

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286073

研究課題名(和文) 光干渉計技術の応用による太陽系外惑星探査用高コントラスト光学系の研究

研究課題名(英文) Study of the high-contrast imaging optical system for exoplanet search with the optical interferometric techniques

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、将来の地球型惑星直接撮像に向けた高コントラスト撮像システムとして、瞳再配置法による高精度波面測定技術を提案し、これを実現するための分割鏡の開発を行った。分割鏡としてガラス製六角柱端面を高精度に斜め研削・研磨する方法を開発し、対辺長さ2mmと非常に小さいガラス六角柱にもかかわらず、高い精度で鏡面を製作することに成功した。これにより6素子瞳再配置の実現に目途を付けた。一方、より多素子に対応するために、ガラス製六角形型鏡と分割型可変形鏡を組み合わせるといった新たな手法を考案し、実現性が高いことを確認した。

研究成果の概要(英文)：We studied a novel high-contrast imaging technique, i.e. Pupil Remapping, to search for Earth-like planets and developed a segmented mirror system to realize this technique. As a segmented mirror, we fabricated small hexagonal glass mirrors with tilt by the special grinding and polishing technique. Despite its small size (2mm side-to-side distance), we successfully achieved high surface accuracy mirror and it enables us to realize a 6-element pupil remapping system. In addition, for a larger number of a segmented system, a new concept is shown by a combination of a hexagonal glass mirror and segmented deformable mirrors.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：系外惑星 瞳再配置

1. 研究開始当初の背景

1995年に太陽系外の惑星(系外惑星)が初めて発見されて以来、これまでに1600個以上の系外惑星が見つかった。そのほとんどが間接的な方法による発見であり、惑星を直接空間的に分解して、直接その光を観測した例は、木星より数倍以上重く例外的に発見しやすい惑星のみである。よって系外惑星、特に地球に似た惑星の直接撮像を行い、生命の指標となる特徴をその大気中に発見することは、現代天文学における最大の課題の一つとなっている。

しかし、地球型惑星の直接検出は非常に難しい。その理由は、恒星より8桁以上も暗い惑星がその恒星のごく近くを公転しているからであり、惑星の光は、恒星の回折光や大気揺らぎによる散乱光に容易に埋もれてしまう。これまで、光の干渉や回折などの性質を利用して、恒星の回折光を抑えて埋もれていた惑星の光を検出するコロナグラフと呼ばれる手法が盛んに研究されているが、結局は大気揺らぎで生じる波面誤差がコロナグラフの性能を制限し、コントラスト(恒星の明るさとノイズレベルの比)は上がらない(図1)。

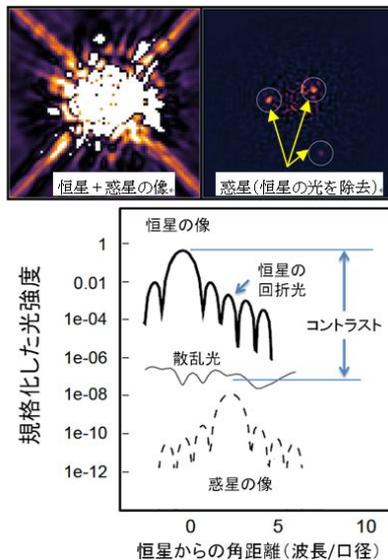


図1:(上)恒星HR8799とその惑星。通常惑星は恒星の光に埋もれて見えない(下)恒星・惑星の明るさ、コントラスト、散乱光の強さを表す模式図

よって惑星の直接撮像には、大気揺らぎの影響を取り除き、恒星の散乱光を極限まで減らすことが重要である。そのために近年盛んに用いられているのが、リアルタイムで波面形状を測定し、可変形鏡を用いたフィードバック制御により大気揺らぎを補正する、補償光学である。中でも惑星探査に特化した、極めて高精度に波面補正を行う極限補償光学が検討されているが、8桁というコントラストでの撮像を行うには、波面誤差を数nm以下に抑える必要があり、既存の技術では実現は極めて困難である。

2. 研究の目的

このような背景のもと、我々は太陽系外の地球型惑星を直接検出するために、全く異なるアプローチを考案した。これは補償光学による波面補正に全てを頼るのではなく、乱れた波面を極めて高い精度で測定し、その情報を元に恒星の散乱光から惑星の光を分離するというものである。そして十分な検討を重ねた結果、コロナグラフによって恒星の回折光を弱め、残った散乱光を高精度波面測定から、データ処理によって取り除くという、2つの方法を組み合わせる新しい手法を考案するに至った。図2にこのコンセプトの概念図を示す。本研究の目的は、これを実現するための、瞳再配置法とそのための高精度分割鏡の開発を行うことである。本研究で提案する光技術により、太陽系外の「第2の地球」の発見に大きく近づく。これは天文学的に重要であるだけでなく、人類の世界観を変えるものである。

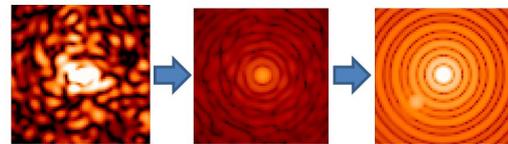


図2: NuII型干渉計+瞳再配置法による高コントラスト撮像の概念図。左は大気乱れによる像、中央はコロナグラフによる恒星光の除去、右は瞳再配置によるスペックル除去後の像を示す。

3. 研究の方法

これまでの波面測定・像再生方法は、様々な要因(波面測定と撮像系が別のために生じる非共通光路誤差、恒星光のショットノイズ、冗長性ノイズなど)を解決できず、4桁以上のコントラストを得ることが困難であった。本研究は、以下に挙げるような特色・独創性により8桁以上のコントラストを実現する。

(1) 瞳再配置法による高精度波面測定

瞳再配置法は、コロナグラフで消しきれずに残った光(恒星+惑星光)の波面形状を高精度に測定し、入射波面に含まれる天体の情報引き出して高コントラストで像再生を行う方法である。これは干渉計を用いた開口合成による像再生法であり、入射開口の配置を特殊な光学系によって組み替えることにより(図3)従来のスペックル干渉法で問題となる冗長性ノイズ(重複する空間周波数を持つ干渉縞により生じる)や、開口マスクング法のような光の損失がないため、格段に多くの天体の空間情報を得られる。そのため本質的に高コントラストの像再生(5桁程度)が可能である。また波面測定と像再生を同じ光学系で行うため非共通光路誤差もない。最終的には、コロナグラフ(3桁)+瞳再配置法

による像再生（5桁）の2段構成で、系外地球型惑星の撮像に必要な8桁のコントラストを達成することが可能になる。

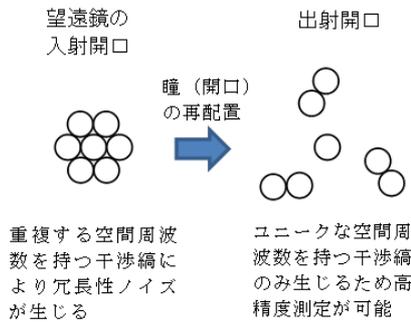


図3：瞳再配置法の原理

(2) 分割鏡による瞳再配置法の実現

本研究で提案する高コントラストでの撮像に不可欠な瞳再配置は、複数の分割鏡を組み合わせることで実現する。具体的には、第1の分割鏡群により、入射瞳を分割しそれぞれ異なる方向へと光を反射させ、第2の分割鏡群により、光を平行光に戻し再配置を完了させる。これを行うための分割鏡は、ガラス製六角柱の端面を斜め研磨することで製作し、所定の場所に精密に配置することが求められる。

4. 研究成果

分割鏡は、ガラス製六角柱（長さ20mm、六角形対辺長さ2-4mm）の端面を研削・鏡面研磨することで各素子を製作し、基板に配置することで実現する。これを実現するためには、六角形型鏡端面の面精度・面荒さ・斜め研磨の角度、そしてこれらを精度よく基板に配置することが重要である。

(1) 光学設計

瞳再配置用の分割鏡光学設計について詳細な検討を行い、カセグレンタイプの望遠鏡と似た配置を取ることで、コンパクトな光学設計を実現した。望遠鏡副鏡に相当する部分に、入射した平行光を分割し光を様々な方向に飛ばすための第1の分割鏡群を配置し(M1)、次に主鏡部分に、M1からの光の角度を平行に戻す第2の分割鏡群(M2)を置くことで瞳再配置を行う。これにより当初想定していた軸外し型光学系よりも格段にコンパクトなシステムとなり、かつ個々の分割鏡の傾きを小さくすることが可能である。この設計を元に、具体的に瞳再配置光学系の分割鏡の仕様を決定した。

(2) 六角形型分割鏡の製作

六角形型鏡はサイズが非常に小さいため（対辺長さが2-4mm）通常の方法では研削・研磨が難しい。そのため、最初に市販の光学用ガラス六角柱を用いて、傾きのない平面の加工テストを行った。その結果、面荒さ・ふちダレ（六角柱端面フチ部分に残る研磨でき

ない領域）を小さくすることについては、十分な精度で達成できることを示した。面精度については、球面成分が少し残るものの、研磨の条件出しに時間をかければ取り除くことができると予想された。

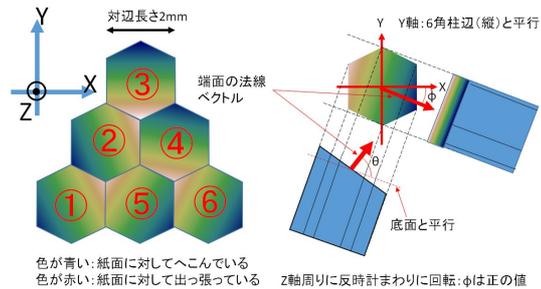


図4：6素子瞳再配置鏡の配置・鏡の傾き

次に斜め鏡面研磨とそれに続く鏡の精密配置のために、寸法・各面の角度公差が小さいガラス六角柱（端面斜め研磨前）の製作を行った。これにより、各辺の長さ・面の平行度の精度がそれぞれ $\pm 1\mu\text{m} \cdot 1$ 分角、面精度 $\lambda/2$ PV ($\lambda=633\text{nm}$)という、極めて高精度なガラス六角柱を製作することができた。

続いて、この精密六角柱の端面を所定の角度で斜めにカットし研磨する加工を行った。図4に実際に製作した六角形型鏡の配置と傾斜方向の例を示す。カットする方向・角度を保証するために、精密な治具でガラスを保持し、またレーザー測距計にて位置を測定しながらの研削・研磨加工を行った。その結果、傾き・面精度・面荒さ共に仕様を満たす六角柱型鏡を製作することに成功し、面精度は約10-18nm rms、面荒さは約3nm Raであった。加工の難しい極小の鏡というのを考えると、非常に高い精度で製作ができたと言える。図5に加工後の端面の面形状・面荒さを示す。これにより6素子分割鏡の第1群を製作することができた。第2群については後述するよう平面鏡を配置することで実現する。

(3) 六角形型分割鏡の精密配置・接着

ガラス六角柱を精度良くガラス基板に設置・接着する手法についての実験を行った。六角柱は、精密加工された金属製の治具を用いることで所定の位置・角度で基板に配置される。接着の際に接着剤が硬化するまでの間、六角柱が基板に垂直に自立していることが重要であるが、ガラス基板の貫通穴直上に六角柱を配置し、穴から空気を抜くことで、大気圧により基板上に押し付ける手法を考案した。実際に金属製の治具を用いた簡易な実験系を構築し、ガラス六角柱が自立することを示した。しかしながら、接着剤が硬化する際に位置ずれが生じるため、精度良く所定の位置に固定することは難しいことがわかった。接着箇所は微細なため確認が難しく、位置の調整が正確にできないことが原因である。

この問題を解決するためには、以下の方法を考案した。瞳再配置を行うには、第1・第2の六角形型鏡群それぞれ6個を組み合わせ、第1群鏡で傾いた光線の向きを、第2群鏡で平行光に戻す必要がある。当初は、両方とも端面を斜め研磨した六角形型鏡を使用する予定であった。しかし第2群鏡は各々の鏡の間隔が広いので、製作が容易な端面に傾きがない六角形型鏡全体を傾斜させ、斜め研磨鏡と同様の機能を持たせるといった新しい着想を得た。個々の鏡を傾けるのは、鏡を支持する部品を動かすことによって行う。これによりこれにより鏡に対する製作許容誤差を緩和させ、また接着による位置変動の影響を取り除くことができる。第1群鏡はそれぞれの鏡

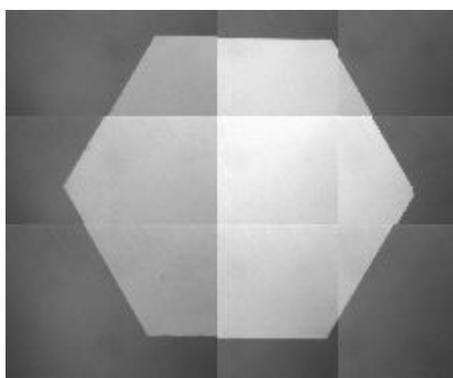
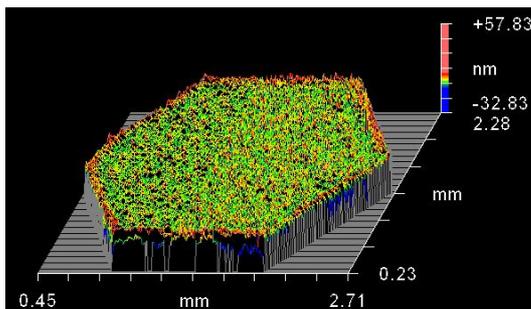
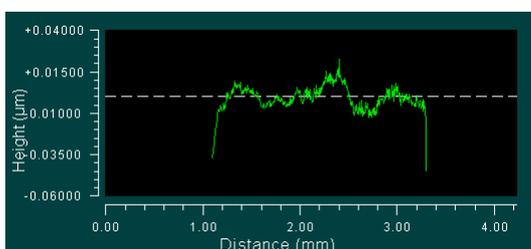
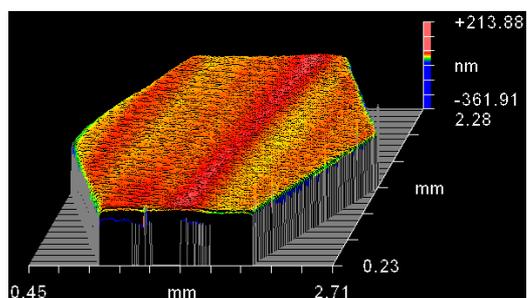


図5：製作したガラス六角形型鏡の端面。上から面精度（3次元表示と1次元カット）、面荒さ、端面の写真を示す。対辺長さは2mmである。

を密着させて固定することができるため、位置ずれの問題は回避できる。

(4)より多素子の分割鏡開発

瞳再配置により高コントラスト撮像を行うには、分割する瞳の数を増やし天体情報をより精密に測定することが重要である。ガラス製六角形型鏡を複数配置する方式は、検討・実証実験の結果、6素子程度の小規模な系であれば実現可能であるが、現実的な鏡やホルダーの製作精度、接着による位置ずれなどを考慮すると、系外惑星探査に必要な36素子といったより複雑な系に対応することが難しいことがわかった。そのため抜本的な方式の再考が必要となった。

そこで36素子分割鏡を実現する方法として新たに、ガラス製六角形型鏡と、2つの分割式可変形鏡（以下セグメント Deformable Mirror, DM）を組み合わせるといった着想を得た。第1群鏡として36素子セグメントDMを、第2群鏡として、第1群鏡で広がった光線の向きを平行光に戻す86素子セグメントDMを配する。またセグメントDMだけでは補正できない光路長差は、ガラス製六角形型鏡を別途設置して補正する。加えてDMは各鏡の傾き・ピストンを独立に制御できるため、ガラス製六角柱型鏡の製作・設置位置誤差の影響を吸収することができること、DMにより再配置する瞳の形状をある程度任意に変更できるため、求められるコントラストや天体の構造に最適な形状を選ぶことができるという利点がある。一方で、第2群鏡として86素子セグメント鏡を用いると、36に分割された瞳を完全に非冗長な配置にすることができない。これを解決するには、86素子セグメントDMによって、使用するセグメントを短時間で切り替えることで、完全に同時ではないが、実質的に非冗長な36素子相当の干渉縞を得ることができる。これらの検討を行い、実際に機能する可能性が高いことを確認した。

ガラス六角形型鏡の製作や接着固定方法の検討などに時間を要したため、これらを用いて5桁のコントラストを達成するには至らなかったが、技術の核となる部分の開発に成功したこと、明らかになった問題を回避するための新たなアイデアにより、最終的な目標達成の可能性は高いと思われる。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

宇田 豊 (Uda Yutaka)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：00434803

栗田 光樹夫 (Kurita Mikio)
京都大学・理学系研究科・准教授
研究者番号：20419427

(3) 連携研究者

村上 尚史 (Murakami Noshi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：80450188

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

田村 元秀 (Tamura Motohide)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：00260018