

# ブラインド画像回復: 修正 Lucy 法 (その 6)

Blind deconvolution: modified Lucy-algorithm

福留治隆, 片山泰男 (ウィンボンド・エレクトロニクス (株))

Harutaka Fukutome, Yasuo Katayama (Winbond Electronics Corp. Japan)

平成 19 年 10 月 11 日

## 1 汎用性を高めるための技術の確認

手ぶれ画像にはブラインド・デコンボリューションの有効性が大きい、小さな範囲の PSF では確実に収束するが、広い PSF は、まだ確実でない。これは、設定 PSF 範囲によるようで、収束する PSF が小さい画像でも設定 PSF 範囲が大きいときこの現象が出る。

例えば、barbara\_gray 原画像のブラインド収束も、16x16 では 3 階層では収束するが、1, 2 階層では、正しく収束しないことを (その 5) に示した。原因は、アルゴリズムの不備、不完全さである。観測画像より現実物体の画像と思える画像にならないアルゴリズムは、問題を残している。これまでの手法も、多くの手ぶれ画像の収束を可能にし、画像回復を可能にしてきたことも事実であり、収束性を量的に把握することが必要である。このため、アルゴリズムの性能を評価するために 512x512 の 11 の手ぶれ画像を用意し、元の大きな画像では、16 種の JPEG 画像がある。

これまで、画像の収束性をあげ、汎用性を高めるために採り入れた技術は、次のものがあつた。

(1) Lucy アルゴリズムを基本にする。Lucy 法は、Landweber 法より優秀な収束をさせる。

(2) 階層的アルゴリズム。上位階層の収束結果の PSF を拡大して、下位画像のデコンボリューションの PSF の初期値とすると下位の繰返し回数を激減させる効果がある。大きな画角の画像の場合、PSF の画像内部の変化に対応する階層分割法が有効である。画像の単純な分割によって独立処理をすると、PSF の違いが領域の切れ目を残すことが多い。

(3) 推定を平坦な観測画像の平均値から開始する。これによって PSF の支持範囲を一杯に使うことができる。推定の初期値を観測画像から始めると、デルタ解へ収束することが多く、対称性を解決するのに時間がかかる。階層を下がるときも PSF だけ上位から継続し拡大して初期値とするが、推定画像の平均の平坦画像から下位のデコンボリューションを開始することが画像を汚くさせない効果が高い。

(4) 周辺の処理。推定画像から、PSF を使ってフィルタ画素を作るとき、推定画像の範囲を超える読み出しアクセスがあり、また、残差を推定に還元するとき、範囲を超える書き込みアクセスがある。読み出しアクセスは、水平 (垂直) 方向に超える場合、その水平 (垂直) 端の画素で代用する。書き込みアクセスは無効にする。この周辺処理によって、推定画像の周辺の画素の性質が中央と変わらない良好な推定画像を得ることができる。

(5) unified 法、unified2 法。フィルタ処理によってフィルタ画素を得て、観測との差を作って残差を求め、残差をそのとき周辺推定画素に還元する unified 法。さらに、残差の 2 乗と周辺の推定画素の相互相関をそのとき求める unified2 法を開発した。これらは、Lucy 法より滑らかな PSF と推定画像の再現を行い、収束の性質がよいと見られる。

(6) Damp 法、残差に非線形 (符号保存の 2 乗関数) を通すことで、推定の画像が粒状ノイズの少ない画像に収束する。同時にこの関数の係数を大きくすれば、収束の速度を上げることが可能であった。

(7)  $n=3 \sim 5$  が最適な画像がある。良好な収束をする  $n$  の条件がある。一定の  $n$  でデコンボリューションするのは、収束の結果によってしか  $n$  を変えられないから。



Fig.60 デモプログラムの画面、観測 (左)、推定と PSF(右)(3 階層 30,30,10 Unif2,damp4

これらの手法は、収束性を高めるために多くの画像の収束を確認して求めたものである。ブラインド・デコンボリューションは、収束環境を整備し良好にすることが重要で、それが収束の確度を上げると考えられる。

## 1.1 デモプログラムの動作

階層型と階層分割型とをデモするプログラムを作成した。X-window の Xlib ライブラリを使う応用である。JPEG の処理に Linux に付属する convert を使用した。デコンボリューションの途中の推定画像と PSF を動画表示し、収束を確認できる。

```
deconv file1.jpg file2.jpg ...
```

によって複数の画像を入力し、推定画像 file1\_est.jpg 等を入力する。JPEG からは個々の画像サイズを知る。YUV ファイルでは -size 水平 x 垂直サイズ指定し、全画像のサイズが等しいと仮定する。

```
deconv -size 1280x960 file1.yuv file2.yuv,...
```

## 2 PSF の Bilinear 補間

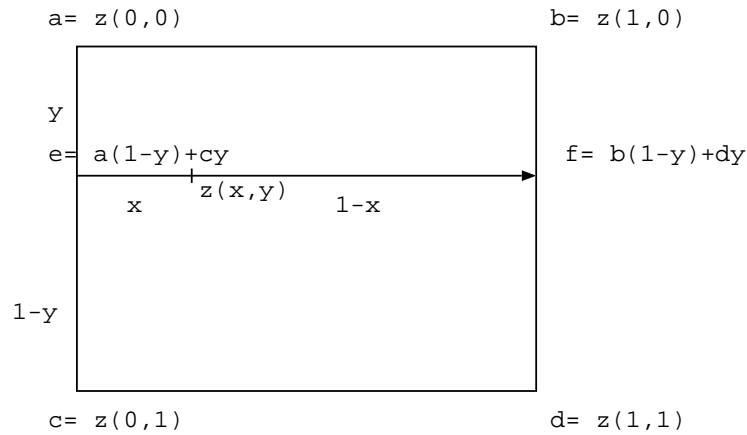
階層分割は、基本的に位置依存の PSF を目指した処理ではあるが、個々の分割領域において上位階層の PSF を初期値とする独立処理であった。しかも、階層を下がる毎に領域を機械的に 4 分割していた。階層分割が画像内の PSF の滑らかな変化に適合しないためと考えられる、領域間の PSF が違って領域に切れ目が見えることがあった。

階層は、PSF 概形を与えるためにあり、階層数は大きいことが望まれる。PSF の光の筋の幅よりも階層が高いと PSF の再現分解には役に立たないが、2 階層より 3 階層が望まれるのに対し、画像内部の PSF 変化は、滑らかで単調な変化であり、2 階層 4 分割程度でよい。階層分割は、3 階層で 4 x 4 であり分割しすぎる傾向がある。

そこで、PSF の画像内部の変化が x 方向と y 方向の両方向に線形である bi-linear 補間 PSF を考えた。画像の 4 隅の位置に 4 PSF a,b,c,d があり画素毎にそれらから補間する。画素位置 (x,y) (x,y= 0~1) に依存する bilinear 補間 z は、次のように表される。

$$z(0,0) = a, z(1,0) = b, z(0,1) = c, z(1,1) = d$$

$$z = a(1-x)(1-y) + bx(1-y) + c(1-x)y + dxy$$



Position dependent Bilinear PSF

Fig.61 PSF の Bilinear 補間

$z$  は  $a, b, c, d$  について線形加算であり、 $z$  の  $a, b, c, d$  の補間係数は、位置  $(x, y)$  に依存する。これは、 $z$  への  $a, b, c, d$  (これらを  $PSF_i$  と書く) の寄与分であり偏微分係数である。

$$\frac{\partial z}{\partial PSF_i} = \{(1-x)(1-y), x(1-y), (1-x)y, xy\}$$

補間 PSF を推定画像からぼやけた画像を作成するフィルタ処理と、推定画像の修正に使用する。そして、 $PSF_i$  をそれらの補間係数に比例してその位置の画素相関  $(dx, dy)$  によって変化させる。

$$dPSF_i = \frac{\partial z}{\partial PSF_i} (dx, dy)$$

これは、PSF の 4 倍の次元の空間での線形関数の最急降下法である。実際の処理には画素位置  $(x, y)$  から直接 4 PSF に関係をとる必要はなく、各水平ライン毎に両端の  $e, f$  の位置の垂直補間を行い、

$$e = a(1-y) + cy, f = b(1-y) + dy$$

水平ライン内では、 $e, f$  からの補間と相関を求め、

$$z = e(1-x) + fx, (dx, dy) = rsdl(x, y) * est(x + dx, y + dy)$$

相関を  $e, f$  にを集め戻す処理を行い、

$$ce+ = (1-x) * (dx, dy), cf+ = x * (dx, dy)$$

ライン処理後に  $e, f$  の位置から  $a, b, c, d$  に分配する処理になる。

$$ca+ = (1-y) * ce, cc+ = y * ce, cb+ = (1-y) * cf, cd+ = y * cf$$

画素毎に補間 PSF を作成する方法では filter 処理と推定画像の修正処理は変わらず、PSF 修正だけが両端の位置  $e, f$  に返す処理になる。(補間 PSF を作成しない方法もある。filter 処理が線形であるから  $e, f$  の PSF による 2 回の filter 処理の結果画素値間の補間のできる。また、推定画像の修正を(残比-1)の転置 PSF による filter 処理として扱うときも、同様に 2 倍程度で代用できる。しかし、残差または(残比-1)を推定の周辺に分配する処理は、その場所の PSF を必要とする。)

画像に 4 PSF のまま階層的に処理することも可能であり、その場合、PSF の拡大は、4 PSF 拡大になる。(各分割領域の 4 隅の PSF を与える画像分割、階層的分割も可能であるが、) 3 階層型 bilinear の結果を示す。推定画像を 図 62 に 4 PSF を 図 63 に示す。

階層 Bilinear 処理は、PSF 補間を行う形で動作させたが、処理時間は、階層型と比べて 10% 程度増加する程度であった。4 PSF の Bilinear 補間の正常な動作を確認した。大きな画像では階層分割よりも階層 Bilinear 法が結果がよいと思われる。

### 3 手ぶれパラメタの PSF への反映について

画面内の PSF の変化を、4 隅の PSF からの bilinear 補間によって扱うことは、位置依存 PSF を滑らかに扱う技術であったが、手ぶれによる PSF 変化は、4 PSF から補間とは、かなり性質の異なるものである。

手ぶれによる PSF は、画像内部で形を変化する。カメラの光軸の 2 次元揺れは、画面内位置によらない光点の平行移動となるが、光軸周りの回転は、画面中心からの距離に比例して拡大した弧を生み出す。例えば、オペラハウスの画像は、右下角付近に回転中心があり、画面内の PSF は弧の太さが変化したものと解釈でき、カメラの右上のシャッターを押すときに手ぶれがあって、左手がカメラを押えた場所、逆転画像の左上付近に回転中心があったと推定できる。そういう PSF 変化に対して bilinear 補間は、線形な重ね合わせであるから、大きな PSF 変化と裾をもたない鋭い PSF には適合しないと思われる。

そこで、Bilinear 補間よりも手ぶれに適合した PSF 補間を考える。遠方物体を撮るとき手ぶれの平行移動分は、遠方物体の大きさより十分小さいとして、カメラの 3 次元回転揺れだけで手ぶれを記述する。

カメラの手ぶれ回転の代わりに世界の回転をベクトル  $\mathbf{W}$  として、カメラを原点とする物体の位置ベクトル  $\mathbf{R}$  の変位  $d\mathbf{R}$  は、 $\mathbf{W}$  と  $\mathbf{R}$  の外積である。(x,y,z を右手の親指からあてる右手系で、x:右、y:下、z:遠方を正とする。カメラの回転は  $-\mathbf{W}$  である。)

$$d\mathbf{R} = \mathbf{W} \times \mathbf{R} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dR_x &= W_y R_z - W_z R_y, \\ dR_y &= W_z R_x - W_x R_z, \\ dR_z &= W_x R_y - W_y R_x \end{aligned} \quad (2)$$

$dR_z$  による  $R_z$  の変化を無視すれば、透視変換、 $x = R_x/R_z, y = R_y/R_z$  によって、物体の位置に対応する受光面上の位置の微小変位 ( $dx, dy$ ) は、次の  $\mathbf{W}$  の成分の 1 次式になる。(x, y の範囲は、水平画角が  $\pm 45$  度のとき  $-1 < x < 1, -0.75 < y < 0.75$ ) 程度の値である。)

$$\begin{aligned} dx &= W_y - yW_z, \\ dy &= -W_x + xW_z \end{aligned} \quad (3)$$

この式から、 $\mathbf{W}$  が受光面内 ( $W_z = 0$ ) である、カメラの縦揺れ (pitching)  $W_x$  と、左右揺れ (yawing)  $W_y$  とは、揺れ ( $W_y(t), -W_x(t)$ ) となり、その時間射影が画像内で一樣な PSF となり、横揺れ (rolling)  $W_z(t)$  があると弧 ( $-yW_z(t), xW_z(t)$ ) が PSF に現れることが分かる。

両者の揺れ、一樣成分 ( $W_y, -W_x$ ) と位置依存分 ( $-yW_z, xW_z$ ) との和の時間射影が PSF に現れる。PSF 上のある点が他の位置の PSF のどこに対応するかが  $W_z(t)$  によるから、PSF の補間には  $W_z(t)$  が必要であるのに、画像と PSF は時間軸を持たない。

#### 3.1 3 次元回転ベクトル密度分布

そこで、 $\mathbf{W}$  を 3 次元回転揺れベクトル軌跡の密度分布と考え、 $\mathbf{W}$  から位置依存 PSF を作り、画像から  $\mathbf{W}$  立体を形成することを考える。

式 (3) は、 $\mathbf{W}$  から位置依存の PSF への変換であり、3 次元から 2 次元への射影である。x=y=0 では  $W_z$  が使われず、 $\mathbf{W}$  の z 方向の正射影である。y < 0 では、 $\mathbf{W}$  を右から眺めるように、 $W_z$  が dx の正に寄与する。x



Fig.62 3 階層 Bilinear 形 Unified2 damp4 法 =5,30,30,20 回

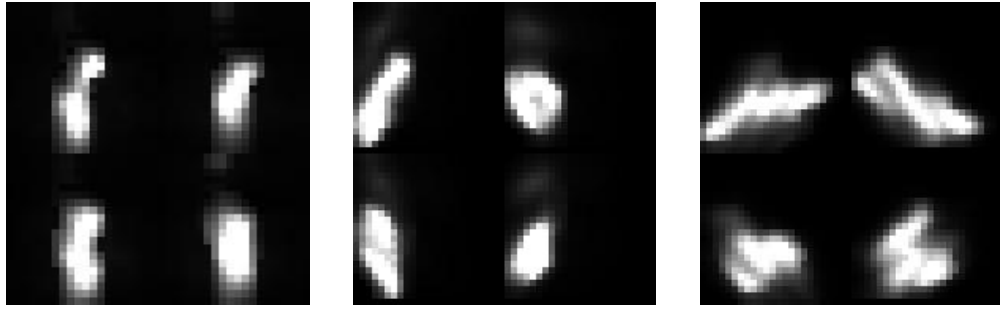


Fig.63 4 隅の PSF 3 次元回転密度の 4 隅の PSF (左：オペラハウス Bilinear) (中：オペラハウス 3 次元 Cube)  
(右：河むかひの建物 3 次元 Cube (Fig.67))

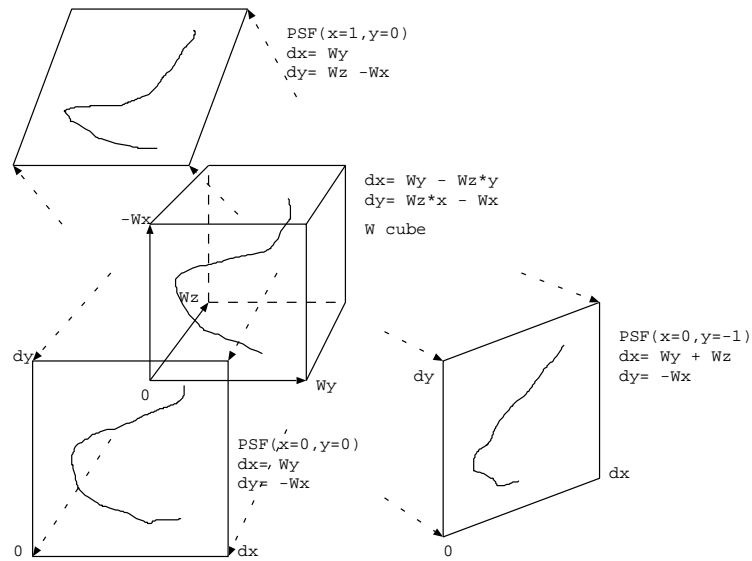


Fig.64 位置依存 PSF は W の一種の射影

$> 0$  では  $W_z$  が  $dy$  に寄与し、 $W$  を上方から眺めるようである。処理は、3次元  $W(i,j,k)$  から式(3)を通して  $psf(l,m)$  のどこに落ちたかによって  $l,m$  のメッシュ内で加算し 2次元 PSF を作成する。

逆に画像の各位置で求めた相関から  $W$  を形成するのは、多くの方向の透視図から 3次元立体を再現する処理である。この方向から見るとこう見えるという多くの要求を満たすように立体を形成するのである。それは、位置  $(x,y)$  の 2次元相関を  $W$  にその射影の方向から掛け込む処理であろう。

補間と同じく  $W$  の各部分と PSF とが正の係数で継り、その係数に比例して  $W$  の各部を変化させる最急降下法が使えるが、bilinear 補間では補間係数は、PSF 全体に一定値であったが、この方法は  $W$  の各部分に別々に係数をもつ。

ある位置の PSF と  $l,m$  位置に落ちた複数の  $W(i,j,k)$  は、同じ係数でこの位置の PSF と、そして、この位置の画素の周辺相関と関係している。しかし、画素の周辺との相関を即時に  $W$  に反映させるのは、無闇な変動を  $W$  に与えるだけでよくないと思われる。画素位置  $(x,y)$  にある相関を直接  $W$  に関係させず、 $W$  の各点に対応する累加するための立体  $S$  を別にもち、関係する  $W$  の部分 ( $psf(l,m)$  に射影された  $W$  部分を記録しておく) に対応する  $S$  の部分にその画素周辺相関を累加していけば画面全体で 3次元相関ができ、画面の最後に  $S$  を  $W$  に掛け込むのである。

$W$  のサイズは、現実には縦、横、深さを与えられるものであり、縦横の大きさは、 $x, y$  が入れ替わるが 2次元 PSF のサイズに反映されるものである。深さは、画面全体での回転の要素の大きさによるが、PSF に射影さ

れ、PSF の輝点に移動を与えるから、PSF サイズと大差ないサイズが与えられるべきものである。

PSF サイズと  $W$  立体のサイズは、一致させると射影による端の潰れが起きるため、垂直サイズ、水平サイズともに、深さ  $d$  の  $1/2$  を差し引いたサイズにした。3次元回転密度立体の初期値としては、一様密度でなく中心からの距離による exponential 型の密度分布を与えた。PSF の中央を中心とする回転楕円体型の濃さをもたせる。これは、重心が PSF の中心から外れることを防止する効果があった。

オペラハウス、河向かいの建物の画像の  $W$  のサイズを  $20 \times 20 \times 8$ 、PSF を  $24 \times 24$  とする実験結果を示す。4隅の PSF を 図 63 中と右に、河向かいの建物の推定画像を図 65 に示す。河向かいの建物の推定は、よいように見えるが、PSF には、Bilinear 型と比較して、特徴的なひも、棒状の構造を感じる (図 63 の右)。これは、カメラ回転の動きを抽出したというよりは、 $W_z$  方向の相関が除去できていない可能性が強い。

原因は、 $W$  の  $z$  方向は、 $x, y$  方向より分離性が悪いことによると思われる。 $z$  方向 1 の違いは、 $x$  の  $\pm 1$  でも分離しない。しかし、現在、以下に述べるようによい対策がない。 $z$  の刻を 2 にすると、 $z$  方向の分解はよくなるが、PSF 上で  $z$  の違う点が離れて見え、拡大時のフィルタが  $z$  方向に 2 倍に広がるため、相関は同程度に残る。画像の周辺を重視するために立体相関を作るとき、 $x * y$  の絶対値を乗算すると、レストランに効果があるが、河向かいの建物がデルタに収束する。階層間での  $W$  の拡大時に平滑フィルタ (存在する位置はそのまま、間は 8 点平均) を外しホールド型にしたら、レストランで上の階層の点数が残り、4,5 点になるものが 2, 3 点になりよくない。



Fig.65 3次元回転密度 (w=20x20x8, psf=24x24, Unif2, Damp4, =3) (河むかいの建物)