

直線的手ぶれ画像復元のための PSF パラメータ推定手法

米司 健一, 田中 正行, 奥富 正敏

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻

概要 画像撮影時の手ぶれや, 対象が動くことによって画像にぶれが生じる. このぶれを等速直線運動で近似すると, ぶれを表す PSF(Point Spread Function) は幅と角度の 2 つのパラメータで表現することができる. 劣化画像の振幅スペクトルは, PSF の幅と角度によって決まる方向と周期で 0 となる性質を持つ. この劣化画像の振幅スペクトルの周期性と方向性を検出することによって, PSF パラメータの幅 ℓ と角度 θ を推定する. 本論文では原画像の周波数特性によらず, 劣化画像の振幅スペクトルの周期性と方向性をロバストに検出する手法を提案する. また, 実画像実験を通して, 提案手法の効果を確認した.

PSF Parameter Estimation for Restoration of Linear Motion Blurred Image

Kenichi YONEJI, Masayuki TANAKA and Masatoshi OKUTOMI

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Abstract

An image is degraded by hand blurring or moving object. That degradation can be expressed by PSF(Point Spread Function). The PSF has two parameters of width and the angle, approximating the motion is uniform. An amplitude spectrum of blurred image has a feature based on PSF parameters. PSF parameters can estimate from this feature. This paper presents a new method to estimate PSF parameters from the amplitude spectrum of blurred image. The effect of the proposed method is confirmed by experiments.

1 まえがき

画像を撮影する際に, カメラ全体が動く, もしくは, 撮影対象が動く事によって画像ぶれが起こる. このようにして生じるぶれをモーションブラーと言い, この画像ぶれを抑えるための研究は数多く存在する. 例えばジャイロセンサや加速度センサを用いて検出した手ぶれ変位に基づいて, それをキャンセルする方向にカメラのレンズ系や撮像素子を物理的に動かすことによって, 静止像を得る方法が実用化されている. しかし, ジャイロセンサによる技術を用いても, 全てのぶれを防止することはできない. また, 複数枚の画像を使って 1 枚のぶれのない画像を復元する手法も多く研究例がある [1][2][3]. しかし, ジャイロセンサを用いる場合も, 複数枚の画像を用いる場合も, どちらも複雑な装置を必要としてしまう.

そこで本論文ではこの手法とは違うアプローチとして, 撮影したぶれ画像を元に, ぶれのない画像を復元する手法を取り扱う. この手法では特に複雑な装

置を必要としない. このような, ぶれ画像の情報のみを用いてぶれのない画像を復元する手法をブラインドデコンボリューションと呼び, 文献 [10] ではこの分野の研究についてまとめている. 1 枚のぶれ画像を利用する手法は, ぶれを表す PSF をパラメトリックに推定し, その PSF を用いて画像を復元する手法と, PSF と復元画像を同時に推定する手法の, 2 つに分けることができる. PSF と復元画像を同時に推定する手法は主にピンぼけなどのオプティカルブラーによって起こる劣化画像の復元に用いられる手法で, モーションブラーによって起こる劣化画像の復元に適用するのは難しい. これは, モーションブラーを表す PSF がオプティカルブラーを表す PSF と比べ, 複雑な形をしているからである. そこで本論文では PSF をパラメトリックに推定し, その PSF を用いて画像を復元する手法を用いる. この PSF をパラメトリックに推定する手法は, これまでにいくつかの研究例がある. 例えば, 方向別微分や, 画像の自己相関関数を利用して PSF(point spread function) のパ

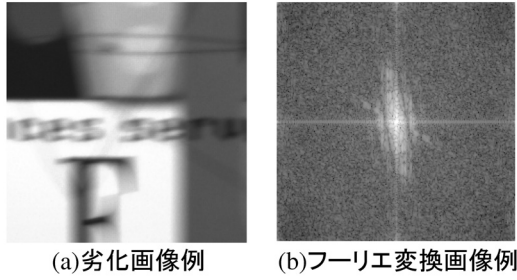


図 1. 劣化画像およびフーリエ変換画像例.

ラメータを推定する手法などがあげられる [8][9]. しかしこの手法では, 原画像の性質による影響を受けやすいという問題点がある. ほかに, ARMA モデルによる手法があげられる [7]. また, ぶれ画像の周波数特性を利用する手法などがあげられる [4][5][6]. これらの手法は, ぶれ画像の周波数特性を間接的に調べ, その結果から PSF パラメータを決定するために, ノイズの影響に弱いといった問題点がある. 本論文では, ぶれ画像の周波数特性から直接的に PSF を調べる手法を提案する.

本論文の主な目的は, 図 1(a) のような劣化画像のフーリエ変換によって得られる画像 (図 1(b)) から, 直接ぶれ幅 ℓ および, ぶれ方向 θ を求めることである. 本論文では, 原画像の性質等による影響に対してロバストな推定方法を提案する. また, その手法の推定精度をシミュレーション画像を用いて調べ, 実画像実験を通してその効果を確認する.

本論文は以下のように構成する. 2 章では等速直線運動を仮定した PSF のフーリエ変換モデルについて説明する. 3 章では PSF パラメータの推定手法を提案する. 4 章ではシミュレーション実験を行い, 提案手法の効果を確認する. 5 章では実際に撮影したぶれ画像のぶれ回復実験について述べる. 6 章では本論文のまとめを行う.

2 等速直線運動を仮定した PSF のフーリエ変換モデル

手ぶれに限らず, ピンぼけや, モーションブラーによって生じる劣化画像は, 一般的に次の式で表すことができる.

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (1)$$

ここで, $f(x, y)$ は原画像, $g(x, y)$ は劣化画像を表す. また, $h(x, y)$ は PSF を表し, $*$ は畳み込みを表す演算子である.

式 (1) をフーリエ変換すると次の式 (2) になる.

$$G(\xi, \eta) = H(\xi, \eta) \cdot F(\xi, \eta) \quad (2)$$

$G(\xi, \eta)$, $H(\xi, \eta)$, $F(\xi, \eta)$ はそれぞれ $g(x, y)$, $h(x, y)$, $f(x, y)$ のフーリエ変換を表す.

本来 PSF はぶれの軌道によって決まるので, しばしば複雑な形になるが, 露光時間が短い場合には, ぶれのモーションを等速直線運動で近似する事ができる. このとき PSF は, ぶれの幅 ℓ , ぶれ方向 θ の 2 つのパラメータによって決定することができ, この

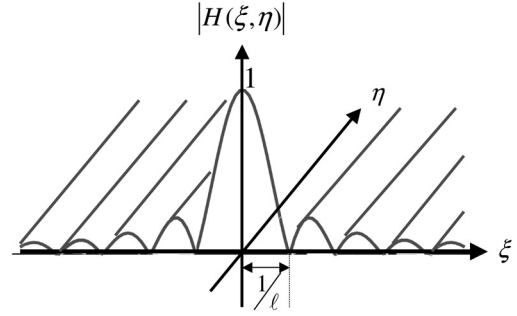


図 2. PSF の振幅スペクトルのイメージ図

2 つのパラメータを推定することにより, PSF を一意に推定することができる. また, このようにして推定をした PSF から既存の手法 (たとえばウィナーフィルターなど) を用いて, 原画像の復元を行うことができる. この復元の手法に関しては文献 [11] に詳しくまとめられている.

ここで, 等速直線運動の PSF モデルの定式化をしておく. ぶれの幅を ℓ , 角度を $0[\text{deg}]$ とした場合, PSF $h(x, y)$ は次の式で表すことができる.

$$h(x, y) = \frac{1}{\ell} \Pi(x) \delta(y) \quad (3)$$

ここで

$$\Pi(x) = \begin{cases} 0 & (|x| > \frac{\ell}{2}) \\ 1 & (|x| \leq \frac{\ell}{2}) \end{cases} \quad (4)$$

であり, $\delta(y)$ はディラックのデルタ関数である.

式 (3) で表される PSF の式をフーリエ変換すると次の式 (5) になる.

$$H(\xi, \eta) = \frac{\sin \ell \pi \xi}{\ell \pi \xi} \quad (5)$$

また, $H(\xi, \eta)$ の振幅スペクトルである $|H(\xi, \eta)|$ は図 2 のようになり, 一定周期ごとに 0 となる関数であることがわかる. ただし, $\xi = 0$ のときは $|H(\xi, \eta)|$ は 0 ではない. ここで, 図 2 からわかるように, 0 となる点がちょうど縞のような模様を形成することから, この論文ではこの 0 となる点による縞模様を単に「縞模様」と呼ぶことにする. この関数の周期はぶれの幅 ℓ によって決定され, その周期を $\nu_0 = \frac{1}{\ell}$ とする. ここでは, 角度は $0[\text{deg}]$ として計算してきたが, 角度がついた場合は, この縞模様が, その角度に合わせて回転した形になる.

ここで, 劣化画像の振幅スペクトル $|G(\xi, \eta)|$ は, 式 (2) から次のように表される.

$$|G(\xi, \eta)| = |H(\xi, \eta)| \cdot |F(\xi, \eta)| \quad (6)$$

この式からわかるように, 劣化画像の振幅スペクトル $|G(\xi, \eta)|$ は, 原画像の振幅スペクトル $|F(\xi, \eta)|$ に PSF の振幅スペクトル $|H(\xi, \eta)|$ を掛け合わせたものである. そのため, PSF の振幅スペクトルの, 一定の周期 ($\nu_0 = \frac{1}{\ell}$) ごとに 0 になる特徴は, 劣化画像の振幅スペクトルにも現れる. その周期はぶれの幅 ℓ によって決定され, またぶれの角度に合わせて縞模

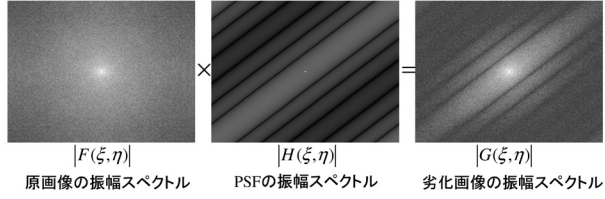


図 3. 実際の振幅スペクトルの画像例

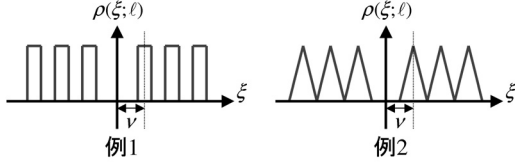


図 4. 関数 ρ の一例

様の角度が変わってくる．図 3 は実際の原画像の振幅スペクトル，PSF の振幅スペクトル，劣化画像の振幅スペクトルの画像例である．

以上の特徴から，劣化画像の振幅スペクトルの縞模様の周期及び縞の方向を調べることによって，ぶれの PSF のパラメータである幅 ℓ 及び角度 θ を推定することができる．

3 PSF パラメータ推定手法

ここではまず，簡略化のため 1 次元（ぶれの角度が $0[\text{deg}]$ ）におけるぶれ幅推定手法について考える．ぶれ幅の推定は，すなわち，劣化画像の振幅スペクトルの縞模様の周期を推定することである．この縞模様の周期の推定は，次の評価関数 $I(\nu)$ の最小化問題として定式化される．

$$I(\nu) = \frac{\|G(\xi)\rho(\xi; \nu)\|_1}{\|G(\xi)\|_1 \|\rho(\xi; \nu)\|_1} \quad (7)$$

ここで， $\|\cdot\|_1$ は 1 次ノルムを表す．また，変数 ν は関数 $\rho(\xi; \nu)$ の ξ 方向の周期である．この関数 $\rho(\xi; \nu)$ は次の特徴をもつ関数である．

1. 周期 ν で極大となる周期関数
2. $|\xi| < \frac{\nu}{2}$ のとき $\rho(\xi; \nu) = 0$

図で表すと，図 4 のような関数である．この関数は，図 2 の縞模様の 0 となる点で最大となるような関数である．

式 (7) で表される評価関数 $I(\nu)$ は，劣化画像の振幅スペクトル $|G(\xi)|$ と $\rho(\xi; \nu)$ との相関を表している．ここで， $|G(\xi)|$ は $\nu_0 = \frac{1}{\ell}$ の周期で最小となり， $\rho(\xi; \nu)$ は ν の間隔で最大となることから， ν と ν_0 が一致したときに，この評価関数 $I(\nu)$ は最小の値になることが分かる．以上から，この評価関数 $I(\nu)$ が最小となるときの ν の値を $\hat{\nu} = \frac{1}{\hat{\ell}}$ とし， $\hat{\ell}$ をぶれ幅の推定値とする．

しかし，この手法には次のような問題点が挙げられる． $\rho(\xi; \nu)$ は ν の間隔で最大となる関数であり， $|G(\xi)|$ は， ν_0 の間隔で最小となる関数であるので，もし， ν が ν_0 の定数倍であったとき ($\nu = 2\nu_0$ など)

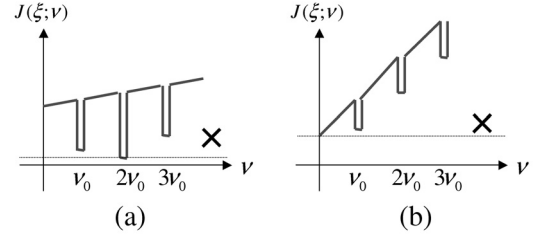


図 5. α による評価関数の変化．(a) は α が小さすぎる場合，(b) は α が大きすぎる場合

も， $I(\nu)$ は小さな値になる．そのため， $I(\nu)$ が極小になる点が多く存在してしまい，どの点が正しい推定値であるのか判別が難しくなる．

ここで，新たな評価関数として次のような関数 $J(\nu)$ を考える．

$$J(\nu) = \frac{\|G(\xi)\rho(\xi; \nu)\|_1}{\|G(\xi)\|_1 \|\rho(\xi; \nu)\|_1} + P(\nu) \quad (8)$$

$P(\nu)$ はペナルティ項を表し， ν に関する単調増加関数である．このペナルティ項を追加することによって， $J(\nu)$ が最小となる ν から，ぶれの幅 ℓ を推定することができる．

ペナルティ項 $P(\nu)$ の例としては，次のような関数があげられる．

$$P(\nu) = \alpha \nu \quad (9)$$

これは， ν の 1 次関数である．この関数を使う場合には，次のような問題がある．まず， α が小さすぎると， ν に対する $P(\nu)$ の変化量が少なくなってしまうため，ペナルティ項としての働きが小さくなり，推定値が間違った値になる（図 5(a)）．逆に α が大きすぎる場合，ペナルティ項としての働きが大きくなりすぎてしまうため， $J(\nu)$ が最小となるのは必ず $\nu = 0$ のときになってしまう（図 5(b)）．

このように， α の設定によって推定に影響が出てしまう．そのため，この提案手法では，ペナルティ項 $P(\nu)$ の設計が最も重要となる．そこで，本論文では次のような評価関数を提案する．

$$J(\nu) = \frac{\|G(\xi)\rho_p(\xi; \nu)\|_1}{\|G(\xi)\|_1 \|\rho_p(\xi; \nu)\|_1} \quad (10)$$

ここで， $\rho_p(\xi; \nu)$ は図 6 のような周期関数である．また，

$$\rho_p(\xi; \nu) = \rho(\xi; \nu) + \rho_0(\xi; \nu) \quad (11)$$

とし， $\rho_0(\xi; \nu)$ は次の性質を持つ関数であるとする．

1. $\xi = 0$ で極大となる関数
2. $|\xi| > \frac{\nu}{2}$ のとき $\rho_0(\xi; \nu) = 0$

この式を用いて，式 (10) の評価関数 $J(\nu)$ は次のように書くことができる．

$$J(\nu) = \frac{\|G(\xi)\rho(\xi; \nu)\|_1}{\|G(\xi)\|_1 \|\rho(\xi; \nu)\|_1} + \frac{\|G(\xi)\rho_0(\xi; \nu)\|_1}{\|G(\xi)\|_1 \|\rho_p(\xi; \nu)\|_1} \quad (12)$$

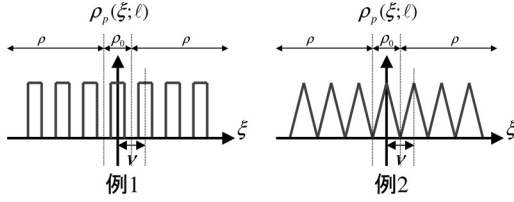


図 6. 提案する関数 ρ_p の一例

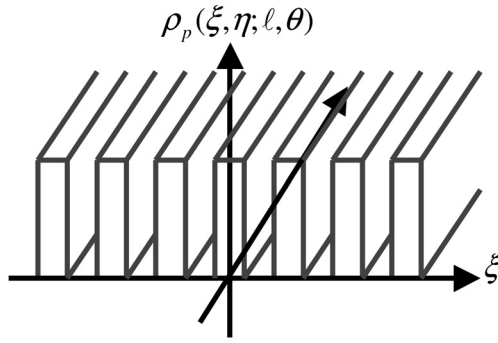


図 7. $\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)$ の例

この式の右辺の第 2 項は、 ν が大きくなるにつれて増加する関数になっているので、ペナルティ項 $P(\nu)$ と見ることができ、これは式 (8) と形が一致することが分かる。このペナルティ項 $P(\nu)$ は $G(\xi)$ の振幅スペクトルによって決定されるため、ペナルティ項として妥当な性質を持つ。このように、ペナルティ項を $G(\xi)$ の振幅スペクトルによって決定することで、PSF パラメータを安定に推定できることが、経験的に分かっている。また、複雑なパラメータ調節も必要ないため、様々な画像に対して同じ評価関数で推定することができる。

ここまで 1 次元について述べてきたが、ここで 2 次元における角度パラメータの推定について述べる。評価関数を 2 次元に拡張すると次のような式になる。

$$J(\nu, \theta) = \frac{\|G(\xi, \eta)\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)\|_1}{\|G(\xi, \eta)\|_1 \|\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)\|_1} \quad (13)$$

$\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)$ は図 7 のような、 $\rho(\xi; \nu)$ を η 方向に伸ばした形の関数を、 θ ほど回転した関数を表す。この θ と ν を変化させながら $G(\xi, \eta)$ と相関を取る。このとき、 $\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)$ の方向 θ と周期 ν が、 $|G(\xi, \eta)|$ の縞模様 の方向と周期に一致したとき、評価関数 $J(\xi, \eta; \nu, \theta)$ は最小の値となる。その最小となるときの ν と θ をもとめ、その値からぶれの方向と幅を決定する。

4 シミュレーション実験

提案手法の効果を確認するために、シミュレーション実験を行った。実験には原画像として図 8(a)~(c) のような 3 つの画像 (marble, aluminium, dog) を用意した。この画像に対して PSF を畳み込み、図 8(d)~(f) のような、様々なぶれ画像を作成した。PSF のパラメータは、幅 21[pix] 角度 30[deg] と、幅 11[pix] 角度 45[deg] の 2 種類を用意した。このようにして作成したぶれ画像に対して、PSF のパラメータを、

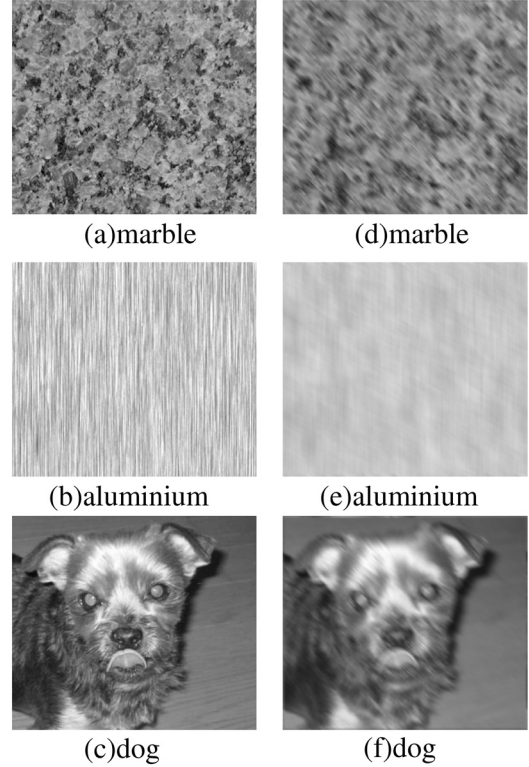


図 8. 実験に用いた画像。(a)~(c) は用意した原画像。(d)~(f) は作成したぶれ画像。

(1) ペナルティ項のない評価関数 $I(\nu, \theta)$, (2) ペナルティ項のある評価関数 $J(\nu, \theta)$, (3) Y.Yitzaky らの手法 [8] を用いて推定し、推定結果を比較した。また、このようにして推定したパラメータを用いて、実際に復元を行った。

推定結果を表 1 および表 2 にまとめる。表 1 はぶれを表す PSF パラメータの設定値を、幅 21[pix] 角度 30[deg] としたときの推定結果を示す。表 2 では設定値を幅 11[pix] 角度 45[deg] として推定を行った結果を示す。このとき探索範囲は、幅は 5[pix]~70[pix]、角度は -90[deg]~90[deg] の間とした。

この結果から、提案するペナルティ項のある評価関数 $J(\nu, \theta)$ を使って推定した結果は、幅、角度とも

表 1. PSF パラメータの推定結果 (設定値: 幅 21[pix] 角度 30[deg])

	設定値		Y.Yitzaky らの手法		ペナルティ項無し		ペナルティ項有り	
	幅	角度	幅	角度	幅	角度	幅	角度
marble	21	30	21	29	5	30	21	30
aluminium			25	76	5	30	21	30
dog			21	27	5	29	21	29

表 2. PSF パラメータの推定結果 (設定値:幅 11[pix] 角度 45[deg])

	設定値		Y.Yitzhaky らの手法		ペナルティ項無し		ペナルティ項有り	
	幅	角度	幅	角度	幅	角度	幅	角度
marble	11	45	11	47	5	45	11	45
aluminium			24	84	5	45	12	45
dog			13	43	5	45	11	45

に設定値から ± 1 の範囲でもとまり、良い精度で推定ができた。これに対してペナルティ項のない評価関数 $I(\nu, \theta)$ で推定した場合は、幅の推定値が設定値から大きく離れた値になった。また、Y.Yitzhaky らの手法を用いて推定した結果は、aluminium のような原画像に方向性がある画像の場合、推定結果に大きな誤差が生じる事があるが、提案手法では正しく推定できた。

5 実画像実験

ここでは、実際に撮影して得られたぶれ画像に対して、提案手法を用いて PSF のパラメータである幅 ℓ および角度 θ の推定を行い、その推定値を用いて画像を復元する実験を行った。推定は提案手法と、Y.Yitzhaky らの手法で行い、その結果の比較を行った。

ここで、提案手法における PSF の推定にはすべて同じ評価関数 $J(\nu, \theta)$ を計算した。実際の計算式は次の式 (14) を使用し、このときの評価関数 ρ_p は図 9 の形の関数を用いた。

$$J(\nu, \theta) = \frac{\|\log |G(\xi, \eta)| \rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)\|_1}{\|\log |G(\xi, \eta)|\|_1 \|\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)\|_1} \quad (14)$$

ここでは劣化画像の振幅スペクトルに対して $\log$ をとる事によって値の小さい部分を強調し、探索の精度を上げた。この操作は振幅スペクトルの大小関係を変えないので、 $\log$ をとることによって、縞模様の特徴自体は変わることはない。また、復元はウィナーフィルタを用いて行った。

実験には図 10 の (a), (b) の 2 枚の画像を使用した。この画像は 2 枚とも CCD カメラ (DragonFly) を用いて撮影し、露光時間を 30[ms]、焦点距離を 35mm フィルム換算で 40[mm] として撮影したぶれ画像である。

推定結果は表 3 のようになった。この推定結果を用いて復元した画像を図 10 の (c)~(f) に示す。ここで、(c) と (d) は提案手法を用いて推定した PSF パラメータを使って復元した画像で、(e) と (f) は Y.Yitzhaky らの手法を用いて推定した PSF パラメータで復元した画像である。

この実験ではシミュレーション画像の実験とは違い、PSF の真値が分からないため、実際に復元した画像を見て、正しい推定値が得られたかどうかを判

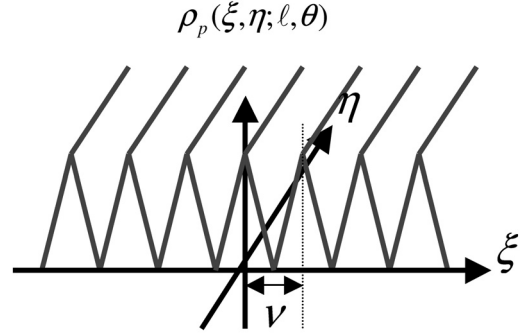


図 9. 使用した $\rho_p(\xi, \eta; \nu, \theta)$ の図

表 3. PSF パラメータの推定結果

	Y.Yitzhaky らの手法		提案手法	
	幅	角度	幅	角度
(a)	21	77	23	62
(b)	19	9	13	4

断した。復元結果を見て分かるように、Y.Yitzhaky らの手法では良い結果が得られていないことが分かる。これは、撮影した画像が方向性を持つために、推定が上手く行かないからであると考えられる。それに対して提案手法で PSF を推定し、復元した画像は、劣化画像では読むことが出来ない文字が読めるようになり、良い結果が得られていることが分かる。

6 むすび

本論文では、直線の手ぶれによって生じる 1 枚の劣化画像をフーリエ変換することによって得られる劣化画像の振幅スペクトルから、ぶれの PSF パラメータを推定する手法を提案した。ここでは、手ぶれを等速直線運動で近似し、もとの PSF のパラメータは、ぶれの幅 ℓ と、ぶれの方向 θ の 2 つとした。提案手法は、手ぶれを等速直線運動で近似すると、劣化画像の振幅スペクトルが一定周期ごとに極小値をもち、その極小値によって縞模様が出来る性質を利用している。その縞模様の周期、および方向から PSF のパラメータを推定する。本論文では PSF パラメータの推定手法として、劣化画像の振幅スペクトルと、方向 θ について一定周期 ν で極大となる関数 $\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)$ との相関を計算し、それによって得られる評価関数が最小になる点を探索することによって、PSF パラメータの ℓ, θ を推定する手法を提案した。このとき考えられる問題点についても検討し、シミュレーション実験によって、提案手法を用いてぶれの PSF パラメータを推定することができることを示した。

また、実画像を用いたぶれ回復の実験を行った。このとき、手ぶれによって生じるぶれ画像の復元を行い、提案手法の効果を確認した。

本論文では、画像を復元するには既存の手法であるウィナーフィルタを用いた。しかし、画像を復元する手法については、これまでに様々な研究が行われている。今後はより良い画像復元の手法について検討していく。



図 10. 実画像実験に使用した画像と復元結果. (a) と (b) は劣化画像, (c) と (d) は提案手法を用いて PSF を推定し, 復元した画像, (e) と (f) は Y.Yitzhaky らの手法で PSF を推定し, 復元した画像.

参考文献

- [1] Moshe Ben-Ezra and Shree K.Nayar, "Motion deblurring using hybrid imaging," *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2003)*, Vol.I, pp.657-664, 2003.
- [2] A.Rav-Acha and S.Peleg, "Restoration of multiple images with motion blur in different directions," *Proceedings Fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV 2000)*, pp.22 - 27, 2000.
- [3] B.Basclé, A.Blake, and A.Zisserman, "Motion deblurring and superresolution from an image sequence," *Proceedings of Fourth European Conference on Computer Vision (ECCV 1996)*, pp.573-582, 1996.
- [4] M.Cannon, "Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase," *IEEE Trans.Acoust.Speech Signal Process (ASSP 1976)*, Vol.24, pp.58-63, 1976.
- [5] M.M.Chang, A.M.Tekalp and A.T.Erdem, "Blur identification using the bispectrum," *IEEE Trans Signal Processing*, Vol.39, pp.2323-2325, 1991.
- [6] Domingo Mery and Dieter Filbert, "A fast non-iterative algorithm for the removal of blur caused by uniform linear motion in X-ray images," *World Conference on Non-Destructive Testing*, pp.15-21, 2000.
- [7] S.J.Reeves and R.M.Mersereau, "Blur identification by the method of generalized cross-validation," *IEEE Trans Image Processing*, Vol.I, pp.301-311, 1992.
- [8] Y.Yitzhaky and N.S.Kopeika, "Identification of blur parameters from motion blurred images," *CVGIP:Graph.Models Image Process*, Vol.59, pp.310-320, 1997.
- [9] Y.Yitzhaky, I.Mor, A.Lantzman, and N.S.Kopeika, "Direct method for restoration of motion-blurred images," *Journal of the Optical Society of America A (Optics, Image Science and Vision)*, Vol.15, pp.1512-1519, 1998.
- [10] Deepa Kundur and Dimitrios Hatzinakos, "Blind Image Deconvolution," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.43-64, 1996.
- [11] Mark R.Banham and Aggelos K. Katsaggelos, "Digital Image Restoration," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.24-41, 1997.