

地上からの観測像の改善

三浦 則明* , 馬場 直志**

* 北見工業大学情報システム工学科 〒090-8507 北見市公園町165

miura@cs.kitami-it.ac.jp

** 北海道大学工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

nbaba@eng.hokudai.ac.jp

地上の望遠鏡で天体観測をする場合、大気ゆらぎによる画像の劣化および望遠鏡の開口での回折によって観測像の分解能が制限されてしまう（どちらが主因かは観測波長、望遠鏡の口径等で決る）。大気ゆらぎ劣化を改善する試みの一つが計算機による画像回復処理を用いることであり、従来から様々な方法が提案されてきている。ここでは、画像回復の基本であるデコンボリューションについて概説した後、大気ゆらぎ劣化回復技術として特に Shift-And-Add 法とブラインドデコンボリューション法を紹介する。また、回折による分解能の制限を改善する方法として、超解像についても述べる。

1. はじめに

天体に関する情報を的確に得るために、観測された画像に対し画像処理がおこなわれる。画像処理のなかでも観測された生の画像より良質の画像を得ることを画像回復とか像再生という¹⁾。地上から観測される天体像は、望遠鏡と検出器などの撮像系による影響だけでなく、大気ゆらぎによる劣化を受けている。このような劣化の要因を低減できれば画像回復が可能となる。

本稿では、画像回復の基本であるデコンボリューションについて説明した後、大気ゆらぎ劣化を受けた画像の回復技術であるスペックル像再生法およびブラインドデコンボリューション法について述べる。さらに、解像力を回折限界よりも良くする方法である超解像について触れる。

2. デコンボリューション

一般に、望遠鏡によって観測される像は次のような結像式で表すことができる。

$$i(x,y) = o(x,y) * h(x,y) + n(x,y)$$

ここで、 $o(x,y)$ は物体の強度分布、 $n(x,y)$ は加算的雑音、 $*$ はコンボリューション積分を表す。

$h(x,y)$ は系の点像関数 (PSF: point-spread function) であり、地上からの観測の場合には光学系の結像特性ばかりでなく大気ゆらぎによる劣化特性も表している。ただし、このようなコンボリューション積分 (PSFが画面上どこでも同じと仮定している) で結像式を表すのは、あくまでも近似である。例えば望遠鏡は収差のため、光軸から離れるに従ってPSFの形状が変化し、その特性が悪くなる。しかし、このような場合であっても画角を制限し、PSFが一定と見なせる領域では上式は良い近似となる。画角の大きな画像に対しては、PSFが一定と見なせる領域毎に上式を適用すればよい。

上式からわかるように、実際に観測される像は物体そのものではなく、PSFの影響を受け、さらに雑音による劣化を受ける。画像回復とは、このような劣化像からできるだけ元の物体の強度分布に近いものを求めることである。このためには雑音項を取り除き、さらにPSFの影響を外せばよい。上式の両辺をフーリエ変換すると、

$$I(u,v) = O(u,v) \cdot H(u,v) + N(u,v)$$

となる。大文字の関数は、対応する小文字の関数のフーリエ変換で、 u, v は空間周波数と呼ばれている。空間周波数領域ではコンボリューション積分



が積の形になるので扱いが簡単になる。この式から物体の強度分布のフーリエ変換は

$$O(u,v) = \frac{I(u,v)}{H(u,v)} = \frac{N(u,v)}{H(u,v)}$$

のように記述されることがわかる。これを逆フーリエ変換すると物体の強度分布が求まることになる。今、雑音項を無視すると、右辺は $I(u,v)/H(u,v)$ となり、観測像から PSF の影響を外す操作を行っていることと等価となる。これをデコンボリューションという。ただし、デコンボリューションがうまくいっても再生される像は物体そのものではなく、物体の高域空間周波数成分が欠落した像となる。これは、 $H(u,v)$ がある半径（遮断周波数という）よりも大きなところでは零となり、遮断周波数の外側で $O(u,v)$ の成分を求められないためである。このため、大気ゆらぎ劣化回復の目的は一般に、物体像そのものではなく、大気がないときに同じ口径の理想的な望遠鏡で観測されるであろう像（回折限界像という）を得ることとされる。口径の大きな望遠鏡ほど遮断周波数が大きくなるので、分解能が良くしたがって物体に近い像が得られることになる。

しかし、実際には上式に基づいて画像回復することはほとんどない。というのは、 $H(u,v)$ が小さなところでは雑音成分が正確に求まらないため、雑音成分を過度に強調してしまうのである。さらに $H(u,v)$ が零のところでは発散してしまう。このため、実際にデコンボリューションによく使われるのはウィナーフィルター²⁾と呼ばれているものである。あるいは、空間周波数面ではなく実空間でデコンボリューションを行う方法として、リチャードソン・ルーシーアルゴリズム³⁾があり、ハッブル宇宙望遠鏡の画像処理などに使われている。

いずれにせよ、デコンボリューションにおいて最も重要なことは、 $H(u,v)$ すなわち PSF が正確に解っていることである。PSF を求める一つの方法は、視野にある点状星の像を使うことであるが、いつも視野内に点状星があるとは限らない。しかも、大気ゆらぎは時々刻々変化し、これにより PSF も変化

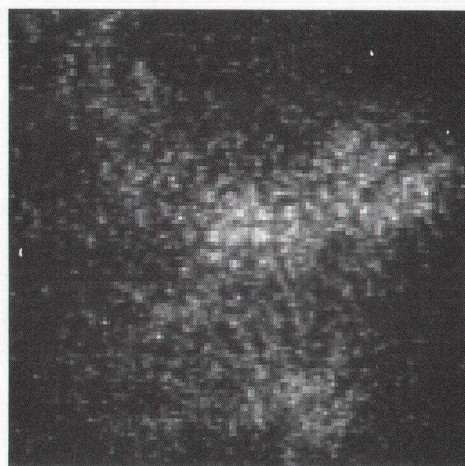


図1 メキシコ、サンペドロ天文台 212cm 望遠鏡で観測された連星 HD185936 の短時間露光像。観測波長 630nm、画角 2.3"×2.3"。大気ゆらぎのため二重星の構造が全く分からなくなっている。

することになる。このような大気ゆらぎ劣化した画像の回復はどのようにするのか。例えば、図1のような像から天体を推定するには？

3. 大気ゆらぎ劣化像の回復

望遠鏡の遮断周波数で決まる回折限界分解能で天体の情報を得るには、大気ゆらぎが凍結するように短時間露光せねばならない。このような短時間露光像からの画像回復には2通りのアプローチがある。

- 1) 大気ゆらぎのランダム性を利用し各瞬間の PSF を推定しないで、多数フレームでの統計処理を行う。
- 2) ある瞬間での PSF を推定し、デコンボリューションを行う。以下に2通りのアプローチの代表的な方法について述べる。

3. 1. スペックルイメージング

多数フレームの短時間露光像から回折限界像を得る方法がスペックルイメージング法である。像再生アルゴリズムにはいくつか提案されているが、こ

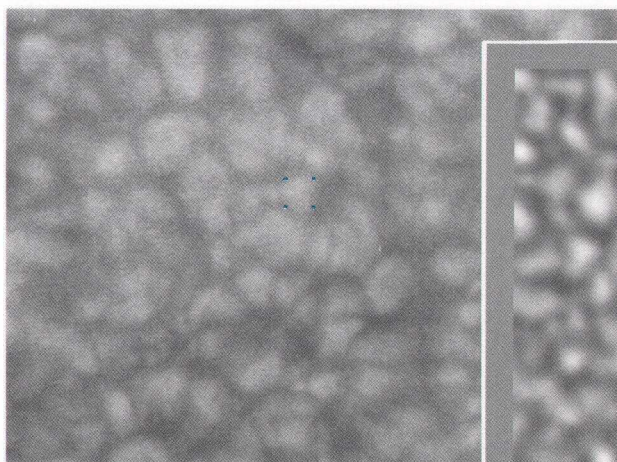


図 2 (a) スペイン，テネリフェ島にある VTT 望遠鏡で観測された太陽粒状斑の像（観測波長 430nm，画角 28"×21"）. 300 フレームの中で最もコントラストの良い像. 青の 4 点で囲まれた部分が SAA の参照パターンとして使われる.

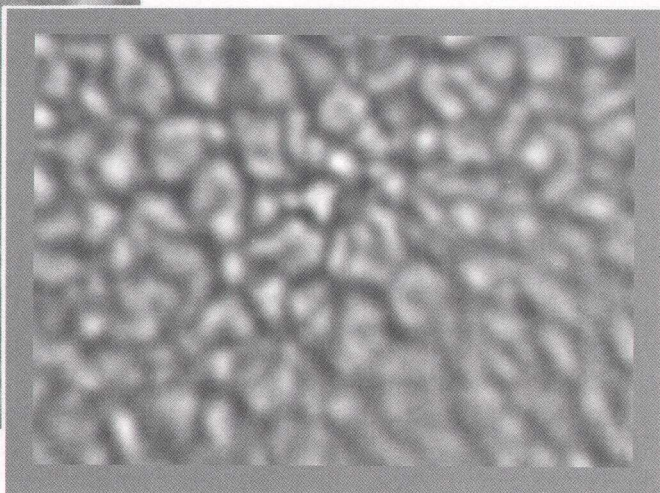


図 2 (b) 300 フレームを使った SAA 再生像. 参照パターン近傍のアイソプラナティック領域内では粒状斑が良く再生されている.

ここでは最も簡単な Shift-and-add (SAA)^{4), 5)}法について述べる. SAA 法は, 各フレーム中の最も明るい点（望遠鏡による回折パターンであるエアリーディスクが最も忠実に形成されていると見なせる）が同じ位置にくるようにシフトして重ね合わせることで像再生する方法である. SAA のシフト操作は波面の傾きを補正することに相当するので, SAA で再生される像は波面のティップティルトだけを補償するアダプティブオプティクスで得られる像に等しい. 実際に, 参照星のスペckルパターンについて実時間で SAA（ティップティルト鏡を使う）を行う簡便なアダプティブオプティクスが近赤・赤外で行われている.

点状構造をしていない広がった天体の場合には, その天体の中にある特徴的なパターンとの相関が最大となる位置で SAA するとよい. 図 2 (a)は, 太陽粒状斑の像で 300 フレーム撮像（露光時間 4ms, 露光間隔 19ms）した中で一番コントラストの良い像である. この像で 4 つの点で囲った部分に着目

し, これを参照パターンとして各フレームとで相関演算し, 相関ピークの位置で SAA しバックグラウンド成分を引くと, 図 2 (b)のような像が得られる. 着目した領域の近辺で画質が改善されていることがわかる. しかし, それ以外の周辺では改善されていない. これは大気ゆらぎの影響が画面全体で一様でない, すなわち PSF が領域毎に異なっているためである. 大気ゆらぎ劣化像の回復のような場合には, PSF が一定と見なせる領域（アイソプラナティック領域）毎に像再生をしなければならない.

3. 2. ブラインドデコンボリューション法

ブラインドデコンボリューション (BD) 法とは, 未知である二つの関数のコンボリューションが与えられたとき, その未知関数についての先見知識を拘束条件として用い, 未知関数を二つとも回復しようとする方法である. 天体の短時間露光像は天体像と PSF とのコンボリューションなので, BD 法を天体像回復に適用すると, 天体の回折限界像と

各瞬間のPSFが同時に求められることになる。BDが可能であるための条件には幾つかあるが、ここではように被処理画像が望遠鏡によって観測されたもので（有限の大きさの遮断周波数を持つことになる）、かつ像の非負性を拘束条件として用いる場合には、BDが可能であることがわかっている。

BD法の中で代表的なものは反復フーリエ変換による方法⁶⁾である。この方法では、デコンボリューションによって片方の関数の推定からもう片方の関数を推定するのであるが、この処理を互いの役割をかえて交互に繰り返すのである。ただし、デコンボリューションによって推定された関数は通常負になる部分を含んでいるので、これを非負化する処理を行う必要がある。ところで、天体像の場合には、観測によって複数枚の短時間露光画像を得ることができる。これらの画像ではPSFはそれぞれ異なっているが、物体関数が共通となっているので、これをさらにBDの拘束条件として用いることができる。このことを利用したBD法の一つが、複数の観測画像に対して並列に上記の反復フーリエ変換を適用する方法である⁷⁾。図3は、この方法を用いて10枚の短時間露光像（うち1枚が図1）から得られた二重星の回復像である。

BD法には他にも、共役勾配法を用いてアルゴリズムの収束性を改善した方法⁸⁾や、フォトンノイズを考慮した最尤法を採用することで暗い天体にも適用できるようにした方法⁹⁾、など様々な方法がある。また、BD法では対象物体を限定し、その物体の特徴を拘束条件として利用することによりさらに信頼性の高い画像回復が可能となる。その一つの例として、対象を太陽粒状斑に限定した方法¹⁰⁾が提案されている。

4. 超解像

超解像とは、観測像を画像処理することによって、望遠鏡の口径で決まる回折限界を越える分解能を実現することである¹¹⁾。つまり、超解像によって実際に用いた望遠鏡よりも大口径の望遠鏡で



図3 複数フレームを用いたブラインドデコンボリューション法によって得られた連星HD185936の回復像（図1より2倍に拡大）。二重星の構造がはっきりと回復されており、位置角、角距離、等級差などの情報が求められる。

観測したのと等価な像を得ることができるのである。それでは、なぜ超解像が可能なのであろうか？ それは観測像が強度分布であり、負にならないという拘束条件のために、観測像の空間周波数スペクトルの各成分が独立ではなくなっているためである。この結果、観測され実際に得られている空間周波数成分から、各周波数間の依存関係を満足させるように遮断周波数の外側の成分を推定していくことが可能となる。

超解像を実現する方法は幾つかあるが、ここでは我々が開発した方法¹²⁾を紹介する。いま、回折限界像 $i(x,y)$ が観測されているとして、この像から超解像によってより高い分解能を持つ像 $j(x,y)$ を得ることがここでの目的である。さて、 $j(x,y)$ は負にはならないので、ある適当な実関数 $f(x,y)$ の2乗として表すことができる。この関係をフーリエ変換して空間周波数空間でみると、 $J(u,v)$ は $F(u,v)$ の自己コンボリューションとなる。ここで大文字の関数は対応する小文字の関数のフーリエ変換である。

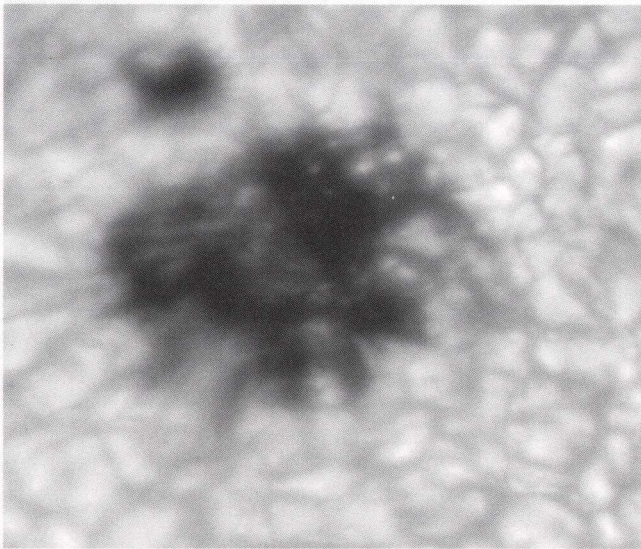


図4 (a) VTT 望遠鏡で観測された太陽黒点像 (観測波長 543nm, 画角 27"×23"). 大気ゆらぎによる画像劣化の影響が左半分に顕著に現れている。

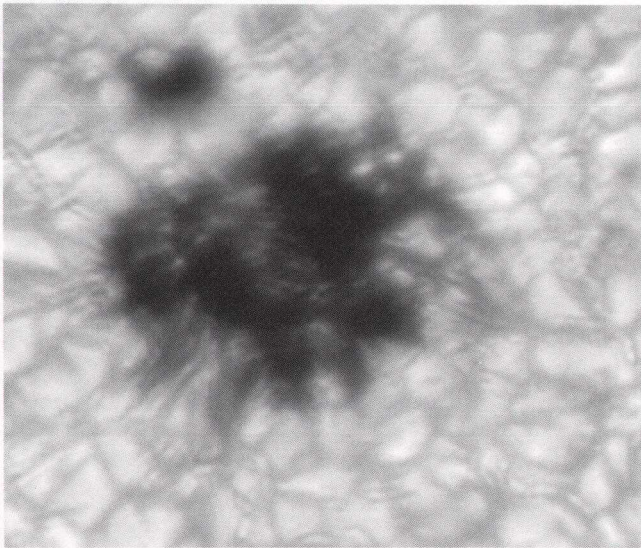


図4 (b) ブラインドデコンボリューション法によって大気ゆらぎの影響を取り除き, 超解像によって分解能を改善したものの。画像全体に細かな構造が回復されているのがわかる。

一方, $I(u,v)$ と $J(u,v)$ は望遠鏡の PSF がわかれば簡単な関係式で結びつけることができるので, この関係式を満たすような $F(u,v)$ を求めることが可能である. 我々の方法では $F(u,v)$ を導出するときは, 共役勾配法という数学的な最適化の手法を用いている. 一旦, $F(u,v)$ が求められれば, それを逆変換して $f(x,y)$, さらに 2 乗して $j(x,y)$ を得ることができる.

図4 (a)は太陽の観測画像である. この画像では右半分は比較的シーイングが良好なのであるが, 左半分は大気ゆらぎのせいで細かな構造が見えなくなっている. (b)は太陽用に特化した BD 法¹⁰⁾を用いて大気ゆらぎの影響を除去したものを, さらにここで紹介した超解像法を用いて分解能を改善したものである. すべての処理がうまくいっているとすると, 0.1 秒角強の空間分解能が実現されているはずである.

5. まとめ

本稿では, 大気ゆらぎ劣化した画像の回復技術としてスペckル像再生法とブラインドデコンボリューション法, 回折限界よりも高い分解能を実現する超解像について述べた. しかしながら, 大気ゆらぎ劣化の回復技術は非常に多岐にわたり, 紙面の制約上ここではすべてを紹介することはできなかった. ここで紹介したもの以外でも, スペckル像再生法として定評あるバイスペクトル法, ブラインドデコンボリューション法と関連深い位相ダイバーシティ法は重要であろう.

大気ゆらぎ劣化を実時間で補正するアダプティブオプティクスが暗い天体の観測などで威力を発揮している. しかし, アダプティブオプティクスによる補正が完全でない場合には, なんらかのデコンボリューション



ョン操作による画像回復が重要となる。天体撮像の状況に応じて異なった手法の画像改善策が適用されているが、撮影像をいかにして更に良質の像にするかの研究は今後とも大切である。

参考文献

- 1) Bates, R. H. T., and McDonnell, M. J., *Image Restoration and Reconstruction* (Oxford, 1986)
- 2) Andrews, H. C., and Hunt, B. R., *Digital Image Restoration* (Prentice-Hall, 1977)
- 3) Hook, R., in *Proc. High Resolution Data Processing*, eds. Iye, M., et al. (NAOJ, 1996) p. 39
- 4) Bates, R. H. T., and Cady, F. M. 1980, *Opt. Commun.*, 32, 365
- 5) Baba, N. et al. 1985, *Appl. Opt.*, 24, 1403
- 6) Ayers, G. R. & Dainty, J. C., 1988, *Opt. Lett.*, 13, 547
- 7) Miura, N., et al., 1993, *Appl. Opt.*, 32, 6514
- 8) Lane, R. G., 1992, *J. Opt. Soc. Am. A*, 9, 1508
- 9) Shultz, T. J., 1993, *J. Opt. Soc. Am. A*, 10, 1064
- 10) Miura, N. & Baba, N., 1995, *J. Opt. Soc. Am. A*, 12, 1858
- 11) 河田聡, 南茂夫編著, 1996, 「科学計測のための画像データ処理」, CQ 出版
- 12) Miura, N. & Baba, N., 1996, *Opt. Lett.*, 21, 1174

Restoration of astronomical images observed from the ground

Noriaki MIURA

Kitami Institute of Technology, Department of Computer Sciences,

165 Koen-cho, Kitami, 090-8507, Japan

Naoshi BABA

Hokkaido University, Department of Applied Physics, Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628, Japan

Abstract: Spatial resolution of an image observed with a ground-based telescope is limited by atmospheric turbulence, diffraction at the telescope aperture, or both. An approach to overcome the former degradation is to use an image-restoration technique by computer. Various restoration methods have been proposed for this purpose. In this article, we briefly explain deconvolution as a basic concept of image restoration, and then apply a shift-and-add method and a blind deconvolution method to restoration of atmospherically degraded images. We also describe a superresolution method to improve diffraction-limited resolution.