

平成 29 年 4 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247021

研究課題名(和文)次世代大型望遠鏡における地球型系外惑星の撮像分光装置の研究

研究課題名(英文)Development of instrument for characterization of extrasolar terrestrial planets with Extremely Large Telescopes

研究代表者

松尾 太郎 (Matsuo, Taro)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：00548464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,600,000円

研究成果の概要(和文)：Thirty Meter Telescope (TMT)をはじめとした次世代の地上大型望遠鏡において地球型系外惑星の観測において、地球大気の大気乱流によって乱れる波面をリアルタイムに高精度で補償することは最も重要である。本開発では、その補償光学の要素開発を室内で行い、また、次世代の補償光学系のための新しい計測技術を考案した。これらの要素開発は、本科研費で閉じることなく、京大岡山3.8m望遠鏡において本科研費で開発された補償光学による系外惑星の観測がその発展として行われる予定である。

研究成果の概要(英文)：Extreme Adaptive Optics (ExAO) that corrects wavefront aberration due to the atmospheric turbulence in real-time is crucial for spectroscopic observation of extraterrestrial planets with the next generation ground-based large telescopes such as Thirty Meter Telescope (TMT). In this study, we successfully developed a prototype of the extreme adaptive optics in the room and also proposed a new type of wavefront sensor, which characterizes the performance of the adaptive optics. The developed adaptive optics will be applied to the new telescope built in Okayama prefecture in future.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：太陽系外惑星 補償光学 波面計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 次世代の超大型望遠鏡のファーストライトが 2020 年代初頭に迫る中、太陽系外惑星の観測可能性について 2010 年ごろから世界各地で議論が始められていた。このような背景において、我々は、次世代大型望遠鏡の非常に高い解像度を活かした、晩期型星周りでの地球型系外惑星の直接観測がひとつの可能性として議論された。

2. 研究の目的

(1) 地球型系外惑星の直接観測の実現可能性についての検討を行い、観測装置の仕様の明確化を行うことである。

(2) 直接観測において鍵となる極限補償光学の要素開発を室内で行い、実現の見通しをつけることである。

3. 研究の方法

(1) 地球大気および観測装置をモデル化し、地球型系外惑星の直接観測の実現可能性を数値に落とし込む。また、その数値に基づいて、観測装置の要求仕様を決定する。

(2) 観測装置の要求仕様に基づいて、極限補償光学を要素ごとに分け(波面計測、演算、波面補償)、各要素に必要な仕様を導出する。その仕様に合わせて構成部品を設計し、室内において実証実験を行う。

4. 研究成果

(1) 次世代の超大型望遠鏡での地球型系外惑星の直接観測の実現可能性を検討した結果、数 pc 以内の晩期型星周りを公転する惑星大気から酸素あるいは水蒸気の分子検出が可能であることがわかった。図 1 は 40m 望遠鏡に高コントラストの偏光分光観測が実現される場合に、観測可能な近傍の惑星をプロットしたものである。図 1 に示すように、数個の小さい惑星について水分子の検出が可能であることが示された。本成果に関して 2 編の査読論文が出版された。

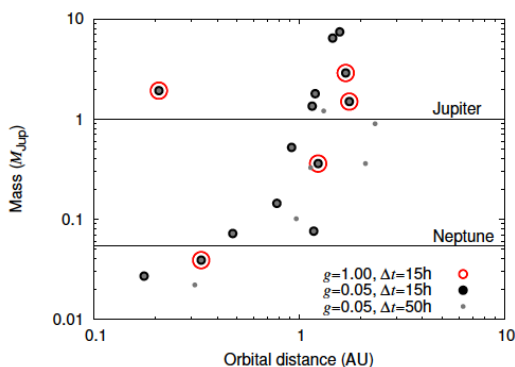


図 1. 高コントラスト偏光分光観測による近傍惑星の特徴づけの実現可能性。大きい黒丸は、およそ一晩で水蒸気の検出が可能な惑星

である。

(2) (1) で導出された要求仕様に基づいて、極限補償光学のブロックダイアグラムを図 2 に示す。口径 30m 級の観測装置は肥大するため、本研究では、科研費の範囲で実行可能な 4m 級望遠鏡に仕様を焼き直して検討を行った。図 2 に示すように、3 つのシステムから構成されている。初めに望遠鏡の指向誤差を補正する Tip-Tilt システム、次に低次の波面歪みの計測補償を行う Woofer システム、最後に高空間周波数の微小な波面歪みを補正する Tweeter システムである。本検討において、段階的にサンプリング周波数を早く、空間サンプリングを細かくし、また波面計測に工夫を加えることによって、直接観測の仕様に耐えるものが構成できることが分かった。

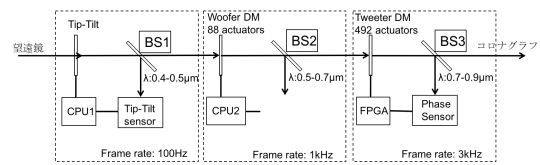


図 2. 口径 4m 望遠鏡に焼き直した極限補償光学装置のブロックダイアグラム

(3) 本装置の最終的な性能を特徴づけるのが Tweeter システムである。本研究において、Tweeter システムの波面計測装置を新しく提案した。従来、位相を直接計測できる波面計測装置は、効率およびリアルタイム性の両立が難しかった。そこで、本研究では、効率をほぼ 100% でリアルタイムに波面を計測できるシステムを考案した。図 3 はその計測センサの概念図である。点回折干渉計を発展させ、偏光を利用することによって損失が極限まで抑えることに成功した。本研究に関して、2 編の査読論文が出版された。

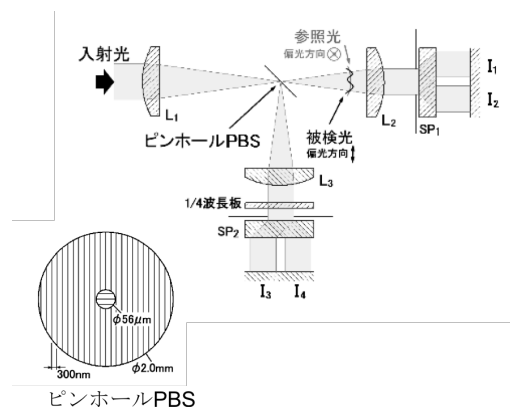


図 3. 新しく考案した点回折干渉計を発展させた波面計測装置の概念図

(4) 室内において、Woofer システムの構築が進められた。本実験では、京大 3.8m 望遠鏡が設置される岡山上空の大気を再現し、Woofer システムで波面揺らぎを計測し、補正できることを検証した。図 3 は、シャツ

クハルトマンで計測された画像である。**Woofler** システムで採用された Shack-Hartmann センサーは、検出器の前に置かれたマイクロレンズアレイによって光束を 1 方向に 8 分割して、分割された各光束の波面の傾斜を検出器の位置に変換して計測している。図 3 に示されるように、室内で模擬された大気乱流を通過した波面は乱れているため、大気乱流がない時に比べて、各スポットの像が整列していないことが確認される。周波数 1kHz のサンプリング周波数で重心の計測精度は 0.3 ピクセル程度を実現している。図 4 は、可変形鏡での補正時の Shack-Hartmann センサーで取得された重心の軌跡を示す。図 4 に示されるように、無補償の場合に比べて、可変形鏡による波面補償が行われる場合には、スポットの軌跡の最大幅が小さくなっている。これは、補償によって波面が制御されていることを示している。このように、室内において実環境を模擬した計測と制御が成功した。本実験で開発された要素技術は、その発展として、京大岡山 3.8m 望遠鏡での直接観測装置へと引き継がれ、数年後のファーストライトを目指して開発が引き続き、京都大学と大阪電気通信大学を中心に進められている。

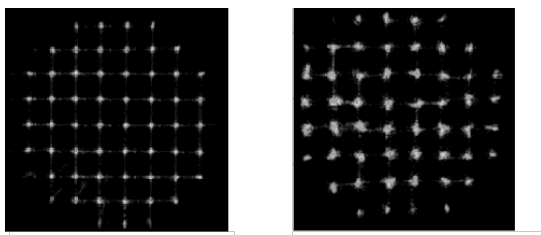


図 3. 室内実験での Shack-Hartmann センサーの画像。大気位相板を通過しない場合 (左) と位相板を通過する場合 (右)

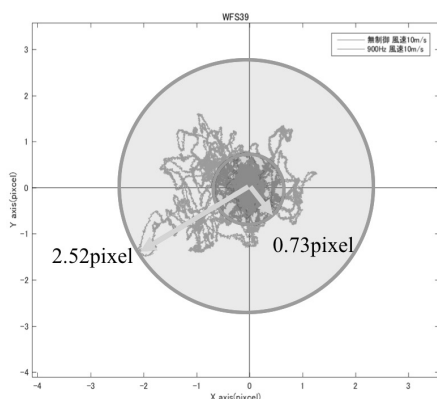


図 4. 室内実験における波面補償時の Shack-Hartmann センサーの 1 ピクセルの軌跡。無制御 (細線) とサンプリング周波数 900Hz の制御 (太線) の比較。

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 6 件)

松尾太郎, 小谷隆行, 村上尚史 他, “Second-Earth imager for TMT (SEIT): concept and its numerical simulation,” Proc of SPIE, 84461, 2012

河原創, 松尾太郎, 高見道弘, 他, “Can Ground-based Telescopes Detect the Oxygen 1.27 μm Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets? ”, Astrophysical Journal, 758, 153, 2012

松尾太郎, 村上尚史, 小谷隆行, 他, Proc of SPIE, “High-Contrast Planet Imager for Kyoto 4m Segmented Telescope,” 9147, 2014

今田大皓, 松尾太郎, 山本広大, 木野勝,

“Real-time point diffraction

interferometer and its analytical

formulation,” Applied Optics, 査読有, 54,

7870, 2015

山本広大, 松尾太郎, 今田大皓, 木野勝, “Measurement of complex amplitude with a point-diffraction interferometer,” Applied Optics, 査読有, 54, 7895, 2015

高橋準, 松尾太郎, 伊藤洋一, “Feasibility of spectro-polarimetric characterization of exoplanetary atmospheres with direct observing instruments,” Astronomy & Astrophysics, 査読有, 599 A56, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾太郎 (MATSUO, Taro)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 00548464

(2) 研究分担者

入部正継 (IRIBE, Masatsugu)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号: 60469228

Olivier Guyon

すばる望遠鏡・RCUH 職員

研究者番号: 90399288

(3) 連携研究者

小谷隆行 (KOTANI, Takayuki)

国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・助教

研究者番号：40554291

村上尚史 (MURAKAMI, Naoshi)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：40554291