細精なブレ補正を可能にする方法を提案する。

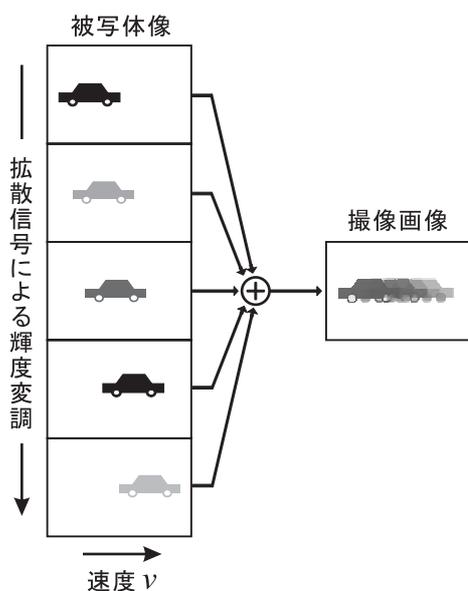
ブレによる画像劣化は、一定輝度の被写体像が移動しながら多重露光されることにより生じ（図 1(a) 参照）、これは画像の高周波情報が失われる不可逆プロセスになるため、その修復には一旦失われた情報を取り戻すという本質的に困難な操作が要求される。そのため、従来のフィルタ処理によ

[†] 電気通信大学 情報通信工学科

Dept. of Information and Communication Engineering, Univ. of Electro-Communications



(a) 従来の露光方式



(b) 輝度変調方式

図1 プレ画像の生成過程の違い

る画像修復には原理的に限界があった。

これに対し本提案方式では、被写体の輝度をチャープ信号もしくはM系列などの広帯域信号で時間的に変調することによって、多重露光時に高周波情報を保持したまま被写体像を記録している点が重要である(図1(b)参照)。したがって撮像画像に対する逆フィルタ演算では、元の高周波情報を含んだ高精細な被写体像の復元が可能になる。

以下では、輝度変調方式によるプレ画像修復の詳細な原理と、LED照明を用いた輝度変調によるカメラ取得画像の修復実験を紹介する。

なお前報¹⁾では、復元処理に相関演算を用いた数値シミュレーションによる検証のみにとどまっていたのに対し、本報では、頑健性と汎用性のあるWienerフィルタを用いた実カメラ画像実験による検証を行っている。

2. プレ画像修復の原理的限界

ブレによる劣化画像には高周波情報が失われてしまっているため、如何なるフィルタ処理によっても元の被写体を完全には復元できない。このことを以下で説明するために、静止時における被写体の撮像面上での輝度分布を $f(x, y)$ と表し、ブレ動作として簡単のため、撮像面上を水平方向 (x 軸方向) に一定速度 v で被写体像が移動していると仮定する。

このとき、多重露光されて得られる撮像画像データ $g(x, y)$ は、被写体像 $f(x, y)$ が速度 v で移動しながら各画素において積算され、画像メモリに記録されることになるから、

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x - vt, y) h(t) dt \quad (1)$$

と表せる。ただし、 $h(t)$ は露光履歴を表わす時間関数であり、通常のカメラではシャッター開口期間 ($0 \leq t \leq T$) でのみ一定値をとり、それ以外では0となる矩形関数

$$h(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

になる。

(1) 式は畳み込み演算を表しているから、周波数領域では

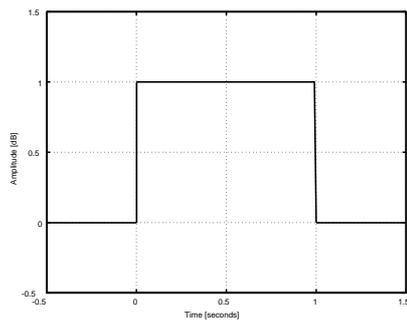
$$G_x(\omega_x, y) = F_x(\omega_x, y) \cdot H(\omega_x) \quad (3)$$

のように積として表せる。ただし、 $H(\omega_x)$ は $h(t)$ をフーリエ変換することで得られるブレ伝達関数であり、特に (2) 式の場合には

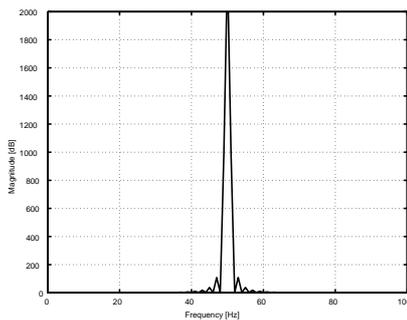
$$H(\omega_x) = \frac{\sin \frac{T}{2} \omega_x}{\frac{T}{2} \omega_x} \cdot T e^{-j \frac{T}{2} \omega_x} \quad (4)$$

で与えられる。 $G_x(\omega_x, y)$, $F_x(\omega_x, y)$ は、 $g(x, y)$, $f(x, y)$ のそれぞれに対する x 軸方向へのフーリエ変換である。

上式によるブレ伝達関数は、露光時間 T に反比例して通過域が狭くなるローパスフィルタの特性をもつため、露光時間が長くなるほど被写体の高周波成分がより多く減衰し、画像のボケが増すことになる(図2参照)。また露光時間が同じであっても、ブレ速度 v が大きいほど同様にボケが強

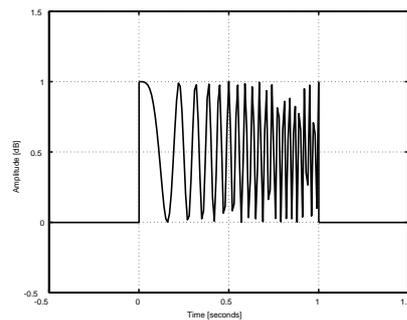


(a) 露光特性

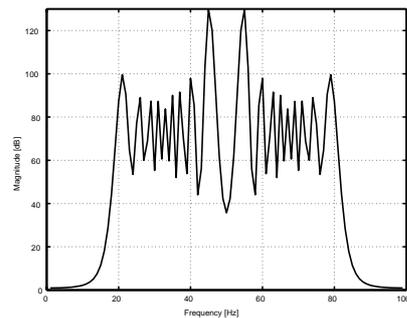


(b) 周波数特性

図 2 従来の一定露光



(a) 露光特性



(b) 周波数特性

図 3 チャープ輝度変調

なる。

ブレ画像の修復には、ブレ伝達関数 $H(\omega_x)$ の逆特性（逆数）を撮像画像 $G_x(\omega_x, y)$ に乗じる逆フィルタ演算が基本になる。このとき問題となるのは、撮像時にわずかな雑音が混入しても高域側で大きく増幅されてしまい、元の被写体像が復元される以上に雑音で画像が乱されることである。これは、Wiener フィルタなどの雑音緩和項をもつ画像復元フィルタを適用しても、雑音が抑圧されるかわりに被写体の高周波情報も減衰したままとなるだけであり、撮像過程で一旦大きく減衰してしまった高周波成分は回復が困難になるという共通の本質的な限界がある。

3. 輝度変調方式

この限界を超えるには、被写体の高周波情報を抑圧する原因となっている露光関数 $h(t)$ に工夫を加えればよい。すなわち (2) 式の代わりに、 $h(t)$ として広帯域関数（あるいは拡散関数）を選ぶことができれば、ブレ伝達関数は (4) 式のような高域遮断特性に縛られることがなくなり、ブレ修復フィルタにおいて飛躍的な性能向上が期待できる。

通常の撮像系では (2) 式のようなシャッター開口期間で一定値をとる関数として決まってしまうが、外部照明光の照度、撮像面への入射光量あるいは撮像素子の光電変換利得を時間的に変化させることを許せばこのことが可能になる。これが我々の

提案する「輝度変調方式」である。

露光関数 $h(t)$ の選び方の代表例として、チャープ関数

$$h(t) = \begin{cases} \sin(\frac{\alpha}{2}t^2 + \omega_0 t), & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

があげられる。 α は周波数掃引率、 ω_0 は初期周波数を表す。位相項 $\phi(t) = \frac{\alpha}{2}t^2 + \omega_0 t$ に対して瞬時角周波数が

$$\omega_i(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \alpha t + \omega_0 \quad (6)$$

となり、時間とともに線形に周波数が変化することがチャープ関数の特徴である。したがって、このときの伝達関数の絶対値特性は、近似的に

$$|H(\omega_x)| \cong \begin{cases} 1, & \text{for } -(\omega_0 + \alpha T) \leq \omega_x \leq -\omega_0, \\ & \omega_0 \leq \omega_x \leq \omega_0 + \alpha T \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

と表せ、露光時間 T に比例した占有帯域幅 αT をもつことになる（図 3 参照）。このような性質をもつ関数は他にいくらでも考えられるが、特に露光の ON, OFF だけで実現したい場合には M 系列が有用である。

注目すべきは、露光時間が長いほど多くの高周波情報が保持できる点である。前章の結論とはちょうど逆になることに注意する。

適当な露光関数 $h(t)$ の下で撮影された画像 $g(x, y)$ から、ブレを修復し被写体像を復元するためのフィルタとしては、雑音重畳下において最小二乗推定を与える Wiener フィルタが適している。これは周波数領域で

$$W(\omega_x) = \frac{H^*(\omega_x)}{|H(\omega_x)|^2 + \sigma_N^2(\omega_x)} \quad (8)$$

と表せる²⁾。 $\sigma_N^2(\omega_x)$ は、各周波数における信号対雑音パワー比で与えられるパラメータである。ブレ伝達関数 $H(\omega_x)$ に広帯域化されたものを選べば、 $\sigma_N^2(\omega_x)$ による緩和効果は少なく、ほぼ全周波数領域にわたって被写体情報の再生にフィルタ演算が寄与することになる。

これとは別に、簡略化した復元処理として相関演算による方法もある¹⁾。その前提条件として、露光関数 $h(t)$ に関して

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x + \tau)h(\tau)d\tau \cong \delta(x) \quad (9)$$

が成り立つように、すなわち自己相関がほぼデルタ関数となるように選ぶ。これは広帯域関数に選ぶことと同義であり、先にあげたチャープ信号や M 系列はこの性質を近似的に満たす。このとき、撮像時に用いた露光関数 $h(t)$ を移動速度 v にあわせて伸張させたもの $\frac{1}{v}h(\frac{1}{v}t)$ とブレ画像 $g(x, y)$ との相関演算

$$\hat{f}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x + \tau, y) \frac{1}{v}h(\frac{1}{v}\tau)d\tau \quad (10)$$

をとることで被写体像が復元できる。

これは、(1) 式より上式が

$$\hat{f}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u, y)du \cdot \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau + \frac{1}{v}(x - u))h(\tau)d\tau \quad (11)$$

となり、さらに (9) 式の関係より

$$\hat{f}(x, y) \cong f(x, y) \quad (12)$$

が成り立つからである。

しかしながら、露光関数 $h(t)$ が物理的に正値しか取り得ないことを考慮すると、(9) 式がよく成り立つような $h(t)$ を選ぶことは不可能なため、復元画像に多くの誤差がともなうことは避けられない。これに対し Wiener フィルタでは、(9) 式の条件を特に必要としないため、 $h(t)$ の選び方の自由度が高く、ブレ伝達関数 $H(\omega_x)$ に零点が存在しないように選んでおきさえすれば、付加雑音がない理想的な場合には完全修復が可能になる。また、Wiener フィルタは相関演算に比べて周波数領域において

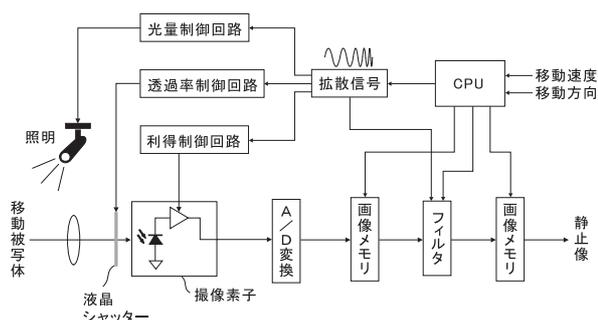


図 4 ブレ修復機能付きデジタルカメラの構成

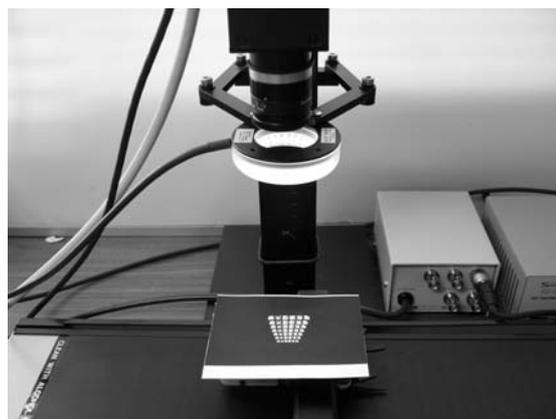


図 5 ブレ画像修復実験で使った撮像装置概観

乗算数で数倍程度にしか計算量が増えないことから、その有用性は明らかである。

図 4 は、以上の輝度変調方式によるブレ修復機能付きのデジタルカメラを想定したときのブロック構成である。被写体に対して任意の露光関数 $h(t)$ で輝度変調をかける方法には、(a) ストロボ等の外部照明光の照度、(b) 撮像面上に設置した液晶シャッターの透過率、(c) 撮像素子の光電変換利得、のそれぞれを時間的に変化させる方法が考えられる。(c) で利用可能な撮像素子は、相関イメージセンサへの一般的用途としてすでに安藤ら³⁾ によって試作されている。

図 4 の撮像システムにおいて、輝度変調をともなつて多重露光された被写体像は、撮像素子による光電変換後に A/D 変換され一旦画像メモリに記録される。加速度センサ等により検出された被写体像の移動速度に基づいて上記 Wiener フィルタを構成し、これに先の輝度変調画像を入力することでブレが補正され、復元結果が画像メモリに記録される。

4. LED 照明を用いたブレ画像修復実験

撮影時の輝度変調をかける方法として前記 (a) の外部照明光による方法を採用し、デジタルカメラで撮影されたブレ画像に対する修復実験を行った。

照明光として高速の輝度変調がかけられる LED

照明を用いて、シグナルジェネレータで発生させたチャープ信号により LED を駆動して被写体を照明し、これを工業用 CMOS デジタルカメラで撮影し得られたブレ画像データを PC 上に転送した後、前記 Wiener フィルタの演算プログラムで復元処理を行った(図5参照)。XYプロットを用いて、被写体サンプルをカメラに対して水平方向に高速移動させることで撮像画像にブレを生じさせている。カメラの露光時間を 50[msec] に設定し、この間に撮像面上を被写体像が一定速度で 225[dots] 移動することを事前に計測してあり、これをフィルタ設計時の既知パラメータとして利用する。輝度変調によって確保される通過帯域の最大周波数が画像データのナイキスト周波数の半分程度となるように、チャープ信号を DC から 1[kHz] まで周波数掃引する設定とした。

以上の実験環境の下で、図 6(a) の画像を被写体とし、チャープ輝度変調および従来の一定露光による撮像画像がそれぞれ同図 (b),(d) であり、その Wiener フィルタによる復元結果がそれぞれ同図 (c),(e) である。輝度変調方式による復元結果の方がブレがよく修復され、よりシャープに復元されていることがわかる。

また、図 6(a),(c),(e) の各画像中央付近の横ラインを抜き出して 1 次元の輝度分布として表したものがそれぞれ図 7(a),(c),(e) であり、その FFT を計算することにより得られたスペクトル分布がそれぞれ同図 (b),(d),(f) である。従来の一定露光による結果では、輝度分布において文字のエッジどうしが近接している部分でつぶれて繋がってしまっているのに対し、輝度変調方式による結果では、つぶれずにより細部まで復元できていることがわかる。これに対応してスペクトル分布では、一定露光による結果が中高域のすべての周波数領域で減衰したままになっているのに対し、輝度変調方式による結果はチャープ変調の設定条件通りに、すなわちナイキスト周波数の半分程度までの周波数成分が保持されていることがわかる。

5. おわりに

本稿の輝度変調方式の説明では、簡単のため手ブレあるいは被写体の動きを水平方向のみに仮定したが、任意の方向あるいは軌跡を描く動きであっても同様な議論が可能である。

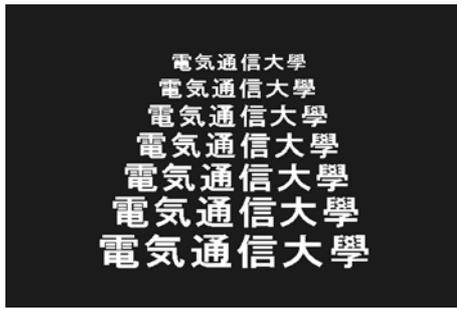
移動速度を既知として議論を進めたが、実際には何らかの方法で計測しなければならない。特に手ブレの場合については、すでにデジタルカメラに搭載されているジャイロセンサや角速度センサによる計測技術が利用できると考えられる。

また本実験では輝度変調を照明光による方法で

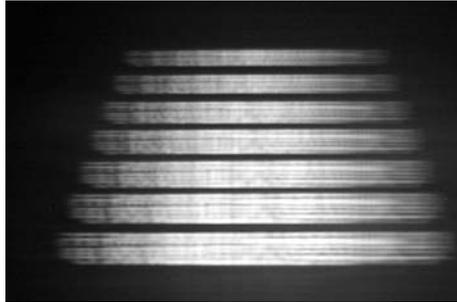
実現したが、被写体が照明光の届く範囲に存在しななければならないなどの制約がある。これを撮像素子の光電変換利得制御により実現できれば、外部照明を用いる必要がなくなり、様々な環境で利用できることになるであろう。

参 考 文 献

- 1) 牟田, 西, "輝度変復調方式による流れ画像修復", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.28, No.44, pp.5-8 (2004).
- 2) H.C. Andrews and B.R. Hunt, "Digital Image Restoration," Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1977).
- 3) S. Ando and A. Kimachi, "Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude modulated light," IEEE Trans. Electron Devices, vol.50, no.10, pp.2059-2066 (2003).



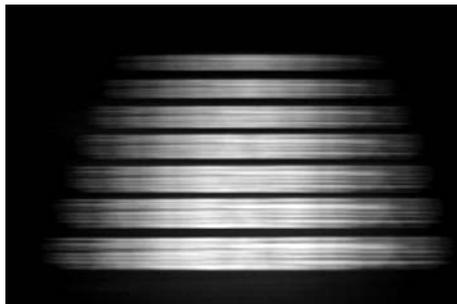
(a) 元画像



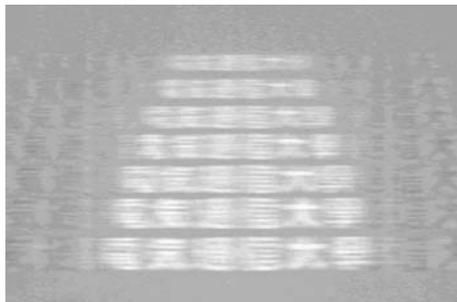
(b) チャープ輝度変調によるブレ画像



(c) 輝度変調画像に対するブレ修復処理結果

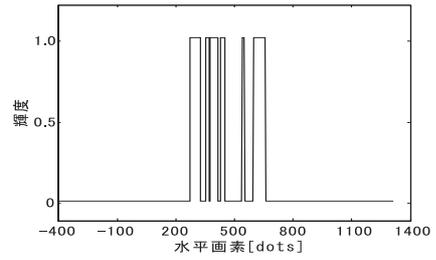


(d) 一定露光によるブレ画像

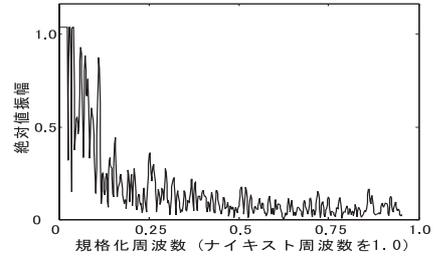


(e) 一定露光画像に対するブレ修復処理結果

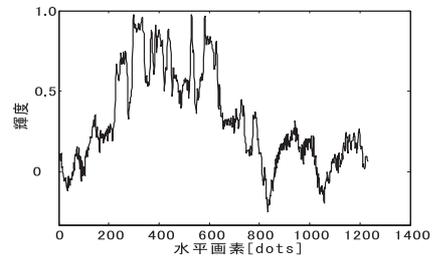
図6 プレ修復実験における各画像処理結果



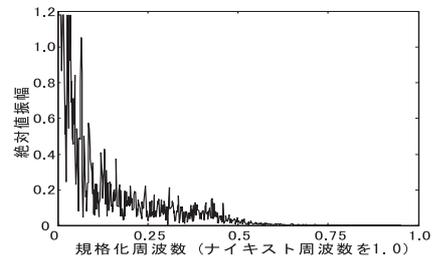
(a) 元画像の輝度分布



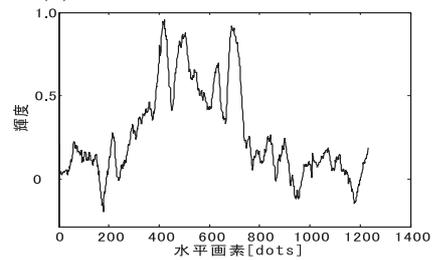
(b) 元画像のスペクトル分布



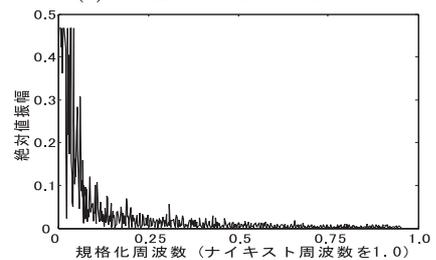
(c) 輝度変調画像の輝度分布



(d) 輝度変調画像のスペクトル分布



(e) 一定露光画像の輝度分布



(f) 一定露光画像のスペクトル分布

図7 画像横ラインに対する1次元処理結果