

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：10106

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654045

研究課題名(和文) 並列波面センサーを用いる新しい天体像回復法の開発

研究課題名(英文) Development of a novel astronomical-image restoration method using parallel wavefront sensors

研究代表者

三浦 則明 (Miura, Noriaki)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30209720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：補償光学系(AO)によって部分補償された太陽像を画像後処理によって改善する手法を開発した。AO装置に新たに波面センサーを追加し、外部トリガーによって波面情報と観測像を同時に観測するようにする。その波面情報からその観測像のPSFを推定し、観測像をデコンボリューションすることによって画像改善を実現する。飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で得られた観測像に適用し、良好な回復像がえられることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We developed an image post-processing method of improving solar images partially-corrected through an adaptive optics (AO) system. In our method, another wavefront sensor is added into the AO system, and a solar image and wavefront information are simultaneously observed using an external trigger. A PSF is estimated from the wavefront information and then the solar image is deconvolved to be improved. We applied our method to images observed with the domeless solar telescope of the Hida Observatory, and confirmed good restoration.

研究分野：数部系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：補償光学 画像回復 太陽観測

1. 研究開始当初の背景

補償光学系(以下 AO)は、大気ゆらぎによる画像劣化を実時間で補償する装置として、現在多くの地上望遠鏡で稼働している。しかし、AO によって回折限界が実現できるのは非常に限定された状況においてのみであり、通常得られるのは部分補償された天体像である。太陽観測においては、そのような天体像をさらに改善するために、多数枚の像を統計処理する方法や、多波長でかつ複数フレームを用いるブラインドデコンボリューション法などが使われ始めている。しかしながら、前者の方法では多数枚処理であるため時間平均した像しか得られない、また後者の方法では必要なデータを得るための観測装置が大きくなるという欠点がある。さらに、両者に共通してデータ量と計算量が膨大になってしまうという運用上の問題も深刻である。

我々は従来太陽 AO の開発を行っており、AO を用いて太陽観測像を改善できることを確認している。AO によって部分補償された太陽像をさらに回復するには、精度のよい点広がり関数 (PSF) さえ計測できれば、上記の方法のような複雑な処理をする必要はなくなり、単純なデコンボリューション処理で実現が可能となる。その PSF 情報を得るために、空間サンプリング性能を向上させた波面センサーを新たに AO 装置に追加し、従来のもものと合わせて波面センサーを並列化するという着想に至ったものである。

2. 研究の目的

空間サンプリング性能を向上させた波面センサーを開発する。これを申請者が開発中の AO 装置(図 1)に組み込み、波面センサーを並列化する。この AO 装置を実際に太陽観測に適用し、取得されたデータを用いて画像回復を実施する。画像回復の結果の評価を通して、提案手法の有効性の評価を行うことが目的である。

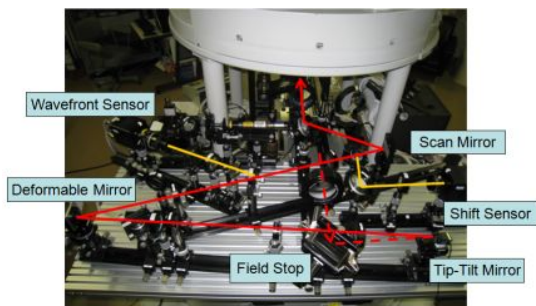


図 1 実験に用いる AO 装置

3. 研究の方法

本研究では、従来の AO の構成を変更し、波面センサーを並列化する(図 2)。追加する波面センサー 2 では、計測に寄与するマイク

ロレンズの個数を多くすることで空間的に高精度な波面計測を実現する。また、外部トリガーによって波面センサー 2 とサイエンスカメラでの画像取得の同時性を保証する。得られた高精度な波面情報を用いて画像回復を実行することで回折限界情報を引き出すことを可能にする。

既存の波面センサーでの波面計測では、可変形鏡のアクチュエータ数に合わせた空間分解能とすることや、AO 補償の繰り返し周波数を十分高くする必要があることから、空間的な補償性能はそれほど高くなく、 $D/r_0=6$ 程度のゆらぎにしか対応できていない(D は望遠鏡の口径、 r_0 はフリードパラメータ)。一方、波面センサー 2 ではこれらの制限がないために、マイクロレンズの数を大幅に増やし、波面測定の精度をかなり上げることができる。この結果、様々な観測条件において回折限界分解能が達成できる。

サイエンスカメラで観測される像 $g(x,y)$ は、物体 $f(x,y)$ と PSF $h(x,y)$ のコンボリューションとなる。このとき、例えば狭帯域のイメージングであれば露光時間は数ミリ~10 ミリ秒程度と比較的長くなる。一方、波面データの方は、露光中の平均化によって測定精度を落とさないようにするため、短時間露光でかつ高速にデータ取得を行う。現在は 2000~4000Hz での取得を考えている。つまり、露光時間は 0.25-0.5 ミリ秒となって、サイエンスカメラで 1 枚の画像を取得する間に、多数の (K 枚とする) 波面データが取得されることになる。今、波面データから計算される PSF を $h_1(x,y), h_2(x,y), \dots, h_K(x,y)$ とするとき、 $h(x,y) \approx \langle h_k(x,y) \rangle$ を仮定すると、Lucy-Richardson (LR)法や Wiener フィルタ等の定評ある手法を用いて、 $g(x,y)$ をデコンボリューションし、 $f(x,y)$ の回折限界像を得ることができる。

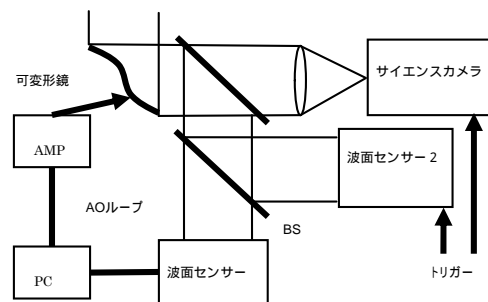


図 2 並列波面センサーの概念図

以下のように研究を実施した。

空間サンプリング性能を向上させた波面センサーの設計を行った。決定されたパラメータに従って、マイクロレンズアレイと高速カメラの購入を行った。これらと並行して画像回復ソフトウェアの開発を実施した。

購入した物品を用いて新しい波面センサーを構築した。当研究室にある疑似大気ゆら

ぎ光学系に組み込み、センサーの開発を実施した。

開発した波面センサーを飛騨天文台の AO 装置に組み込み、太陽観測を実施した。取得したデータを用いて、画像回復処理を実施し、デコンボリューション法による差異を確認した。

4. 研究成果

図3は、AO を通過したのちサイエンスカメラによって観測されたデータの一例である。観測日は2013年6月4日、波長は432nm、視野は38"x38"である。波面センシングのターゲットは中央左の黒点である。これと同時に波面センサー2で観測されたマイクロレンズアレイ像の1枚が図4(a)である。個々のサブアパーチャに黒点像が存在しているのがわかる。波面センサーでは4000Hzで画像取得しているので、サイエンスカメラの露光時間8.2ms中に図4のような画像が32枚得られる。

このような32枚の画像から、先に述べた方法で1枚のPSFを推定する。図4(b)は推定されたPSFであり、斜めに引き伸ばされたような像になっている。この像の視野は13.6x13.6"である。

このようにして得られたPSFを用いて、太陽像をデコンボリューションすることで画像改善を実現する。ここで用いた方法は、疑似Wienerフィルタ

$$F(u) = \frac{G(u)H^*(u)}{|H(u)|^2 + \epsilon}$$

および、LR法

$$f^{(n+1)}(x) = f^{(n)}(x) \cdot \left[\frac{g(x)}{f^{(n)}(x) * h(x)} \otimes h(x) \right]$$

である。ここで、*と⊗はそれぞれ畳み込み、相関演算を表す。大文字の関数は対応する小文字関数のフーリエ変換である。両者を実行する上で必要なパラメータ、Wienerフィルタのε、LR法のループ回数、は実験的に最適なものを決定した。

図5にWienerフィルタ、LR法による回復像を示した。原画像に比較して細かな模様がより鮮明になっているのがわかる。また、波面センシングのターゲットとなった中央の黒点付近が最も細かな模様が見えているのに対して、その地点から離れるに従って、画像回復の効果が小さくなっているのがわかる。これは推定したPSFの有効な範囲が大気ゆらぎが同じと見なせる視野、すなわち観測時のisoplanatic領域で決まるためである。

別の画像回復例を図6に示した。波面センシングのターゲットは中央の大きな黒点である。この例でも画像回復の効果を確かめることができる。

二つのデコンボリューション法の結果を比較すると、LR法の方が若干コントラストの高い結果となった。様々な画像への適用の結果、LR法の方がよい結果を与えることが確認できた。また、WienerフィルタとLR法の欠点を補い合うWiener-Lucy chain法の実装も進めているところである。

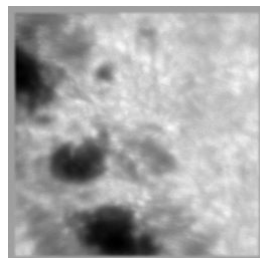


図3 観測像

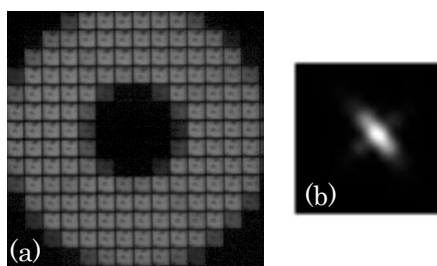


図4(a)サブアパーチャ像と(b)推定されたPSF

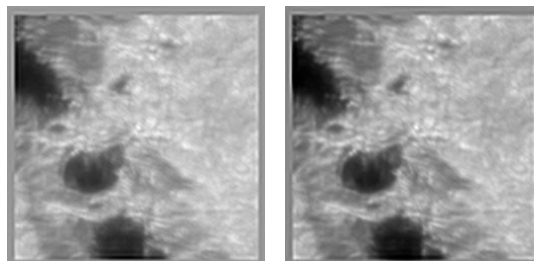


図5 回復像、(左)Wienerフィルタε=0.0001、(右) Lucy-Richardson法、loop=20

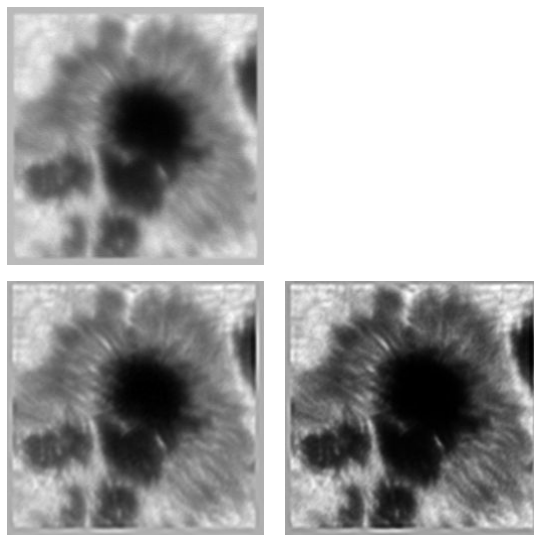


図6 (上段)原画像、(下段)回復像、(左)Wienerフィルタε=0.0001、(右) Lucy-Richardson法、loop=15

本研究を通して、提案手法が太陽像の回復に有効であることを確認することができた。残念ながら、本計画中に分光データへの適用はできなかったが、現在研究を進めているところであり、近いうちに成果が出せるものと考えている。本研究の成果を基に、今後は本手法をAO装置の中に組み込んでシステム化し、リアルタイムで画像回復を行うことを計画中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

”Multiframe blind deconvolution applied to diverse shift-and-add images of an astronomical object,” S. Kuwamura, Y. Azuma, N. Miura et al., Opt. Rev., 21, 9-16 (2014) (査読あり) DOI: 10.1007/s10043-014-0003-3

”Solar SCIDAR Technique for Measuring Turbulent-Layer Heights,” N. Miura et al. (8名), MNRAS, 424, 1205-1216 (2013) (査読あり) DOI: 10.1093/mnras/stt1074

“Solar Adaptive Optics at the Hida Observatory: Latest Achievements of Current System and Design of New System,” N. Miura, J. Miyazaki, S. Kuwamura, N. Baba, et al. (12名), Proc. SPIE, **8447**, 8447-162 (2012). (査読なし), DOI: 10.1117/12.925848

[学会発表](計15件)

「飛騨天文台AO装置と関連技術の開発状況」三浦則明他、太陽研連シンポジウム(2014年2月、京都)

「上空波面センサの開発と太陽観測への適用」大石歩、三浦則明他、日本天文学会秋季年会(2013年9月、仙台)

「EMCCDカメラ搭載VTOSによるスペckル観測とデータ処理」桑村進他、日本天文学会秋季年会(2013年9月、仙台)

「波面センサ情報を用いる太陽AO像の改善」青木章太郎、三浦則明他、日本天文学会秋季年会(2013年9月、仙台)

「なゆた望遠鏡/VTOSを用いたベテルギウスのスペckル観測」三浦則明他、日本天文学会秋季年会(2013年9月、仙台)

“Application of solar SCIDAR technique to measuring wind velocity,” N. Miura et al., OSA Imaging and Applied Optics Congress, (2013年6月、アーリントン、アメリカ)

「飛騨天文台補償光学系と関連技術の開発」三浦則明、太陽研究シンポジウム(2013年2月、東京)

「波面センサー情報を用いる太陽画像のデコンボリューション」塩野谷慎吾他(5名、5番目) 応用物理学会北海道支部学術講演会(2013年1月、釧路)

「太陽観測に向けた補償光学」三浦則明、可視赤外線観測装置ワークショップ(2012年12月、三鷹)

「飛騨天文台における太陽補償光学系の開発」三浦則明、補償光学研究会(2012年9月、三鷹)

「異なる複数枚の shift-and-add 画像からの回折限界像再生」東泰之、桑村進他(6名、3番目) 日本天文学会秋季年会(2012年9月、大分)

「太陽 SCIDAR 技術によるゆらぎ層の高さの測定」三浦則明他(8名) 日本天文学会秋季年会(2012年9月、大分)

「太陽補償光学系 KIT-AO の開発：装置開状況(5)」三浦則明他(13名) 日本天文学会秋季年会(2012年9月、大分)

「太陽観測のための補償光学系の開発」三浦則明、可視化情報シンポジウム(2012年7月、東京)

“Solar Adaptive Optics at the Hida Observatory: Latest Achievements of Current System and Design of New System,” N. Miura, J. Miyazaki, S. Kuwamura, N. Baba, et al. (12名), SPIE Astronomical Instrumentation, (2012年7月、アムステルダム、オランダ)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/general/facilities/dst/Hida-DST-AO.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

三浦 則明 (MIURA NORIAKI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：30209720

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者

桑村 進 (KUWAMURA SUSUMU)

北見工業大学・工学部・助教

研究者番号：20271538

上野 悟 (UENO SATORU)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：70303807