

京都大学大学院理学研究科附属天文台技報

Technical Reports from Kwasan and Hida Observatories

Graduate School of Science, Kyoto University

Vol.2-1

スペックルマスキング法による画像復元プログラム

Image Reconstruction Program by Speckle Masking Method

一本 潔^{*1}、川手 朋子^{*1}

2013年 8月 1日 初稿

2014年 1月 25日 改訂

[†]京都大学理学研究科附属天文台

スペックルマスキング法による画像復元プログラム

Image Reconstruction Program by Speckle Masking Method

一本 潔、川手 朋子

概要

シーイングによって解像度の劣化した観測画像から対象の本来の輝度分布を得るために、スペックルマスキング法による画像復元プログラムを IDL 上に作成した。入力画像は観測対象が変化しないと考えられる時間内に得られた短時間露出画像の時系列である。スペックルマスキング法を用い、位相復元プロセスに新たな工夫を付け加えることで、ロバストで効果的な画像復元をおこなうことができる。飛騨天文台の SMART や DST で得られた画像への適用例を示す。

An image reconstruction program is implemented on IDL to recover real features of targets from observed images degraded by seeing. Data to be processed by the program is a set of short exposure images taken during a time period shorter than the evolutionary time scale of the observing target. We use the speckle masking method and by implementing a new algorithm for phase recovery, realize a robust and effective image reconstruction. Results are demonstrated by applying it to the data taken by SMART and Domeless solar telescope at Hida observatory.

1. はじめに

天体観測において地球大気の影響による屈折率揺らぎに伴う入射光波面の歪み（シーイング）は、望遠鏡によって得られる画像の解像度を著しく低下させる。とくに異なる複数画像の差分をとる速度場や偏光観測では、高い空間分解能の高精度計測を不可能にする。シーイングの大きさは、長時間露光したときの点像の広がり角を回折限界とする仮想的な望遠鏡の口径で表すことができ（フリードパラメータ: r_0 ）、飛騨天文台における典型的な値は約 4cm であることが分かっている（川手他、2014）。これはドームレス太陽望遠鏡の口径 60cm や SMART/T3,T4 の口径 25cm に対して大きく下回る値であり、ほとんどの場合望遠鏡の回折限界性能を出しきっていないことになる。これを克服するため、実時間で入射波面の歪みを補正する補償光学装置（Adaptive Optics）が現在ドームレス太陽望遠鏡において開発中であるが、本稿は、取得したデータの後処理によりこのシーイングによって劣化した画像から本来の画像を復元する試みについての報告である。

シーイングが変動するタイムスケールは 1/100 秒程度であるため、10msec よりも短い露出時間の撮像では、大気は‘フリーズ’した状態であり、像の歪みやぼけは避けられない

ものの原理的には回折限界に近い空間構造の情報（空間高周波成分）が画像に含まれている。このことを利用したいくつかの画像復元手法が試みられてきた。最も簡便な方法は、短い露出で短時間に多数の画像を取得し、画像を数秒角程度の部分画像に分割してそれぞれの領域について輝度の相互相関より時系列画像の位置を揃えて足し合わせる、というものである（shift and add 法, Baba et al, 1999）。この手法により、像の有意な改善は見られるものの、補正されるのは部分領域における波面のティルト成分のみであり、高次の波面歪みによる像のぼけや変形を除去することはできない。より高度な方法としてスペックル干渉法がある。スペックルとは、短時間露光した星像が多数の点像（speckle=斑点）に分かれて写るものをこう呼んだことに由来する。これは望遠鏡開口にわたる乱れた波面要素が干渉することによって発生するものであり、最小の点像は望遠鏡の口径で決まる回折限界の空間情報を含んでいる。スペックル画像を用いた画像復元手法は、1970 年代に星の観測分野で開発され（eg. Labeyrie 1970）、点光源のある星野撮像においては大きな威力を発揮した。太陽の様に 2 次元的に広がった観測対象についてこの手法を応用する研究は 1980 年代になって行われる（eg. Weigelt, and Wirtzner, 1983）。

その原理は、観測対象が変化しないと考えられる時間内に、短時間露出でかつ大気揺らぎの状態が独立と考えられる時間間隔において画像を多数枚取得し、個々の画像をフーリエ変換して観測対象の各周波数成分の振幅と位相を多数のサンプル情報から推定し、それを逆フーリエ変換して本来の対象画像を復元する、というものである。位相の推定は基本的には各画像における同一周波数成分の位相の平均により求めるが、高周波成分は各画像について位相が 2π を大きく超えて変動しうるため、単純な平均では真の値を求めることができない。スペックル画像復元では、まず低周波成分の位相をサンプルの平均から求め、シーイングによる位相の揺らぎがランダムであるという仮定の下、低周波側から順次高周波成分の位相を推定していく。その手法として最初に考案されたものが Knox-Thompson 法（Knox and Thompson, 1974）であり、これを用い太陽画像に適用可能な画像復元プログラム KISIP (Kiepenheuer-Institut Speckle Imaging Package, von der L  he, 1993, 1994, W  ger and von der L  he, 2008) が開発された。飛騨天文台でも SMART フレア高速撮像装置 (FISCH) で取得された画像に KISIP を適用し、画像を復元する試みを行ったが、シーイングの状態によってなかなか期待される結果が得られないことがわかった。位相復元手法として Knox-Thompson 法を発展させた手法、スペックルマスキング法が Weigelt (1977) により提唱された。これを太陽観測に応用する研究は 1980 年代に行われた。スペックルマスキングは大きな計算機のリソースを要求するため、当時の論文には「まともに処理するのはとても現実的ではない」、との記述がある。本稿は Lohmann, Weigelt, and Wirtzner (1983)、Pehlemann and von der L  he (1989) に基づき、スペックルマスキングによる像回復プログラムを IDL 上で実現した報告である。

2. スペックルマスキングの原理

観測された時系列画像の n 枚目の強度を $i_n(\mathbf{x})$ 、観測対象の真の輝度分布を $o(\mathbf{x})$ 、各撮像時の望遠鏡と揺らいだ大気を含む瞬間的な点像分布関数(point spread function)を $p_n(\mathbf{x})$ とする ($\mathbf{x}$ は天空上の方向を指す 2 次元ベクトル)。 $i_n(\mathbf{x})$ は $o(\mathbf{x})$ と $p_n(\mathbf{x})$ のコンボリューション

$$i_n(\mathbf{x}) = o(\mathbf{x}) \otimes p_n(\mathbf{x}), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

で表され、これをフーリエ変換すると

$$I_n(\mathbf{u}) = O(\mathbf{u}) \cdot P_n(\mathbf{u}) \quad (2)$$

となる ($\mathbf{u}$ は波数ベクトル)。元画像のサイズを $n_x \times n_y$ とすると、FFT が返すフーリエ変換はやはり $n_x \times n_y$ の複素数配列 (振幅と位相をもつ) であるが、各フーリエ変換は $I_n(\mathbf{u}) = I_n^*(-\mathbf{u})$ (複素共役) であるため、その自由度はやはり $n_x \times n_y$ である。 $P_n(\mathbf{u})$ は望遠鏡と大気を含んだ光学伝達関数(optical transfer function; OTF)と呼ばれる。すべての画像についてのアンサンブル平均を $\langle I_n(\mathbf{u}) \rangle \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n(\mathbf{u})$ であらわすと、(2)式は

$$\langle I_n(\mathbf{u}) \rangle = O(\mathbf{u}) \cdot \langle P_n(\mathbf{u}) \rangle = O(\mathbf{u}) \cdot \langle |P_n(\mathbf{u})| e^{-i\phi_n(\mathbf{u})} \rangle \quad (3)$$

となる。右辺の $e^{-i\phi_n(\mathbf{u})}$ は高い空間周波数 ($u > r_0/\lambda$) では位相が 2π を超えて画像ごとに大きく変動する (複素平面上あらゆる方向に向く) ため、アンサンブル平均すると互いに打ち消し合ってしまう。 $\langle P_n(\mathbf{u}) \rangle$ の絶対値 $|\langle P_n(\mathbf{u}) \rangle|$ は長時間露出における変調伝達関数(modulation transfer function; MTF= $|OTF|$)であり、 r_0/λ よりも高周波側でほぼ 0 となる関数である (図 1)。

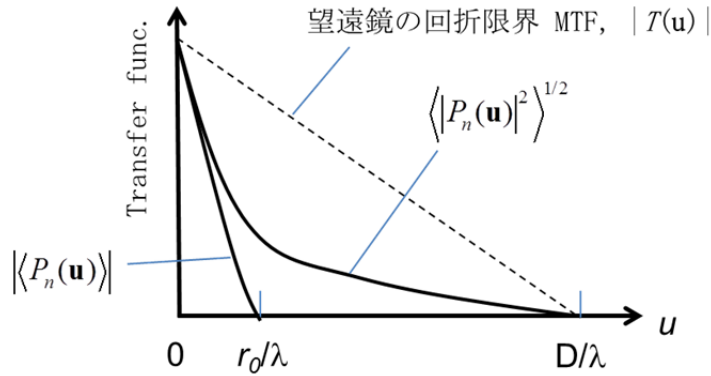


図 1. シーイングを含む Modulation transfer function

一方 $I_n(\mathbf{u})$ の振幅の 2 乗、すなわち空間パワースペクトルのアンサンブル平均は、

$$\langle |I_n(\mathbf{u})|^2 \rangle = |O(\mathbf{u})|^2 \cdot \langle |P_n(\mathbf{u})|^2 \rangle \quad (4)$$

となり、位相情報はもたないが、各周波数成分の振幅情報は望遠鏡の回折限界周波数 (D/λ) までゼロとならない。 $\langle |P_n(\mathbf{u})|^2 \rangle$ をスペックル伝達関数 (Speckle transfer function; STF) とよぶ。スペックル画像復元は、STF を推定することで、減衰した高周波成分の振幅を回折限界 MTF で得られるであろうところまで戻し ($|O(\mathbf{u})|^2 = \langle |I_n(\mathbf{u})|^2 \rangle / \langle |P_n(\mathbf{u})|^2 \rangle$)、さらに各フーリエ変換の位相を高周波数成分まで推定することで、本来の画像を得ようというものである。

2-1. 振幅の復元

STF の推定を行うために本研究では Ricort and Aime (1979) による以下の伝達関数のモデル式を使う。すなわち、

$$\langle |P_n(q)|^2 \rangle = |T(q)|^2 \exp \left(-6.88 \left(\frac{q}{\alpha} \right)^{5/3} \right) + 0.44 \alpha^2 |T(q)| \quad (5)$$

ここで、 $T(q)$ は望遠鏡の OTF、 $q = u/u_{\text{limit}}$ は望遠鏡のカットオフ周波数 (回折限界周波数)、 $u_{\text{limit}} = D/\lambda$ (cycle/rad)、で規格化した空間周波数、 α は望遠鏡の口径で規格化したフリードパラメータ (r_0/D) である。OTF や STF は方位角によらないとしている。

像復元処理が目標とする画像は、シーイングのない状態で望遠鏡によって結像した回折限界像である。すなわち、そのフーリエ成分の振幅は(4)式より、

$$|O(\mathbf{u}) \cdot T(\mathbf{u})|^2 = \langle |I_n(\mathbf{u})|^2 \rangle |T(\mathbf{u})|^2 / \langle |P_n(\mathbf{u})|^2 \rangle \quad (6)$$

従って目標画像の各空間周波数成分の振幅は、

$$|O(\mathbf{u}) \cdot T(\mathbf{u})| = R(q) \cdot \langle |I_n(\mathbf{u})|^2 \rangle^{1/2}, \quad R(q) \equiv |T(q)| \cdot \langle |P_n(q)|^2 \rangle^{-1/2} \quad (7)$$

によって求めることができる。

(5)式と(7)式により振幅復元倍率 $R(q)$ は撮像時のフリードパラメータから一意的に求めることができる。フリードパラメータ r_0 の推定は von der L  he (1984)の方法によりおこなう。まず、

$$\varepsilon(q) \equiv \frac{\langle |P_n(q)| \rangle^2}{\langle |P_n(q)|^2 \rangle} = \frac{\langle |I_n(q)| \rangle^2}{\langle |I_n(q)|^2 \rangle} \quad (8)$$

を定義する。図1から明らかなように、 $\varepsilon(q)$ は低周波($q \ll \alpha$) で1に近く、周波数が高くなると($q \geq \alpha$) ほぼ0になる関数である。従って $\varepsilon(q)$ が急激に減少するところの q の値は、 r_0 の指標を与えることになる。von der Lühe (1984)によると、 $\varepsilon(q)$ が0.5になる周波数を $q_{0.5}$ とすると、

$$\alpha \equiv \frac{r_0}{D} = A q_{0.5}^B, \quad A = 0.990, \quad B = 1.07 \quad (9)$$

と書け、これよりフリードパラメータ r_0 を求めることができる。ここで、 $\varepsilon(q)$ を求めるときの画像時系列 $I_n(\mathbf{u})$ は画像間の位置ずれ（波面のティルト成分）を補正したシリーズである。求まった r_0 から(7)式により回折限界像のフーリエ成分の振幅を求める。

図2にここで述べた各種スペクトルの実例を示す。

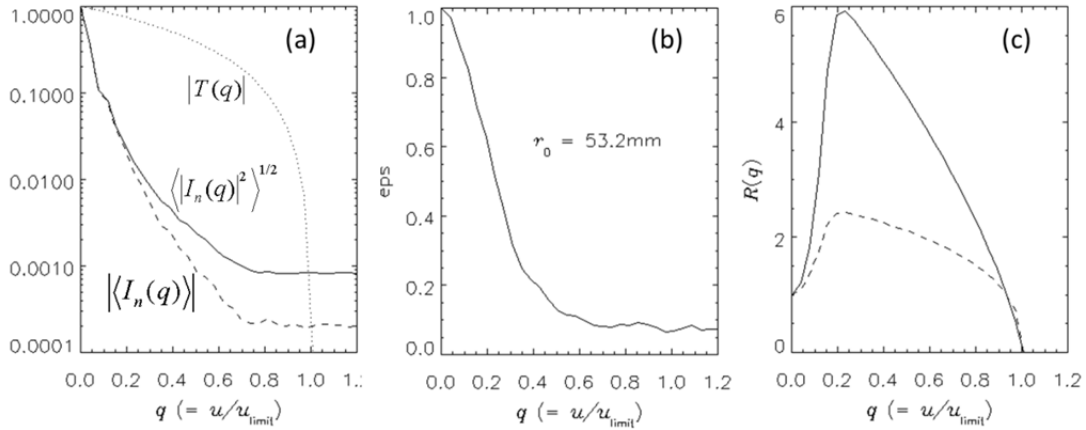


図2．各種スペクトルの実例（SMART/FISCH の連続光画像；露出 0.2ms, 50 枚時系列より）。(a) 空間フーリエ成分の平均とパワースペクトルの平均、(b) $\varepsilon(q) = \langle |I_n(q)| \rangle^2 / \langle |I_n(q)|^2 \rangle$ 、(c) 振幅復元倍率 $R(q)$ (実線) と $R(q)^{0.5}$ (破線)。

2-2. 位相の復元

位相復元の最も直接的な方法は、 N 枚の時系列画像の位置を合わせた後、それぞれの画像を空間フーリエ変換し各周波数成分の位相を全画像について平均する、というものである。低周波の成分についてはこの方法である程度信頼できる位相を得ることができる。しかし空間周波数が高くなると各画像のシフト量がその波長を大きく超え得るため、 N 個の位相情報は 2π にわたってランダムに分布するようになり、確度の高い位相を得ることはで

きない。図3は50枚の観測画像について、 $I_n(\mathbf{u}) = |I_n(\mathbf{u})|e^{-i\phi_n(i,j)}$ ((i,j) は $\mathbf{u}$ の添字) としたときの位相因子 $e^{-i\phi_n(i,j)}$ を $(i,j) = (1,1)$ と $(8,8)$ の場合について複素平面上に線分で示した例である。これから分かるように低周波成分 $(1,1)$ は位相の向きがほぼ揃っているのに対して、少し高い周波数 $(8,8)$ ではあらゆる方向を向いており、その平均がこの周波数成分の正しい位相を与えるとは言い難い。位相因子 $e^{-i\phi_n(i,j)}$ を平均したものの絶対値、すなわち、

$$C(i, j) = \left| \left\langle e^{-i\phi_n(i,j)} \right\rangle \right| \quad (11)$$

は N 枚の画像の各周波数成分の位相がどれ程揃っているかを示す目安となり、これを **consistency** とよぶ。 $C(i, j) = 1$ ならば位相は完全に揃っており、 0 ならばランダムであることを意味する。図3の各プロットの上にそれぞれの **consistency** の値を示してある。また図5(a) には (i, j) 面における **consistency** の分布を示す。

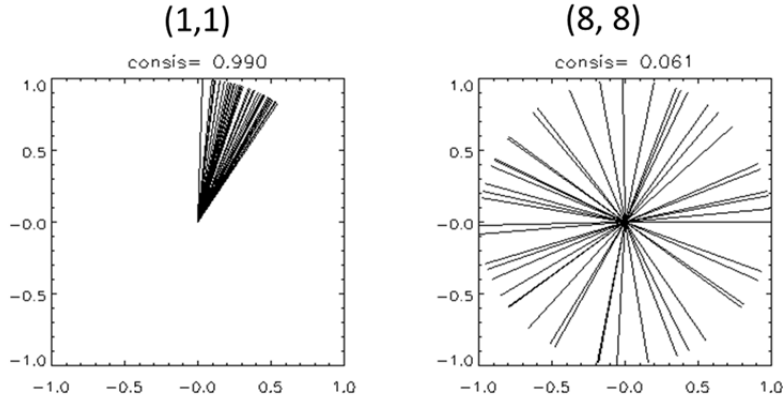


図3. $e^{-i\phi_n(i,j)}$ の $(1,1)$ と $(8,8)$ を複素平面上に表示したもの。SMART/FISCH の部分画像 (64×64 pix) の50枚の画像時系列より作成。

高周波成分の位相をより正しく推定するために、スペckルマスキングにおいて登場するのが、以下で定義される画像の **bispectrum** である。

$$I_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \equiv I_n(\mathbf{u})I_n(\mathbf{v})I_n(-\mathbf{u}-\mathbf{v}) = I_n(\mathbf{u})I_n(\mathbf{v})I_n^*(\mathbf{u}+\mathbf{v}) \quad (12)$$

これは $(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ 4次元空間を張る複素数の関数である。(2)式より、

$$I_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = O(\mathbf{u})O(\mathbf{v})O(-\mathbf{u}-\mathbf{v})P_n(\mathbf{u})P_n(\mathbf{v})P_n(-\mathbf{u}-\mathbf{v}) \quad (13)$$

また、多数画像のアンサンブル平均は

$$\langle I_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rangle = O(\mathbf{u})O(\mathbf{v})O^*(\mathbf{u} + \mathbf{v}) \langle P_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rangle \quad (14)$$

と書くことができる。 $\langle P_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rangle$ は speckle masking transfer function と呼ばれ、ランダムに変動する大気揺らぎの状態を十分サンプルすれば、望遠鏡のカットオフ周波数まで伸びる正の実数であることが示される (Lohmann, Weigelt, and Wirnitzer, 1983)。従って、観測対象の bispectrum $O^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ の位相は観測画像の bispectrum $\langle I_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rangle$ の位相と等しい。ここで

$$\begin{aligned} O(\mathbf{u}) &= |O(\mathbf{u})| e^{-i\phi(\mathbf{u})}, \\ O(\mathbf{u} + \mathbf{v}) &= |O(\mathbf{u} + \mathbf{v})| e^{-i\phi(\mathbf{u} + \mathbf{v})} \\ \langle I_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rangle &= \left| \langle I_n^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rangle \right| e^{-i\Phi(\mathbf{u}, \mathbf{v})} \end{aligned} \quad (15)$$

等とおくと、(12)式の位相部分は

$$e^{-i\Phi(\mathbf{u}, \mathbf{v})} = e^{-i\phi(\mathbf{u})} e^{-i\phi(\mathbf{v})} e^{i\phi(\mathbf{u} + \mathbf{v})} \quad (16)$$

離散フーリエ空間における $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ の添字をそれぞれ $(i, j), (k, l)$ とし、並べ替えを行うと、

$$e^{-i\phi(i+k, j+l)} = e^{-i\phi(i, j)} e^{-i\phi(k, l)} e^{i\phi(i, j, k, l)} \quad (17)$$

すなわち、オブジェクトの位相因子を $e^{-i\phi(i, j)} \equiv (i, j)$ 、観測された bispectrum の位相因子を $e^{-i\phi(i, j, k, l)} \equiv [i, j, k, l]$ 等と表記すると

$$(p, q) \equiv (i + k, j + l) = (i, j)(k, l)[i, j, k, l]^* \quad (18)$$

となる。これはフーリエ空間においてオブジェクトの周波成分 $(i + k, j + l)$ の位相因子がより低い周波数成分 $(i, j), (k, l)$ の位相因子と観測された bispectrum $[i, j, k, l]$ の位相因子のアンサンブル平均から求められることを示している。従ってこの漸化式を用いることにより、アンサンブル平均によって求めた低周波成分の位相から、順次高周波成分の位相を推定することが可能となる。

3. spemirh 処理の流れ

以上の原理に基づいてスペckルマスキングによる画像復元をおこなう IDL プログラム、spemirh.pro (SPEckle Masking Image Reconstruction at Hida) を作成した。以下にその処理の流れを示す。プログラムに与える時系列画像 $[n_x, n_y, N]$ のデータキューブはダ

ーク・フラット補正を施したものとする。

(1) 時系列画像の位置合わせ

時系列画像間の視野全体の位置ずれを相互相関（クロススペクトルの逆フーリエ変換による）のピークからもとめ、ピクセル単位で位置あわせをする。この処理をするかどうかは `img_align` パラメータ (1 or 0) で選択可能である。

(2) 画像の分割・部分画像の抽出

シーイングの状態、すなわち各フーリエ成分の位相のずれ量は、観測視野内の場所によって異なる。それがほぼ一様と考えられる領域 (**isoplanatic patch**) は通常 1~10 秒角程度である。スペックルマスキング処理はシーイング条件が一様な範囲内でしか適用できないため、画像を **isoplanatic patch** 相当の小さな正方形の部分領域 (セグメント) に分割する。以降の復元処理においてセグメントの周辺部分は正しく画像を復元できないため、セグメントの抽出は縦横方向にその半分がオーバーラップするように順次行う。従って部分領域の一辺の大きさを w とすると、その数は $\left(2\frac{n_x}{w}-1\right)\left(2\frac{n_y}{w}-1\right)$ 個となる。

(3) 部分画像時系列のアライメント

抽出した部分領域の時系列を(1)と同じ方法で再度位置あわせを行う。但しここでは、サブピクセルの精度で画像ずれを補正する。サブピクセル量の画像シフトは内挿法を用いずフーリエ空間における位相補正によっておこない、ランダムノイズの一様性を保つ。各セグメントで位置あわせをすることは、画像の歪みを補正するデストレッチ処理に相当する。できるだけ正しく歪みを補正するため、画像シフトをおこなう際の目標は、時系列内の各画像のずれ量の中央値をもつフレームを採用する。ずれ量の平均値を用いないのは、画像のコントラストが低く、画像ずれ量の取得に失敗するフレーム（ずれ量が極端に大きくなることがある）の影響を排除するためである。また、この処理において、ずれ量の取得に失敗したフレームを以降の処理において用いないようにするため、シフト量の絶対値が $w/2 \times s$, ($s = 0 \sim 1$) 以上のフレームを除外することができる。 s は `seg_select` パラメータで指定することができる。

(4) 画像バイアスの除去

下のステップでフーリエ変換をする際に部分画像の端での不連続を低減するために、各部分画像から時系列の平均画像にフィットした1次平面を引く。平均値（一定値）を差し引くだけでは輝度勾配の大きいリム近傍や黒点において、画像端の不連続が大きくなり、合成した結果に画像分割に起因する格子パターンが発生しやすい。

(5) エッジ処理

セグメント画像端の不連続をさらに低減するため、各画像に図4で示す $\cos$ 関数を用いた窓関数を掛け (apodization)、エッジをなだらかにゼロにする。Apodization をかける周辺部分の幅は wap パラメータ ($wap < w/4$) で指定可能である。

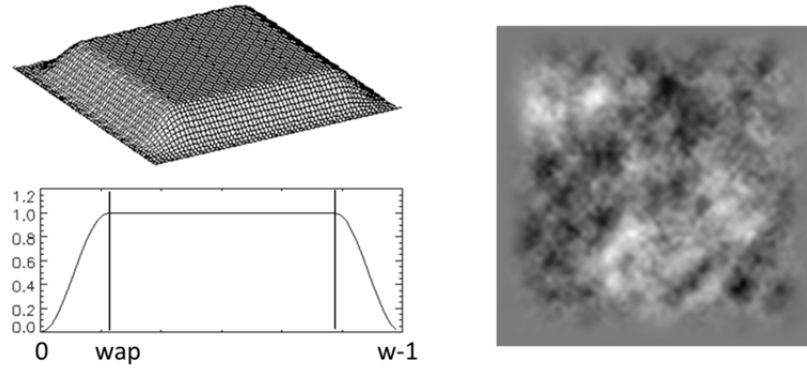


図4. エッジ処理のための Apodization 関数。右はそれを施した画像例($w=64$, $wap=12$)。

(6) フーリエ変換

各画像に FFT を施す。

(7) 振幅の復元

図2(a)から分かるようにパワースペクトルの最も高い周波数領域は、周波数に依存しないフラットなスペクトルになる。これはフォトンノイズやカメラの熱雑音、読み出しノイズといったランダムなノイズが、白色スペクトルとして振幅のバイアスになっていると考えられる。そこで最も周波数の高い 25 個のフーリエ成分の振幅を平均し、これをバックグラウンドとして全振幅から差し引く。

次に STF を(5)式から求めるために、フリードパラメータ r_0 を求める。spemirh ではフリードパラメータ r_0 は視野内で一様であると仮定する。これはリム外や黒点では r_0 を正しく求められないため、これを視野内において対象のコントラストの高い領域で r_0 を求め、視野全体で共有することを意味する。 r_0 は 1 枚目の画像全体に sobel フィルター (1 次微分) をかけ、それと強度の積が最大となる点を中心とする $w \times w$ ピクセルの領域を使って、(9) 式により求める。

r_0 が求まると次に(5)式と(7)式を用いて STF 及び、振幅復元倍率 $R(q)$ を計算する。実際にこれを用いて画像復元を試みたところ、(7)式をそのまま使った場合中間周波数成分が増大されすぎて復元画像に不自然なコントラストの強調が見られることが分かった。そこで spemirh では振幅の復元を抑制するため、振幅復元倍率として $R(q)^\alpha$ ($0 < \alpha < 1$) の形を採用する。図2(c)の破線は $\alpha=0.5$ の場合の $R(q)^\alpha$ を $R(q)$ の比較として示している。 α は

`amp_recov` パラメータにより指定が可能である。振幅復元倍率 $R(q)^\alpha$ はすべてのセグメントについて共通であり、一連の処理の最初に準備される。

(8) 位相の復元

2-2で述べたようにフーリエ成分の位相の復元は、時系列画像における位相因子のアンサンブル平均により低周波成分の位相を求めることから始める。`spemirh` では N 枚のフーリエ変換よりすべてのフーリエ成分について(11)式で定義される `consistency` を求め、それがある閾値（通常 0.9）よりも大きい成分については、位相因子の平均を目標画像の位相として採用する。閾値は `ph_cons` パラメータで指定可能である。`consistency` の周波数空間における分布の一例を図 4 (a) に示す。また、図 4 (b)の中央黒い部分は、この中で `consistency` が 0.9 以上である成分である。

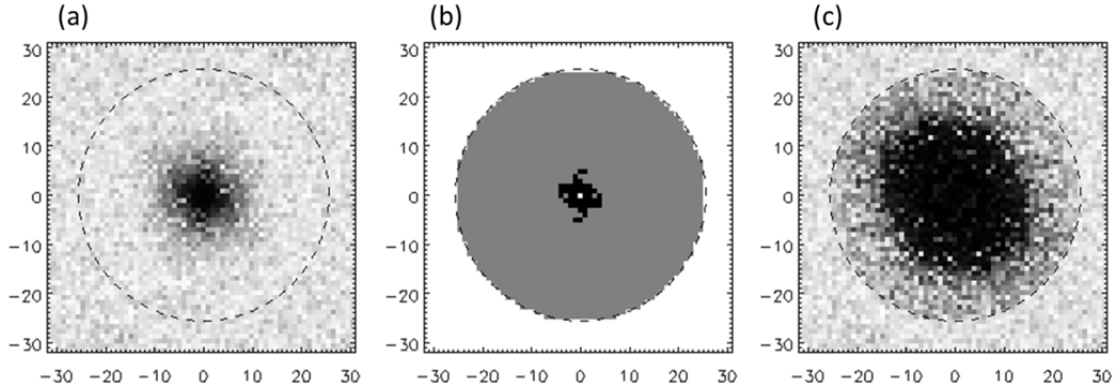


図 4. (a) 時系列平均によって得られた位相因子の `consistency` の周波数空間における分布。白～黒のスケールは 0 ～1 であり、破線の円は回折限界の空間周波数を示す。(b) 位相因子のアンサンブル平均で `consistency` > 0.9 を得たフーリエ成分（黒）とスペクトルマスキングにより位相が復元されたフーリエ成分（灰色）、(c) 復元された位相の `consistency`。

次に単純なアンサンブル平均では十分高い `consistency` が得られなかった周波数成分について、(18)の漸化式を用いてすでに位相因子の定まった周波数成分と観測量の `bispectrum` からその位相を求めていく。まだ位相因子の求まっていない空間周波数の添字 (p, q) 成分を求める場合、 $p = i + j$, $q = k + l$ となるすでに位相因子の定まった成分 (i, j) と (k, l) のペアは複数あるであろう。成分 (p, q) の位相はこれらのペアについて(18)より得られる位相因子の平均から求められる。またその `consistency` も(11)式に従って同様に定義される。このプロセスを順次低周波側から高周波成分に向かって繰り返し、回折限界周波数以下のすべてのフーリエ成分の位相を求める。処理が進んで p, q の値およびすでに位相因子の定まった成分の数が大きくなると、漸化式を満足するペアの数は $p^2 + q^2$ にほぼ比例して増加していく。これをすべてのペアについて処理をおこなうと、計算量が大幅に

増大してしまう。spemirh では、 (i,j) と (k,l) のペアをその consistency の積、すなわち $C(i,j) \times C(k,l)$ の大きさの順に並べ替え、それが大きい方からある一定数 M (通常 50 個) のペアだけをつかってこの処理をおこなう。図 6 は $(p,q) = (7,27)$ のときの $C(i,j) \times C(k,l)$ を、並べ替えた後のペア番号に対してプロットしたものである。この図から、すべてのペアについて計算しても信頼性の低い情報を付加するだけであり、あまりメリットはないことが推察できる。 M の値は c_trun パラメータで指定可能である。図 (b) の灰色の部分はこのようにして位相を復元したフーリエ成分を示す。尚、フーリエ成分の位相は周波数 u と $-u$ で互いに複素共役であるため、上記計算は $q > 0$ の領域についてのみおこなう。spemirh では処理速度を上げるため、位相の復元を回折限界よりも低い周波数 $t \times u_{limit}$ ($0 < t < 1$) で打ち切ることが可能である。 t は ph_recov パラメータで指定可能である。 $t = 0$ のときは、bispectrum を使わずアンサンブル平均のみで位相復元をおこなうことを意味する。尚、spemirh では位相因子の平均過程でシーイングが非常に悪くて consistency が閾値 (通常 0.9) を超える成分が 2 つ以上なかった場合も、漸化式による位相推定をスキップし、位相因子のアンサンブル平均のみをおこなう。

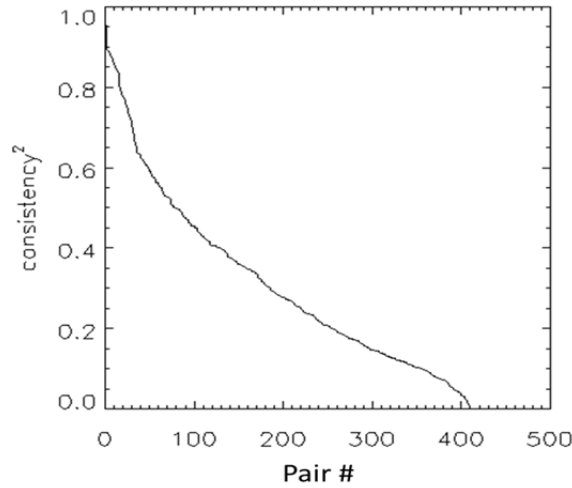


図 5. 周波数成分 $(p,q) = (7,27)$ の位相復元に使えるペア $(i,j), (k,l)$ 成分の consistency の積 $C(i,j) \times C(k,l)$ を大きさの順にプロットしたもの。ペアの数は 400 余りになる。

(9) 逆フーリエ変換

求めた振幅と位相から FFT により逆フーリエ変換をかける。

(10) バイアスの復元

ステップ(4) で差し引いた 1 次平面を足して画像のレベルを元に戻し、セグメントの復元画像を求める。

(11) 部分画像の結合

セグメントの境界が目立たないようにするため、復元された部分画像に $\frac{1-\cos(2\pi x)}{2}$, $[x = 0 - 1]$ を 2 次元にした窓関数 (図 6) をかけ、これを順次セグメント位置に加えることで画像をつなぎ合わせる。

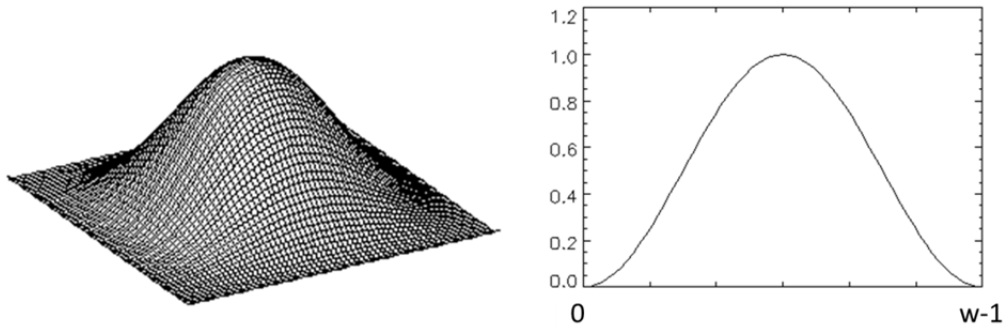


図 6. 画像結合に用いる窓関数。

(12) デコンボリューション

以上で復元された画像は、観測対象本来の輝度分布に望遠鏡の伝達関数を施した回折限界像である。これをさらに本来の画像に近づけるため、spemirh では SSW (Solar Software Package) の max_likelihood 関数を用いた、点像分布関数によるデコンボリューション処理をかけることもオプションとして可能である。

4. プログラム仕様

Spemirh において、処理に必要なパラメータ及び処理中に生成され記録に残すとよい情報は、*p* 構造体に格納される。そのエレメントを下に示す。

変数名	意味	デフォルト値
D:	望遠鏡口径 [mm]	250.
Dco:	中心遮蔽 [mm]	0.
pix1:	ピクセルスケール [arcsec/pix]	0.215
wl:	波長 [nm]	647.1
w:	セグメントサイズ [pix]	64
wap:	apodization 幅 [pix]	12
img_align:	全視野像アライメントをするか	1
seg_align:	セグメント像アライメントをするか	1
seg_select:	シフト量 < w/2*seg_select のフレームのみ採用	1
amp_recov:	振幅復元倍率 = $R(q)^{\text{amp_recov}}$	0.5

ph_recov:	位相復元をおこなう最大周波数／回折限界周波数	1.
ph_consist:	位相因子のアンサンブル平均をとる consistency	0.9
c_trun:	漸化式で用いる最大ペア数	50
verbose:	1 - 回復画像の進行状況を表示	1
nframe:	フレーム数	戻り
r0:	フリードパラメータ	戻り
deconv:	deconvolution をおこなったか	戻り
ver:	spemirh のバージョン	戻り

spemirh の最も簡便な使い方は画像の時系列配列を `imgs[nx,ny,N]` として、

```
IDL> p = spemir_st0
IDL> p.D = 600. ; 望遠鏡口径
IDL> p.pix1 = 0.05
IDL> ring = spemirh(imgs,p=p)
```

これにより、復元画像が `ring[nx,ny]` として得られる。処理パラメータを変更する場合は、`spemirh` の実行までに `p.**` を指定すればよい。
さらに進んだ使い方として、

```
IDL> ring = spemirh(imgs, imgs2, p=p, avimg=avimg, saimg=saimg, ring=ring, $
    consis=consis, istf=istf, /deconv)
```

ここで、各 keyword は

avimg[nx,ny]	時系列の平均画像を戻す
saimg[nx,ny]	時系列の shift & add 画像を戻す
consis[nx,ny]	全セグメントを平均した consistency を戻す
istf[nx/2]	振幅復元倍率を戻す
deconv	セットすると max_likelihood による deconvolution をおこなう

である。

`imgs2[nx,ny,N]` は `imgs` と同時に撮られた 2 つめの画像時系列である。`spemirh` では 2 つめの画像時系列を 1 つめの画像時系列と全く同じ条件により復元処理をすることができる。すなわち、画像間アライメントおよびフーリエ成分の振幅と位相の復元を、1 つめの時系列で得られたパラメータ（各フレームのシフト量、振幅復元倍率、位相補正量）を使って 2 つめの画像の処理をおこなう。これは 2 つの近接した波長を同時に撮像し、その相互関係がクリティカルな観測（例えば速度場や偏光観測）において、画像間の差を画像復

元処理で発生させたくないときに有効であろう。但し2つの時系列画像は各露出のタイミングが正確に同じであり、相互間の位置合わせも正確になされていることが要求される。戻される配列は、`ring[nx,ny,2]`のよう2つの画像を含む配列となる。

図7に `spemirh` 処理の進行中の画面 (`p.verbose=1` で表示) を示す。処理にかかる時間は $1600 \times 1200 \text{ pix}^2$ 、50枚の画像時系列において約12分である。但しCPUはCore i7-3770(コア数4、クロック3.4GHz、キャッシュ8MB)、メモリ16GB、CentOS release 5.9。

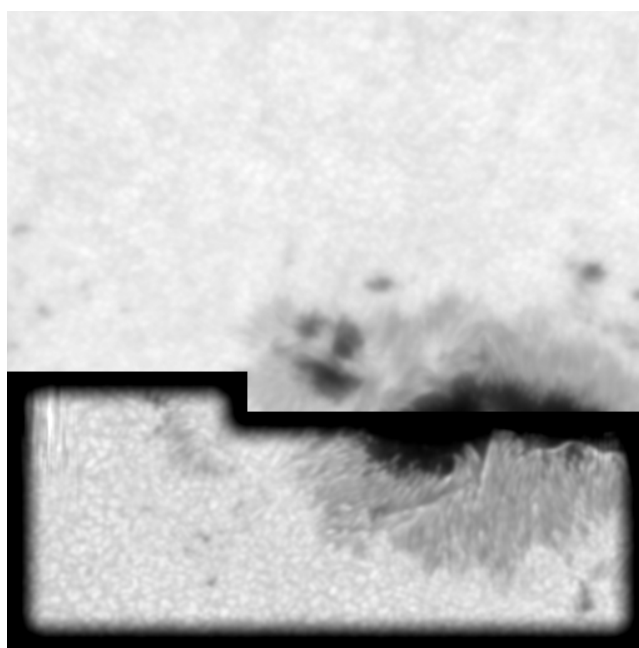


図7．処理進行中の画面。処理が終わった領域（図下部分）が順次表示される。背景の画像は時系列の平均画像。

5. 適用例

飛騨天文台の SMART フレア高速撮像装置 (FISCH、Ishii et al., 2013) およびドームレス太陽望遠鏡 (DST) で得られた太陽画像に様々なパラメータで `spemirh` を適用し、その効果を評価した。以下にその結果を示す。

1) SMART/FISCH 連続光、黒点

図8は SMART/FISCH で得られた黒点の連続光画像について、様々なパラメータで処理を施した結果である。データの諸元、及び処理パラメータは以下の通りである。

[データ諸元]

- ・口径 250mm
- ・カメラ Prosilica GigE1650, pix.size = $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$
- ・ピクセルスケール 0.215 arcsec/pix

・波長	647.1nm（半値幅 1nm 連続光）
・露出時間	0.2 msec
・精度	12bitA/D, ランダム誤差～1%
・フレームレート	10 frame/sec
・画像サイズ	1600 x 1200pix（ここでは 256 x 256pix の部分画像を用いた）
・データ取得日	2011 年 9 月 29 日
・フレーム数	50
・シーイング	$r_0 = 49.7\text{mm}$

[処理パラメータ]

・セグメントサイズ	w = 64
・エッジ処理幅	wap = 12
・c_trun	50

図 8 a)～i) の処理内容は以下のものである。

- 全視野で位置あわせをした後の時系列平均画像
- 各セグメントで Shift & add を施した画像
- rms コントラストが最大のベストフレーム
- 位相復元は位相因子の平均 ph_recov=0、振幅復元は amp_recov=0.5
- 位相復元は回折限界の半分まで ph_recov=0.5、振幅復元 amp_recov=0.5
- 位相復元は回折限界まで ph_recov=1、振幅復元 amp_recov=0.5
- 位相復元は回折限界まで ph_recov=1、振幅復元なし amp_recov=0.
- 位相復元は回折限界まで ph_recov=1、フル振幅復元 amp_recov=1.
- f) にデコンボリューションをかけたもの

シーイングは $r_0 = 49.7$ で飛騨としては良い方である。b) と f) の比較より、簡便な shift & add 法と比べてスペックルマスキングの画像改善効果が格段に優れていることがわかる。d), e), f) はフーリエ成分の位相復元の仕方を変えたもの、すなわち、d) は位相因子のアンサンブル平均だけを使った場合、e) は回折限界周波数の半分の周波数まで bispectrum による位相復元をおこなった場合、f) は回折限界周波数まで位相復元をおこなった場合である。振幅復元はすべて抑制係数 0.5 である。この比較から、高周波まで位相復元をおこなう程より画像の改善効果が向上する事が分かるが、位相因子の平均だけでもすでにかなりの復元効果があることが注目される。最下段 g) と h) は振幅復元をしなかった場合と(7)式の倍率をフルにかけた場合の比較である。このパラメータの違いにより画像のコントラストが大きく変わるが、h) はコントラストが強調されすぎているように見受けられる。以上の実験より、spemirh では f) をデフォルトの処理としている。i) は f) の結果にさらに max_likelihood による点像関数のでコンボリューションを施したものである。これによって画質はさらに大きく改善している。

図9は図8の a)~i) の画像にフーリエ変換をかけて得られたパワースペクトルを示す。但し d), e), f) についてはパワースペクトルの差は僅かなので e)の結果で代表してある。これから平均画像や shift & add 画像に比べて、スペックルマスキングをかけた画像は中間周波数のパワーが増加し、高周波数ではノイズカットのためパワーが減少している。回折限界周波数以上はフーリエ成分の復元をおこなっていないので、パワーもゼロとなっている。また、振幅復元関数Rをフルにかけた場合と比べて、max_likelihood のでコンボリューションをかけた画像はより高周波よりのパワーが強調されていることが分かる。

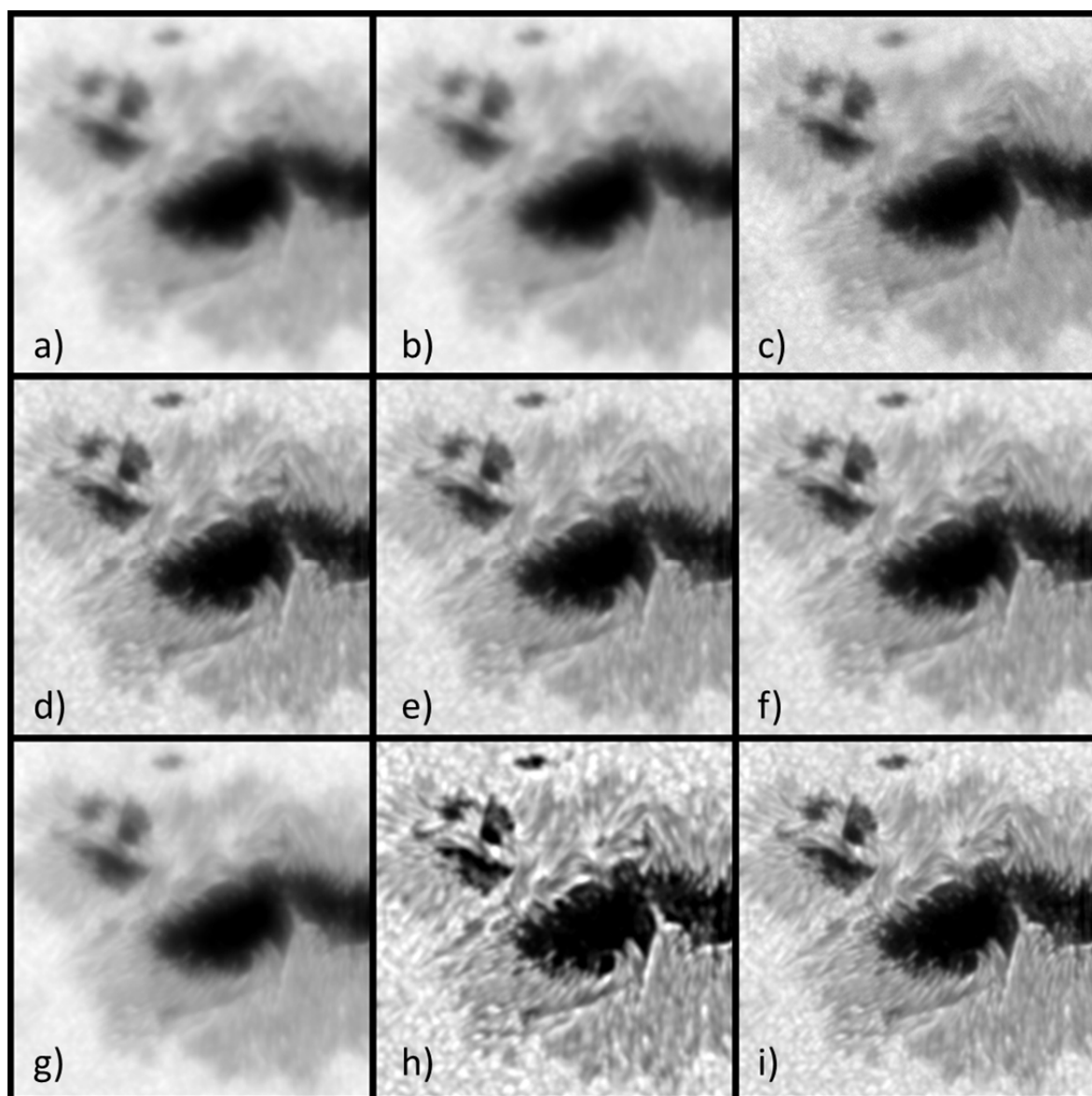


図8. SAMRT/FISCH 連続光画像。各処理内容については本文参照。

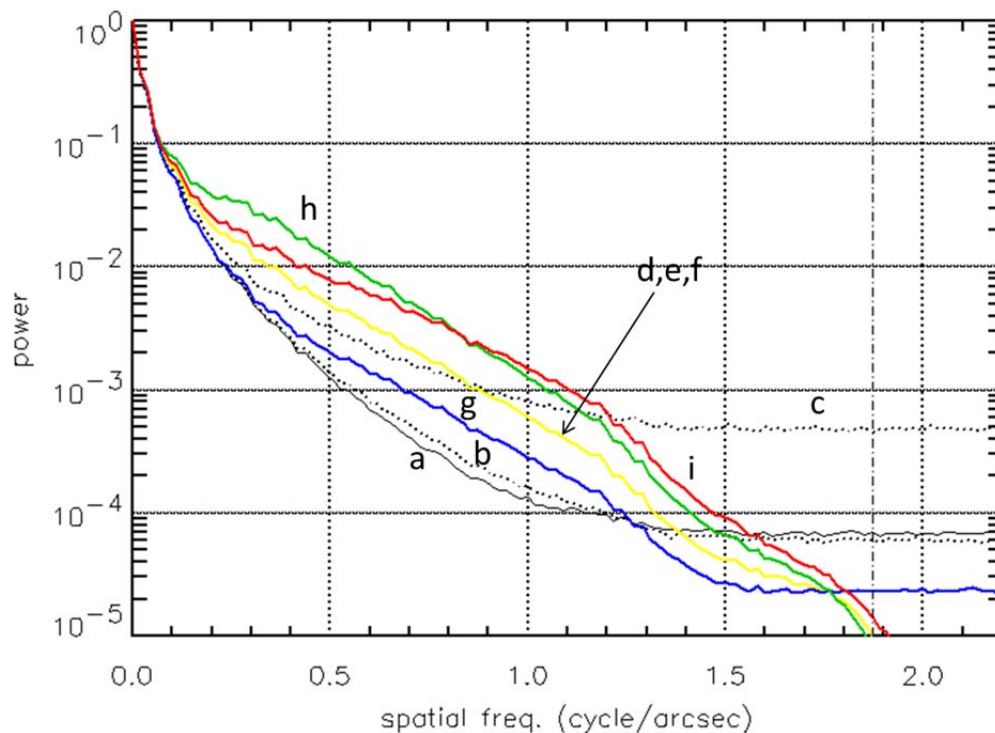


図 9．図 8 に示した各画像の空間パワースペクトル。周波数 1.87 の一点鎖線は回折限界周波数を示す。

2) SMART/FISCH H_{α} /連続光、リム近傍のフレア

図 10 は SMART/FISCH によるリム付近で発生した X クラスフレアの H_{α} と連続光画像の処理例である。図 8 の画像と異なるデータ諸元および処理パラメータは以下の通りである。

[データ諸元]

- ・波長 656.3nm (半値幅 0.15nm H_{α}), 647.1nm (半値幅 1nm 連続光)
- ・フレームレート 25 frame/sec
- ・データ取得日 2013.5.14
- ・シーイング $r_0 = 37.8\text{mm}$

[処理パラメータ]

- a) H_{α} , Shift & add 画像
- b) H_{α} , 位相復元は回折限界まで ph_recov=1、振幅復元 amp_recov=0.5
- c) b) + デコンボリューション
- d) 連続光, Shift & add 画像
- e) H_{α} と同時に Speckle 処理した連続光

f) 独立に Speckle 処理した連続光

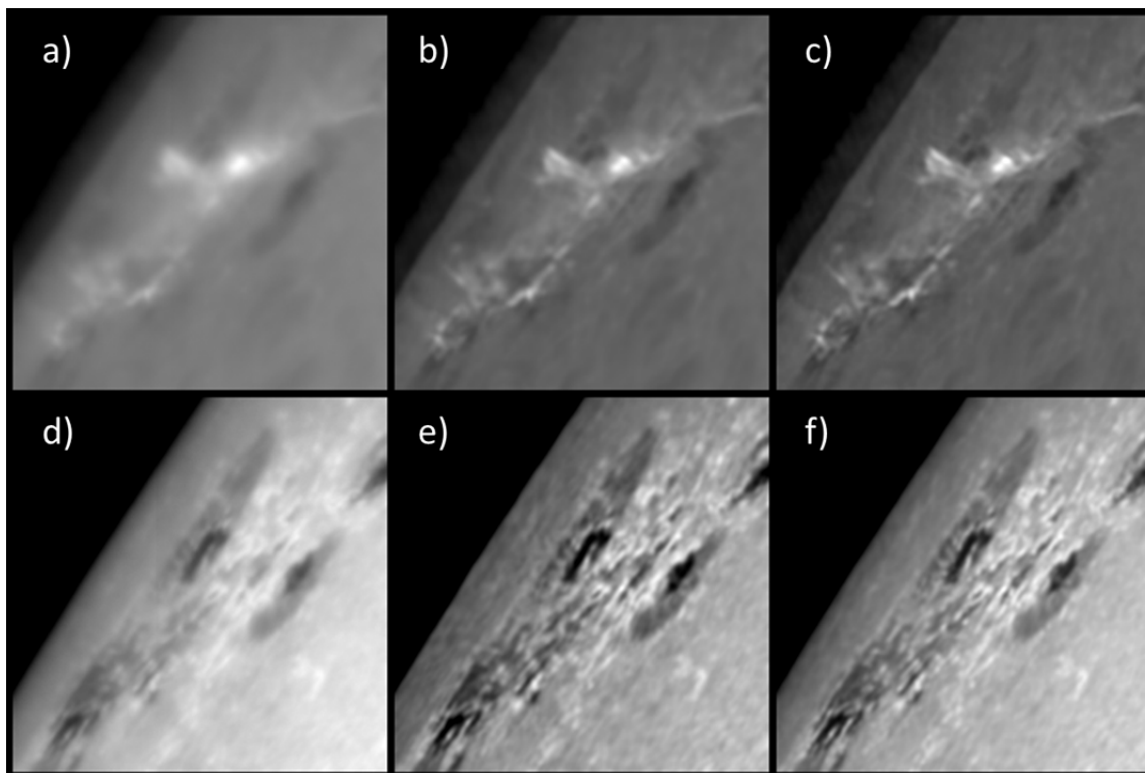


図 10. SAMRT/FISCH で得られた H_{α} と連続光画像。2013.5.14 の X クラスフレアを捉えたもの。各処理内容については本文参照。

b) は H_{α} 画像に前述のデフォルトパラメータで **spemirh** を施したものの、c) はさらにデコンボリューションをおこなったものである。これより **spemirh** がリムを含む画像でも安定して動作することがわかる。下段は上段の H_{α} と同時に得られた連続光画像に同じ処理を施したものである。e) は連続光を H_{α} と **spemirh** によって同時に処理したものの、f) は同じ条件であるが **spemirh** により独立に処理したものである。これらを比べると、どちらも著しい像の改善が見られるが、独立に処理した f) の方が若干改善効果は高いように見受けられる。これは H_{α} 画像で得られた位相因子の補正量をそのまま連続光画像に適用することが、高周波成分において必ずしも正しい位相を与えるものではない、ということかもしれない。また、2つの画像の位置アライメントの僅かなずれが高周波成分において大きな誤差の要因となることも考えられる。

3) DST G-band、黒点

図 11 にドームレス太陽望遠鏡で得られた G バンドの黒点の復元画像を示す。

[データ諸元]

・口径	600mm
・中心遮蔽	210mm
・ピクセルスケール	0.05 arcsec/pix
・波長	430nm
・露出	1msec
・精度	16bitA/D, ランダム誤差~0.7%
・フレームレート	約 10 frame/sec
・画像サイズ	2048 x 2048pix (ここでは 900 x 700 の部分画像を示す)
・データ取得日	2013.6.25
・フレーム数	100
・シーイング	$r_0 = 38.7\text{mm}$

[処理パラメータ]

・セグメントサイズ	w =128
・エッジ処理幅	wap = 25

6. 結び

スペックルマスキングの手法が確立したのは今から30年近く前である。その後計算機の進歩に伴いこれを太陽観測に適用する様々な試みがなされ、2000年代には補償光学装置との併用や、LaPalma 真空塔望遠鏡の口径1m化により、太陽観測における解像度の飛躍的な向上を見た。さらに現在、BigBear の 1.6m NST や中国フーシャン湖の1m真空望遠鏡、テネリフェの Gregor 1.6m 望遠鏡等が稼働を開始し、今後高解像の観測を推進する上でこうした画像復元テクニックは必須のツールとなっている。日本はこれまでこうした取り組みに後れをとってきたが、spemirh の開発により簡易でロバストなツールを手にすることができた。今後ドームレス望遠鏡や SMART の口径をフルに生かしたデータをより日常的に生成すること可能となり、新たに開発するチューナブルフィルターを合わせることで、ユニークで質の高い観測データを提供することができるようになるものと期待できる。さらに Solar-C に搭載する光学望遠鏡(SUVIT)の意義を確固たるものにするためにも、地上で到達できる空間分解能とその連続性、及び偏光測定精度の限界を見極めることは極めて重要である。

本プログラムは処理速度の観点でまだ完全に最適化されているとは言えない。より多くのデータに適用することで今後のさらなる改良が望まれる。

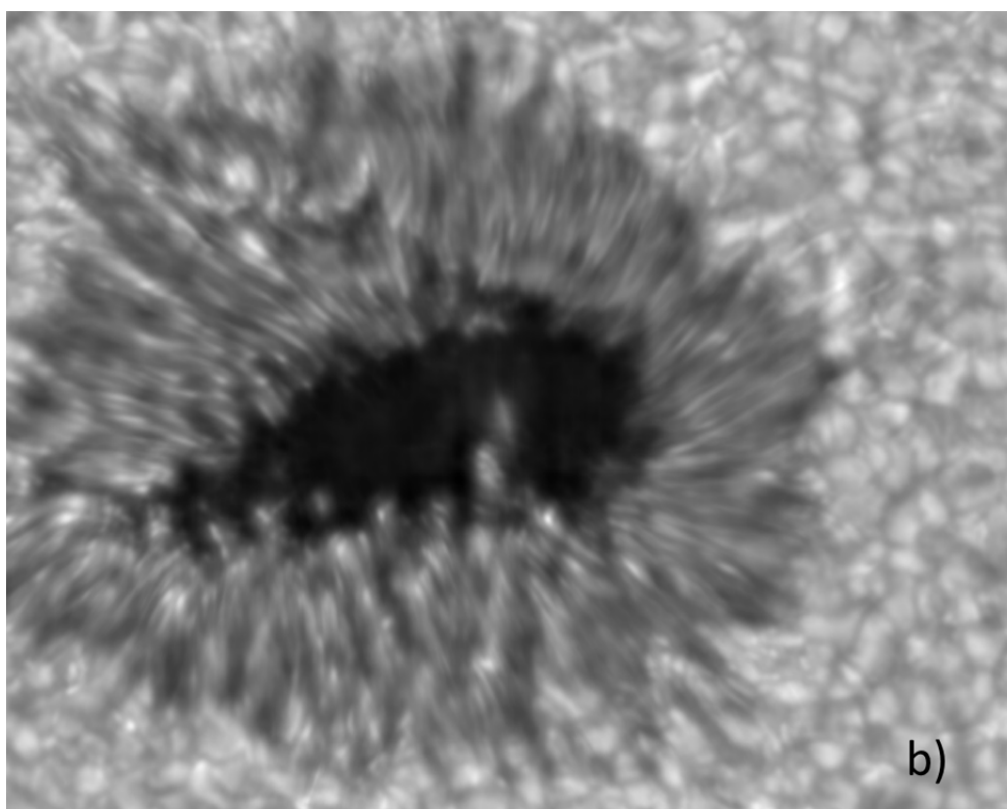
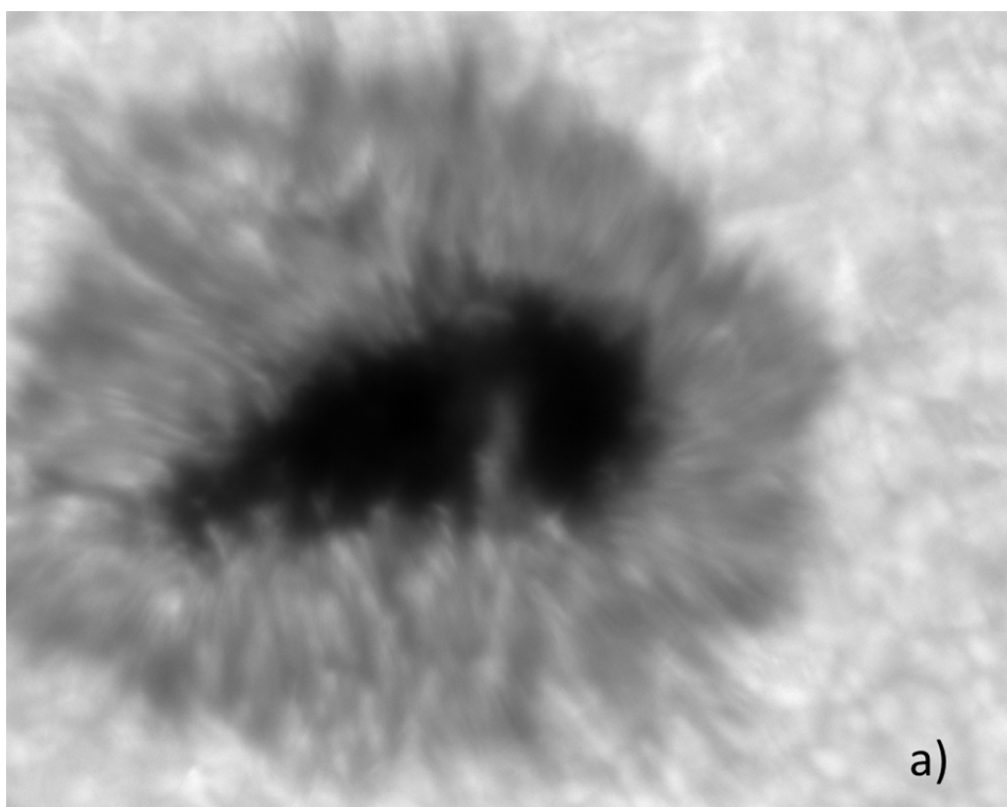


図 1 1 . DST で得られた黒点 G バンド像。a) rms コントラストによるベストフレーム、b) スペックル像復元及びデコンボリューション処理した画像。

謝辞：

SMART やドームレス太陽望遠鏡の観測を支えてくれた石井貴子氏、上野悟氏をはじめとする飛騨天文台のスタッフに感謝します。

参考文献；

- Baba, N., Miura, N., Sakurai, T., Ichimoto, K., Soltau, D., and Brandt, P., 1999, Sol.Phys.188, 41
- Ishii, T. Kawate, T., Nakatani, Y., Morita, S., Ichimoto, K., Masuda, S., 2013, PASJ, 65, 39I
- 川手 朋子、他、2014, 附属天文台技報（執筆中）
- Knox, K.,T., and Thompson, B.,J., 1974, ApJ, 193, L45
- Labeyrie, A., 1970, AA, 6, 85
- Lohmann, A.,W., Weigelt, G., and Wirnitzer, B., 1983, App. Opt., 22, 4028、
- Pehlemann, E., and von der Lühe, O., 1989, AA, 216, 337
- Ricort, G., and Aime, C., 1979, AA, 76, 324
- von der Lühe, O., 1984, J.Opt.Soc.Am.,1, 5
- von der Lühe, O., 1993, AA, 268, 374
- von der Lühe, O., 1994, AA, 281, 889
- Weigelt, G., 1977, Optics Communications, 21, 55
- Weigelt, G., and Wirnitzer, B., 1983, Optics Letter, 8, 389
- Wöger, F., and von der Lühe, O., 2008, Proc. SPIE, Vol. 7019, 70191E