

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05016

研究課題名(和文) 地表層補償光学に基づく超広視野太陽像回復の効果

研究課題名(英文) Ultra-wide field restoration of solar images based on ground-layer adaptive optics

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)： 地表層補償光学系(GLAO)用の波面センサーの開発を行い、地表層と上空層の波面位相を分離して求めることに成功した。開発したGLAO波面センサーを飛騨天文台に設置して実験を行った結果、観測視野全体で画像のコントラストが向上することを確認した。参照点として4点を用いた場合で600Hz以上の動作速度を達成した。

on-focusとdefocusの太陽像を同時に観測するシステムを開発し、飛騨天文台での観測に適用した。観測データをPhase Diversity法によって処理することによって、広視野に渡って大幅な画像改善に成功した。計算時間削減のため、計算機クラスターによる並列処理システムを開発した。

研究成果の概要(英文)： We developed a sensor for a ground-layer adaptive optics (GLAO), and then succeeded in separately deriving wavefront phases in the ground and an upper layer. We set the GLAO sensor in the Hida Observatory to make experiments. As a result, we confirmed the improvement of image contrast over the whole field of view. We attained the control frequency of more than 600 Hz when using four sensing targets.

We also developed an observational system of simultaneously acquiring solar images on focus and defocus positions, and applied it to observations in the Hida Observatory. By processing the observational data with a phase diversity method, we succeeded in image improvement over a wide field of view. To reduce the computational time, we developed a parallel processing system using a PC cluster.

研究分野：天文光学

キーワード：地表層補償光学 画像回復 補償光学 Phase Diversity

1. 研究開始当初の背景

補償光学系 (Adaptive Optics, 以下 AO) は太陽地上観測において必須の技術である。しかしながら、従来型の AO では補償の中心では解像度が大きく改善されるが、そこから離れるほど補償が不完全なという問題点があった。

多層共役 (Multi-Conjugate, 以下 MC) AO は、従来 AO での補償可能な視野が狭いという欠点を克服する技術として、太陽分野でも精力的に開発が進められている。しかし、太陽観測において、MCAO を実現する上で幾つかの問題点も明らかとなっている。

(a) 太陽が連続的に広がった物体であるために、上空補償用の可変形鏡を光路中に入れて動作させると、波面センサー上の瞳像が変形してしまい、AO 全体の動作が不安定になる。

(b) 太陽光ビームは上空層共役面では瞳面より大きく拡がり、MCAO で補償可能な視野は実質的に上空共役面に置く可変形鏡の開口径によって規定されてしまう。

(c) トモグラフィーに基づく上空波面推定を太陽で実現するには、多数の参照点において全サブアパーチャでの相関演算を実行する必要があり、計算量が膨大となる。

他方、地表層 (Ground-Layer, 以下 GL) AO は大口径望遠鏡での次世代 AO の一つとして注目を集めている新しい技術である。トモグラフィー波面推定で得られる地表層波面位相だけを瞳面の可変形鏡で補償することで、広視野でのシーイング改善を実現する。この技術を太陽に応用すると、上記(a)と(b)の問題点を考慮する必要がなくなり、残された(c)の問題点を克服すれば、超広視野での太陽 GLAO を実現することができる。

ただし、GLAO では上空波面ゆらぎの補償はしないので回折限界像は得られない。これに対しては、Phase Diversity (以下 PD) 法に基づく画像後処理で対処する。波面位相が精度よく得られていれば、画像処理によって回折限界像の回復が可能であることは、別途確認できている。

GLAO によって広視野でのシーイング改善を実現し、そこで得られる上空波面位相を画像改善に活用することで、現在の MCAO の制約を超える広視野での回折限界像観測が実現できる。

2. 研究の目的

本研究には主に二つの技術的な課題がある。一つは、トモグラフィー波面推定において計算量が膨大となる問題である。これに対しては、効率的なアルゴリズムの開発、計算処理の並列化、計算機の高性能化等で対処する。二つ目の問題は、PD 法に対して GLAO で得られている上空波面情報をどのように取り込んでいくかというアルゴリズム開発である。PD 法そのものは定評ある手法であ

り、GLAO からの波面情報をその拘束条件として取り込んでいくことになる想定している。また、PD 法の処理をどのように広視野化するかという問題もある。これの一つの解決法はモザイク処理であり、これについては既に研究実績がある。以上の考察を基に、本研究では以下の2点を目的とする。

(1) GLAO 用の波面センサーを開発すると共に、計算量が膨大となる問題を解決する。開発した波面センサーを飛騨天文台の AO 装置に組み込んで実際の太陽観測に適用し、GLAO による広視野画像改善の効果を観測的に確認する。

(2) PD 法のアルゴリズムを開発すると共に、必要なデータを取得するための光学系の開発も行う。飛騨天文台のドームレス望遠鏡に開発したシステムを設置し、必要なデータを取得しオフラインによる画像処理を実施する。得られた結果について画像改善の効果を評価する。

3. 研究の方法

GLAO 波面センサーの開発を行う。波面センサー光学系を北見工業大学実験室に設置し、光学実験を繰り返しながら開発を進める。相関画像処理部の並列度をさらに高めること、相関計算の効率化アルゴリズムを開発することが重要課題である。これによって、1kHz、最低でも 500Hz 以上での波面補償を実現する。また、ハードウェアで対処することも考える。高速クロックで多コアを備えたコンピュータを使うだけで、かなりの状況改善につながる。場合によっては GPU を導入して問題に対処する。

PD 用のカメラを新しく購入し、このカメラを使用するためのソフトウェアの開発を進める。トリガーによって画像取得を制御する機能もここで実装しておく。

太陽観測を実施する。新しく PD 用のカメラを飛騨天文台光学系に設置し、on-focus と defocus の太陽像をペアで取得する。様々な物体およびシーイング状態でのデータ取得を行う。

得られた太陽観測像とシミュレーションデータを併用しながら PD 法の開発を行う。まず、オリジナルの PD 法を実装し、画像処理の効果を確認する。ここまでは三浦および飛騨天文台でも開発実績があり、問題なく開発できる。さらに研究が進めば、上空位相の情報を PD 法に組み込むためのアルゴリズムを開発する。現時点では、上空波面情報を初期推定として利用すると共に、波面推定において緩い拘束条件として活用することを想定している。

4. 研究成果

(1) GLAO 用センサーの開発を行った。図 1 (a)-(c)は波面センシングの参照として異なる

黒点を用いて波面推定を行った結果である。参照点が比較的近い場合 (b と c) には比較的似た分布となるが、離れると波面形状が異なってくる(a)ことがわかる。これらの情報を使って地表層と上空層の波面位相を求めたものが(d)と(e)である。なお、開発した手法では、プログラムを動作させる際に上空層の高さを指定する必要がある。このときは5kmと設定して実行した。

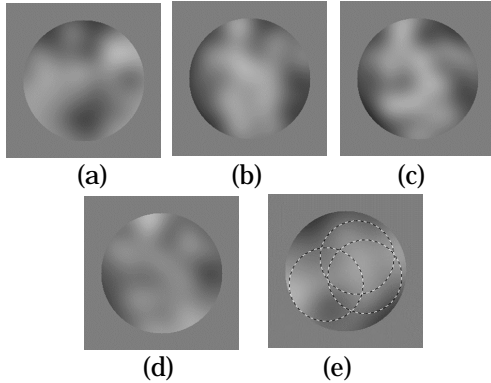


図1 トモグラフィック波面センシングの実験例。(a)-(c)各方向の積算位相。上段の3枚から計算された(c)地表層と(e)上空層の波面位相。

(2)GLAO 用センサーを動作させる際に必要となる上空層高さの情報を得る手段として、太陽 SLODAR (Slope detection and ranging) の開発を行った。これは従来二重星用に開発されてきた SLODAR 法を初めて太陽観測用に適用したものである。

SLODAR では広視野 Shack-Hartmann センサーを用いて、サブアパーチャの視野内の異なる黒点間の相対位置の変動を、時間相関を用いて評価する。

図2は2016年9月に実施した観測で得られた結果の例である。地表層(高さ0km)での値が一番大きく、高くなるにしたがって、相関値が小さくなっていくことがわかる。また、高さ2500m付近で反応が表れており、この高さに揺らぎ層があることがわかる。なお、用いる黒点ペアの間隔によって計測できる高さで高さ方向のサンプリング間隔が異なり、これがグラフ中のマークの違いとなっている。

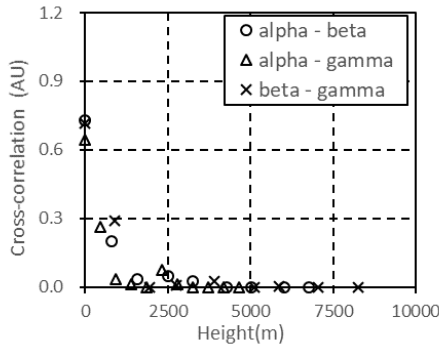


図2 太陽 SLODAR で得られた揺らぎ層高さに対する相関値分布の例

(3)飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 1F に GLAO 波面センサー (図3) を設置した。このセンサーで得られた地表層波面情報を基に、2Fにある常設 AO 装置中の可変形鏡を動作させることによって実験を行った。

図4は実験結果の一例である。(a)はGLAOなし、(b)はGLAOを動作させたときの結果である。視野は128秒角である。GLAOによって広い視野に渡って像全体のコントラストが上がり、細かな構造が現れてきているのがわかる。

この例では、矢印で示す四つの黒点を用いて波面センシングを行った。この時の処理速度は600Hzであり、目標にしていた1kHzには届いていないが、500Hz以上は実現できており最低限の性能は達成できた。

しかしながら、画像のコントラスト解析の結果、期待していた性能には届いていないことも明らかになっている。この原因は主に動作周波数の低下によるものと考えられ、この問題を克服するためにさらなる改善が必要である。

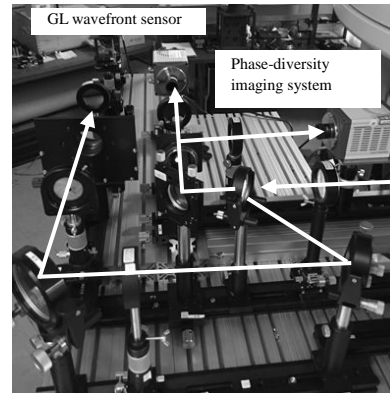


図3 実験光学系

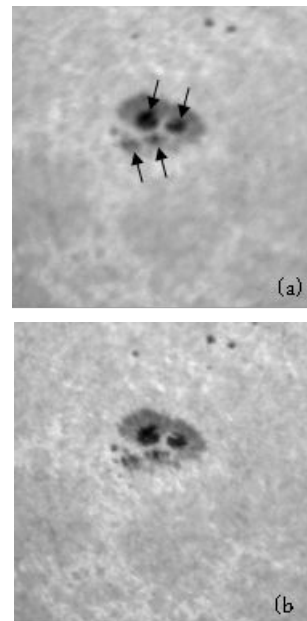


図4 観測された太陽像の例。(a)GLAOなし、(b)GLAOあり。

(4) PD 法用のデータ取得のための光学系(図3)を設置し、太陽像観測を実施した。ビームスプリッタで光波を二つに分けて、片方は on-focus、もう一方は少し defocus にして撮像する。このとき、トリガーを与えて2台のカメラで同時露光するシステムを開発した。図5は取得した on-focus および defocus での太陽像である。視野は32秒角である。

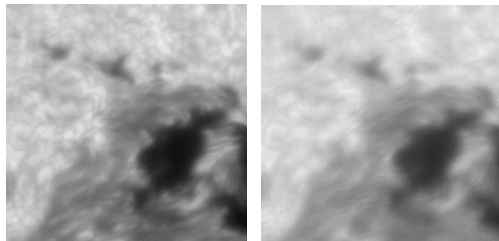


図5 on-focus (左) および defocus (右) で観測された太陽黒点像

(5) PD 法による太陽画像回復システムを開発した。ここで採用した PD 法は Lofdahl と Schaemer によるものである。データ処理の際、波面は広視野に渡って均一ではないので、画像を部分画像に切り分けて、それぞれに PD 法を適用したのち、得られた回復像をモザイク処理して、一枚の全体画像を再生している。図6上段が on-focus で観測された太陽像、下段が回復像である。コントラストが大きく改善され、細かな構造がより鮮明に現れている。視野は128秒角である。

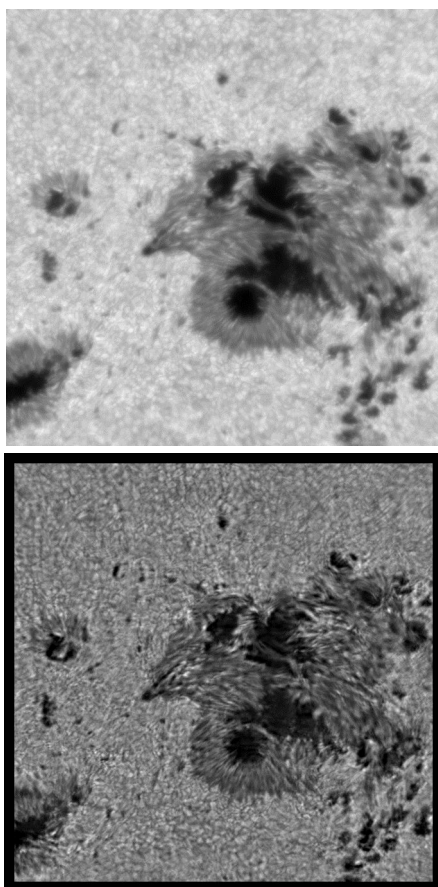


図6 画像処理による像回復の例。On-focus での観測像(上段) 回復像(下段)

(6) PD を実行する際、多数回の勾配計算を含んでおり、膨大な計算時間がかかる。そこで、部分画像ごとに異なる計算機で並列に回復処理をする計算機クラスタシステムを開発した。このクラスタシステムは5台のPCから構成されるものである。実験の結果、最も性能のよい計算機に比較して、1/5の計算時間で全体の回復処理が終了することを確認した。

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 4 件)

大石明, 三浦則明, 鈴木貴博, 桑村進, 上野悟, 仲谷善一, 一本潔, “大気揺らぎの高さ分布計測のための太陽 SLODAR 技術”, 光学, 査読有, 57, 2018, in print
<http://myosj.or.jp/publication/kogaku/>

三浦則明, “太陽観測のための補償光学系の開発と展望”, 天文月報, 査読無, 110, 2017, 791-799
http://www.asj.or.jp/geppou/contents/2017_12.html

N. Miura, A. Oh-ishi, S. Kuwamura, N. Baba, S. Ueno, Y. Nakatani, and K. Ichimoto, “Deconvolution of partially compensated solar images from additional wavefront sensing,” Applied Optics, 査読有, 55, 2016, 2484-2488
DOI: 10.1364/AO.55.002484

三浦則明, “画像相関を利用した太陽観測のための補償光学”, 光学, 査読無, 44, 2015, 379-383
<http://myosj.or.jp/kogaku/backnumber/44-10/>

[学会発表](計 16 件)

N. Miura, T. Suzuki, S. Takahashi, S. Kuwamura, N. Baba, S. Oya, S. Ueno, Y. Nakatani, K. Ichimoto, “Experiments of GLAO using the domeless solar telescope of the Hida Observatory,” Proc. SPIE, 2018

T. Suzuki, N. Miura, S. Kuwamura, S. Oya, S. Ueno, Y. Nakatani, K. Ichimoto, “Phase-diverse restoration of solar images partially compensated by GLAO using a PC cluster,” Proc. SPIE, 2018

鈴木貴博, 三浦則明, 桑村進, 上野悟, 一本潔, “太陽画像改善のための Phase Diversity 並列処理”, 日本天文学会, 2017

高橋進也, 三浦則明, 鈴木貴博, 菊池駿, 桑村進, 馬場直志, 花岡庸一郎, 上野悟, 仲

谷善一, 一本潔, “飛騨天文台における AO/GLAO の開発”, 日本天文学会, 2017

三浦則明, 菊池駿, 鈴木貴博, 山本大二郎, 野澤恵, 萩野正興, 上野悟, 一本潔, “太陽 SLODAR による大気ゆらぎ層の高さ分布の測定”, 日本天文学会, 2017

T. Suzuki, N. Miura, S. Kuwamura, S. Ueno, Y. Nakatani, K. Ichimoto, “Parallel processing of solar image restoration with phase diversity technique,” 24th Congress of ICO, 2017.

大石明, 三浦則明, 本間佑涼, 桑村進, 馬場直志, 上野悟, 仲谷善一, 一本潔, “太陽 GLAO のための波面センシング法の開発、応用物理学学会北海道、2017

大芦鷹弥, 三浦則明, “GPU を用いた波面計算のための基礎実験”, 応用物理学学会北海道、2017

鈴木貴博, 三浦則明, “Phase Diversity 法による太陽像回復の並列処理”, 応用物理学学会北海道、2017

大石明, 三浦則明, 本間佑涼, 桑村進, 馬場直志, 上野悟, 仲谷善一, 一本潔, “太陽 GLAO のための波面センシング法の開発、日本天文学会、2016

三浦則明, 大石明, 本間佑涼, 桑村進, 馬場直志, 花岡庸一郎, 北井礼三郎, 上野悟, 仲谷善一, 一本潔, “飛騨常設補償光学系の開発: 光学系の校正と観測”, 日本天文学会、2016

N. Miura, A. Oh-ishi, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, S. Ueno, Y. Nakatani, K. Ichimoto, “Status of Hida solar adaptive optics system and experiments of tomographic wavefront sensing,” Proc. SPIE, 2016

三浦則明, “飛騨天文台補償光学系の開発と広視野化計画” Optics Photonics Japan(招待講演) 2015

三浦則明, 大石明, 桑村進, 馬場直志, 花岡庸一郎, 北井礼三郎, 上野悟, 仲谷善一, 一本潔, “太陽補償光学系の開発と補償効果のシミュレーション(2)”, 日本天文学会、2015

大石明, 清信功之介, 三浦則明, 桑村進, 馬場直志, 上野悟, 仲谷善一, 一本潔, “飛騨天文台における多層共役補償光学系の開発”, 日本天文学会、2015

N. Miura, A. Oh-ishi, S. Kuwamura, N.

Baba, S. Ueno, Y. Nakatani, K. Ichimoto, “Solar image improvement base on deconvolution using additional wavefront sensor,” OSA Imaging and Applied Optics Congress, 2015

〔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
<https://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

上野 悟 (UENO Satoru)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号: 70303807

(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

大屋 真 (OYA Shin)
国立天文台・TMT 推進室・特任准教授
研究者番号: 80399287