

## 回転ブレ画像のブレの中心とその角度の推定

### Estimations of the center and the angle of rotationally blurred images

小野直樹

滝山竜三

Naoki ONO

Ryuzo TAKIYAMA

九州芸術工科大学

Kyushu Institute of Design

あらまし 劣化画像の修復を行う上で、その劣化系のPSFを推定することは重要な問題である。劣化画像の一種、一様回転ブレ画像のPSFは、ブレの中心及びその角度を与えることによって定められる。本稿では、回転ブレ画像のブレの中心及びそのブレの角度の推定のための一方法を提案している。ここで提案している方法は、回転ブレ画像のエッジが回転方向のエッジとして、即ちブレの中心を中心とする円弧となって現れる特徴を用いたものである。つまり、エッジとして抽出した円弧によって、中心座標とブレの角度の推定を行うものであり、実験からもこの方法が有効であることを確かめている。ここで提案している方法は、ブレの角度が大きいほどそれらの検出精度が向上するため、回転ブレ修復おける効果的なPSF推定方法として期待できる。

Abstract The PSF of the rotationally blurring system is specified by rectfunction with an appropriate spread width in a rotational direction. To restore a rotationally blurred image, identifying the center and the magnitude of rotation in the image is of great importance. A method to estimate the center and the angle of rotation in blurred images is proposed. In the method, it is used that the edges of the rotationally blurred image tend to occur in rotational direction. The center and the angle are estimated by using arcs detected by image processing. Experimental results are shown to demonstrate the proposed method to be effective.

#### 1. ま え が き

カメラの露光中に被写体がカメラと相対的に動いている場合、得られる写真はブレ画像となる。手ブレによってボケの生じた写真は、この種の劣化像の一例である。一般にブレの方向には、直線方向と回転方向、及びそれらを合成したものが考えられる。

直線方向の動きによって劣化した2次元画像の修復は、その動きの方向での一次元修復を繰り返して実行することによって行うことができ、実際にいくつかの修復方法が紹介されている<sup>(1)</sup>。回転方向のブレに対しては、画像を極座標表示することによって、同様に一次元ボケの修復方法を用いることができる<sup>(2)</sup>。すなわち、極座標変換と一次元修復とによって、

回転ブレ画像の修復が実現できる。しかしながら、その際に用いられるデジタル画像の極座標変換の方法の如何によって、修復結果や処理時間が左右される<sup>(3)</sup>。

劣化画像の修復を現実に行う場合、その劣化系のPSF(Point Spread Function)を推定することが、言うまでもなく重要な問題となる。直線ブレの場合には、その方向とブレの幅とがわかれば劣化のPSFが定められる。一方回転ブレ画像の場合には、PSFの推定は、ブレの中心の検出及びブレの角度を推定することと等価である。つまり、回転ブレ画像を修復するためには、その回転の中心とブレの角度を特定することが極めて重要となる。

本稿では、回転方向への一様な動きによって劣化した画像のブレの中心の検出とそのブレの角度の推定について考察し、そのための一方法を提案している。更に、その方法に基づきパーソナルコンピュータを用いた実験を行い、良好な結果が得られることを示している。

## 2. 回転ブレのPSFについて

露光中にカメラが動いたり、被写体が動くとその写真は、ボケ画像となる。ここでは、そのときの劣化系について考察する。

まず、簡単のために横ブレについて考えることにする。カメラ及び被写体が動いていないときに得られる画像を  $f(x, y)$  とする。つまりこれが原画像である。ここで前述の仮定より、被写体の動きは一様で、 $x$  方向のみであり、露光中に結像面上で、画像が  $a$  だけ動くものとする。この結果得られる劣化像  $g(x, y)$  は、

$$g(x, y) = \frac{1}{a} \int_{x-a}^x f(x', y) dx' \quad (1)$$

となる。一般に画像の  $x$  方向への線形劣化系は、次のように表すことができる。

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

ここで、 $h(x-x')$  は劣化系のPSFである。(1)と(2)とを比較すると

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{a} & 0 \leq x < a \\ 0 & \text{その他の場合} \end{cases} \quad (3)$$

となる。つまり  $h(x)$  は、間隔  $(0, a)$  で一定値  $1/a$  をとる。即ちこの系のPSFは、幅  $a$  の  $\text{rect}$  関数である。

回転ブレ画像の劣化系についても同様な考察が行える。一様に回転している物体を撮影した場合には、露光中に画像が一様にある角度  $\theta$  だけ回転することになる。ここで画像を回転の中心を原点とする極座標で表すことにしよう。動きのないときの画像を原画像として  $f(r, \theta)$  で表せば、回転ブレ画像  $g'(r, \theta)$  は

$$g'(r, \theta) = \frac{1}{\Theta} \int_{\theta-\Theta}^{\theta} f(r, \theta') d\theta' \quad (4)$$

となる。回転方向のPSFを  $h'(\theta)$  で表せば、この式は

$$g'(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} h'(\theta-\theta') f(r, \theta') d\theta' \quad (5)$$

$$h'(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\Theta} & 0 \leq \theta < \Theta \\ 0 & \text{その他の場合} \end{cases} \quad (6)$$

と書き直すことができる。つまり、回転方向へ幅  $\Theta$  の  $\text{rect}$  関数で表されるPSFによって劣化した画像とみなすことができる。

このように回転ブレの生じた画像は、ブレの中心を原点とする極座標系で表せば、回転方向への  $\text{rect}$  関数による劣化像である。従って、回転ブレ画像のPSFを定める問題は、ブレの角度  $\Theta$  と回転の中心を特定する問題と同義である。3.、4. でその方法について詳しく述べる。

## 3. 回転ブレの中心・角度の推定のための画像処理

一般に回転ブレ画像のエッジは、回転方向に生じ、半径方向へは生じにくい。つまりエッジがブレの中心を中心とする円弧として生じ易くなっている。本稿では、回転ブレの中心及び角度を求めるのにブレ画像のこのような性質を用いる。

### 3.1 ブレの方向とエッジの関係

画像にブレが生じた場合、ブレの方向に垂直な方向のエッジはブレによってボケることになる。一方、ブレに平行なエッジはブレの程度に応じた長さのエッジとして保存される。図1は、直角座標系において画像に  $x$  方向へのブレが生じた画像の一例である。

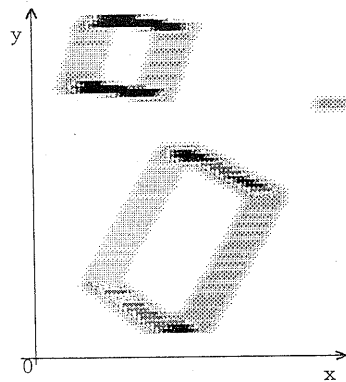


図1 横ブレ画像

y軸に平行なエッジはボケて、x軸に平行なエッジが残っている。更に、このエッジの長さは、ブレのために画像本来のエッジよりブレの幅にほぼ等しい長さだけ長くなる。

回転方向へのブレについても同様な考察が行える。即ち、半径方向へのエッジは、ブレによってボケ、回転方向のエッジがブレの大きさに応じた長さの線分として残る。これは、直角座標上で眺めるとブレの中心を中心とする半径方向のエッジがボケて薄くなり、回転方向のエッジが長くなって円弧ができることを意味している。図2に回転ブレの生じた画像の例を示す。半径方向のエッジがボケていることがわかる。

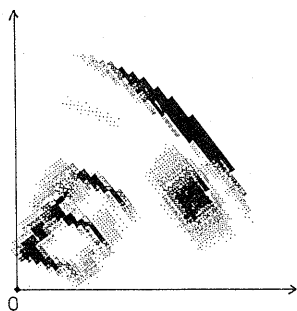


図2 回転ブレ画像

### 3. 2 円弧抽出のための画像処理

ここでは、ブレによって生じた円弧を取り出すための画像処理について説明する。即ち、円弧を構成する座標点列を抽出する方法を述べる。

まず、画像のエッジ検出を行う。これはコンピュータ画像処理において一般に用いられている Sobel、Robert などのマスクを用いて行うことができる。この結果得られるエッジ画像は、エッジの程度に応じた濃度値を有する画素によって構成される多値画像である。次に、この画像を2値化する。ここでは2値化のしきい値を画像の状態を見ながら外部入力することにする。通常、エッジを2値化するとエッジは幅1以上の帯として現れる。そこで円弧線分を抽出するために2値画像の細線化を行う。

これら一連の処理によって、ブレによって生じた円弧が得られる。しかし、上の処理では、円弧以外の線分もいくつか残ることになる。即ち、回転ブレの中心付近では、直角座標上で眺めるとブレが小さくなるため、半径方向のエッジが残ることになる。

又、2値化の時に複数の帯状円弧が一部重なることがあり、それを細線化すると図3に示すように二つの円弧をつなぐ線ができてしまう。このような状態は、2値化のしきい値を大きくすれば防ぐことができるが、しきい値が大きいと抽出すべき円弧の長さが短くなってしまふ。中心検出を精度よく行うためには、円弧はある程度長くなければならない。そのため、しきい値は一概に大きくすることはできない。

つまり、上述の画像処理で取り出したエッジ線分全てを中心検出に用いることはできない。そこでここでは、円弧と思われる線分を外部入力によって指定することにする。この結果、画素の点列で構成される複数の円弧線分が得られることになる。

## 4. 中心座標の検出 ブレ角度の推定

3. で述べた一連の処理を用いれば、ブレによって生じたエッジに基づく円弧が得られる。ここでは、そのデータを使った円弧の中心座標とブレの推定方法について説明する。

### 4. 1 中心座標の検出

抽出された複数の円弧は、それぞれ半径は異なるが、その中心座標は同一である。よって、ブレの中心座標の検出は、抽出された円弧を構成する点列に最も適応する中心座標を求める問題と等価である。

計算機を用いた画像処理において、円の中心座標や半径の推定には、通常 Hough 変換が用いられているようである<sup>(4) (5) (6)</sup>。Hough 変換は、雑音の中から指定した形状の対象、例えば直線、円、楕円といったものを抽出する場合に有効である。しかし、検出を精度よく行おうとすると、計算に要するメモリ及び処理時間が非常に大きくなる。円検出のために必要メモリの縮小化、処理の高速化をはかったアルゴリズムもいくつか紹介されているが、

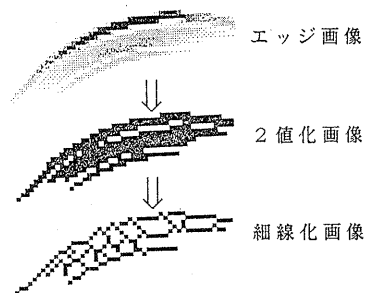


図3 円弧をつなぐ線分の発生

180°以上の中心角の円弧、同一の円に基づく複数の円弧が向かい合って位置する場合といったように用いる円弧になんらかの条件が課せられている<sup>(5)</sup>。円弧に関する条件のないものもいくつか挙げられるが、円弧を抽出する以前の画像の円の内側と外側の濃度値の違いが用いられており、ここでは用いることはできない<sup>(6)</sup>。

本稿では、ブレに基づく円弧を外部入力によって指定するため、雑音に対してはほとんど考慮する必要はない。そこで、円弧の中心座標を最小二乗法によって求めることにする。

半径の異なる円弧がM個与えられているときに、それらの円弧を表す点列に対して、誤差を最小にする共通な円の中心座標(a, b)を求める。まず、各々の円弧に対して誤差関数を次のように与える。

(図4)

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \sum_{j=1}^{N_1} \{ (x_{1j} - a)^2 + (y_{1j} - b)^2 - R_1^2 \}^2 \\
 &\quad \vdots \\
 J_i &= \sum_{j=1}^{N_i} \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 - R_i^2 \}^2 \\
 &\quad \vdots \\
 J_M &= \sum_{j=1}^{N_M} \{ (x_{Mj} - a)^2 + (y_{Mj} - b)^2 - R_M^2 \}^2
 \end{aligned} \tag{7}$$

ここで、i番目の円弧は $N_i$ 個の画素よりなっている。又、i番目の円弧を構成する画素の座標を $(x_{ij}, y_{ij})$ 、それらの画素に最も適した円の半径を $R_i$ で表している。全体の誤差関数Jとして各円弧の誤差関数の和

$$J = \sum_{i=1}^M J_i \tag{8}$$

を用いることにしよう。全ての円弧を考慮して最適な中心座標(a, b)を求めることは、Jの最小化問題を解くことに等しい。

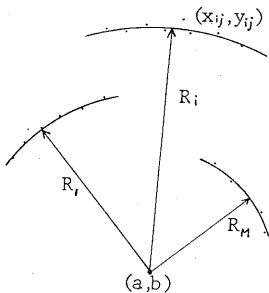


図4 最小二乗法による中心座標の推定

Jは、変数a, bについての偏微分が、

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial J_i}{\partial a} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial J_i}{\partial b} = 0 \tag{10}$$

のときに最小値をとる。又、変数 $R_i$ についての偏微分からは、円弧毎に次の条件が与えられる。

$$\frac{\partial J_1}{\partial R_1} = \frac{\partial J_2}{\partial R_2} = \dots = \frac{\partial J_i}{\partial R_i} = \dots = \frac{\partial J_M}{\partial R_M} = 0 \tag{11}$$

ここで、円弧iにおける評価関数 $J_i$ をa, b,  $R_i$ について偏微分すると

$$\frac{\partial J_i}{\partial a} = -\sum_{j=1}^{N_i} 2 \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 - R_i^2 \} \cdot 2(x_{ij} - a) \tag{12}$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial b} = -\sum_{j=1}^{N_i} 2 \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 - R_i^2 \} \cdot 2(y_{ij} - b) \tag{13}$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial R_i} = \sum_{j=1}^{N_i} 2 \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 - R_i^2 \} \cdot -1 \tag{14}$$

となる。ここで、

$$r_{ij}^2 = (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2$$

とおくと

$$\frac{\partial J_i}{\partial a} = -4 \sum_{j=1}^{N_i} (r_{ij}^2 - R_i^2) (x_{ij} - a) \tag{15}$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial b} = -4 \sum_{j=1}^{N_i} (r_{ij}^2 - R_i^2) (y_{ij} - b) \tag{16}$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial R_i} = -2 \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}^2 - R_i^2 \tag{17}$$

である。よって(17)より、半径に関する式

$$\sum_{j=1}^{N_i} r_{ij} = N_i R_i^2$$

$$\therefore R_i^2 = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 \} \tag{18}$$

を得る。又、(15)、(16)より

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_i}{\partial a} &= -4 \left( \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}^2 x_{ij} - R_i^2 \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \right) \\
 &= -4 \left( \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}^2 x_{ij} - \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J_i}{\partial b} &= -4 \left( \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}^2 y_{ij} - R_i^2 \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} \right) \\
 &= -4 \left( \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}^2 y_{ij} - \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij} \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} \right)
 \end{aligned}$$

であるから、

$$\frac{\partial J_i}{\partial a} = -4 \sum_{j=1}^{N_i} \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 \} (x_{ij} - \bar{x}_i) \quad (19)$$

$$\frac{\partial J_i}{\partial b} = -4 \sum_{j=1}^{N_i} \{ (x_{ij} - a)^2 + (y_{ij} - b)^2 \} (y_{ij} - \bar{y}_i) \quad (20)$$

を得る。ここで、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ は、

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}, \quad \bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij}$$

で各々の x 座標、y 座標平均値を表している。

(19)、(20)を展開すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_i}{\partial a} = & -4 \left\{ \sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - \bar{x}_i) (x_{ij}^2 + y_{ij}^2) \right. \\ & \left. - 2a \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_i) - 2b \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_i) \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_i}{\partial b} = & -4 \left\{ \sum_{j=1}^{N_i} (y_{ij} - \bar{y}_i) (x_{ij}^2 + y_{ij}^2) \right. \\ & \left. - 2a \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_i) - 2b \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_i) \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_i) &= \sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = \sigma_{ix}^2 \\ \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} (x_{ij} - \bar{x}_i) &= \sum_{j=1}^{N_i} (y_{ij} - \bar{y}_i) (x_{ij} - \bar{x}_i) = \sigma_{ixy} \\ \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_i) &= \sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - \bar{x}_i) (y_{ij} - \bar{y}_i) = \sigma_{ixy} \\ \sum_{j=1}^{N_i} y_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_i) &= \sum_{j=1}^{N_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \sigma_{iy}^2 \\ \sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - \bar{x}_i) (x_{ij}^2 + y_{ij}^2) &= P_i \\ \sum_{j=1}^{N_i} (y_{ij} - \bar{y}_i) (x_{ij}^2 + y_{ij}^2) &= Q_i \end{aligned} \quad (23)$$

とおくと

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial J_i}{\partial a} = -4 \sum_{i=1}^M (P_i - 2a \sigma_{ix}^2 - 2b \sigma_{ixy}) = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial J_i}{\partial b} = -4 \sum_{i=1}^M (Q_i - 2a \sigma_{ixy} - 2b \sigma_{iy}^2) = 0 \quad (25)$$

を得る。つまり次の一次方程式が成り立つ。

$$2 \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M \sigma_{ix}^2 & \sum_{i=1}^M \sigma_{ixy} \\ \sum_{i=1}^M \sigma_{ixy} & \sum_{i=1}^M \sigma_{iy}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M P_i \\ \sum_{i=1}^M Q_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

(26)を解けば、

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sum_{i=1}^M \sigma_{ix}^2 \sum_{i=1}^M \sigma_{iy}^2 - \sum_{i=1}^M \sigma_{ixy}^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M \sigma_{iy}^2 & -\sum_{i=1}^M \sigma_{ixy} \\ -\sum_{i=1}^M \sigma_{ixy} & \sum_{i=1}^M \sigma_{ix}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M P_i \\ \sum_{i=1}^M Q_i \end{bmatrix} \quad (27)$$

となる。即ち、(27)によって中心座標 (a, b) が求められる。

#### 4. 2 プレの角度の推定

ブレによって生じた円弧の長さは、ブレの大きさに応じて変わる。例えば、ある1画素だけが、周辺と大きく異なる濃度値を有するような画像に対してブレが生じたときには、その画素の近傍に生じるエッジの長さがブレの長さにはほぼ等しくなる。もちろん、このように1画素だけが周辺と大きく異なる濃度値を有することはごく希であろう。一般の画像では、直線、円といったある程度の大きさのものにブレが生じるため、通常のブレ画像から抽出したエッジの長さをそのままブレの大きさとみなすことはできない。又、2値化や細線化の処理における誤差も考えられる。しかし、こうして得られるエッジの長さは、PSFを推定する上で有用である。つまり、ブレ幅の目安として用いることができよう。

回転ブレ画像においては、ブレの角度が大きくなるほど円弧の中心角も大きくなって現れる。そこで、4.1に従って求めた中心座標と各々の円弧の両端の座標とから、各々の円弧における中心角を求めて、それらの平均を計算する。上に述べたように、通常の画像ではある程度の大きさを持ったものがブレるため、エッジの長さは実際のブレの長さより多少大きくなることが多い。そのためブレの角度は、ここで求めた値よりやや小さめに見積るのが妥当であろう。

#### 5. 実験

回転ブレによって劣化した画像のブレの中心座標及びその角度を推定する実験をパーソナルコンピュータを用いて行った。原画像は、図5に示す91×91画素で構成される256階調の画像である。座標原点を一般性を失うことなく、画像の中心に位置

する画素の中心とする。このように座標系を取れば、画素の中心は、 $x$ 座標、 $y$ 座標共に $-4.5$ から $4.5$ の値をとる。

ブレの中心座標及び角度の検出結果を正確に評価するため、回転ブレ画像は原画像を元に計算機によって生成した。ブレの中心は、上で定めた座標原点 $(0, 0)$ とした。図6(a)に $30^\circ$ ブレ画像、図6(b)に $60^\circ$ ブレ画像を示す。半径 $4.5$ 以上の部分では、ブレが画像の範囲を越える部分の影響を受けるため、直径 $9$ 画素の円の内側の画像をブレ画像として用いている。これらの画像に対してPSFの推定を行った。

3. の処理に従って、エッジ検出、2値化、細線化なる一連の処理を行った結果を図7(a)、(b)に示す。それぞれ図6(a)、(b)に対応している。外周にみられる円弧は、ブレ画像表示に付随する外枠である。即ち一般のブレ画像では、このようなエッジは現れないため、このデータを中心検出に用いることはできない。又、前述したように、中心部分には画像本来のエッジがそのまま現れていることがわかる。更に円弧と円弧とをつなぐ線も見られる。これらの線分も中心検出には用いることはできない。

このような線分を避けてブレによって生じた円弧と思われる線分を取り出した結果を図8(a)、(b)に示す。これらの円弧データを用いて中心検出及び中心角を求めた結果が表1である。各々の円弧に対応する円の半径、中心角をそれぞれ示している。又、参考のために円弧を構成する画素と計算によって求めた円との位置の誤差も表した。図8(a)のデータから求めた $30^\circ$ ブレ画像の中心座標は、 $x$ 方向へ $-0.10$ 、 $y$ 方向へ $-3.18$ だけずれていることがわかる。又 $60^\circ$ ブレ画像については、 $x$ 方向へ $-0.06$ 、 $y$ 方向へ $+0.26$ の誤差がある。

一般に中心の $x$ 座標は、中心座標の上もしくは下に十分な長さの円弧があれば推定の精度が上がる。一方、 $y$ 座標については中心座標の左右の円弧に推定精度が影響される。これは、幾何的にも説明がつくものであり、 $30^\circ$ ブレ画像の実験データについては、中心座標の左右に位置する円弧が十分でなかったために、 $y$ 座標の値が正確に求められなかったものと考えられる。

円弧の中心角は、ブレの角度にほぼ等しい角度が得られている。全体的に大きめの値となるわけは、

前述のように回転方向にある程度の大きさを有するエッジがブレて円弧になったためである。

$30^\circ$ ブレ画像の処理結果と $60^\circ$ ブレ画像の処理結果とを比較すると、 $60^\circ$ ブレ画像の方が中心座標、ブレの角度ともにより推定となっている。即ち、ブレの角度が大きいかほど検出精度が向上する。実際に画像修復を行う場合、ブレの角度小さければ、その修復の程度は小さくて済む。一方、ブレが大きい場合には、その修復も大幅に行う必要があり、修復結果には中心座標の検出誤差が大きく影響することになる。ここで提案している検出方法は、ブレの大きい画像ほど精度よく中心座標を求めることができ、回転ブレ画像の修復のための中心座標検出に有効であると考えられる。

ブレの角度については、ある程度の目安が求められるのにとどまるが、修復を行うためのPSFの大きな手がかりとなりうる。すなわち、ここで求めたブレの角度に近い値のブレをいくつか仮定して修復を行い、修復結果としてはそれらの中で最も適当と思われる画像を採用するといった修復方法が考えられる。ブレの中心座標についても、同様に計算値の近傍で振らせることによって最適な画像を調べることができよう。回転ブレ画像の具体的な詳しい修復方法については、次の機会にゆずる。

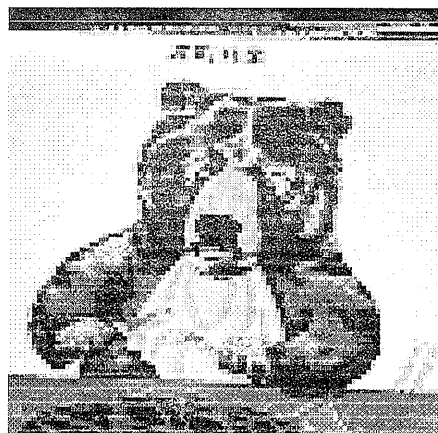
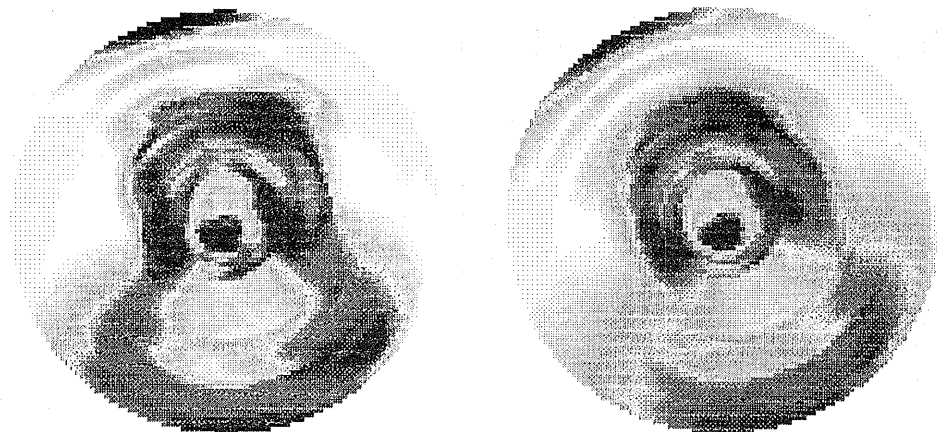


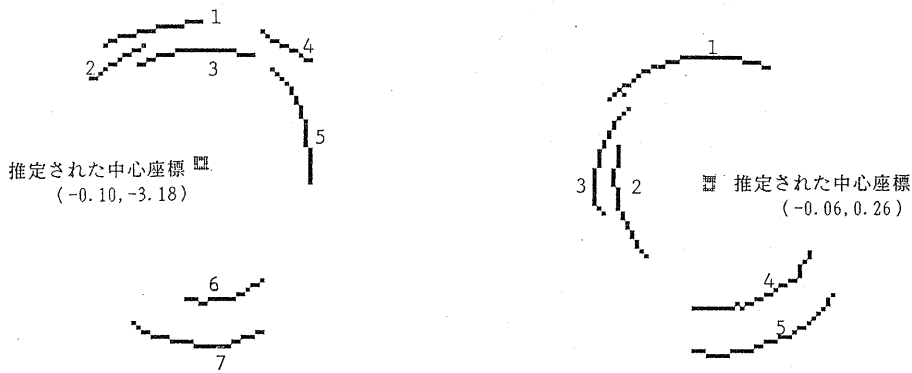
図5 原画像



(a) 30° プレ画像 (b) 60° プレ画像  
 図6 回転プレ画像



(a) 30° プレ画像 (b) 60° プレ画像  
 図7 エッジ細線化画像



推定された中心座標  $\square$   
 (-0.10, -3.18)

$\square$  推定された中心座標  
 (-0.06, 0.26)

(a) 30° プレ画像 (b) 60° プレ画像  
 図8 円弧抽出画像

表1. 30°ブレ画像の中心座標とブレの角度

円弧の番号	円弧を構成する画素数	中心角度 [deg]	円の半径	1画素当りの誤差
1	20	38.9	30.4	0.84
2	11	26.5	27.8	0.52
3	24	57.7	24.2	0.42
4	10	21.4	30.7	0.53
5	24	62.9	23.6	0.70
6	16	33.2	29.4	0.51
7	27	42.0	38.6	0.65
中心座標 = (-0.10, -3.18)				
ブレの角度 = 40.37°				

表2. 60°ブレ画像の中心座標とブレの角度

円弧の番号	円弧を構成する画素数	中心角度 [deg]	円の半径	1画素当りの誤差
1	32	68.5	27.5	0.35
2	23	72.3	19.4	0.51
3	22	58.5	23.7	0.36
4	27	63.4	25.9	0.36
5	30	53.7	35.4	0.42
中心座標 = (-0.06, 0.26)				
ブレの角度 = 63.28°				

## 6. むすび

回転ブレ画像修復のための劣化系のPSF推定方法について、即ち回転ブレにおけるブレの中心とその角度の推定のための一方法を提案している。ここで提案している方法は、回転ブレによって画像に生じる円弧状のエッジを用いたものである。その処理は、円弧抽出のための画像処理とそれら円弧からの中心座標、ブレの角度の計算という二つの処理過程より成っている。まず、エッジ検出、2値化、細線化、円弧の指定といった画像処理によって複数の円弧線分を抽出する。そのようにして抽出した円弧を構成する画素に、最も適した円の中心座標を最小二乗法によって計算するものである。更に、求めた中心座標を用いて、円弧の中心角つまりブレの角度のおおよその目安も求められる。

この方法を用いた回転ブレ画像のPSFの推定実験を行い、良好な結果が得られることが確かめられた。このことから、ここで提案している方法が、実際の回転ブレ画像の修復をする上で、有効なPS

F推定法となることが期待される。

## 参考文献

- (1) F.N.Ku and J.M.Hu: "A New Approach to the Restoration of an Image Blurred by a Linear Uniform Motion", Computer Vision, Graphics, and Image Processing 34, pp20-34, 1986
- (2) H.C.Andrews and B.R.Hunt: "Digital Image Restoration", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1977
- (3) 小野、滝山: "回転ブレディジタル画像の修復"、第10回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp759-764, 1987
- (4) R.O.Duda and P.E.Hart: "Use of the Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures", Communications of the ACM, Vol.15, No.1, pp11-15, January, 1972
- (5) S.Tuji and F.Matsumoto: "Detection of Ellipses by a Modified Hough Transformation", IEEE Transactions on Computers, Vol.c-27, No.8, pp777-781, August 1978
- (6) C.Kimme, D.Ballard, and J.Sklansky: "Finding Circles by an Array of Accumulators", Communications of the ACM, Vol.18, No.2, pp120-122, February, 1975