

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 9 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287027

研究課題名(和文) すばる望遠鏡による超広視野の多天体補償光学の実証

研究課題名(英文) Performance evaluation of an ultra wide-field multi-object adaptive optics on the Subaru telescope

研究代表者

秋山 正幸 (Akiyama, Masayuki)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50425401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,800,000円

研究成果の概要(和文)：広視野補償光学を実現するトモグラフィック波面推定の新しいアルゴリズムとして、複タイムステップ・トモグラフィック波面推定の手法を、すばる望遠鏡の持込み装置である多天体補償光学実証機 RAVEN を用いて実証した。RAVEN の波面センサーの解析により、各高さの大気揺らぎが風向きにより時間と共に移動していること、関連のピークの強度は100ms程度までは強く、この時間間隔では大気揺らぎの各層が「凍結して移動している」と見なせることがわかり、複タイムステップ・トモグラフィック波面推定の有効性が実証された。

研究成果の概要(英文)：We demonstrate a new tomographic wavefront estimation algorithm, "multi-timestep tomographic wavefront reconstruction", which achieve more accurate tomographic estimation in wide field of view, with a multi object adaptive optics system, RAVEN, on the Subaru telescope. We analyzed the wavefront measurements data of RAVEN, and found that (1) the turbulence pattern at each altitude layer can be regarded as moving with winds, and the pattern can be regarded as "frozen" in the time scale of 100ms. Those results indicate the multi-timestep tomographic wavefront reconstruction method is effective to enlarge the field of view of tomographic wavefront estimation.

研究分野：可視赤外線装置開発、銀河進化研究

キーワード：補償光学 トモグラフィック補償光学 多天体補償光学 波面測定

## 1. 研究開始当初の背景

次世代 30m 望遠鏡 TMT の高空間分解能を生かして、遠方宇宙にある銀河の内部構造を統計的に観測するためには、超広視野の多天体補償光学を実現することが必要である。特に多天体の同時観測により統計的な観測を実現するためにはターゲット天体の数密度を考えると直径 10 分角程度の広視野での補償光学を実現することが必要である(成果論文)。

地上観測の空間分解能を制約する光波面の乱れは大気中の温度ムラ(以下、大気揺らぎと呼ぶ)で生じる。これまでの補償光学では大気揺らぎの補償が効く視野は大気揺らぎのパターンが同じと見なせる 30 秒角程度の領域であり、一度に観測できる天体は 1 天体に限られた。TMT の初期補償光学系(NFIRAOS)でも複数層共役補償光学の技術が用いられるが、回折限界に近い補償が効く領域は直径 30 秒角程度に限られる。

多天体補償光学はこの視野の制約を打破し、広視野に点在する 20 個程度の天体を一度に回折限界に近い高空間分解能で観測することを目指すシステムであり、その鍵となるのはトモグラフィック波面推定の手法である(成果論文 参照)。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はトモグラフィック波面推定の新しいアルゴリズムとして、複タイムステップ・トモグラフィック波面推定の手法を実証し、トモグラフィック推定による多天体補償光学が有効な視野を広げることにある。

図 1 にトモグラフィック波面推定の模式図を示す。トモグラフィック波面推定においては複数のガイド星の観測で得られる複数の方向で積分した大気揺らぎの測定結果を、トモグラフィックの手法で解析することにより大気揺らぎを高さ方向に分解して推定する。高さ方向に分解した大気揺らぎをターゲットの方向で積分することで、その方向の大気揺らぎを推定し、補正することが出来る。これによりガイド星がカバーするコーン状の体積の中の任意の方向にある天体について回折限界に近い空間分解能で観測することが出来る。複数の天体について、それぞれに最適化した補正を同時に行うことで、多数の天体の高空間分解能観測が可能となる。

これまでに提案されていたトモグラフィック波面推定のアルゴリズムではガイド星の数の制約と最上層のガイド星の光路の重なり具合から補償の効く視野は 5 分角程度に留まる。我々はさらに超広視野の多天体補償光学を可能にする新しいアルゴリズムとして、複タイムステップ・トモグラフィック波面推定を考案した(成果論文)。図 1 の矢印で示すように、大気揺らぎの時間変動は小さい時間間隔では風によってそれぞれの高さの

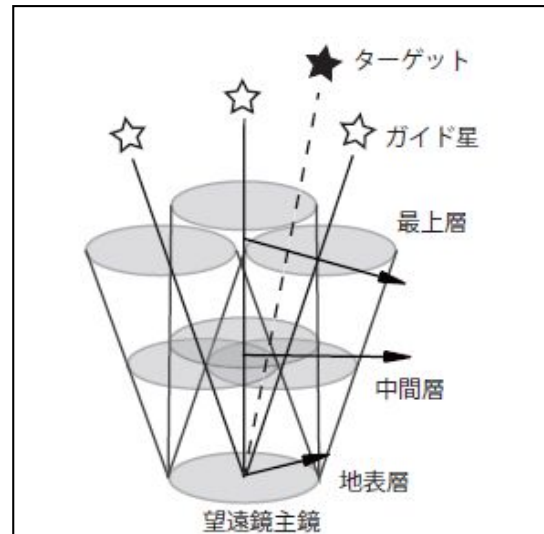


図 1：トモグラフィック波面推定の模式図。複数のガイド星の方向の波面測定をトモグラフィックの手法で解析することにより、大気揺らぎの構造を高さ方向に分解して推定する。

大気揺らぎがその構造を保ったまま移動する効果であると見なせる。よって、過去の複数のタイムステップで得られた波面測定の情報と同時に推定に用いれば、大気揺らぎの移動によって、それぞれの高さの大気揺らぎの測定点を実効的に増やすことが出来、トモグラフィック推定の精度を向上し、多天体補償光学の視野を拡大することが出来る。

この複タイムステップ・トモグラフィック波面推定が実際の観測において有効であることを実証するために、すばる望遠鏡の持ち込み装置である多天体補償光学実証装置 RAVEN を用いて、複タイムステップ・トモグラフィック波面推定の性能評価を行うことが本研究の目的である。このアルゴリズムを用いるためにはそれぞれの高さにある大気揺らぎの移動速度、移動方向を推定することが鍵となるので、RAVEN の複数の波面センサーによるトモグラフィック波面推定に複数の時間での各層の大気揺らぎパターンの相関を取る手法を組み合わせ、各層の風速、風向を推定し、大気揺らぎの移動速度と移動方向の推定の精度を評価する。さらに複タイムステップ・トモグラフィック波面推定を導入した制御計算機を RAVEN に接続し、実際の観測条件下での新しい推定手法の性能を評価する。

この実証観測により、複タイムステップ・トモグラフィック波面推定が有効であることを示し、TMT の次世代の観測装置として超広視野の多天体補償光学を実現する道を開く。

## 3. 研究の方法

超広視野の多天体補償光学を実現する方法として我々が提案する複タイムステップ・ト

モグラフィック波面推定の性能を決める重要なパラメータは大気揺らぎの各層の移動速度と移動方向(つまり大気の各層での風速と風向)の推定精度と大気揺らぎの各層のパターンの時間変動のタイムスケールである。各層の移動速度と移動方向が十分な精度で決まらなければ以前のタイムステップの情報をトモグラフィック波面推定の中で用いることが出来ない。計算機シミュレーションの結果によれば上層の大気揺らぎ層については毎秒 0.5 m 程度の誤差で決めることが出来れば十分に良い推定が出来る(成果論文)。大気の各層の揺らぎのパターンの時間変動のタイムスケールが短く、短い時間でも各層の変化が移動だけでは記述できない場合にも有効性が下がる。計算機シミュレーションの結果では 0.05 秒の間パターンを一定と見なすことが出来ればこの手法は十分に有効である。

これらの評価を行うために、すばる望遠鏡の持込み装置である多天体補償光学実証機 RAVEN を用いる。RAVEN は 3 台の自然ガイド星用波面センサーと 1 台のレーザーガイド星用波面センサーを持ち、この 4 個の波面センサーの測定情報を用いてトモグラフィック波面推定を行うことが出来る。ターゲットの観測用には 2 個のピックオフ光路が用意され、それぞれが独立した可変形鏡で補償され赤外線分光撮像装置 IRCS に導かれる。

大気揺らぎの各層の移動速度、移動方向と時間変動のタイムスケールの決定は具体的に以下のように行う。まず 4 個の波面センサーの測定結果を用いることでトモグラフィック波面推定を行い、大気揺らぎの層別のパターンの推定を得る。複数の時間において推定された各層のパターンについて相関を取ることで、相関のピークとなる位置から大気揺らぎの各層の移動量と移動方向をそれぞれ推定することが出来る。また相関の強度からパターンの変動量を推定することが出来る。

#### 4. 研究成果

我々は RAVEN をすばる望遠鏡に搭載し、自然ガイド星を用いて 3 個の波面センサーでの大気揺らぎの同時測定を行った。その測定結果を用いて、まず各高さの大気揺らぎの移動速度、風向・風速の推定を行った。その結果を図 2 に示す。この図は大気揺らぎ各層の風向・風速を求めるための空間相関のマップを示す。それぞれの行は大気揺らぎの各層の高さに対応しており、横軸は相関を取る時間間隔となっている。時間間隔をあけるにしたがって相関のピークが移動しており、これは各高さの大気揺らぎが風向きにより時間と共に移動していることを示しており、この手法により各高さでの風速と風向が測れていることを示す。また相関のピークの強度は 100ms 程度までは強く、この時間間隔では大気揺らぎの

各層が「凍結して移動していて強い相関を持つ」と見なせることを示す(成果論文)。

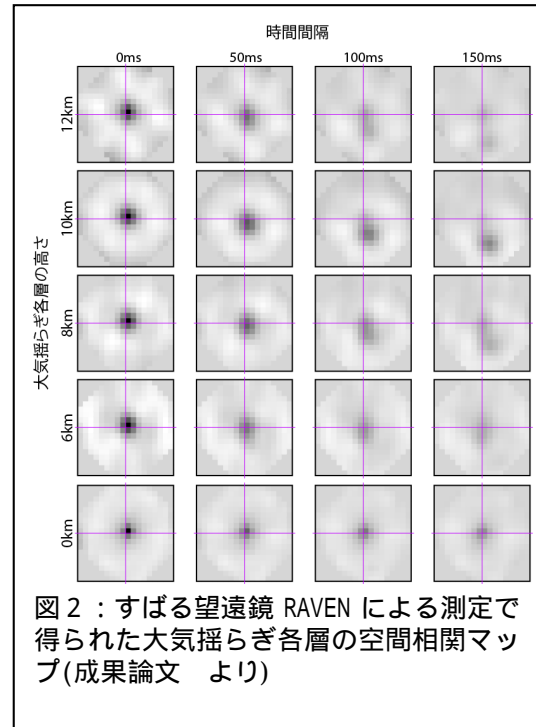


図 2 : すばる望遠鏡 RAVEN による測定で得られた大気揺らぎ各層の空間相関マップ(成果論文より)

トモグラフィック測定により得られた大気揺らぎの高さ分布の情報を用いて、ガイド星の方向の大気揺らぎからターゲット天体の方向の大気揺らぎを求める行列を構成した。その結果を図 3 左に示す。一方で我々はターゲット天体方向の波面も同時に測定を行い、ガイド星 3 方向の測定とターゲット方向の測定を結びつける行列を経験的に求めた。図 3 右は経験的に求めた行列であり、いわば推定行列の解となっている。この 2 個の行列の比較から、現在の手法で求めた推定行列は十分に高い精度が達成できており、トモグラフィックによる波面推定は良い精度で実現できていることがわかった。

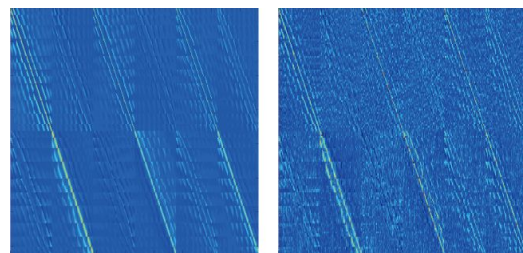
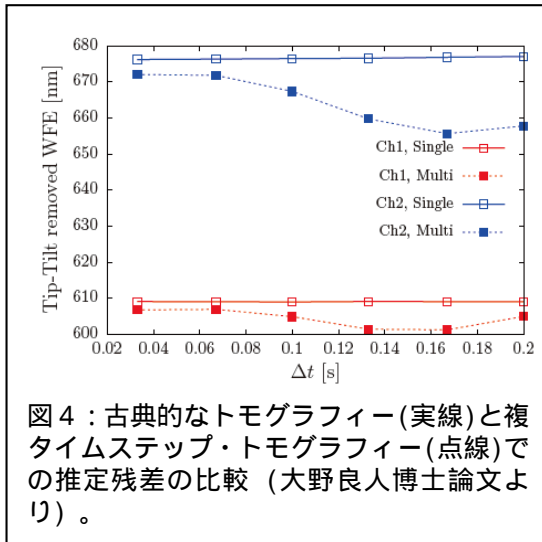


図 3 : トモグラフィック波面推定に用いる行列。左) 推定された大気揺らぎの高さ分布とガイド星の配置から計算された推定行列。右) ガイド星の波面測定の結果を用いて経験的に求めた推定行列(成果論文より)。

最後に、複タイムステップ・トモグラフィックを用いた場合の性能向上についても評価を行った。図 4 にその結果を示す。複タイムステップ・トモグラフィックの推定を用いることで、古典的な単タイムステップ・トモグラフィック



フィーによる推定よりもより小さい残差、より高精度の推定が出来ることが確認された。ただし、実際には古典的な推定とそれほど残差に違いがない時間帯も多く、大きな性能の違いが出ない点については今後さらに解析を進める必要がある。



## 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14件)

Abdurrouf, Akiyama Masayuki, "Understanding the scatter in the spatially-resolved star formation main sequence of local massive spiral galaxies", Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 査読有, 2017, in press

Ono Yoshito, Correia Carlos, Andersen David, Lardiere Olivier, Oya Shin, Akiyama Masayuki, Jackson Kate, Bradley Colin, "Statistics of turbulence parameters at Maunakea using the multiple wavefront sensor data of RAVEN", Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 査読有, 2017, Vol 465, 4931-4941

Lamb Mason, Venn Kim, Andersen David, Oya Shin, Shetrone M., Fattahi A., Howes L., Asplund M., Lardiere Olivier, Akiyama Masayuki, Ono Yoshito, Terada Hiroshi, Hayano Yutaka, Suzuki Genki, Blain Celia, Jackson Kate, Correia Carlos, Youakim K., Bradley Colin, "Using the multi-object adaptive optics demonstrator RAVEN to observe metal-poor stars in and towards the Galactic Centre", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 2017, Vol.465, 3563-3557

Davidge Tim, Andersen David, Lardiere Olivier, Bradley Colin, Blain Celia, Oya Shin, Terada Hiroshi, Yutaka Hayano, Mason Lamb, Akiyama Masayuki, Ono Yoshito,

Suzuki Genki, "Cluster Glimpses with RAVE: AO-corrected Near and Mid-infrared Images of GLIMPSE C01 and GLIMPSE C02", Astronomical Journal, 査読有, 2016, Vol.152, 173 (19pp)

Ono Yoshito, Carlos Correia, Lardiere Olivier, Andersen David, Oya Shin, Akiyama Masayuki, Darryl Gamroth, Kate Jackson, O. Martin, A. Guesalaga, Bradley Colin, "The statistics of atmospheric turbulence at Maunakea measured by RAVEN", Proceedings of the SPIE, 査読無, 2016, Vol.9909, 99093E(7pp)

Ono Yoshito, Carlos Correia, Lardiere Olivier, Andersen David, Oya Shin, Akiyama Masayuki, Darryl Gamroth, Kate Jackson, O. Martin, Bradley Colin, "On-sky MOAO performance evaluation of RAVEN", Proceedings of the SPIE, 査読無, 2016, Vol.9909, 990910(6pp)

秋山 正幸、大野 良人、"次世代超大型望遠鏡 TMT のための広視野多天体補償光学", 光学, 査読無, 2015, Vol.44, 1

Davidge Tim, Andersen David, Lardiere Olivier, Bradley Colin, Blain Celia, Oya Shin, Akiyama Masayuki, Ono Yoshito, "Raven and the center of Maffei 1: Multi-object Adaptive Optics Observations of the center of a nearby elliptical galaxy and the detection of an intermediate age population", Astrophysical Journal, 査読有, 2015, Vol.811, 133-144

Ono Yoshito, Akiyama Masayuki, Oya Shin, Lardiere Olivier, Andersen David, Correia Carlos, Jackson Kate, Bradley Colin, "Multi time-step wavefront reconstruction for tomographic adaptive-optics systems", Journal of the Optical Society of America A, 査読有, 2016, Vol.33, 726-740

Oya Shin, Hayano Yutaka, Lai Olivier, Iwata Ikuru, Kodama Tadayuki, Arimoto Nobuo, Minowa Yosuke, Akiyama Masayuki, Ono Yoshito, Terada Hiroshi, Usuda Tomonori, Takami Hideki, Nishimura Tetsuo, Takato Naruhisa, Tomono Daigo, "ULTIMATE-Subaru: simulation update", Proceedings of the SPIE, 査読無, 2014, Vol.9148, 91486G-8

Hayano Yutaka, Akiyama Masayuki, Hattori Takashi, Iwata Ikuru, Kodama Tadayuki, Lai Olivier, Minowa Yosuke, Ono Yoshito, Oya Shin, Takiura Koki, Tanaka Ichi, Tanaka Yoko, Arimoto Nobuo, "ULTIMATE-Subaru: project status", Proceedings of the SPIE, 査読無, 2014, Vol.9148, 91482S-8

Lardiere Olivier, Andersen Dave, Blain Celia, Bradley Colin, Gamroth Darryl, Jackson Kate, Lach Przemek, Nash Reston,

Venn Kim, Veran Jean-Pierre, Correia Carlos, Oya Shin, Hayano Yutaka, Terada Hiroshi, Ono Yoshito, Akiyama Masayuki, “Multi-object adaptive optics on-sky results with Raven”, Proceedings of the SPIE, 査読無, 2014, Vol.9148, 91481G-14

Ono Yoshito, Akiyama Masayuki, Oya Shin, “TMT-AGE: numerical simulation of a new tomographic reconstruction method for wide FoR MOAO”, Proceedings of the SPIE, 査読無, 2014, Vol.9148, 9148146M-6

Akiyama Masayuki, Oya Shin, Ono Yoshito, Takami Hideki, Ozaki Shinobu, Hayano Yutaka, Iwata Ikuru, Hane Kazuhiro, Wu Tong, Yamamuro Tomoyasu, Ikeda Yuji, “TMT-AGE: wide field of regard multi-object adaptive optics for TMT”, Proceedings of the SPIE, 査読無, 2014, Vol.9148, 914814-14

〔学会発表〕(計12件)

鈴木 元気、秋山 正幸、大屋 真, “多天体補償光学に向けた開ループ制御補償光学系での波面補償の性能評価”, 日本天文学会春季年会、2017年3月、九州大学(福岡県福岡市)

鈴木 元気、秋山 正幸、大屋 真, “多天体補償光学に向けた Open-Loop 補償光学系での波面補償の試験”, 日本天文学会秋季年会、2016年9月、愛媛大学(愛媛県松山市)

Akiyama Masayuki, Ono Yoshito, “Tomographic Wavefront Estimation for Wide-field Adaptive Optics Systems”, The 26<sup>th</sup> International Symposium on Optical Memory (ISOM, 国際学会, 招待講演), 2016年10月、京都(京都市)

Abdurro'uf, Akiyama Masayuki, “Spatially-resolved Star Formation Rate and Stellar Mass of Spiral Galaxies in the Local Universe: Quantifying the inside-out scenario of disk galaxies formation”, How galaxies form stars (国際学会、口頭講演), 2016年8月、ストックホルム(スウェーデン)

Akiyama Masayuki, “TMT-AGE: AO-assisted wide-field multi-object NIR spectrograph concept”, TMT Science Forum 2016 International Partnership for Global Astronomy (国際学会、口頭講演)、2016年5月、京都(京都市)

Akiyama Masayuki, “Studying galaxies in the early universe with wide-field Multi-Object Adaptive Optics systems on ELTs”, MOS for ELTs (国際学会、口頭講演), チェファル(イタリア)

大野 良人、秋山 正幸、大屋 真、Lardiere Olivier, “RAVEN: 多天体補償光学を用いた場合の視野内での PSF の一様性の評価”, 日本天文学会秋季年会、2015年9月、

甲南大学(兵庫県神戸市)

秋山 正幸、大野 良人、大屋 真, “TMT-AGE: 多天体面分光で探る遠方銀河”, 日本天文学会春季年会、2015年3月、大阪大学(大阪府大阪市)

高田 大樹、秋山 正幸、大屋 真、池田 優二, “次世代超大型望遠鏡の広視野補償光学の光学設計”, 日本天文学会春季年会、2015年3月、大阪大学(大阪府大阪市)

山崎 公大、秋山 正幸、大野 良人、大屋 真, “Subaru/RAVEN の on-sky 観測で得られた大気揺らぎの経験的モード展開”, 日本天文学会春季年会、2015年3月、大阪大学(大阪府大阪市)

大屋 真、大野 良人、秋山 正幸、寺田 宏、早野 裕、高遠 徳尚、高見 英樹、伊藤 周、Olivier Lardiere, Colin Bradly, David Andersen, “RAVEN プロジェクトの進展”, 日本天文学会春季年会、2015年3月、大阪大学(大阪府大阪市)

大野 良人、秋山 正幸、大屋 真、Olivier Lardiere, “Subaru/RAVEN を用いたトモグラフィック再構成手法の開発と実証”, 日本天文学会春季年会、2015年3月、大阪大学(大阪府大阪市)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

秋山 正幸 (AKIYAMA, Masayuki)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 50425401

### (2) 連携研究者

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