

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03719

研究課題名（和文）分割主鏡望遠鏡での直接撮像による木星類似型太陽系外惑星の特性観測

研究課題名（英文）Characterization of Jovian Exo-Planets by Direct imaging with a Segmented Mirror Telescope

研究代表者

長田 哲也（NAGATA, Tetsuya）

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：80208016

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,700,000円

研究成果の概要（和文）：夜空に輝く恒星を惑星が回っているという証拠は見つかってきているものの、実際にこういった「太陽系外惑星」を撮像するには、中心の恒星の非常に強い光に負けずに高いコントラストで暗い惑星をくっきりと浮かび上がらせる装置が必要である。それに必要な技術として、センサと光の波面の制御装置からなる、大気のゆらぎを打ち消すための光学系を開発することが出来た。岡山のせいめい望遠鏡に搭載して試験をさらに繰り返す予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光を焦点面で回折させその干渉を用いて、大気のゆらぎを高速に精度よく測定し計算し、その結果を使って光学系の鏡を高速に精度よく歪めて補正し、非常にきれいな光の波面を得ることが出来た。この新しい方式は従来の大気のゆらぎの測定や補正よりも優れており、それを実証まで行えた。口径3.8 mのせいめい望遠鏡での観測および将来のもっと大きい望遠鏡での観測では直接撮像で生命の指標となるシグナルを得ることにつながるものである。

研究成果の概要（英文）：The direct imaging of extrasolar planets, which are found to be revolving around night-time stars, is technically very challenging. It needs a high-contrast imaging system to detect planets extremely fainter than their host stars. A new optical system has been developed to correct atmospheric turbulence with sensors and wavefront controllers, which is scheduled to attach to the Seimei Telescope in Okayama for its further refinement.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：赤外線天文学 太陽系外惑星探査 直接撮像観測 装置開発 極限補償光学 FPGAによる多入出力で高速な制御 光学的波面形状の直接計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

夜空に輝く恒星の周りに惑星が存在する証拠が 1995 年に見つかった以来、当時でも 3000 個以上の太陽系外惑星の証拠が知られていた。しかしながら、直接撮像によって惑星からの光や赤外線をとらえた観測は多く見積もっても数十以下で、生命が存在しそうな惑星に対しては皆無とあって良かった。

次のマイルストーンは、地球型惑星を直接撮像して生命指標 (酸素の大気を持つなど、生命由来のシグナル) を検出することである。そのためには、中心の恒星からの光を、安定して高精度に除去する光学・制御・データ処理など種々の先進技術が必要である。

各要素技術の開発と、それらをまとめ上げて将来の 30 m 級の巨大な地上望遠鏡に搭載すれば上記が達成可能な実証モデルとしての惑星直接撮像装置を製作することが、本研究の第一の目的であった。

さらに、そのプロトタイプ装置を京都大学の 3.8 m 望遠鏡に搭載して、長期間・高頻度観測を行い、これまで観測できなかった惑星の様々な特性を解明することを目指した。

2. 研究の目的

本研究では、(1)京大岡山 3.8 m せいめい望遠鏡に搭載する太陽系外惑星撮像装置の開発とその装置を用いた 0.2 秒角離れた木星質量の惑星の検出および軌道運動や大気構造の測定、(2)「第二の地球」検出を目指した将来の超大型望遠鏡に搭載される惑星撮像装置に繋がる技術開発の 2 つを目的としている。

恒星の近傍に存在する太陽系外惑星を撮像観測するためには、暗い惑星からの光を検出する高い感度と、恒星と惑星を分離するための高い角分解能、そして明るい恒星と暗い惑星の大きな光度差を解決する必要がある。感度と角分解能に関しては、一定以上の口径を持つ望遠鏡で克服できるが、光度差の解決には高コントラスト装置が必要になる。本研究では、(1)として惑星撮像を行うために、多入出力に対応した高速で高精度な波面制御を行う高コントラスト撮像装置を開発する。これにより(2)の将来の大型望遠鏡の撮像装置へと発展可能な先進的な技術を得る。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために高コントラスト撮像装置を以下の 4 つの項目に分けて開発した。

(1)極限補償光学系、(2)高精度温調チャンバー、(3)分割主鏡対応系、(4)装置全体光学系である。これらの装置を組み合わせることで望遠鏡開口を 492 分割した制御点で 5 - 10 kHz のループ制御が可能となり、コロナグラフを用いた太陽系外惑星の撮像観測が可能となる。

(1) 極限補償光学系はさらに Field Programmable Gate Array(FPGA)制御装置と点回折干渉型波面センサ、低次補償光学系で構成されている。

(1) FPGA 制御装置は、本研究の多入出力、高速制御をになう装置である。従来は安価な PC 制御か、高速な専用回路による制御が主流であったが、前者は装置間の信号変換遅延、後者は実装後のアルゴリズム変更など最適化や改善に難点がある。一方 FPGA は PC のような遅延は少なく、また専用回路よりも容易に実装を変更出来るため柔軟に制御アルゴリズムの更新や最適化を行える。

(1) 点回折干渉型波面センサは従来の波面センサと比べ少ない光子数で波長の 20 分の 1 の計測が可能で、本観測装置における高速なループ制御でも十分な波面計測が可能になる。

(1) 低次補償光学系は極限補償光学系に組み込む前段の補償光学装置であり、88 箇所制御点で 1 kHz のループ制御を行い、の波面センサがの高速制御下でも動作出来るよう波面を大まかに制御する。

(2) 高精度温調チャンバーは温度変化による極限補償光学系への影響を抑制するために装置全体を保温するための装置である。断熱材による気温変化の抑制と、水冷定盤をもちいた光学系からの廃熱処理および観測中に温度変化を ± 0.1 度に抑制を行う。

(3) 京大岡山 3.8 m せいめい望遠鏡の主鏡は 18 枚の分割鏡で構成されている。そのため分割鏡間のギャップで生じる散乱光や鏡面のズレで生じる位相ずれなどを補正する必要があり、これらを分割主鏡対応系で対処する。

(4) その他、望遠鏡が経緯台式であるため装置を設置するナスミス焦点では観測が進むに従って視野が回転してしまうためそれを補正する視野回転光学系や、地球大気による色分散を補正する大気分散補正光学系など装置全体光学系が必要である。

以上の 4 つの項目を組み合わせコロナグラフによる高コントラスト観測が可能な装置を開発した。

これらのうち(1) FPGA 制御装置と(1) 点回折干渉型波面センサは新たに天文分野に導入される技術であり、将来の大型望遠鏡の撮像装置が要求する性能を満たす性能をもちうるようにするため、その性能評価も行う。

4. 研究成果

本研究によって(1)FPGA 制御装置と(2)点回折干渉型波面センサの開発がそれぞれ進み、(3)これらを組み合わせて極限補償光学系を構成し、性能評価試験を行えるようになった。

(1) 8×8 の領域のうち 52 箇所まで従来の波面センサによる測定と可変形鏡による波面補正を行った場合、従来の汎用コンピュータ(PC)を用いた場合は 900 Hz が最大のループ制御速度であった。

これは波面センサから 52 素子分のデータの読出しに 1100 マイクロ秒かかるためである。その他、波面情報から可変形鏡の制御量の計算にかかるのは 100 マイクロ秒程度であるが、波面センサから PC へのデータ変換に 300 マイクロ秒かかっており、現在の波面センサより高速で読出しが可能なカメラであっても最大で 2.5 kHz が限界となることがわかった。

本研究で開発した FPGA を用いると後述する点回折干渉型波面センサでの波面測定による計算が複雑になったが、24×24 の領域のうち 492 箇所での制御量の計算で 65 マイクロ秒に短縮出来、データ変換はほぼ遅延なしになった。

データ読出しが高速で行えた場合、最大で 15 kHz のループ制御が可能になる。これは世界最速級であり、将来の大型望遠鏡での撮像装置に搭載されうる性能である。

(2) 点回折干渉型波面センサでは天体からの光子を効率的に利用するために、当初点回折素子にワイヤグリッド型の偏光分離素子を想定して開発を進めていた。

しかしこの形式では十分な偏光分離度が得られないことがわかったため、新たに複屈折を用いた手法を考案した。

これらの原理実証、及び点回折素子の製作、加工を行い、仕様通りの光子数での波面測定精度を達成する波面センサを構成出来た。(Fig.1, Fig.2)

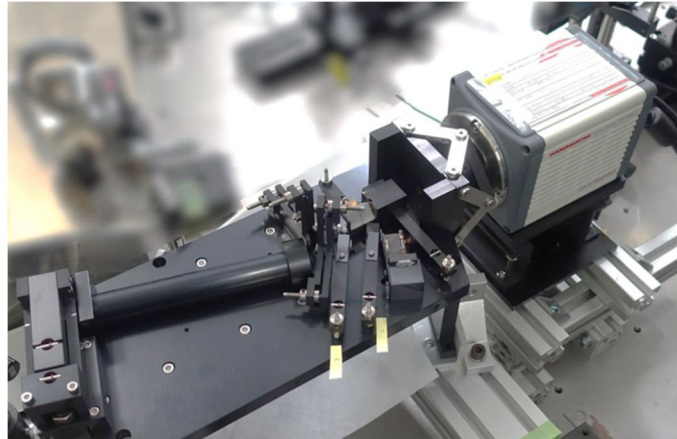


Fig.1 点回折干渉型波面センサの実機。
写真で左下方に変形可能鏡があり、そこから位相をわずかにずらしたビームを入れて右の撮像センサで試験する。

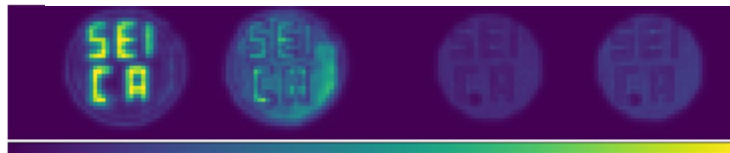


Fig.2 その結果得られた像。

(3) 上述の FPGA 制御装置と点回折干渉型波面センサを組み合わせると極限補償光学系を構成出来るようになった。現在では波面センサのデータを読出しながら動作試験を行っている。

現時点で確認されている FPGA の制御速度とアルゴリズム、波面センサ実機で計測された測定ノイズから到達可能な性能を評価したところ、コロナグラフと組み合わせることで恒星から 0.2 秒角の距離で 10^{-3} から 10^{-4} のコントラストを達成できる見込みであり、本研究の目的である 0.2 秒角離れた木星質量の惑星を検出するのに必要な性能を達成できると予想される。(Fig.3)

上述した極限補償光学系は現時点では望遠鏡に搭載して直ちに観測を進めていく段階ではないが、近いうちに京大岡山 3.8 m せいめい望遠鏡に搭載し、天体を導入して試験観測が行えると見込まれる。

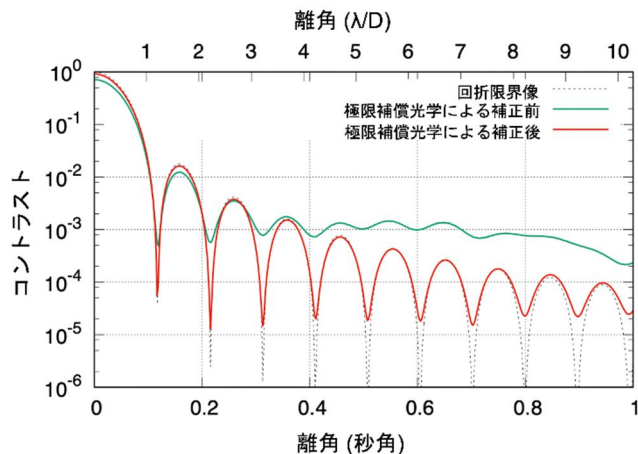


Fig.3 制御速度と測定ノイズから見積もった、今回の極限補償光学による補正パターン(赤い曲線)。回折限界の場合(薄い黒の点線)と同様に、きれいな周期が遠方まで実現している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Tsukui Ryo, Kino Masaru, Yamamoto Kodai, Kurita Mikio | 4. 巻 59 |
| 2. 論文標題 Point-diffraction interferometer wavefront sensor with birefringent crystal | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Optics | 6. 最初と最後の頁 8370 ~ 8370 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.397735 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 津久井遼、木野勝、山本広大、栗田光樹夫(京都大学)、松谷晃宏(東京工業大学) |
| 2. 発表標題 点回折干渉計方式を用いた補償光学用波面センサの開発 (V245b) |
| 3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大谷拓也(阪電通大), 入部正継(阪電通大) |
| 2. 発表標題 天体望遠鏡のための補償光学装置の開発(11207) |
| 3. 学会等名 関西学生会 2020 年度学生員卒業研究発表講演会 / 日本機械学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大谷拓也(阪電通大), 高橋陸(阪電通大), 入部正継(阪電通大), 山本広大(京都大), 木野勝(京都大), 栗田光樹夫(京都大) |
| 2. 発表標題 天体観測のための補償光学装置の性能改善(sf38-sp0026) |
| 3. 学会等名 センシングフォーラム・ポスターセッション / 制御機械学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 津久井遼、木野勝、山本広大、栗田光樹夫（京都大学）、松谷晃宏（東京工業大学） |
| 2. 発表標題 せいめい望遠鏡での極限補償光学に向けた波面センサの開発 |
| 3. 学会等名 赤外線学会第88回定例研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山本広大、津久井遼、木野勝、栗田光樹夫、長田哲也（京都大）、入部正継、藤田勝（大阪電気通信大）、小谷隆行（Astrobiology Center/国立天文台）、河原創（東京大）、村上尚史（北海道大）、田村元秀（東京大/Astrobiology Center/国立天文台） |
| 2. 発表標題 せいめい望遠鏡搭載にむけた太陽系外惑星撮像装置の開発 |
| 3. 学会等名 2019年天文学会秋季年会（熊本大学） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 村上尚史、米田謙太（北海道大）、黒田真之佑（北海道大/スタンレー電気）、河合研弥（北海道大/パナソニック）、山本広大（京都大）、小谷隆行（Astrobiology Center/国立天文台）、河原創（東京大）、馬場直志（北海道大）、田村元秀（東京大/Astrobiology Center/国立天文台） |
| 2. 発表標題 せいめい望遠鏡搭載に向けたコロナグラフSPLINEの開発状況 |
| 3. 学会等名 2019年天文学会秋季年会（熊本大学） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤田勝、入部正継（大阪電気通信大学）、山本広大、木野勝、栗田光樹夫（京都大学） |
| 2. 発表標題 せいめい望遠鏡にむけた極限補償光学の開発：制御アルゴリズム開発のためのシミュレータ |
| 3. 学会等名 2019年天文学会秋季年会（熊本大学） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 入部正継, 藤田勝 (大阪電気通信大学), 山本広大, 木野勝, 栗田光樹夫 (京都大学) |
| 2. 発表標題 せいめい望遠鏡にむけた極限補償光学装置の開発: FPGAによる制御装置の実現 |
| 3. 学会等名 2019年天文学会秋季年会 (熊本大学) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 津久井遼, 山本広大, 木野勝, 栗田光樹夫 (京都大学) |
| 2. 発表標題 点回折干渉計方式を用いた補償光学用波面センサの開発 |
| 3. 学会等名 2020年天文学会春季年会 (筑波大学) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 入部正継, 藤田勝, 山本広大, 木野勝, 栗田光樹夫 |
| 2. 発表標題 極限補償光学装置の開発: FPGA を使用した制御装置の開発 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤田勝, 入部正継, 山本広大, 木野勝, 栗田光樹夫 |
| 2. 発表標題 極限補償光学装置の開発: 実験とシミュレーションによる制御装置開発 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西岡秀樹, 木野勝, 山本広大 |
| 2. 発表標題 極限補償光学装置の開発: 直接位相計測型波面センサの開発 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤田勝, 入部正継, 山本広大, 木野勝, 栗田光樹夫 |
| 2. 発表標題 補償光学系に内包される制御系シミュレータの開発 |
| 3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤田勝, 入部正継, 山本広大, 木野勝, 栗田光樹夫 |
| 2. 発表標題 制御系シミュレーションによる補償光学装置の性能評価 |
| 3. 学会等名 第19回計測自動制御学会SI部門講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究 分担者 | 松谷 晃宏 (MATSUTANI Akihiro) (40397047) | 東京工業大学・オープンファシリティセンター・主任技術専門員 (12608) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 入部 正継 (IRIBE Masatsugu) (60469228) | 大阪電気通信大学・工学部・教授 (34412) | |
| 研究分担者 | 山本 広大 (YAMAMOTO Kodai) (70738319) | 京都大学・理学研究科・研究員 (14301) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |