

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[†] 田 中 正 行[†] 奥 富 正 敏[†]

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) はぶれの幅と方向の 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 の方向に、PSF の幅によって決まる周期で 0 となる性質を持つ。そのとき、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 パラメータの幅と方向を推定する。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、提案手法の効果を示す。

PSF Parameter Estimation for Restoration of Linear Motion Blurred Image

KENICHI YONEJI,[†] MASAYUKI TANAKA[†] and MASATOSHI OKUTOMI[†]

An image is blurred by camera shake or moving object. That degradation can be expressed by using 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、カメラが動く、もしくは、撮影対象が動くことによって画像ぶれが生じる。このようにして生じるぶれをモーションブラーといい、この画像ぶれを抑えるための研究は数多く存在する。たと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、カメラの動きをキャンセルする方向に、レンズ系や撮像素子を物理的に動かすことにより、ぶれを軽減す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る場合には、移動機構が必要であり、さらにすべ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の研究例がある^{1),2)}。しかしこれらの手法では、ぶれ画像間の位置合わせが必要であり、かつデータ量が增大するといった問題がある。

そこで本論文ではこれらの手法とは違うアプローチ

として、通常のカメラで撮影された 1 枚のぶれ画像をもとに、ぶれのない画像を復元する手法を取り扱う。この手法は、ぶれを表す PSF (point spread function) と復元画像を同時に推定する手法と、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。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には、これまでにいくつかの研究例がある³⁾⁻⁶⁾。たとえば Yitzhaky ら⁶⁾ は、方向別微分や、画像の自己相関関数を利用して PSF のパラメータを推定する手法を提案している。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。本論文では、ぶれ画像の周波数特性から直接的に PSF を調べることによって、原画像の性質による影響を受けにくい推定手法を提案する⁷⁾。

本論文は以下のように構成する。2 章では等速直線

[†] 東京工業大学

Tokyo Institute of Technology

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．5 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．この PSF が分かれば，ウィナーフィルタなどを用いることによって画像を復元することができる．

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，ぶれの動きを等速直線運動で近似することができる．このとき PSF は，ぶれの幅 ℓ ，ぶれの方向 θ の 2 つのパラメータによって決定することができる．

ここで，等速直線運動の PSF を定式化しておく．ぶれの幅を ℓ ，方向を $0[\text{deg}]$ とした場合，PSF を $h(x, y)$ ，そのフーリエ変換を $H(\xi, \eta)$ とすると， $H(\xi, \eta)$ は次の式で表すことができる．

$$H(\xi, \eta) = \frac{\sin \ell \pi \xi}{\ell \pi \xi} \quad (2)$$

$H(\xi, \eta)$ の振幅スペクトルである $|H(\xi, \eta)|$ は，一定周期ごとに 0 となる関数であり，この 0 となる点によって縞模様が現れる． $|H(\xi, \eta)|$ の周期はぶれの幅 ℓ によって決定され，その周期は $\nu_0 = 1/\ell$ である．ここでは，方向は $0[\text{deg}]$ として示したが，方向が $0[\text{deg}]$ 以外の場合は，この縞模様が，その方向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 $|G(\xi, \eta)|$ について考える．式 (1) のフーリエ変換から $|G(\xi, \eta)|$ は，原画像の振幅スペクトル $|F(\xi, \eta)|$ と PSF の振幅スペクトル $|H(\xi, \eta)|$ との掛け算で表される．そのため，PSF の振幅スペクトルの，一定の周期 ($\nu_0 = 1/\ell$) 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，またぶれの方向に合わせて縞模様の方向が変わる．さらに，ノイズがある場合でも一定の周期ごとに 0 に近い値になる特徴は変わらない．以上のことから，劣化画像の振幅スペクトルの縞模様は，原画像によらず PSF の特徴のみによって決まることが分かる．そこで，この縞模様の周期およ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 および方向 θ を，原画像によらず安定に推定することが可能である．3 章ではこの縞模様の具体的な検出手法を提案する．

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 (ぶれの方向が $0[\text{deg}]$) 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り，ここでは次のような推定手法を提案する．まず，ある探索関数 $\rho(\xi; \nu)$ を用意する．関数 $\rho(\xi; \nu)$ は図 1 (a) のような，周期 ν で極大となる周期関数である．

提案手法では，この関数 $\rho(\xi; \nu)$ と劣化画像の振幅スペクトル $|G(\xi)|$ との相関が最小となる ν を探索することによって，縞模様の推定を行う．これは，次の評価関数 $I(\nu)$ の最小化問題として定式化される．

$$I(\nu) = \frac{\|G(\xi)\rho(\xi; \nu)\|_1}{\|G(\xi)\|_1 \|\rho(\xi; \nu)\|_1} \quad (3)$$

ここで $\|\cdot\|_1$ は 1 次ノルムを表す．

このとき， $|G(\xi)|$ は PSF の特徴から $\nu_0 = 1/\ell$ の周期で極小となり， $\rho(\xi; \nu)$ は ν の間隔で極大となることから， ν と ν_0 が一致したときに，この評価関数 $I(\nu)$ は，原画像の特徴によらず最小の値となる．以上から，評価関数 $I(\nu)$ が最小となるときの ν の値を $\hat{\nu} = 1/\hat{\ell}$ とし， $\hat{\ell}$ をぶれ幅の推定値とする．

ここまで 1 次元について述べてきたが，次に 2 次元における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式になる．

$$I(\nu, \theta) = \frac{\|G(\xi, \eta)\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)\|_1}{\|G(\xi, \eta)\|_1 \|\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)\|_1} \quad (4)$$

ここで $\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)$ は， $\rho(\xi; \nu)$ を 2 次元に拡張した関数を， θ ほど回転した関数を表す (図 1 (b))．この周期 ν と方向 θ を変化させながら $G(\xi, \eta)$ と相関をとる．このとき， $\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)$ の周期 ν と方向 θ が， $|G(\xi, \eta)|$ の縞模様の周期と方向に一致したとき，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周期 ν と方向 θ を求め，その値からぶれの幅と方向を決定する．このように，原画像によらない特徴に着目することで，PSF パラメータを安定に推定

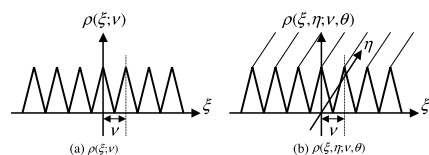


図 1 関数 $\rho(\xi; \nu)$ および $\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)$
Fig. 1 Function $\rho(\xi; \nu)$ and $\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)$.

することができる。

なお、画像の一部がぶれている場合は、ぶれ部分のみを対象とすることにより、同様に推定を行うことができる。

4. 実験結果

提案手法の効果を確認するために、シミュレーション画像および、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 および方向 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。評価関数の最小化には全

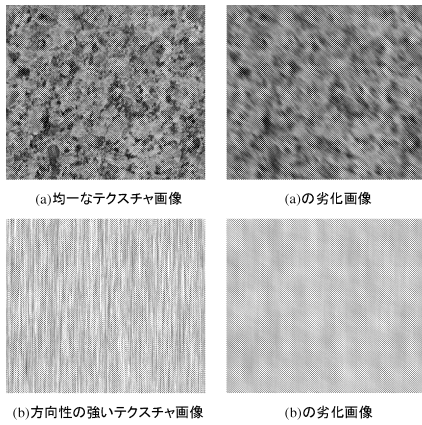


図 2 シミュレーション画像。
Fig.2 Simulation images.

表 1 PSF パラメータの推定結果

Table 1 Result of estimated parameter of PSF.

	真値		Yitzhaky らの手法		提案手法	
	幅 [pix]	方向 [deg]	幅 [pix]	方向 [deg]	幅 [pix]	方向 [deg]
(a)	21	30	21	29	21	30
(b)	21	30	25	76	21	30

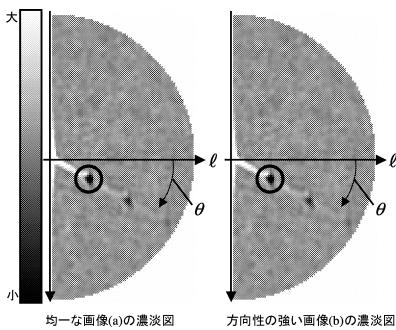


図 3 評価関数 $I(\nu, \theta)$ の濃淡図。丸がついている部分は最小値を表す

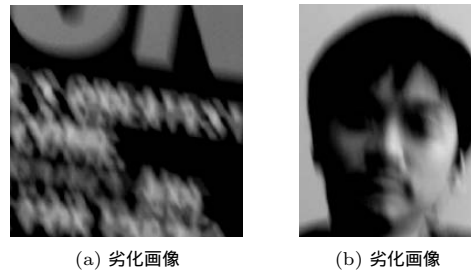
Fig.3 Density map of evaluation function $I(\nu, \theta)$. Circle shows minimum value.

探索を用い、ぶれ幅の探索範囲は $1 \sim 70$ [pix] とした。推定は提案手法と、Yitzhaky らの手法で行い⁶⁾、結果の比較を行った。

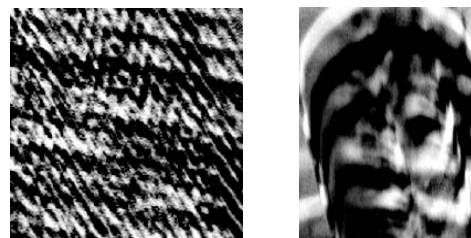
シミュレーション実験には、図 2 の 2 種類の画像を使用した。1 枚はどの方向に対しても均一なテクスチャの画像 (a) で、もう 1 枚は方向性の強いテクスチャの画像 (b) である。この 2 種類の画像に対して、幅 21 [pix]、方向 30 [deg] のぶれ画像を作成し、推定を行った。実験結果を表 1 に示す。また、評価関数 $I(\nu, \theta)$ を計算し、その値をプロットした濃淡図を図 3 に示す。

この結果から、Yitzhaky らの手法では、方向性の強い画像では推定に失敗しているのに対し、提案手法では、方向性の強い画像に対しても PSF パラメータが正しく求まることが確認できた。

実画像実験には図 4 の (a)、(b) の 2 枚の画像を使



(c) 提案手法による復元画像 (幅 23 [pix] 方向 62 [deg]) (d) 提案手法による復元画像 (幅 18 [pix] 方向 79 [deg])



(e) Yitzhaky らの手法による復元画像 (幅 21 [pix] 方向 77 [deg]) (f) Yitzhaky らの手法による復元画像 (幅 41 [pix] 方向 75 [deg])

図 4 実画像実験に使用した画像と復元結果。括弧内は推定結果

Fig.4 Blurred images and restoration results. Estimated result is in parentheses.

Estimated result is in parentheses.

用した．この画像に対して PSF パラメータの推定を行い，復元した画像を図 4 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 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．なお，復元にはウィナーフィルタを用いた．

図 4 の (a) の実験画像は文字が等間隔に配置されている画像であるために，原画像に強い方向性がある．そのため，Yitzhaky らの手法では PSF パラメータの推定が困難であると考えられ，結果として良い復元結果は得られなかった．一方で提案手法を用いて復元した画像は，劣化画像では読むことができない文字が読めるようになり，これは推定した PSF が正しかったことを示している．図 4 の (b) の画像に対しても，提案手法では良い結果が得られた．

5. 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．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 $\rho(\xi, \eta; \nu, \theta)$ との相関が最小となる点を探索することによって，PSF パラメータの幅 ℓ ，方向 θ を推定する手法を提案した．また，シミュレーション実験によってその効果を確認した．さらに，実画像を用いたぶれ回復の実験を行い，提案手法の効果を確認した．これらの実験から，提案手法によって方向性の強い画像に対しても，安定して PSF の推定ができることを確認した．

評価関数の効率的な最小化が，今後の課題である．

参 考 文 献

- Hailin, J., Paolo, F. and Roberto, C.: Visual tracking in the presence of motion blur, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.II, pp.18–25 (2005).
- Basclé, B., Blake, A. and Zisserman, A.: Motion deblurring and superresolution from an image sequence, *Proc. 4th European Conference on Computer Vision*, pp.573–582 (1996).
- Cannon, M.: Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase, *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process*, Vol.24, pp.58–63 (1976).
- Chang, M.M., Tekalp, A.M. and Erdem, A.T.: Blur identification using the bispectrum, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.39, pp.2323–2325 (1991).
- Reeves, S.J. and Mersereau, R.M.: Blur identification by the method of generalized cross-validation, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.I, pp.301–311 (1992).
- Yitzhaky, Y. and Kopeika, N.S.: Identification of blur parameters from motion blurred images, *CVGIP: Graph. Models Image Process*, Vol.59, pp.310–320 (1997).
- 米司健一，田中正行，奥富正敏：直線の手ぶれ画像復元のための PSF パラメータ推定手法，情報処理学会研究報告，No.149, pp.47–52 (2005).

(平成 17 年 8 月 30 日受付)

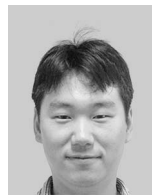
(平成 18 年 3 月 17 日採録)

(担当編集委員 北原 格)



米司 健一

2005 年東京工業大学工学部制御システム工学科卒業．現在，同大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻修士課程在学中．



田中 正行

1998 年東京工業大学工学部制御システム工学科卒業．2000 年同大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了．2003 年同大学院理工学研究科機械制御システム専攻博士課程修了．同年アジレント・テクノロジー（株）入社．2004 年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研究員．工学博士．



奥富 正敏（正会員）

1981 年東京大学工学部計数工学科卒業．1983 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了．同年キヤノン（株）入社．1987 ~ 1990 年カーネギーメロン大学コンピュータサイエンス学科客員研究員．1994 年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻助教授．2002 年同大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授．工学博士．