

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13961

研究課題名（和文）太陽系外惑星の撮像データに適用する新たな画像処理法の開発

研究課題名（英文）Development of a new image processing system for direct imaging data of exoplanets

研究代表者

小西 美穂子 (Konishi, Mihoko)

大分大学・理工学部・講師

研究者番号：30780952

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000 円

研究成果の概要（和文）：太陽系外惑星の観測手法の1つとして撮像法がある。直接惑星光の情報を得ることができるが、主星近くの暗い惑星を検出することが難しい。そこで、撮像法で取得したデータセットに適用する処理法に着目する。従来のデータ処理法では積極的に活用できていなかった時間軸情報を活用して、暗い惑星の検出可能性をあげることが本研究の目的である。データ科学の手法を基盤としたプログラムを作成し、撮像法で取得された太陽系外惑星観測のデータセットに適用した。その結果、時間変動を効率的に取り出すことで、暗い天体の検出に高い有用性がある可能性を示した。しかし、主星近傍では主星光の低減が十分ではないため、今後改善を進める予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、データ科学の手法を天文の画像解析に適用し、太陽系外惑星の検出可能性をあげることを目的としている。本分野のデータ処理を専門とする研究者は非常に少ないため、有用な手法が開発できた際は、世界で使われることが期待される。また、今後TMTなどの超大型望遠鏡が稼働すると第二の地球の探査が始まる。本研究で開発した手法を適用することが可能であるため、次世代の惑星の調査にも貢献できると期待される。

研究成果の概要（英文）：Direct imaging is one of the observational methods to get exoplanet properties from the images and spectra, but it is hard to detect faint objects especially near a star. In this study, I focus on the data processing which is applied to the dataset taken by the direct imaging. This study tries to utilize the time information, which is not handled in the previous data processing, in order to improve the detectability of faint objects. I developed programs whose bases were image processing methods used in the data science field, and adapted them to the dataset of the direct imaging. As a result, I found that the new methods had a high possibility to detect faint objects efficiently. However, it was not sufficient to reduce the halo near the star currently. Additional considering will be done to improve it.

研究分野：撮像による太陽系外惑星・原始惑星系円盤の性質調査

キーワード：太陽系外惑星 画像処理

1. 研究開始当初の背景

太陽以外の恒星の周りをまわる惑星（太陽系外惑星）の存在が普遍的になり、それらの性質や特徴を調べることが精力的に行われている。その中でも、惑星自身の光を直接検出できる撮像法は、惑星スペクトルを取得できるため性質調査には欠かせない。撮像法は明るい主星の近くにある暗い惑星（コントラスト比： $\sim 10^8$ ）を検出するため、技術的な困難が多い。大気による揺らぎを補正する補償光学装置や明るい主星光を隠すためのコロナグラフマスクを用いて観測している。それとともに、ADI (Angular Differential Imaging) と呼ばれる観測手法（文献 1）に特殊な画像処理（LOCI: Locally Optimized Combination of Imaging^{文献 2}, や PCA: Principal Component Analysis^{文献 3, 4} など）を施すことでコントラストが 10^6 程度までの惑星を検出し、スペクトルを得ることに成功している。しかし、木星サイズ以下の軽い（暗い）惑星の直接検出には未だ至っていない。さらに、惑星が存在すると考えられる主星近傍（ $< 約 0.5$ 秒角、典型的には $< 数十 au$ ）では、主星光の影響を十分に低減することができておらず、惑星光の判別が難しい。主星に近いもしくは軽い惑星の性質を調べるためにも、主星近くで高コントラスト（ $\sim 10^8$ ）を達成できるような、新たな装置や画像処理が鍵となる。特に近年、統計学・機械学習・信号処理といったデータ科学の発展が目覚ましい。これらの手法を組み込んだ画像処理を行うことで、より暗い惑星の撮像に貢献できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、データ科学分野で使われている画像処理法（3. (1) 参照）を組み合わせ、直接撮像による太陽系外惑星探索データにおいて、主星近傍に位置する暗い惑星を検出できる新たな画像処理法を提案・開発することが目的である（図 1 参照）。主星に近い領域においてノイズリミットまでコントラストを向上することが最終到達点である。主星のシグナルをモデリングする場合は惑星由来のシグナルを不用意に減少させないこと、もしくは惑星由来のシグナルを効率的に抽出することが求められる。目標を達成して広く公開するために、以下の小目標を掲げた。

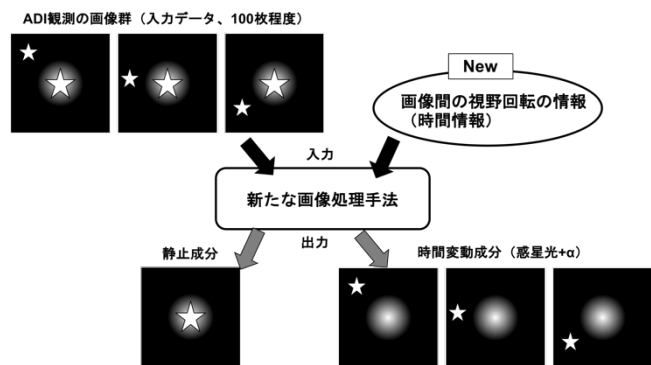


図 1: 本研究で開発を目指す画像処理手法の概念図

(1) 時間情報を取り入れた新たな画像処理法の開発（図 1 参照）

ADI 観測とは望遠鏡の瞳像を検出器面上に固定して観測する手法であり、望遠鏡の回折パターンや主星のハロー・スペckル成分は検出器面上に固定されて写る。一方、画像上の北の位置が時事刻々と変化するため、惑星や周りに見える天体は日周運動により主星を中心に回転移動をする。従来の画像処理手法（LOCI, PCA）は、検出器面上に固定されたシグナルのテンプレートを作成して差し引くことで、主星光を低減して惑星探索を行っていた。このような従来の手法ではデータセットの時間情報を用いていない。本研究ではこの時間情報を積極的に用い、データ科学の手法を適用することを目指す。開発した手法の有用性を示し、直接撮像による太陽系木星に相当する惑星（5 AU 程度にある 1 木星質量程度の惑星）の検出の実現を目指した。

(2) 世界中の望遠鏡・装置に簡単に適用できるようなコードを作成、公開

手法の開発が終了したのち、どのような望遠鏡・装置で取得された画像でも簡単に適用できるようなコードを作成し、広く公開する。

(3) アーカイブデータと開発したコードを用いた、未発見の惑星の探索

上記 2 項目が達成できた場合、世界中の望遠鏡で取得されたアーカイブデータが一様に扱える状態になる。これら過去のデータに開発した画像処理法を適用することで、現在まで検出できていなかった主星光やノイズに埋もれた惑星の発見を試みる。新たな惑星候補が見つかり次第随時、追観測を提案する。また、ここまでは惑星のような点源に注目してきたが、原始惑星系円盤のような空間的に広がった成分の抽出においても開発した手法が適用可能なものの検討も行う。

3. 研究の方法

まずは、主たる目標である 2. (1) を達成するために以下の手法で段階的に進めた。

(1) 軸となるデータ科学の処理手法の検討と準備

ADI データセットに対する処理手法として、現在は PCA が主に用いられている。しかし、

観測データにはさまざまなノイズや予期しないシグナル（回折パターンや宇宙線など）が含まれているため、PCA を適用することが適切である保証はない。データ科学の分野で昔から用いられているが、天文分野の画像処理にはまだ適用されていない手法2つに注目した。

1 つは ICA (Independent Component Analysis) である。PCA である程度の成果が見られているが、分解された主成分（画像）は物理的な意味を持たず、独立な成分である保証はない。ICA の特徴としては、分解された成分が直交しなくてもよいこと、成分が互いに独立であることが挙げられるため、より現実的に即した処理方法である。

もう 1 つは、SVD (Singular Value Decomposition) である。この手法はすでに動画にも適用されており、天球を移動する天体を抽出することに成功している（文献 5）ため、本研究のような観測手法によって擬似的に移動するように見える天体にも適用できると考えた。

(2) 模擬データを用いた新処理手法の有用性の検討

実際の観測データに含まれている統計性のないノイズによって手法のパフォーマンスが左右される可能性を考慮して、まずは ADI 観測を模擬したデータを作成して適用した。作成した模擬データには、簡易化のために主星や惑星を表したガウシアンを埋め込み、さらにランダムノイズを付与した。主星に対する惑星のコントラストやノイズの大きさを変化させて、上記 2 つの手法を適用して傾向を調べた。

(3) 観測データへの適用

明るめの伴星候補が検出されているデータセット（すばる望遠鏡に搭載された撮像装置 HiCIAO で観測した HIP 36624 の ADI 観測のデータセット。画像 289 枚。）に対して、(1) の画像処理手法を適用した。従来の手法（LOCI, PCA）と比較し、その性能を検討した。

4. 研究成果

(1) 軸となるデータ科学の処理手法の検討と準備

2 つの画像処理手法（ICA と SVD）を、ADI のデータセットに適用する基盤となる Python プログラムを作成した。(2)以降のデータを扱うために、二次元画像（前処理済み）を一次元行列に変換してそれぞれの手法を適用する。ICA では、主要な独立成分を線型結合した主星光のテンプレートを作成し、それを元のデータセットから差し引くことで主星光を低減した。また、SVD では時間変動成分を抽出するため、適用後のデータセットには主星光の低減は行われていると判断した。

(2) 模擬データを用いた新処理手法の有用性の検討

適用の結果、模擬データでは従来の手法と大差ないことが明らかになった。この模擬データセットには主星光の時間変動を入れていないため、ほぼ同等の性能が得られたと考えられる。すなわち、検討している処理手法は ADI 観測にも適用可能であることがわかった。

(3) 観測データへの適用

検討している処理手法を実際の観測データへ適用した。図 2 に SVD の適用結果と従来の手法（LOCI, PCA）の適用結果を示す。従来の手法では処理途中に伴星（惑星）シグナルの損失が生じるが、SVD では伴星シグナルの損失はほぼ生じない。これは時間変動している成分を抽出するという、SVD の特徴の影響であると考えられる。したがって、SVD は暗い伴星の検出により適していることが明らかになった。しかし、恒星の時間変動成分も残ってしまうため、主星近傍でコントラストを向上させることが難しいことが明らかになった。主星近傍では伴星シグナルの損失も大きいため、この手法の有用性について慎重に検討中である。また ICA に関しては PCA と大差ない結果が得られた。

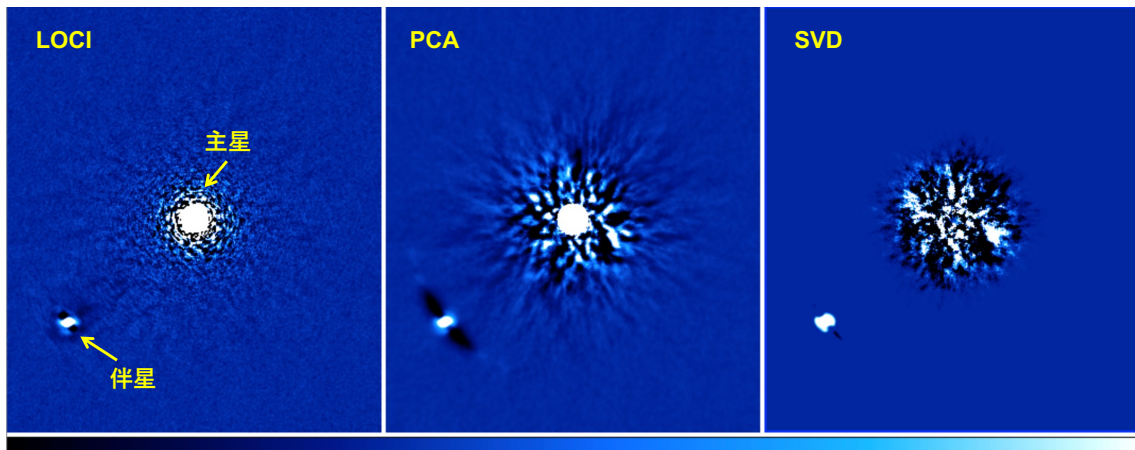


図 2: 新処理手法（SVD）と従来の手法（LOCI, PCA）の比較

本研究で検討したデータ処理手法では、従来の手法と比べて主星近傍で劇的にコントラストを向上させることはできなかった。しかし、主星から離れた天体に関してはシグナルの損失が少なく、検出しやすくなることが明らかになった。そのため、現在は主星の時間変動成分を取り除くための前処理に関する調査・検討を進めている段階である。本研究の期間は 2 年と短く設定したために、計画通り目標(3)まで進めることができなかった。しかし、開発中の手法が有用である可能性を示すことができたため、今後は問題点を改善していく予定である。

また、年々アップデートされている最新装置で得られる観測データを優先的に使用するため、観測には積極的に参加した。特に、補償光学装置のアップデートによって主星の時間変動をより抑えられている可能性があるため、開発中の画像処理手法と相性がよいと考えられる。また、本研究で使用するために取得したデータの一部を用いて、惑星の性質調査に関する成果発表も行った。

参考文献：1. Marois, et al. 2006, ApJ, 641, 556; 2. Lafrenière, et al. 2007, ApJ, 660, 770; 3. Amara & S. P. Quanz 2012, MNRAS, 427 948; 4. Soummer, et al. 2012, ApJL, 755 28; 5. Morii et al., 2017, ApJ, 835, 1

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小西美穂子
2. 発表標題 Characterizing Atmosphere of a Planetary-mass Companion around a Pre-main Sequence Star
3. 学会等名 Protostars ans Planets VII（国際学会）
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------