

RI-001

## 撮影光学系の収差にロバストな直線的画像ブレ推定法 Aberration-robust Estimation Method of Linear Motion Blur Parameters from Image

江野口 章人†  
Akito Enokuchi

中須賀 真一‡  
Shinichi Nakasuka

### 1. まえがき

物体を撮影する際、撮影光学系（カメラ）と物体が相対的に動くとき、画像ブレが生じる。視線のずれが等速直線運動と仮定できるときは、このブレは線分と見なせる。撮影した画像から、この線分の長さや方向を推定する研究は数多くなされてきた。しかし収差、すなわち光学系の性能劣化がある場合については本格的に検討されてこなかった。このような場合、従来手法では収差とブレを区別できず、推定精度が著しく劣化するという問題があった。本論文では、この問題に対処する手法を提案する。本手法は、光学系の性能が不確実な環境下における運動推定や画像復元分野で、有用性が特に高いと考えられる。

### 2. 収差の影響を受けにくいブレ推定法

#### 2.1 ブレ推定の基本原理

物体  $o$  が劣化要素  $h$  の影響を受けて画像  $g$  として得られるモデルは、加法ノイズを無視すれば

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

とかける。 $*$ は2次元畳み込み演算子を表わす。 $h$ はPSFと呼ばれる。式(1)をフーリエ変換し、絶対値をとれば

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

が得られる。ここで、 $G, H, O$ はそれぞれ画像  $g$ , 劣化要素  $h$ , 物体  $o$  の2次元フーリエ変換であり、 $(\xi, \eta)$ はフーリエ面を表わす直交座標である。カメラの視線が露光時間中に等速直線運動した場合、対応する  $h$  は線分となる。具体的には、ブレが  $x$  方向に長さ  $\rho$  の線分である場合、そのフーリエ変換を  $H_{mot}$  とかけば、 $N \times N$  画素の画像に対して、

$$H_{mot}(\xi, \eta) = \frac{\sin(\rho\pi\xi/N)}{\rho\pi\xi/N} \quad (3)$$

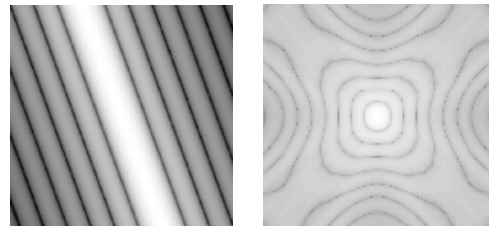
となる。式(3)は、周期  $\nu = N/\rho$  ごとにゼロ点を持ち、フーリエ面では周期的で  $\eta$  軸に平行な縞模様となるのがわかる。また、式(2)を介して画像のスペクトル振幅にもこの縞模様が現れる。ブレ方向が  $x$  方向と角度  $\theta$  をなす場合、縞模様は  $\eta$  軸と角度  $\theta$  をなす。多くの画像ブレ推定手法がよりどころとする基本原理は、画像のスペクトル振幅に現れる、この縞模様の周期と方向を調べることにより、ブレの長さ  $\rho$  と方位角  $\theta$  を推定するというものである。近年提案されている方法[1][2]は、 $\rho$  と  $\theta$  を同時に推定することによって、被写体の影響を受けにくくしている。

#### 2.2 ブレ推定問題における収差の影響

収差とは光学系の結像性能の劣化であり、例えばレンズが熱変形したり、レンズ同士が位置ずれした場合に生じる。収差のフーリエスペクトルを  $H_{aberration}$  とおけば、式(2)における画像劣化要素  $H$  は式(3)との積で与えられ、

$$|H(\xi, \eta)| = |H_{mot}(\xi, \eta)| \cdot |H_{aberration}(\xi, \eta)| \quad (4)$$

となり、収差の影響は式(2)を介して画像に現れることがわかる。収差には、スペクトル振幅が縞模様を伴うものと、方向依存性が強いものがある。前者の例として非点収差、球面収差、デフォーカス（焦点はずれ）があり、後者の例としてコマ収差がある。ブレと非点収差のスペクトル振幅を図1に例示する。両者の縞模様の方向は互いに無関係である。双方によって劣化を受けた画像のスペクトル振幅を図2に示す。このように、収差は、ブレに由来しない縞模様を画像のスペクトル振幅に生じため、ブレの長さや方位角を同時に推定しようとすると、誤る危険性がある。



ブレのスペクトル振幅 非点収差のスペクトル振幅  
図1 劣化要素のフーリエスペクトル振幅

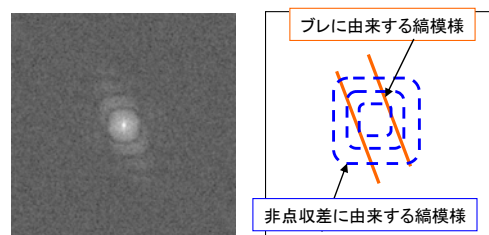


図2 図1に示すブレと非点収差によって劣化を受けた画像のスペクトル振幅（左）とその模式的説明（右）

#### 2.3 収差の影響を受けにくいブレ推定法

提案するブレ推定法は、図3に示す2つの方針にもとづいて、収差に対するロバスト性を向上する。

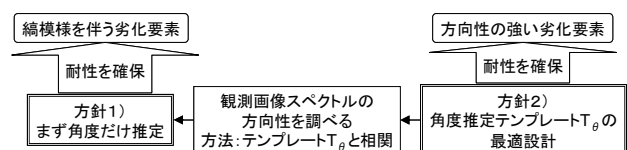


図3 ブレ推定の収差耐性を向上する2つの方針

† 株式会社ジェネシア, Genesia Corporation

‡ 東京大学工学部, University of Tokyo

2.3.1 方針1) まずブレの方向のみを推定する

前節にて確認したように、収差の影響を含んだ画像からブレの長さと同様に推定しようとすると、失敗する危険性がある。そこで、収差に由来する縞模様の影響を受けにくくすることを期待して、まずブレ方向のみを推定し、解の探索範囲を限定することを提案する。具体的には、ブレ方向の候補を1つ、あるいは複数選ぶ。候補を1つ選んだ場合には、続いて長さのみを推定する。候補を複数選んだ場合には、方向の探索範囲を、これらの候補に限定して、方向と長さを推定する。候補を選択した後の手順は、例えば従来の画像ブレ推定手法[1][2]に従う。

2.3.2 方針2) ブレ方向推定テンプレートを設計する

ブレ方向の推定は、「直線的なブレの影響を受けた画像の高空間周波数成分が、ブレと平行な方向には減衰し、直交する方向には減衰しない」という特性にもとづいて行なう。具体的には、図4に示すような、延伸する方向が $\eta$ 軸と角 $\theta$ をなすような帯状のテンプレート $T_\theta$ を導入し、これと画像のフーリエスペクトル振幅 $|G|$ から、式(5)に従ってスペクトルの方向性指標 $R(\theta)$ を求めれば、その直交する2方向についての比 $J(\theta)$ は、ブレ方向の真値において最大値をとることが期待される。そこで、この $J$ をブレ方向推定評価値と定義する。

$$R(\theta) = \sum_{\xi, \eta} T_\theta(\xi, \eta) \log [G(\xi, \eta)] \quad (5)$$

$$J(\theta) = \frac{R(\theta)}{R(\theta + 90 \text{ deg})} \quad (6)$$

ただし、上で述べた方法は、被写体のテクスチャや収差の方向依存性が強い場合に、ブレの方向を正しく推定できない場合がある。この危険を避けるために、テンプレート $T_\theta$ の幅は試行錯誤的に選択されてきた[3]。これに対して本論文では、ブレ推定問題としてのSNRを最大化するように、幅 $T_{\max}$ を設計する。具体的な方法を次節にて提示する。なお、本論文では簡単のため、 $T_\theta$ は帯内部で1、外部で0を取る2値関数とし、設計パラメータは $T_{\max}$ 唯一つとする。

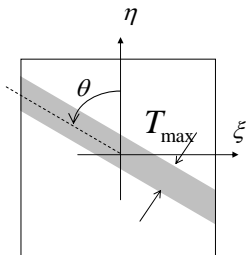


図4 ブレ方向推定テンプレート  $T_\theta(\theta; T_{\max})$

2.4 ブレ方向推定テンプレートの設計法

テンプレート $T_\theta$ の設計評価値を、後述する量 $J_T$ で表わすことにし、この $J_T$ を最大化するような $T_{\max}$ を決定する。一連の設計作業は、実際の画像取得を必要としない。本節では、marginJと $\delta J$ という量を導入し、これらを用いて $J_T$ を求める。なお、これ以降、方向依存性のある劣化要素を異方性ノイズ、方向依存性の無い劣化要素を等方性ノイズと呼ぶことにする。

2.4.1 marginJの定義

ブレ方向を推定する際に異方性ノイズの影響を吸収する余裕をmarginJとする。その導出過程の概要を図5に示す。その定量化には、いくつかのパラメータを定量化する必要があるが、これは2.4.4節にまとめて述べることにし、ここでは既知とする。まず、さまざまな長さのブレを与えた仮想的な画像のスペクトル振幅 $G_{\text{iso}}(\rho)$ を、数値的に得る。これは、定量化した等方性ノイズを式(2)に代入することで得られる。ここで、ブレの方向は $\theta = \theta_{\text{true}} = 0$ と仮定して一般性を失わない。続いて $|G_{\text{iso}}|$ と、さまざまな幅 $T_{\max}$ のテンプレート $T_\theta(\theta; T_{\max})$ を式(5)に代入して、スペクトル振幅の方向性指標 $R_{\text{iso}}$ を求める。さらに、式(6)に従ってブレ方向推定評価値 $J_{\text{iso}}(\theta, \rho; T_{\max})$ を求める。この $J_{\text{iso}}$ は $\theta = \theta_{\text{true}}$ において最大となることが期待される。ここで、異方性ノイズが、特定の角度近傍においてのみ大きな値をもつことを考慮すると、ブレ方向真値の近傍における $J_{\text{iso}}$ の振幅が大きいほど、より強い異方性ノイズが混入しても、正しくブレ方向を推定できることが期待できる。そこで、式(7)で計算できるこの振幅をmarginJと定義する。近傍角度 $\delta\theta_s$ は、2.4.4節にて定量化する。

$$\text{marginJ} \equiv \max_{\theta \in S_\theta} \{ J_{\text{iso}}(\rho, \theta) \} - J_{\text{iso}}(\rho, \theta = \theta_{\text{true}} + \delta\theta_s) \quad (7)$$

$$S_\theta \equiv [\theta_{\text{true}} - \delta\theta_s, \theta_{\text{true}} + \delta\theta_s]$$

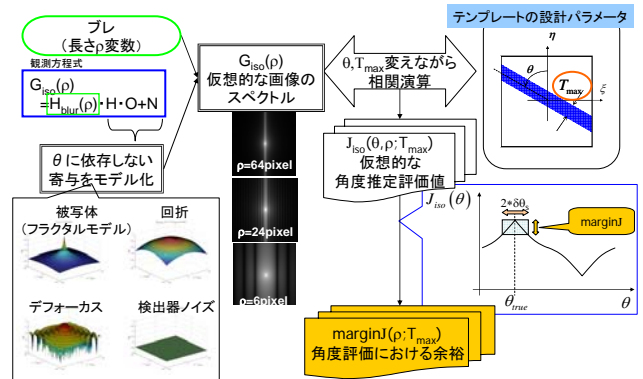


図5 marginJの導出過程の概念図

2.4.2  $\delta J$ の定義

異方性ノイズによるブレ方向推定評価値 $J_{\text{iso}}$ の変化量を $\delta J$ とする。簡単のため、異方性ノイズは $\theta = \theta_{\text{true}}$ においてのみ正值をとり、その他の角度ではゼロ値をとるとモデル化する。このとき、式(5)と式(6)に従って、 $\delta J$ は次式で与えられる。

$$\delta J(\rho; T_{\max}) = \frac{c}{|R_{\text{iso}}(\rho, \theta_{\text{true}} + 90 \text{ deg})|}, c > 0: \text{const} \quad (8)$$

2.4.3  $J_T$ の導入とこれを用いたテンプレート設計

marginJは、ブレ方向推定評価値 $J$ が異方性ノイズを吸収する余裕であり、一方 $\delta J$ は、同じ $J$ が異方性ノイズに対してもつ感度であるから、両者の比率は、ブレ方向を推定するプロセスの、等方性および異方性ノイズに対する影響の受けにくさと解釈できる。また、ブレ推定問題としてのノイズの少なさと解釈できる。この比率を $J_T$ とかくことに

すると、これは式(7)と式(8)をもちいれば、次式で与えられる。

$$J_T(\rho; T_{\max}) \equiv \frac{\text{marginJ}(\rho; T_{\max})}{\delta J(\rho; T_{\max})} \quad (9)$$

$$= \text{marginJ}(\rho; T_{\max}) \cdot |R_{\text{iso}}(\rho, \theta_{\text{true}} + 90\text{deg})|$$

一般性を失わずに、式(8)における定数  $c=1$  とした。ここで、ブレ長さ予測値の確率分布を考え、 $J_T$  の確率的期待値を最大化するような幅  $T_{\max}$  を設計値とする。ブレは長いほどブレ推定問題としての信号は強くなるから、ここで設計した  $T_{\max}$  は、ブレ推定問題としての SNR を最大化すると解釈できる。

#### 2.4.4 marginJ の定量化に必要なパラメータの設定

ここまで、marginJ を定量化するのに必要なパラメータを既知として議論を進めた。可能なら、これらのパラメータに関する先験情報が利用すればよい。本節では、このような先験情報が、撮影時には未知である場合を想定して、簡易な設定方法を提示する。まず、仮想的な画像スペクトル  $G_{\text{iso}}$  の定量化に必要なパラメータの設定方法を表 1 に記す。

表 1  $G_{\text{iso}}$  の定量化に必要なパラメータとその設定方法

パラメータ	パラメータ設定方法
デフォーカス	ブレ方向推定が条件よく行なえる範囲で最大のデフォーカスを想定
被写体	(等方性) フラクタルモデル[4]
回折	PSF が 1 画素に対応すると仮定、あるいはこの項目を無視する
撮像素子ノイズ	画像の階調から求まる量子化誤差

これらのうち、デフォーカス（焦点はずれ）は、テンプレート  $T_0$  の最終的な設計結果に最も強く影響することがわかっており、またその量について先験情報が利用できない場合が多いと考えられる。そこで、その設定方法を具体的に述べる。デフォーカスのスペクトル  $H_{\text{defocus}}$  およびその第一暗環の半径  $r_{1\text{stdark}}$  は、式(10)および式(11)で与えられる[5]。

$$H_{\text{defocus}}(f) = \frac{J_1(2\pi \cdot r_i \cdot f)}{\pi \cdot r_i \cdot f} \quad (10)$$

$$r_{1\text{stdark}} = 0.61 \frac{N}{r_i} \quad (11)$$

ここで  $J_1$  は 1 次の第 1 種ベッセル関数であり、 $f$  は空間周波数を表す。一方で、ブレ長さの最短値  $\rho_{\min}$  を与えれば、対応する縞模様間隔  $\nu_{\max}$  が式(12)から得られる。

$$\nu_{\max} = \frac{N}{\rho_{\min}} \quad (12)$$

ここで、デフォーカスのパワーの大部分は、第一暗環の内側に集中する[5]ことを利用し、ブレ方向推定が条件よく行なえる範囲で最大のデフォーカスを想定することにする。具体的には、 $\nu_{\max}$  と  $r_{1\text{stdark}}$  を等置することで、式(10)で与え

られるデフォーカスのスペクトルを定量化する。このときのスペクトル振幅を模式的に図 6 に示す。

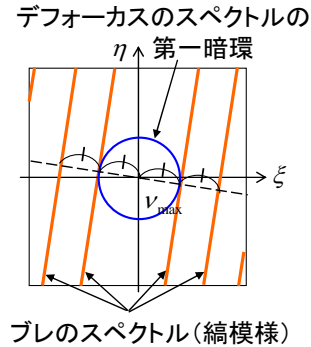


図 6 想定するデフォーカス量を決めるためのスペクトル振幅の模式図（スペクトル領域におけるデフォーカスの第一暗環の半径が、ブレに由来する縞模様間隔  $\nu_{\max}$  と等しいようなデフォーカスを与える）

続いて、式(7)で与えるべき、marginJ を定義する近傍角度  $\delta\theta_s$  の設定方法を述べる。ブレ方向の推定誤差が増えるとブレ長さの推定は正常に行なえなくなるが、その許容される最大角度を  $\delta\theta_s$  とする。これを概念的に図 7 に示す。具体的には式(13)で与える。ブレ方向推定誤差が  $\delta\theta_s$  を超えると、ブレ長さ推定が正常に行なえなくなることが実験的にわかっており、この方法は簡単な設計法として採用できる。

$$\delta\theta_s [\text{rad}] = \frac{1}{\rho_{\min} [\text{pixel}]} \quad (13)$$

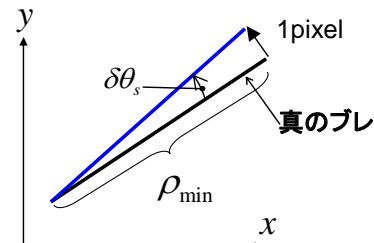


図 7 近傍角度  $\delta\theta_s$  の設定方法

### 3. 画像ブレ推定実験

#### 3.1 テンプレート設計結果

ブレ長さの確率分布として、標準偏差を  $\sigma_p$  とする正規分布を仮定する。 $\sigma_p$  を大きくしていくと、設計結果がブレ長さの予測値、すなわち正規分布の平均値に依存せず一定となった。 $N=256$  画素の場合、 $\sigma_p=45$  画素のとき幅  $T_{\max}=11$  画素で一定となった。なおこのとき、 $\rho_{\min}=6\text{pixel}$  とし、式(13)に従って  $\delta\theta_s \approx 10\text{deg}$  を用いた。

#### 3.2 計算機実験の設定

図 8 に示す画像から、 $256 \times 256$  画素の部分画像を、互いに重なり合わないようランダムな位置で 100 枚切り出し、被写体と見なした。推定すべきブレと、表 2 に示す 4 種類の収差を与え、100 枚ずつ合計 400 枚の画像を生成した。画像には SNR100 となるよう白色正規雑音を加えた。

デフォーカスは与えていない。ブレ情報の推定は、次の2つの方法で行なった。

- ・提案手法：前節にて設計した幅 11 画素の  $T_0$  で方向を推定し、唯一つの角度推定値候補を選択し、続いて長さを推定する方法。長さの推定には従来手法[1]を用いた。
- ・従来手法[1]：ブレ長さと方向を同時に推定する方法。



図8 被写体として用いた画像 (山岳地帯)

表2 与えた収差の種類と強さ、およびブレ方位角

	caseA	caseB	caseC	caseD
非点(Z5)	0	$2\pi$	0	$-\sqrt{3}\pi$
非点(Z6)	0	0	0	$\pi$
コマ(Z7)	0	0	$2\pi$	$\pi$
コマ(Z8)	0	0	0	$-\sqrt{2}\pi$
三次球面(Z9)	0	0	0	$\sqrt{2}\pi$
ブレ方向	20deg	20deg	60deg	5deg

※収差の強さを、規格化 FRINGE Zernike 多項式係数で示した

### 3.3 実験結果

ブレ方向の推定結果を図9に示す。与えた収差別の性能の中央値を代表性能として併記した。最高性能に注目すると、どちらの手法を用いてもほぼ100%正答しており、違いは見られないが、これはcase A (無収差) に対応することがわかっている。一方、最悪性能や、代表性能に注目すると、提案手法による推定性能が概ね高いことがわかる。

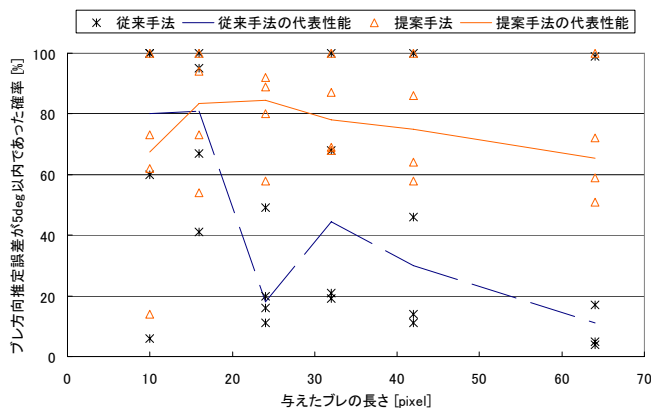


図9 ブレ方向推定結果

次に、case B (非点収差を与えた) における推定結果の度数分布を図10に示す。従来手法では非点収差に伴う縞模様をよく検出してしまい、誤推定が多いことがわかる。一方で、提案した手法は、ブレ方向を正しく推定した結果、収差の影響をあまり受けずに、正しくブレ情報を推定していることが確認できる。

ブレ情報真値: 方位角  $\theta=20\text{deg}$ , 長さ  $\rho=24\text{pixel}$

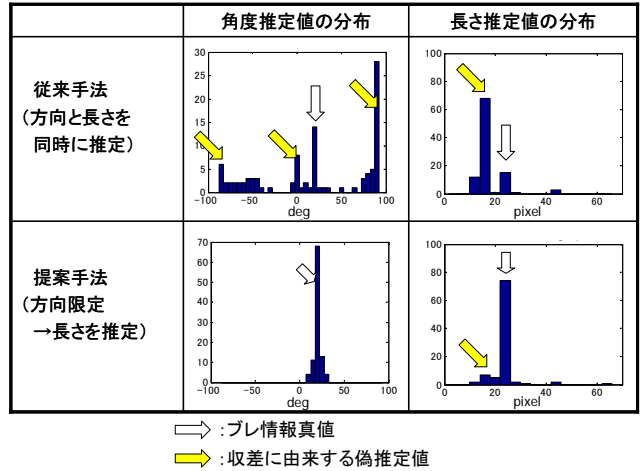


図10 case B におけるブレ方向・長さ推定値の度数分布

### 4. むすび

画像からブレの方向と長さを推定する問題に対して本論文では、光学系の性能劣化すなわち収差へのロバスト性を高める枠組みとして、まずブレの方向を推定して解の探索範囲を限定するという方針と、ブレ方向推定テンプレートを設計するという方針を提供し、これに基づく解決方法を提案した。計算機実験の結果、従来の手法に比べ、収差の影響を受けにくい推定手法であることが示された。本手法は、運動推定や、画像復元分野において有用であり、特に、光学系の性能が不確実な環境、例えば十分な校正やメンテナンスが行えなかったり、光学系が変質したり、鏡筒が変形するような過酷な環境において有用性が高いと考えられる。

### 参考文献

- [1] 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(卒論セッション). 情報処理学会研究報告. CVIM,[コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol.2005, No.38, pp.47-52, 2005
- [2] M. Sakano, N. Suetake, and E. Uchino. "A PSF Estimation Based on Hough Transform Concerning Gradient Vector for Noisy and Motion Blurred Images." IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.90, No.1, pp.182-190, 2007
- [3] 橋本正一, 斎藤英雄. Psf のパラメータ分布を推定するシフトバリエーションぼけ画像の復元法. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol.77, No.4, pp.719-728, 1994
- [4] D.J. Field. "Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells." J. Opt. Soc. Am. A, Vol.4, No.12, pp.2379-2394, 1987
- [5] J.Goodman. Introduction to Fourier Optics. Roberts & Company Publishers, 2004