

なゆた望遠鏡によるイオのスペックル観測とデータ処理

桑村 進¹⁾・三浦 則明¹⁾・圓谷 文明²⁾・坂元 誠²⁾・馬場 直志³⁾

¹⁾ 北見工大・²⁾ 西はりま天文台・³⁾ 北大院工

Speckle observation and data processing for Io using Nayuta telescope

Susumu KUWAMURA¹⁾, Noriaki MIURA¹⁾,
Fumiaki TSUMURAYA²⁾, Makoto SAKAMOTO²⁾, Naoshi BABA³⁾

Abstract

We have observed Io, a Jupiter satellite, in speckle mode using 2m telescope (Nayuta telescope) of Nishi-Harima Astronomical Observatory. The speckle data are processed by shift-and-add (SAA) method to restore the diffraction-limited image of Io. An image with resolved surface structures of Io has been yielded by rather simple SAA algorithm with help of a sophisticated post-processing, background subtraction (BGS) and deconvolution by a modeled point-spread-function (PSF). The present result has demonstrated a capability of SAA to restore images of extended objects.

Key Words: speckle, Nayuta telescope, shift-and-add, deconvolution, Io

1 はじめに

天体スペックル像再生は、大気揺らぎ下で撮影された多数枚の短時間露光像（スペックル像）から天体の回折限界像を得ることを目的とする。天体スペックル干渉法¹⁾は、位相回復法^{2), 3)}の援用によって、原理的には任意の強度分布を持つ天体像を再生できる。しかしながら、大気揺らぎ伝達関数や雑音バイアスを精度良く補正するのが困難なため、強い輝点を含む恒星状の天体クラスに応用が限定され、惑星や衛星のような広がった天体への応用は余り進んでいない。

shift-and-add (SAA) 法^{4), 5)}は、スペックル像再生法の中では最も単純な方法であり、上記のような困難さを伴わないという利点がある。しかし、SAA 法は恒星状天体への適用を前提として提案された方法であり、少なくとも物体像内に強い輝点が含まれていなければ適用できないと信じられてきた。このため、連星などの限られた天体クラスに対してその有効性が実証されて来たに過ぎず、適用可能な天体クラスを拡張することが一つの課題であった⁶⁾。

近年我々は、西はりま天文台 2 メートル望遠鏡（な

ゆた望遠鏡）を使った木星衛星イオのスペックル観測を行い、そのデータを SAA 法で処理し良好な結果を得た。本稿では、データ処理アルゴリズムの詳細を述べる。

2 観測

イオのスペックル観測は、2006 年 6 月 7 日、なゆた望遠鏡のカセグレン焦点 (F/12) に取り付けられた VTOS (visible target observation system) によって行われた。VTOS は、望遠鏡焦点面の像をコリメートレンズ (40mm) と結像レンズ (200mm) によって 5 倍に拡大し、EBCCD (electron bombarded CCD) カメラの検出面に再結像する。コリメートレンズの後に挿入された干渉フィルタ ($\lambda = 515\text{nm}$, $\Delta\lambda = 20\text{nm}$) によってスペックル像を狭帯域化している。CCD カメラの画素サイズは $14\mu\text{m}$ で、これが像の標本間隔となる。スペックル像はビデオレート (1/30 sec) でフレームメモリに取り込まれる。こうして得られたスペックル像の一枚を図 1 に示す。比較的良好なシーリング状

態に恵まれ、Fried パラメータは 10cm 程度と見積もられている。

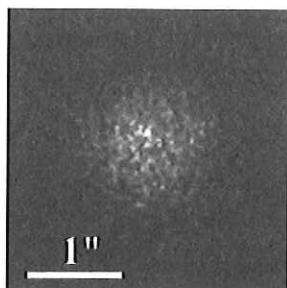


図 1: イオのスペックル像

3 データ処理と結果

3.1 SAA 処理

物体像が 1 つの際立った強い輝点を含む場合、画素値の最大位置が一致するように各スペックル像をシフトして足し合わせれば回折限界像が得られる。これが SAA アルゴリズムの原型である⁴⁾。後に Gingras と Aruga は、より一般の天体クラスに適用できるよう SAA アルゴリズムの修正を行った⁵⁾。このアルゴリズムは次のように再帰的に定式化できる：いま、Z 枚のスペックル像 $s_0(x, y), s_1(x, y), \dots, s_{z-1}(x, y)$ のうち、0 から z 番目までをシフト加算した像 (SAA 像) を $a_z(x, y)$ とする。これに $z+1$ 番目のスペックル像 $s_{z+1}(x, y)$ をシフト加算し、新たな SAA 像

$$a_{z+1}(x, y) = a_z(x, y) + s_{z+1}(x + u_{z+1}, y + v_{z+1}) \quad (1)$$

を生成する。ここで、シフトベクトル (u_{z+1}, v_{z+1}) は、 $s_{z+1}(x, y)$ の $a_z(x, y)$ に対する相互相関関数のピーク位置から決定される。以上の手続きを全てのフレームに対して反復することで最終的な SAA 像を得る。図 2 は、イオのスペックル像 1000 枚から得られた SAA 像である。



図 2: イオの SAA 像

3.2 後処理

図 2 を見ても分かるように、SAA 像には回折限界像と重なって強いバックグランドが存在する。このため、SAA 像から回折限界像を抽出する後処理 (post-processing) が必要になってくる。最も直接的な方法は、バックグランド成分を推定して SAA 像から引き算するという方法である。バックグランド成分の推定は、SAA 像 $a(x, y)$ を平滑化するというのが最も簡単である。バックグランド減算後 (background subtracted, BGS) の像を $i(x, y)$ と置くと、フーリエ空間上で

$$I(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) \{1 - G(f_x, f_y)\} \quad (2)$$

と書ける。ここで、 $A(f_x, f_y)$ は $a(x, y)$ のフーリエ変換、 $G(f_x, f_y)$ は低域通過フィルタ (low-pass filter) で通常ガウス関数を用いる：

$$G(f_x, f_y) = \exp \left(-\frac{f_x^2 + f_y^2}{2w^2} \right) \quad (3)$$

こうして得られる BGS 像 $i(x, y)$ は、低周波数成分が大きく欠落した像（直流成分はゼロすなわち平均がゼロの像）となり、負値を含む像になってしまふ。今回のような広がった物体の場合、像が全体的に負の方向に沈み込んでしまい、画素値が負のバイアスを持つようになる。図 3 は、BGS 处理後のイオの像である。物体像の周囲が負値の領域になっているのが分かる。本来の回折限界像は非負であるが、BGS 处理で得られる像はそれを強調処理したような像になてしまう。

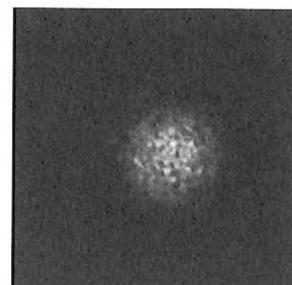


図 3: イオの BGS 像。黒レベルは負の画素値に相当する

広がった物体の場合、SAA 像のバックグランド成分を正確に同定するのは困難である。SAA 像から回折限界像を得る別のアプローチとして deconvolution がある。SAA 处理は線形演算なので、SAA 像 $a(x, y)$ は物体の回折限界像 $o(x, y)$ とある固有の点広がり関数 (point-spread-function, PSF) $h(x, y)$ の convolution で表すことができる。 $h(x, y)$ は点状星 (参照星) の SAA 像で置き換える事ができる。こうして、物体の SAA 像を参照星の SAA 像で deconvolution することによって、回折限界像を得ることが可能である。ただ、

なゆた望遠鏡によるイオのスペックル観測とデータ処理

参照星の SAA 像と $h(x, y)$ がぴったり整合しているという保証は無い。両者は異なるシフトベクトルによる SAA 処理の結果であるし、シーイング状態も異なっている。参照星の SAA 像で deconvolution するというアプローチは（特に広がった物体の場合）経験から言つて満足な結果に結び付かない。

そこで我々は、式 (2) で得られる BGS 像 $i(x, y)$ をゼロ平均の PSF で deconvolution するというアプローチを試みた⁷⁾。こうすることで、BGS 処理で不足した低周波数成分が補われ非負の回折限界像を得ることができる。BGS 像 $i(x, y)$ もやはり、物体の回折限界像 $o(x, y)$ とある固有の PSF $p(x, y)$ の convolution で表すことができる：

$$i(x, y) = o(x, y) * p(x, y) \quad (4)$$

$o(x, y)$ は非負で、 $p(x, y)$ は負値を持つゼロ平均の関数である。点状星の BGS 像を観察すると、図 4 に示すように、尖部と凹部から成る特徴的な形状を持つことが分かる。 $p(x, y)$ も同様の形状を持つと仮定できる。

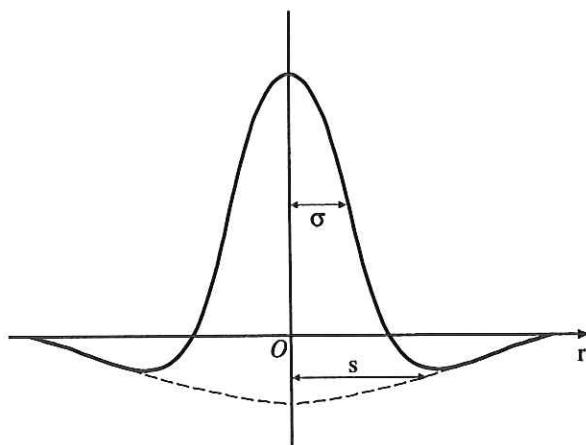


図 4: BGS 像の PSF モデル

この形状は 2 つのガウス関数を使って次式のようにモデル化できる：

$$p(x, y; \sigma, s) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) - \frac{\sigma^2}{s^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2s^2}\right)$$

ここで、 σ と s はモデルパラメータで、それぞれ尖部と凹部の拡がりを表す。モデル化された PSF $p(x, y; \sigma, s)$ によって BGS 像 $i(x, y)$ を deconvolution し、回折限界像 $o(x, y)$ を求めるアルゴリズムは次のようになる⁷⁾：与えられた物体推定 $o(x, y)$ に対し、BGS 像 $i(x, y)$ と convolution 像 $o(x, y) * p(x, y; \sigma, s)$ との二乗誤差積分が最小になるようモデルパラメータ値 (σ_0, s_0) を求め、 $i(x, y)$ を $p(x, y; \sigma_0, s_0)$ で deconvolution (逆フィルタリング) し、その結果得られた像に非負条件を課して新たな物体推定 $o(x, y)$ とする。これを物体推定

が収束するまで反復する。こうして得られたイオの推定像を図 5(a) に示す。物体像の周囲にあった負値の領域が解消されているのが分かる。また、同図 (b) のボイジャー 2 号の近接像と比較して、イオ表面のクレータ構造が良好に再生されているのが分かる。

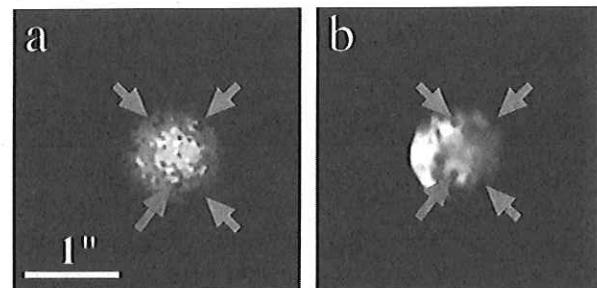


図 5: 左図は、図 3 の BGS 像をモデル PSF で deconvolution した像である（黒レベルが画素値ゼロに相当する）。比較のためボイジャー 2 号の近接像を右に示す。クレータの位置を矢印で示しているが、再生像の対応する位置に暗いスポットが現れているのが分かる。

4 最後に

天体スペックル像は、大気揺らぎによって時々刻々変化する PSF で劣化した時系列画像である。SAA 処理は、このような一連の画像をレジストレーション（位置合わせ）しながら積分していく所謂 image stacking 処理を行っていることになる。Gingras と Aruga は、物体像が複数の輝点を含む場合に関して、そのスペックル像に上記処理を適用することで回折限界像の再生が可能である事をシミュレーション実験で実証している⁵⁾。今回我々は、同処理をイオのスペックル像に適用し、さらに後処理を工夫することで良好な再生結果を得ることに成功した。これは、物体像が輝点を持たない広がった場合においても SAA 法が有効であることを実証している。我々はシミュレーション実験により、本方法で得られる再生像が約 5% の相対精度で天体表面の強度（アルベド）分布を再現し得る事を示している⁷⁾。SAA 法のアルゴリズムは単純ではあるが、適当な後処理を行うことによってその潜在性を引き出すことができる。

参考文献

- 1) Labeyrie, A., Astron. Astrophys., Vol.6, pp.85-87, 1970.
- 2) Knox, K. T. and Thompson, B. J., ApJ, Vol.193, p.L45, 1974.

- 3) Lohmann, A. W., Weigelt, G. and Wirnitzer, B.,
Appl. Opt., Vol.22, pp.4028-4037, 1983.
- 4) Bates, R. H. T. and Cady, F. M., Opt. Commun.,
Vol.32, p.365, 1980.
- 5) Gingras, D. J. and Aruga, T., Opt. Lett., Vol.15,
p.1380, 1990.
- 6) Baba, N., Miura, N., Sakurai, T., Ichimoto, K.,
Soltau, D. and Brandt, P., Sol. Phys., Vol.188,
p.41, 1999.
- 7) Kuwamura, S., Tsumuraya, F., Sakamoto, M.,
Miura, N. and Baba, N., Opt. Rev., Vol.16,
pp.587-593, 2009.

(2009年12月21日受付，2010年1月15日受理)