

# ブラインド画像回復: 修正 Lucy 法 (その 3)

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 6 月 25 日

## 1 周波数領域処理

Lucy 法は、周波数領域で行うと、順方向処理の  $H$  のコンボリューション処理は、フーリエ係数毎の複素乗算であり、PSF の転置  $H^T$  のコンボリューション処理は、複素共役 (complex conjugate) の複素乗算である。観測画像 / フィルタ画像の割算は、実空間での画素同士の演算であり、逆フーリエ変換 (IFT) によって実空間に戻して行う必要がある。また、推定画像への掛け込みも実空間処理である。そのため、PSF 変更も含めて、フーリエ変換と逆フーリエ変換を繰り返し 1 回ごとに 5 回行うことになる (図 20.(a))。

$H^T$  は、逆フィルタ処理、(複素除算  $H^{-1}$ ) の単純な代替であって、この逆フィルタ処理は、単純な複素除算  $H^{-1}$  周波数領域では一回ですむ処理である。これを (図 20.(b)) に示す。これによって多くの回数の繰り返しが減らせ、これによって処理が効率化されると、入力の割算、推定への掛け算は、引き算と足し算に変化でき、繰り返ループの中は、全て周波数領域処理となり、フーリエ変換とその逆変換は、入出力だけになる。これを図 20.(c) に示す。

そのように考えて実験した。その際の複素割算のゼロ処理は、ある一定値より小さいパワーをもつスペクトルでは、その一定値で割るようにした。PSF の初期値は、画像上の光の流れから取り出したものである。

結果: この方法には問題があった。一回の繰り返し処理で逆フィルタ処理は可能であるが、周波数領域での  $H^{-1}$  は、PSF が未完成にも係わらず、観測画像の PSF の逆数を求めることであり、誤差がなくなってそれ以降の処理が止まり、その後の PSF 修正ができないのである。図 21. にこの結果の例を示す。画像には多くのリングングと上下左右の回り込みが残っている。

## 2 速度パラメタの問題

適切に設定しないと画像回復しないパラメタがふたつある。PSF サイズは、小さすぎると画像回復せず、大きすぎると無駄なだけでなく収束を遅くする。もう一つの大きな要素として、PSF 変化の速度パラメタの設定が必要ながある。

前回、画像の光の流れを取り出して PSF の初期値とする方法で回復した ”教会内部” の画像を、ブラインド法で回復できた (図 22.(a))。PSF は、 $24 \times 24$  と大きく、4 階層による。このとき、PSF 変化は、ごく小さくし `adl2` を使わなければならなかった。階層化中は、300 回、階層から出て 100 回の処理を行った。光の流れを画像から取り出して PSF の初期値とするならば、大きな PSF 変化である `smpl` 法で行っても問題なく収束した画像である。

”河向かいの建物” PSF サイズ:  $13 \times 6$ 、`smpl2` 法、2 階層 50 回と 50 回 (1 階層でも実行可能) (図 22.(b))。 ”河のこちら側” PSF サイズ:  $13 \times 6$ 、`adl2` 法、2 階層 300 回と 100 回 (図 22.(c))。

”パリオペラ座の左上” と、”河向かいの建物” などは、PSF 変化の大きい必要のある画像例である。 ”教会内部” は、小さく変化させなければ回復しない画像の例である。

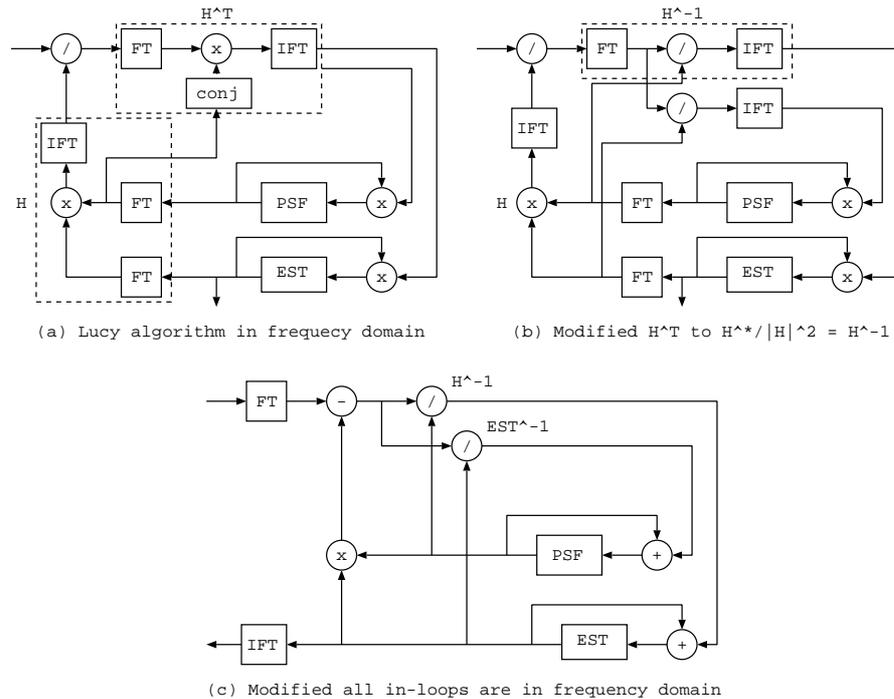


Fig.20 周波数領域処理

速度パラメタは、画像サイズと PSF サイズの比からは決められない。同一画像の部分である ”河向かいの建物” は、PSF 大変化で収束するが、”河のこちら側” は、小変化で収束する。両者の画像サイズと PSF サイズは等しいが、両者に必要な速度パラメタは、異なる。

PSF 変化が大きくても小さくても収束する画像について、PSF 変化が小さいとき画像がその回数分、汚れが残る。階層間を移るとき、推定画像をフラットから開始することによって汚れは取り去られる。しかし、少ない回数で回復したほうが画像の性質は一般に良好である。

例として、”美術館の中” の画像をみると、左上の観測画像から、小さい PSF 変化によって回復した画像 (右上) と、大きな PSF 変化によって回復した画像 (左下) を比べると、画像のコントラストと粒上ノイズが大きく違い、少ない回数で回復することが望ましいことが分かる。なお、右下は PSF サイズ 24x8 が大きすぎて正しく収束しなかった例である。

一般に、小さい PSF サイズのデコンボリューションは容易であり、PSF サイズが大きくなると困難になる。通常画像の、5x5 ~ 9x9 程度の PSF サイズのブラインドデコンボリューションは、大抵問題なく、階層型又は階層分割型によって smp12 法で 数 10 回の繰り返しによって収束する。そのとき 1280x960 とかの全画像のデコンボリューションでは、階層分割型がよく、512x512 程度に切り出した画像では階層型がよい。それは、画像の切り出しに伴って画角が狭まり、PSF の場所による変化が小さいことによると思われる。

パラメタの最適化なしに行えたブラインド処理の例として、”クリスマスイルミネーション” (図 24) を示す。ほぼ 2 点になった PSF のぶれが除去されるが、画像右部分の柱部分などの崩れが気になる。

### 3 ガンマ特性の問題

手ぶれやぼけの起きる暗い画像では、シャッタ時間が長く、デジタルカメラの感度特性もそれによって違うようである。EXIF の使う、sRGB 規格の規定するガンマ特性、

$$v = 1.055L_c^{0.45} - 0.055 \text{ (for } 1 \geq L_c \geq 0.0031308 \text{)}$$

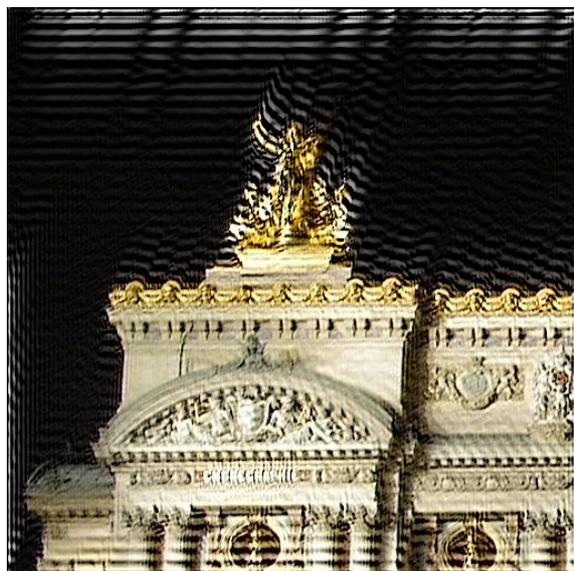
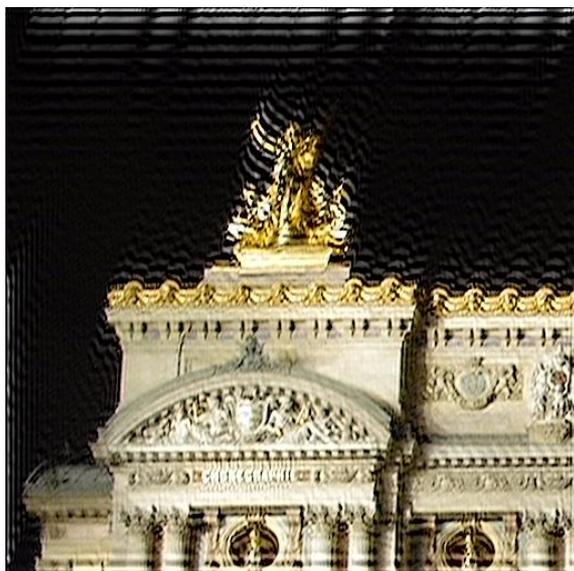
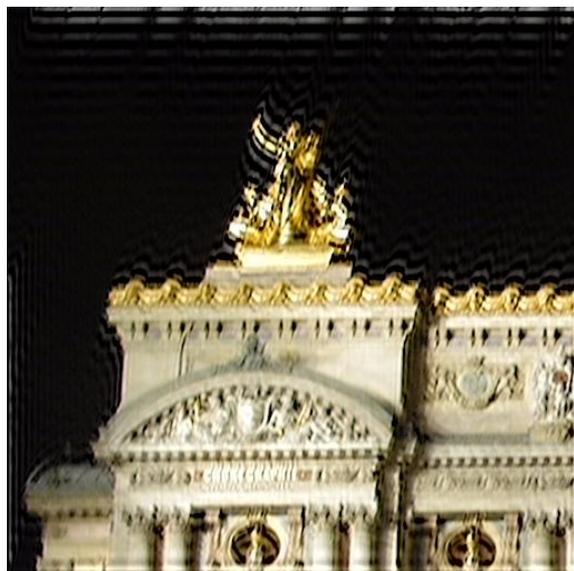
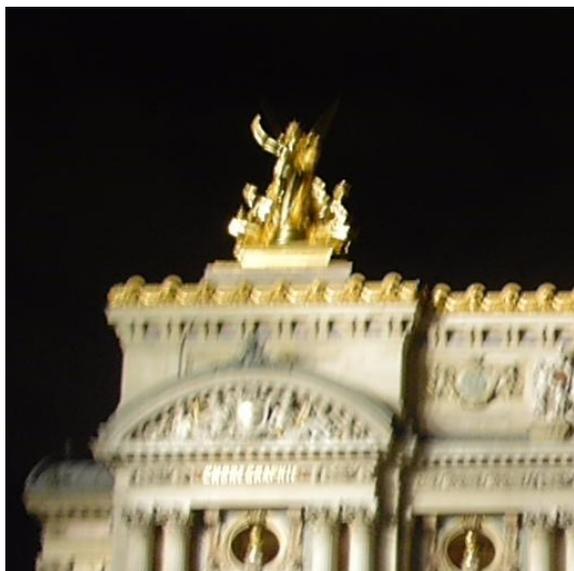
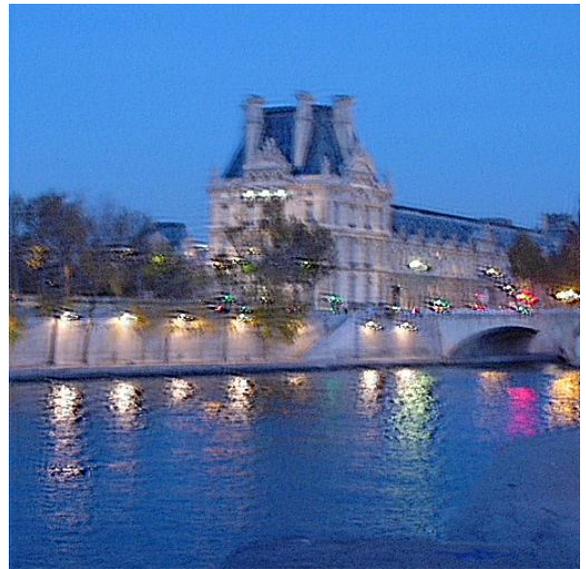
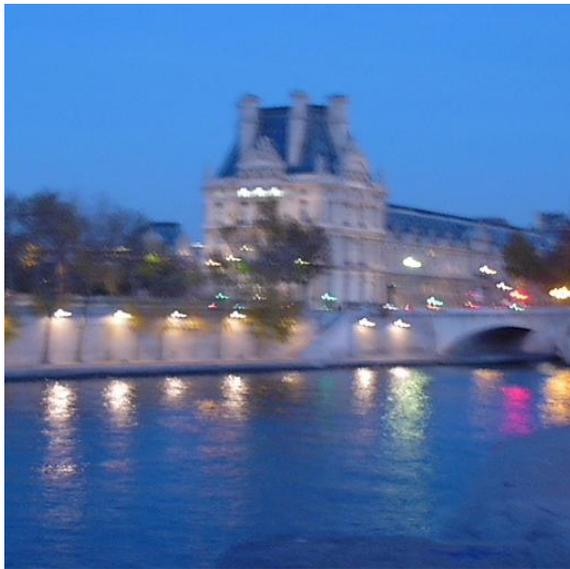


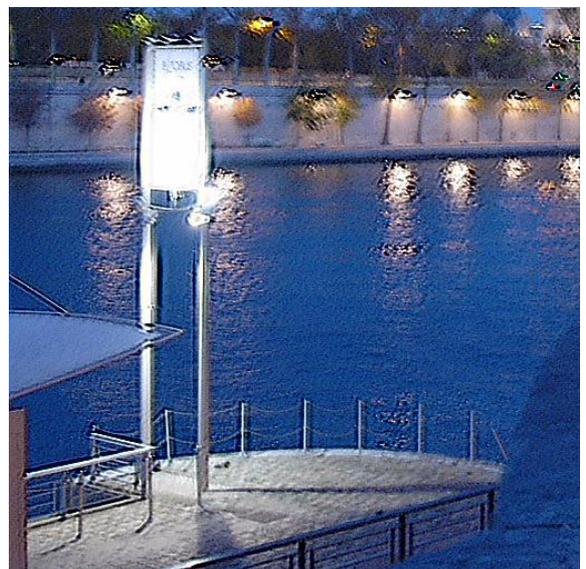
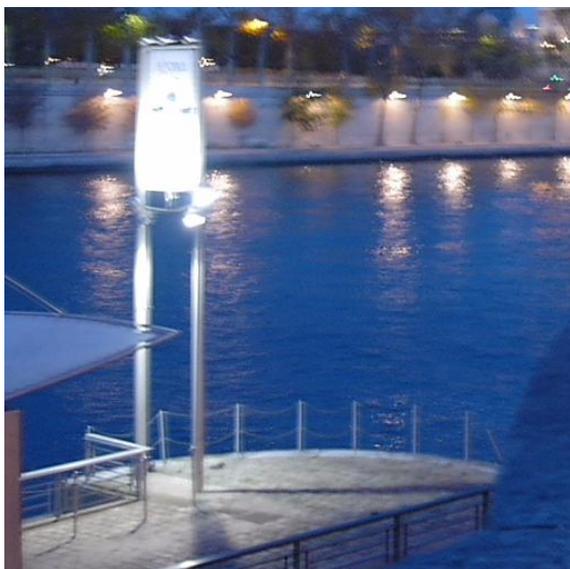
Fig.21 周波数領域処理 観測 (左上)、ノイズ 0.1(右上)、ノイズ 0.03 (左下)、ノイズ 0.01(右下)



(a) ”教会内部” のブラインド画像回復 (PSF:24x24)



(b) ”河の向かい側の建物”



(c) ”河の土ちら側”

Fig.22 手ぶれ画像の画像回復 (a),(b),(c) とともに左が観測、右が回復である。

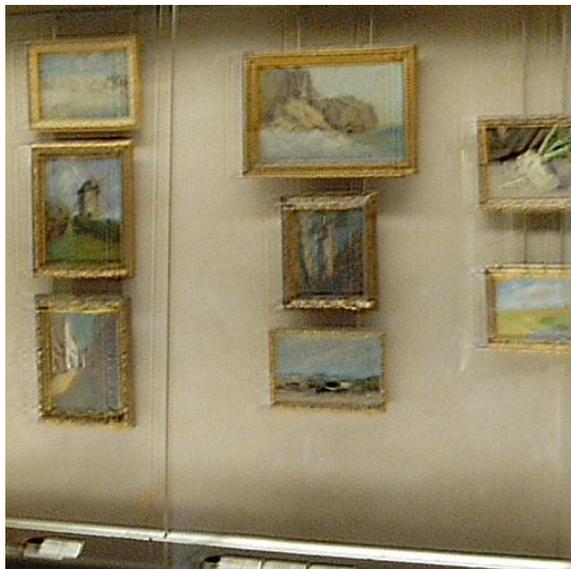


Fig.23 "美術館の中"、左上：観測、右上：回復 PSF サイズ 24x8、4 階層 (h4) ad12 法 300, 200, 左下：回復 PSF 20x8 h3,smpl2,50,50, 右下：失敗 24x8 h3,smpl2,50,50

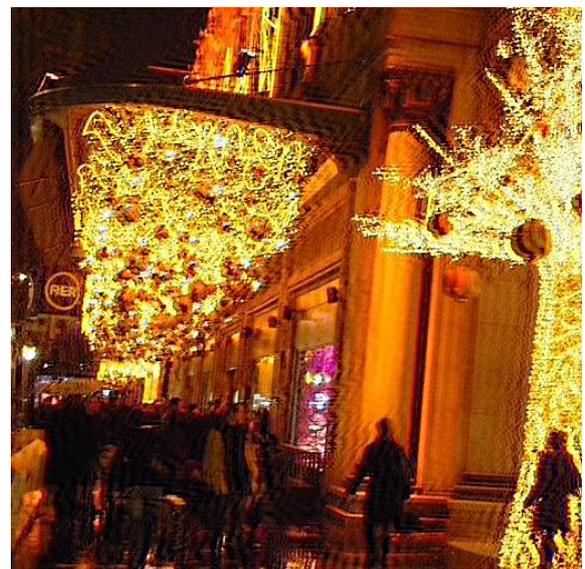


Fig.24 クリスマスイルミネーション、左：観測画像、右：PSF サイズ 16x16、3 階層 (h3) smpl2 法 50, 50。

$$v = 12.92L_c(\text{for } 0.0031308 > L_c \geq 0)$$

という規定は、一般的なデジタルカメラで常に守られているとは考えられない。(なお、我々が実験で使ってきたのは、ITU-R BT709, SMPTE 170M の

$$v = 1.099L_c^{0.45} - 0.099(\text{for } 1 \geq L_c \geq 0.018)$$

$$v = 4.500L_c(\text{for } 0.018 > L_c \geq 0)$$

であった。) デコンボリューション処理は、データの存在する空間が線形を仮定している。ガンマ特性が違っている場合、フィルタ処理によって作られたぼけを消すデコンボリューションの収束に影響すると考えられる。

このことを示す結果があった。教会内部の画像は、PSF サイズを 24 x 24 程度に大きくせざるを得ない画像で、ブラインドでは PSF 変化が小さくないと収束しない画像としていたが、PSF の初期値を画像上の光の流れから取り出す方法では、それが回数の少ない PSF 変化大の方法、smp12 によっても収束することを確認していて、ガンマ特性を 2.2 乗則から変えてみた。を 2.2 乗則から、3, 4, 5, 6 と変化させ、収束状態をみると、画像上の光源のハイライト近辺の収束が良くなった。その中では = 5 が最適であった。そこで、ブラインド処理を試すと、 = 5 乗では、2 階層 smp12 法 30, 30 回の処理によって収束した。2 階層は 5, 4 乗でも、(3 乗は、やっと) 収束し、 = 5 乗は、1 階層でも収束した。より画素が大きくなって画像の模様と対応しなくなる 3 階層でも収束可能であった。

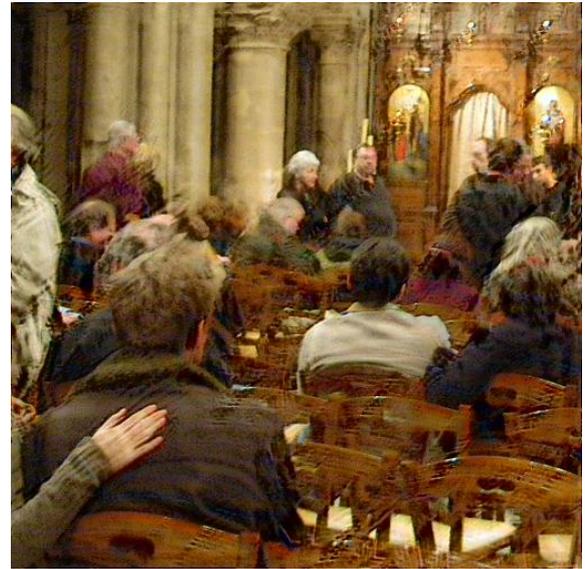
このことの意味は、手ぶれの起きるような暗い情景の場合、デジタルカメラは、ガンマ特性を規格から外して、暗い画像のガンマ特性の累乗 2.2 乗を例えばその 2 倍程度大きくし、その逆数の累乗を 0.45 から 0.2 程度に小さくすることで、暗い輝度領域を持ち上げているのではないかと推測できる。デコンボリューションは、線形の空間を必要としている。画像のガンマ特性への合致は、重要な要素として、収束性を決めている。このとき、ガンマ特性は、上式どおりに与えるものと、2,3,4,5 等を直接与え、線形部分を持たないものを使った。

$$v = L_c^{1/}$$

そこで、ガンマ特性を正しくするために、任意の乗数においても線形部分を与える式を試すと線形部分ありでは収束しないことが分かった。この画像のハイライトの近辺の収束の様子から見て、輝度の高い部分でのソフトなクリップが大きな の累乗に近似しているのではないかと推測したが、それ以外に暗い部分の線形性も関係しているようである。



(a) 光の筋を採る方法 (2 階層, smp12, 30,30)、左:  $\gamma = 2.2$ 、右:  $\gamma = 5.0$



(b) ブラインド法 左:  $\gamma = 2.2$ , 4 階層, ad12, 300, 100, 右:  $\gamma = 5.0$ , 2 階層, smp12, 30,30

Fig.25 ガンマ特性問題 ”教会内部”画像において (PSF : 24x24) (a) 光の筋を採る方法と (b) ブラインド法ともに  $\gamma = 5.0$  がよい。