

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287026

研究課題名(和文) 瞳再配置光学系を用いた広帯域高コントラスト偏光観測システムに関する研究

研究課題名(英文) Study on an achromatic high-contrast polarimetric astronomical observation system using a pupil-remapping optics

研究代表者

村上 尚史 (Murakami, Naoshi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80450188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系外惑星(太陽以外の恒星がもつ惑星)の直接観測を目指して、観測の妨げとなる明るい恒星光を強力に除去する高コントラスト観測技術の開発を行った。我々は、新たな高コントラスト観測技術(焦点面位相マスクコロナグラフのための瞳再配置光学系、スペックルデコリレーション処理にもとづく偏光観測技術など)を提案し、計算機シミュレーションおよび室内実証試験による性能評価を行った。その結果、太陽系外惑星観測に最適化されていない一般的な望遠鏡であっても、提案した観測システムにより強力に恒星光が除去できることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：For directly detecting extrasolar planets (planets orbiting around stars other than the Sun), we developed a high-contrast astronomical instrument to strongly reject bright starlight which is obstacle to detection of faint planetary light. We proposed new high-contrast techniques (a pupil-remapping optical system for focal-plane phase-mask coronagraphs, a polarimetric technique based on speckle decorrelation method, and so on), and carried out computer simulation and laboratory demonstration to evaluate the performance of the proposed techniques. Results of the computer simulation and the laboratory demonstration suggest that the proposed techniques can strongly reject bright starlight even when using a telescope which is not optimized for observations of extrasolar planets.

研究分野：天文光学

キーワード：光赤外線天文学 応用光学・量子光工学 太陽系外惑星 コロナグラフ 偏光

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星（太陽以外の恒星がもつ惑星、以後「系外惑星」）の研究は、現代天文学における重要なテーマの一つである。1995年の第一発見以来、これまでに1000個以上の系外惑星が見つかった（研究開始当初、現在では3500個を超えている）。そのほとんどは、視線速度法やトランジット法など、「間接的な」観測手法（恒星の観測データから、惑星を検出する手法）によるものである。近年では、数木星質量程度の巨大惑星が「直接」観測され、大きな話題となっている。

系外惑星研究の究極のマイルストーンは、地球型惑星を直接観測し、詳細な分析（キャラクターゼーション）により生命の痕跡を発見することであろう。しかしながら、地球型惑星を直接観測するためには、惑星光と恒星光の 10^{10} 倍もの莫大な強度比（コントラスト）を克服する必要がある。そのため、恒星光を強力に除去する高コントラスト観測システムの開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

このような研究背景を踏まえて、本研究課題の目的は、「焦点面位相マスクコロナグラフ」を軸とした高コントラスト観測システムを開発することである。これにより、既存の地上大型望遠鏡や将来のスペース望遠鏡での、地球型系外惑星の直接観測を目指す。

焦点面位相マスクコロナグラフとは、天体像が形成される望遠鏡焦点面において、光波の位相を制御するデバイス（位相マスク）により、恒星光のみを強力に除去する観測装置である。焦点面位相マスクコロナグラフは、望遠鏡瞳が円形の場合、理論上、恒星光を完全に除去することが可能である。しかしながら、一般的な望遠鏡は副鏡による中心遮蔽をもち（後述、図2a参照）それが原因で恒星光を十分に除去することができない。そこで、コロナグラフに最適化されていない一般的な望遠鏡でも恒星光を強力に除去するため、新たに「瞳再配置光学系」を提案した。本研究課題では、計算機シミュレーションおよび室内実証試験を通じて、提案する観測技術の性能評価を行う。

さらに我々は、系外惑星を詳細に分析するための手法として、偏光観測に着目した。可視から近赤外域における惑星光は、主に恒星光を反射散乱したものであるため、部分偏光であると考えられる。惑星の偏光特性を分析できれば、惑星大気や表層環境などの情報を得ることができる。さらに偏光観測では、無偏光である恒星光が除去されるため、コントラストのさらなる向上が期待できる。我々は、恒星光を効率的に除去するため、「スペックルデコリレーションに基づく偏光観測法」を

提案した。本研究課題では、焦点面位相マスクコロナグラフへの、偏光観測系の搭載を目指した技術開発を推進する。

3. 研究の方法

本研究課題で開発する観測システムは、焦点面位相マスクコロナグラフを軸に、瞳再配置光学系、偏光観測系から構成される。

焦点面位相マスクコロナグラフの原理を、図1に示す。第1瞳面に形成される望遠鏡瞳が円形である場合、第1焦点面における恒星像はAiryパターンとなる。この場所に、位相マスクを導入する。図1では例として、8分割位相マスク(Murakami et al., (2008), PASP, 120, 1112) および2次光渦マスク(Foo et al., (2005), Opt. Lett., 30, 3308; Mawet et al., (2005), ApJ, 633, 1191)を示している。望遠鏡瞳を再結像した第2瞳面では、恒星光が位相マスクにより瞳外側にすべて回折される。回折光を絞り（リヨストップ）で除去することにより、最終焦点面では恒星光が完全に除去される。

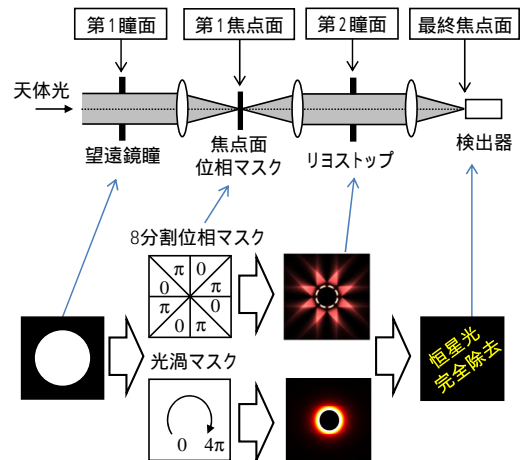


図1: 焦点面位相マスクコロナグラフの原理。

図2は、瞳再配置光学系を用いた焦点面位相マスクコロナグラフ（以後、「瞳再配置型コロナグラフ」）の原理を示す。一般的な望遠鏡瞳は理想的な円形ではなく、副鏡とその支持機構（スパイダ）の影を持つ（図2a）。この場合、コロナグラフにより恒星光を完全に除去することができない。そこでまず、副鏡とスパイダを避けるように4個の円形サブ開口を取り出す（図2b）。図2cは、4個のサブ開口に対して焦点面位相マスクコロナグラフを用いた際の、第2瞳面で得られる像の計算機シミュレーションである。焦点面位相マスクとして、2次光渦マスクを仮定している。図2cから分かるように、焦点面位相マスクを用いたとしても、サブ開口内に恒星光が漏れこんでしまい、コントラストの大幅な改善は見込まれない。そこで図2dのように、前置瞳再配置光学系により、サブ開口間の相対距離（サブ開口サイズで規格化した距離）

を広げる。瞳再配置光学系により、サブ開口内への恒星光の漏れこみが著しく低減され、結果として焦点面位相マスクコロナグラフのコントラスト性能が格段に向上する(図2e)。しかしながら、このままでは惑星像が乱されてしまうため、後置瞳再配置光学系を設置して瞳配置を元に戻す必要がある。

本研究課題では、提案した瞳再配置型コロナグラフの計算機シミュレーションによる性能評価、および原理実証実験を実施した。

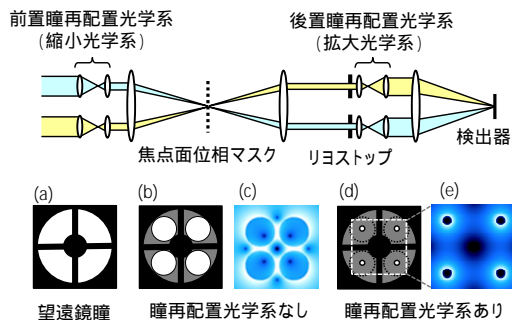


図2: 提案した瞳再配置型コロナグラフの原理。焦点面位相マスクとして、2次光渦マスクを仮定。

焦点面位相マスクコロナグラフの性能を劣化させるもう一つの要因は、使用する光学素子の収差に起因する光波面乱れである。コロナグラフに入射する光波面が乱されると、除去できない恒星光がスペckル状に現れてしまう。我々は、恒星スペckルを除去するアプローチとして、偏光観測に着目した。コロナグラフ装置に偏光観測系を搭載できれば、無偏光の恒星スペckルを除去できるだけでなく、偏光による惑星の詳細な分析が可能となる。我々は、恒星スペckルを効率的に除去するため、スペckルデコリレーションに基づく偏光観測法を新たに提案した。本研究課題では、提案する新たな偏光観測手法の開発を推進した。

4. 研究成果

コロナグラフに最適化されていない一般的な望遠鏡での恒星除去性能の向上を目指し、瞳再配置型コロナグラフのシミュレータを構築し、室内実証試験を行った。サブ開口間の相対距離を広げるため、当初はレンズによる縮小および拡大光学系を検討していた(図2)。しかしながら、レンズ系では波長依存性が問題となることが予想されるため、ミラー反射による瞳再配置光学系を採用した。室内シミュレータは、サブ開口間の相対距離を広げるため、プリズムミラーと平面ミラーから構成される(図3a)。図3bは、2個のサブ開口による予備実験の結果である。その後、4個のサブ開口による本実験も実施し、瞳再配置光学系によるコントラスト向上を実証することに成功した。

上述のように、光学素子により光波面が乱

されると、コロナグラフにより恒星光が完全に除去できず、スペckル状の恒星光が惑星観測を妨げてしまう。そこで、恒星スペckルをさらに除去するため、図4aに示す偏光観測系を検討した。コロナグラフ前段に偏光変調器を、検出器前に偏光分離素子を置くことによりXY偏光像を分離する。偏光変調器として、回転半波長板、液晶可変リターダ、さらに液晶空間光変調器を検討した。

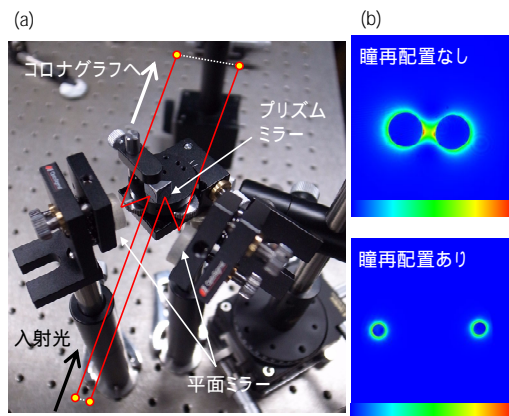


図3: (a) 構築した瞳再配置型コロナグラフの室内シミュレータ(瞳再配置光学系部分)。サブ開口間の相対距離を広げた後、コロナグラフへと送られる。(b) 室内実証試験で得られた第2瞳面の像(2個のサブ開口による予備実験)。

偏光観測系により、恒星スペckルをさらに低減できると期待される。しかしながら、偏光変調器により光波面がわずかに変化してしまうため、恒星スペckルを完全に除去することができないと考えられる。この問題を解決するため、スペckルデコリレーションに基づく偏光観測法の開発を行った。これは、偏光変調器を動かしながら画像を積分することで、偏光変調に起因するスペckル成分をスムージングし、その影響を低減する手法である。本研究課題では、現実的な偏光変調器を想定し、得られるコロナグラフ像をジョーンズ行列解析により定式化した。その結果をもとに、さまざまな光波面乱れの条件下での偏光観測の計算機シミュレーションを行った。

図4b,cは、偏光観測の計算機シミュレーション結果の例である。スペckルデコリレーション処理を行わない場合、最終像(偏光差分像)には恒星スペckルが強く残ってしまう(図4b)。一方、スペckルデコリレーション処理を行った場合、恒星スペckルが強力に低減されている(図4c)。計算機シミュレーションにより、提案する偏光観測法の有用性が示唆され、また観測システムの光学収差が偏光観測性能にどのように影響するかの詳細な考察を行うことができた。

さらに、広い波長域にわたる系外惑星観測を目指し、焦点面位相マスクの広帯域化にも取り組んだ。具体的には、フォトニック結晶技術による広帯域位相マスクの開発を推進した。その結果、可視の広い波長域にわたり、

地球型惑星が狙える高いコントラストを実現できる設計解を見出しつつある。

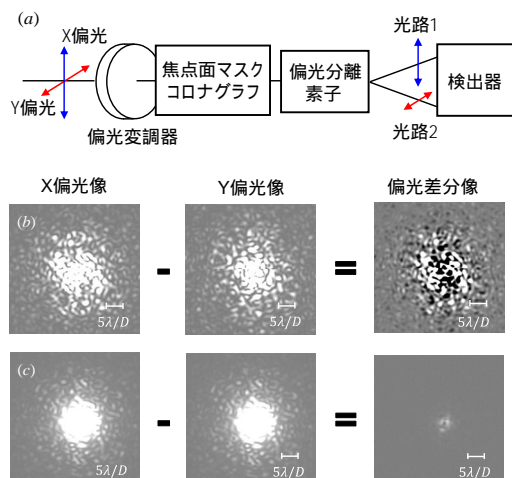


図4: (a) 焦点面位相マスクコロナグラフと偏光観測系の組み合わせた観測システムの概要。(b,c) 偏光観測の計算機シミュレーション。(b)はスペckルデコレーション処理を行わない場合、(c)は行った場合の結果。グレイスケールは、コントラストレベル 10^{-7} (白)から -10^{-7} (黒)を表示している。

また、偏光観測系のキーデバイスである液晶空間光変調器を活用し、「スペckルナリング技術」の開発も推進した。これは、液晶光変調器を用いた光波面制御により、コロナグラフで除去できない残留恒星スペckルをアクティブに補正する技術である。スペckルナリング技術は、地球型惑星の直接観測に要求される 10^{10} の極限コントラストを目指す上で必要不可欠な技術である。本研究課題により、新たなスペckルナリング技術の開発に着手できたことは、将来の地球型惑星探査において大きな意義があると考えている。

本研究課題で得られた成果により、系外惑星観測に最適化されていない一般的な望遠鏡でも高い恒星除去性能が得られる、高コントラスト観測システムの実現に向けた見通しを得ることができた。

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)

K. Yoneta, N. Murakami, T. Kotani, H. Kawahara, T. Matsuo, N. Baba, M. Tamura, 「Development of speckle nulling technique for the Savart-plate lateral-shearing interferometric nuller for exoplanets (SPLINE)」, Proceedings of SPIE, 9912 巻, 99126I 頁 (2016), 査読無
DOI: 10.1117/12.2231950
N. Murakami, J. Nishikawa, N. Akaiwa, Y. Komuro, N. Baba, M. Tamura, 「A three-layer eight-octant phase mask

towards broadband high-contrast observations」, Proceedings of SPIE, 9912 巻, 99126G 頁 (2016), 査読無
DOI: 10.1117/12.2231946

N. Jovanovic, F. Martinache, O. Guyon, C. Clergeon, G. Singh, T. Kudo, V. Garrel, K. Newman, D. Doughty, J. Lozi, J. Males, Y. Minowa, Y. Hayano, N. Takato, J. Morino, J. Kuhn, E. Serabyn, B. Norris, P. Tuthill, C. Schworer, P. Stewart, L. Close, E. Huby, G. Perrin, S. Lacour, L. Gauchet, S. Vievard, N. Murakami, F. Oshiyama, N. Baba, T. Matsuo, J. Nishikawa, M. Tamura, O. Lai, F. Marchis, G. Duchene, T. Kotani, J. Woillez, 「The Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics System: Enabling High-Contrast Imaging on Solar-System Scales」, Publ. Astron. Soc. Pacific, 127 巻, pp.890-910 (2015), 査読有

DOI 10.1086/682989

N. Murakami, J. Nishikawa, M. Tamura, E. Serabyn, W. A. Traub, K. M. Liewer, D. C. Moody, J. T. Trauger, O. Guyon, F. Martinache, N. Jovanovic, G. Singh, F. Oshiyama, H. Shoji, M. Sakamoto, S. Hamaguchi, K. Oka, N. Baba, 「Recent progress on phase-mask coronagraphy based on photonic-crystal technology」, Proceedings of SPIE, 9143 巻, 914334 頁 (2014), 査読無
DOI: 10.1117/12.2054790

〔学会発表〕(計 9 件)

米田謙太, 村上尚史, 小谷隆行, 河原創, 松尾太郎, 馬場直志, 田村元秀, 「太陽系外惑星の直接観測を目指したサブアール板横シヤリング・ナル干渉計のためのスペckル除去技術の開発」, 第 52 回応用物理学会北海道支部学術講演会, 2017 年 1 月 7 日発表, 北見工業大学(北海道北見市)

赤岩夏海, 村上尚史, 西川淳, 田村元秀, 小室佑介, 馬場直志, 「瞳再配置型光学系による位相マスクコロナグラフの実証実験 2」, 日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016 年 9 月 15 日発表, 愛媛大学(愛媛県松山市)

小室佑介, 村上尚史, 西川淳, 赤岩夏海, 馬場直志, 田村元秀, 「広帯域コロナグラフ観測を目指した 3 層 8 分割位相マスクの特性評価」, 日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016 年 9 月 15 日発表, 愛媛大学(愛媛県松山市)

N. Murakami, J. Nishikawa, N. Akaiwa, Y. Komuro, N. Baba, M. Tamura, 「A three-layer eight-octant phase mask towards broadband high-contrast」,

SPIE Conference: Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2016年7月1日発表, エジンバラ (英国)
K. Yoneta, N. Murakami, T. Kotani, H. Kawahara, T. Matsuo, N. Baba, M. Tamura, 「Development of speckle nulling technique for the Savart-plate lateral-shearing interferometric nuller for exoplanets (SPLINE)」, SPIE Conference: Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2016年7月1日発表, エジンバラ (英国)
村上尚史, 西川淳, R. Galicher, P. Baudoz, 小室佑介, 赤岩夏海, 馬場直志, 田村元秀, 「広帯域極限高コントラスト観測を目指した3層8分割位相マスクの開発」, 日本天文学会2016年春季年会, 2016年3月15日発表, 首都大学東京(東京都八王子市)
赤岩夏海, 村上尚史, 西川淳, 田村元秀, 馬場直志, 「瞳再配置型光学系による位相マスクコロナグラフの実証実験」, 日本天文学会2015年秋季年会, 2015年9月10日発表, 甲南大学(兵庫県神戸市)
村上尚史, 赤岩夏海, 馬場直志, 西川淳, 田村元秀, 「瞳再配置型位相マスクコロナグラフの提案」, 日本天文学会2015年春季年会, 2015年3月19日発表, 大阪大学(大阪府豊中市)
N. Murakami, J. Nishikawa, M. Tamura, E. Serabyn, W. A. Traub, K. M. Liewer, D. C. Moody, J. T. Trauger, O. Guyon, F. Martinache, N. Jovanovic, G. Singh, F. Oshiyama, H. Shoji, M. Sakamoto, S. Hamaguchi, K. Oka, N. Baba, 「Recent progress on phase-mask coronagraphy based on photonic-crystal technology」, SPIE Conference: Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2014年6月22日発表, モントリオール(カナダ)

研究者番号: 80450188

(2) 連携研究者

西川 淳 (NISHIKAWA, Jun)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 70280568

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

馬場 直志 (BABA, Naoshi)
北海道大学・ - ・名誉教授
研究者番号: 70143261

〔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 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 尚史 (MURAKAMI, Naoshi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教