



部分画像の並列ブラインドデコンボリューション処理 による劣化像回復

三浦 則明・大沢 健郎

北海道大学工学部応用物理学科 060 札幌市北区北13条西8丁目

(1993年4月5日受付, 1993年5月26日受理)

Blurred Image Restoration by Parallel Blind Deconvolution of Partial Images

Noriaki MIURA and Kenro OSAWA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Hokkaido University,
Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060

(Received April 5, 1993; Accepted May 26, 1993)

A method for restoring a single blurred image using only nonnegativity constraint of both an object function and a point spread function is described. The method is based on application of parallel blind deconvolution to partial images cut out from the blurred image. The partial images, however, no longer satisfy their convolution relation between an object function and a point spread function. In this paper, a technique for modifying the partial images is also described. Computer simulations were carried out to investigate performance of the present method using computer-generated blurred images. Results of the simulations show effectiveness of the present method compared with the conventional blind deconvolution method.

1. はじめに

大気揺らぎ, 結像系の収差, 流れ劣化などさまざまな要因によって劣化した画像から真の像を回復する研究は活発に行われている。特に, 画像劣化の性質を決める劣化関数(すなわち系の点状分布関数; PSF)が既知または何らかの方法で推定できる場合には, 画像回復のための幾つかの方法が提案され, 良好な結果が得られている¹⁾。しかしながら, 例えば, 大気の揺らぎによって劣化した太陽表面像から微細な模様を再生しようとする応用においては, 多くの場合像回復処理に使用できる劣化像は1枚しかなく, さらに PSF は通常未知であり, 従来の画像回復法は適用できない。このような場合には, 1枚の劣化像のみから真の像を回復するブラインドデコンボリューション(BD)に基づいた方法が必要になる。

Ayers と Dainty は反復フーリエ変換アルゴリズムを用いて BD を行う効率的な方法(AD 法)を提案した²⁾。この方法は2次元画像を表す関数の非負条件と, その二

つの関数がコンボリューション関係を満たすという条件を適用し, 反復アルゴリズムを用いて BD を行うものである。さらに AD 法はウィーナフィルタを使用するように改良された³⁾。また, AD 法を用いた幾つかの像再生結果も報告されている^{4,5)}。ただし, この方法では, アルゴリズムにおける解の収束性, 一意性が保証されておらず, 特にノイズを含む画像について, アルゴリズムの挙動が不安定で再生像の評価が難しい。

そこでわれわれは, 天体スペckル画像のように, 共通の物体関数を持つ複数枚のコンボリューション画像が観測できる場合に適用できる, 並列型 BD 法を提案した^{6,7)}。この方法は複数枚の画像に並列的に AD 法を適用するもので, 得られる複数枚の出力像と入力像の相関計算により, 再生像の評価が可能であるという長所を持つ。また, 実際に二重星の観測データに適用され, 良好な再生像が得られている。

さらに, 並列 BD 法は, 太陽表面画像のように, 物体像の広がり方が PSF の広がりよりも大きく, なおかつ

PSF が画像全体で不変という条件が成り立つ場合には、一枚の劣化像からの像回復に応用できる。これは、劣化像の各部分に着目すると、それらは物体像の一部と PSF とのコンボリューションとなっており、1枚の劣化像から複数枚の部分画像を切り出すことによって、人為的に複数枚のコンボリューション像を作り出すことができるためである。

本論文では、部分画像を用いた並列 BD 法による劣化像回復の方法を述べる。しかし、一般に画像切り出しを実行することで、各部分画像は「しみ込み、しみ出し」の効果によって、厳密にはそのコンボリューション関係を満たさなくなる。ここでは、しみ込み、しみ出しの項の補正方法を述べ、切り出された各部分画像がコンボリューション関係を満たす場合と、満たさない場合の両方について計算機シミュレーションを行い本手法の性能を検証する。

2. アルゴリズム

いま、観測される劣化像を

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) \quad (1)$$

とする。ここで、 $f(x, y)$ が物体像、 $h(x, y)$ が画像劣化の性質を決める劣化関数 (すなわち系の点状分布関数; PSF) でシフトインバリエントが仮定されている。 \otimes はコンボリューション。ここでの目的は、一枚の劣化像 $g(x, y)$ から切り出された複数枚の部分画像 $g^{(n)}(x, y)$ を用いて、物体像 $f(x, y)$ を求めることである。

われわれのアルゴリズムを Fig. 1 に示す。内側のループが N 枚の部分画像を用いた並列 BD、外側が切

り出し画像の補正ループであり、それぞれのループ回数を j, k 、および最大ループ回数を J, K とする。いま、各ループにおける再生像を $h^{(j,k)}(x, y)$ とし、その評価値を $Q(j, k)$ とする。評価値の計算方法は 2.2 節で述べる。また、 k 回目の切り出し画像を用いたときの、並列 BD 法による出力像を $\bar{h}^{(k)}(x, y)$ とする。この推定像を用いて原画像をデコンボリューションすると、 $f^{(k)}(x, y)$ が得られる。最終的には $\bar{h}^{(k)}(x, y)$ の中で最も良い評価値を与える PSF の再生像を $\bar{h}(x, y)$ 、それからデコンボリューションして得られる物体の再生像を $\bar{f}(x, y)$ とする。なお、ここでのデコンボリューションには BD 処理に使用されているのと同じウィナーフィルタを用いている。また、初期推定 $h^{(0,k)}(x, y)$ は、 $k < (K/2)$ では適当な大きさの円の中で一様乱数を発生させたものを用い、それ以外では前回のループで得られた再生像 $\bar{h}^{(k)}(x, y)$ をそのまま使用する。この処理の目的は不適切な画像切り出しを原因とする再生像の誤った像への収束を防ぐことにある。

2.1 切り出し画像の補正

今、画像切り出しのための窓関数を $w_n(x, y)$ とする。この窓関数はある矩形の範囲内で 1、それ以外でもゼロの値を持つ関数で、その矩形の大きさ、位置、形ともに、元の劣化像を見て適当に設定する。さて、切り出し画像はこの窓関数を用いて、

$$\begin{aligned} g_n(x, y) &= w_n(x, y)g(x, y) \\ &= \{w_n(x, y)f(x, y)\} * h(x, y) + c_n(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} c_n(x, y) &= w_n(x, y)[\{w'_n(x, y)f(x, y)\} * h(x, y)] \\ &\quad - w'_n(x, y)[\{w_n(x, y)f(x, y)\} * h(x, y)] \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$w'_n(x, y) = 1 - w_n(x, y)$$

となる。ここで、 $c_n(x, y)$ は、切り出し範囲の外側の物体像が PSF によって広げられ、その一部が切り出し範囲内に入ってきた「しみ込み」(第一項)と、切り出し範囲内の物体像が PSF によってひろげられ、その一部が切り出し範囲外に出ていった「しみ出し」(第二項)を表している。式(2)の場合は共通関数は PSF であるが、これは一般には物体関数と PSF の分布範囲の狭い方が選ばれる。BD を適用するためには $c_n(x, y) = 0$ でなければならないが、一般にはそうではなく、この項の補正が必要になる。しかし、(3)式を見てわかるように、補正のためには $f(x, y)$ と $h(x, y)$ の情報が必要であり、簡単にはできない。

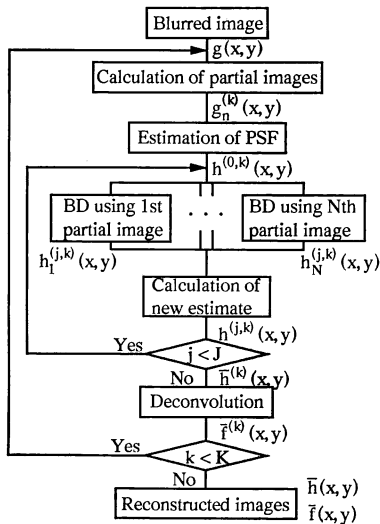


Fig. 1 Flow chart of the present method.

そこで、われわれは逐次的に切り出し画像を修正する方法を考案した. すなわち, k 回目の切り出し画像を $g_n^{(k)}(x, y)$ とすると, 前回の反復で得られた物体と PSF の再生像を用いて,

$$g_n^{(k)}(x, y) = \begin{cases} [w_n(x, y) \bar{f}^{(k-1)}(x, y)] * \bar{h}^{(k-1)}(x, y) & (k > 0) \\ w_n(x, y) g(x, y) & (k = 0) \end{cases} \quad (4)$$

とするものである. ただし, この方法が有効であるためには, しみ込み, しみ出しの項の補正をしない時 ($k=0$) でも, ある程度真の像に近い再生像が得られることが必要である.

2.2 並列ブラインドデコンボリューション法

並列 BD 法^{6,7)}は複数枚の劣化像に並列に AD 法を適用するものであるが, ここでは N 枚の切り出し画像を用いて並列 BD 法の適用を可能にしている. 今 N 枚の切り出し画像を使用した場合, N 枚の出力像 $h_n^{(j,k)}(x, y)$ を得る. これらの出力像を用いて新しい推定は,

$$h^{(j,k)}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n^{(j,k)}(x, y) & (j \geq N) \\ \frac{1}{j} S_j [h_1^{(j,k)}(x, y), \dots, h_N^{(j,k)}(x, y)] & (1 \leq j < N) \end{cases} \quad (5)$$

として求められる. ここで, 記号 $S_j[\dots]$ は N 枚の出力像の中で高い評価値を持つ j 枚の出力像の和をとることを示す. 各出力像の評価値は $h_n^{(j,k)}(x, y)$ と $h^{(j-1,k)}(x, y)$ の規格化相互相関関数の中の最大値である. また, (j, k) 回目のループにおける再生像の評価値 $Q(j, k)$ はその各出力像の評価値の中での最小値が選ばれる. BD 法への入力像と出力像の相関計算によって, その入力像が使用したフレームのコンボリューション関係をどの程度満たしているのかを評価できる. すなわち, $Q(j, k)$ が 1 に近い値を持つならば, その入力像はすべてのフレームのコンボリューション関係をほぼ満足していることが保証される. この並列 BD 法による出力像を $\bar{h}^{(k)}(x, y)$ とする. これは, ある k について, $Q(j, k)$ ($j=0, \dots, J-1$) が最大値を持つループ回数における再生像である.

3. 計算機シミュレーション

はじめに, 再生像の平均自乗誤差 (MSE) と各切り出し画像のしみ込み, しみ出しによる汚染レベルをそれぞれ

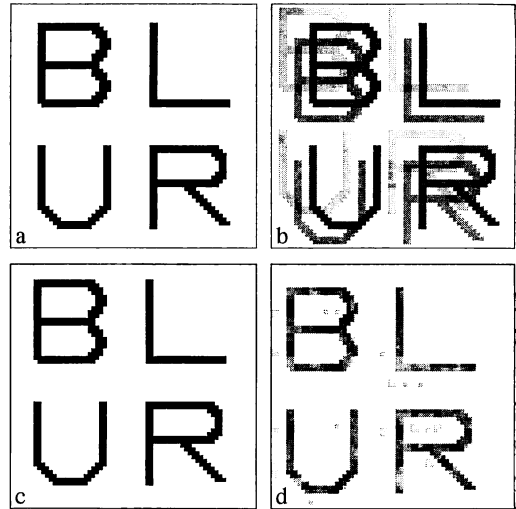


Fig. 2 Image restoration from a blurred image where a blurred letter are separated from others: (a) an object; (b) a blurred image; (c), (d) restored images by the present method and by the conventional blind deconvolution method, respectively.

$$E(j, k) = \sum_x \sum_y \{h^{(j,k)}(x, y) - h(x, y)\}^2 / \sum_x \sum_y \{h(x, y)\}^2 \quad (6)$$

$$C_n = \sum_x \sum_y |c_n(x, y)| / \sum_x \sum_y |g(x, y)| \quad (7)$$

と定義する.

Fig. 2(a) が用いた物体の一例で, 各文字間の間隔が 11 画素のものである. 他に物体としては, 間隔が 3 画素および 7 画素のものを使用する. PSF はまず強度比が 1:2:3 の 3 点からなり, その広がりが 8×8 画素であるものを使用する. 画像サイズは 64×64 画素である. Fig. 2(b) は Fig. 2(a) の物体と PSF をコンボリューションして得られた劣化像であり, 5% のノイズが含まれている. ここで, ノイズ量は原画像の自乗和の平方根とノイズの自乗和の平方根の比で定義した. Fig. 2(b) の劣化像においては, 劣化した各文字同士が重なっておらず, C_n はほぼ 0.05 である. Fig. 2(c), (d) はそれぞれ本手法 ($J=100, K=10$) と AD 法 (反復回数 100 回) を適用して得られた再生物体像である. ここでは各文字を囲むように切り出した 4 枚の部分画像を用いて本手法を適用した. 用いた窓関数は大きさ $30 \times 30 \sim 36 \times 36$ 画素の矩形のものである. また, AD 法の再生像は最も MSE の小さいものを表示している.

物体の各文字間の間隔を変えたときの結果を Table 1 にまとめた. どの場合も劣化像には 5% のノイズが含ま

Table 1 Results of computer simulations.

PSF (Number of points)	Separation between letters in object (pixels)	C_n				The present method		AD method
		B	L	U	R	MSE of a reconstructed object	Evaluation value	MSE of a reconstructed object
3	11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.0071	0.9608	0.1567
	7	0.17	0.36	0.22	0.24	0.0256	0.9535	0.1694
	3	0.23	0.49	0.32	0.32	0.2782	0.9187	0.0901
7	11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.0116	0.9486	0.5135
	7	0.18	0.35	0.25	0.23	0.0122	0.9411	0.5547
	3	0.24	0.46	0.34	0.30	0.2739	0.8533	0.1384

れている。間隔が狭くなると C_n の値が大きくなり、再生物体像の MSE が大きくなる。特に、間隔が3画素になると、急激に MSE が増加し、AD 法による場合よりも大きくなってしまふ。しかし、 C_n の値が比較的小さい場合には AD 法に比較して MSE の改善が見られ、本手法が有効であることがわかる。

Fig. 3(a) は物体の各文字間の間隔が7画素の場合の劣化像、Fig. 3(b) は本手法 ($J=100, K=10$) による再生像である。Fig. 3(c), (d) はそれぞれ $k=0$, および $k=9$ の時の切り出し画像を示している。ここでそれぞれの場合の切り出し画像の汚染レベルは 0.24, 0.13 である。Fig. 3(d) では、切り出し画像補正の反復を繰り返すことによって Fig. 3(c) に見られるとなりの文

字からのしみ込みがかなり補正されている。Fig. 4 は Fig. 3(b) の再生像を得るときの評価値および MSE の挙動を示したものである。切り出し画像の補正が行われるたびに、MSE が改良されるのがわかる。また、細かい変動を除いて評価関数と MSE との一致が見られる。

PSF を構成する点の数を7点に変えたときの結果も Table 1 に示した。ここでは PSF の空間的広がりが3点の場合とほぼ同じであるため、 C_n の値にはあまり変化はなく、再生像の評価値、MSE とともに大きな変化は見られない。Fig. 5(a), (b) は物体の各文字間の間隔

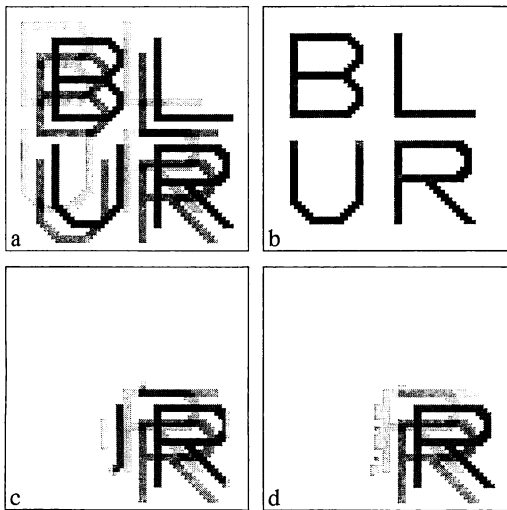


Fig. 3 Image restoration from a blurred image where blurred letters overlap each others: (a) a blurred image; (b) a restored image by the present method; (c) one of partial images when $k=0$; (d) a modified image of (c) when $k=9$.

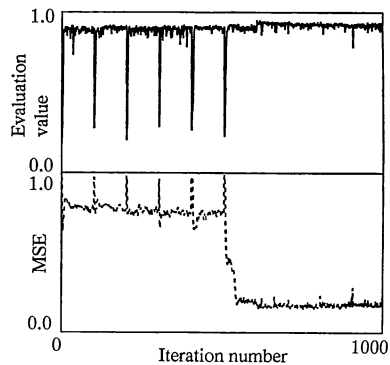


Fig. 4 Behaviors of an evaluation function and an MSE vs. iteration number ($k \times 100 + j$).

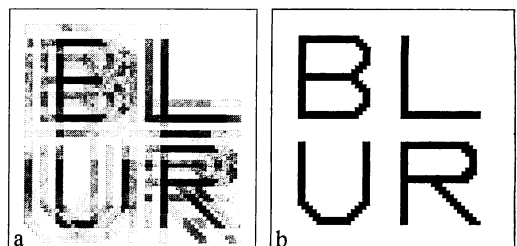


Fig. 5 Image restoration from a blurred image whose PSF is structured by 7 points.

が7画素の場合の劣化像, および本手法 ($J=100$, $K=10$) による再生像である.

4. ま と め

一枚の劣化像から複数枚の部分画像を切り出し, それらに並列 BD を適用することにより, PSF が未知の場合にも, 劣化像回復が可能なアルゴリズムを提案した.

また, 切り出し画像は一般にそのコンボリューション関係を満足していないが, それを補正する手法を提案した. 計算機シミュレーションの結果から, 本手法は, 切り出した部分画像のしみ込み, しみ出しによる汚染レベルがそれほど高くない場合には従来の BD 法よりも良好な再生像が得られることが示された. 今回のシミュレーションで用いた PSF 程度の複雑さであれば, 再生像の MSE は, PSF の形状にはほとんど無関係で, 切り出し画像の汚染レベルに強く依存する. 本論文では, 切り出す部分画像の枚数や, 窓関数の形状などの検討は行っていない. また, 本研究で用いた物体像は二値画像であり, 比較的コントラストの良い画像であった. より一般的な画像への適用のためには, これらの問題点をさらに検討する必要があり, 今後の課題として残る.

本手法は, 現段階では切り出した部分画像の汚染レベルが高い場合には良好な結果が得られないため, 適用できるのは, コンボリューション関係をあまり乱さずに部分画像の切り出しができる物体, すなわち独立した模様

が点在する物体に限定される. 例えば, 太陽表面には粒状斑のようにまわりと独立して存在する模様が多く, コンボリューション関係を乱さない切り出しが可能で, 大気によって劣化した太陽表面画像からの微細構造回復の応用においては, 本手法の適用が有効である.

文 献

- 1) A. Rosenfeld and A. C. Kak: *Digital Picture Processing*, 2nd ed. (Academic Press, Orlando, 1982) pp. 268-352.
- 2) G.R. Ayers and J.C. Dainty: "Iterative blind deconvolution method and its applications," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 547-549.
- 3) B. L. K. Davey, R. G. Lane and R. H. T. Bates: "Blind deconvolution of noisy complex-valued image," *Opt. Commun.*, **69** (1989) 353-356.
- 4) P. Nisenson: "Single speckle frame imaging using Ayers-Dainty blind iterative deconvolution," *Proceedings of the ESO Conference on High-Resolution Imaging by Interferometry II* (1993) pp. 299-308.
- 5) 小松進一: "ブラインドデコンボリューションによる像回復," 第22回画像工学コンファレンス論文集 (1991) pp. 179-184.
- 6) N. Miura, S. Kuwamura, N. Baba, S. Isobe and M. Noguchi: "Parallel scheme of the iterative blind deconvolution method for stellar object reconstruction," *Appl. Opt.* (to be published).
- 7) N. Miura, N. Baba, S. Isobe and M. Noguchi: "Image reconstruction using parallel blind deconvolution method and its application to binary stars," *Proceedings of the Sino-Japan Symposium on Engineering Optics* (Beijing, 1992) pp. 232-235.