

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287032

研究課題名(和文)ハイパー望遠鏡による太陽系外惑星の像再生に関する研究

研究課題名(英文)Image restoration of exoplanets observed with a hypertelescope

研究代表者

馬場 直志 (BABA, Naoshi)

北海道大学・一・名誉教授

研究者番号：70143261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系外惑星を解像するには、口径が数10km以上の望遠鏡が必要となる。しかし、このような超大型の望遠鏡を建造することは無理であり、数十台の中口径望遠鏡を広い範囲に配置するハイパー望遠鏡が提案されている。ハイパー望遠鏡は干渉計と異なり、各素子望遠鏡からのビームを拡大して像合成(瞳高密度化)を行う。しかしながら、疎らな素子望遠鏡と瞳高密度化による合成像には何らかの像再生処理が必要となる。本研究から、ノイズが無視できるような場合にはクリーンアルゴリズムが像再生に有効であるが示された。一方、ノイズレベルが上がってくると、擬似ウィナーフィルターによる像再生処理の方が有効であった。

研究成果の概要(英文)：In order to resolve exoplanets an effective aperture with several tens or more kilometers is needed. A hypertelescope consists of many elemental telescopes. The beams from the elemental telescopes are enlarged and arranged compactly on the imaging lens to form the snap-shot image. This procedure is referred to densification.

Snap-shot images formed with a limited number of elemental telescopes do not exhibit high quality features. Some image restoration should be implemented to reveal the surface structures of exoplanets. One of annoying problems in hypertelescope image restoration is shift-variant characteristic of PSF that is caused by the pupil densification. We show that the CLEAN algorithm manages to restore images formed with shift-variant PSF and works well for noise-less images. For noisy images the pseudo Wiener filtering works better to restore the images.

研究分野：天文光学

キーワード：光学赤外線天文学 望遠鏡 系外惑星 像再生

### 1. 研究開始当初の背景

1995年に最初の太陽系外惑星が発見されて以来、多くの太陽系外惑星検出の報告 (<http://exoplanet.eu/>)がある。これらの大半は、ドップラー法やトランジット法などによる間接的な方法により発見されたものである。一方、直接的な検出方法であるイメージングにより見出されたのは少数にとどまっている。しかし、生物が存在可能と思われるハビタブルゾーンで直接検出された系外惑星の報告は無い。間接的な方法においては、地球型惑星の発見報告が出てきている。第2の地球は、我々の地球と比べてどのようなものだろうか？第2の地球を点としてイメージングするのではなく、表面構造を識別できるようにイメージングする方法を探究する必要がある。

既存の大型望遠鏡をもってしても恒星ですら広がった天体としてイメージングすることはほとんど出来ない。これは口径で決まる空間分解能が低いためである。したがって、現在開発が進められている口径30mのTMT (Thirty Meter Telescope)のような超大型望遠鏡であっても系外惑星の表面模様をイメージングすることは無理である。超空間分解能を達成するためには、単体の望遠鏡ではなく、多数台の望遠鏡を広い範囲にわたって配置する天体干渉計のような構成とするハイパー望遠鏡がある。これは、既存の光赤外干渉計と比べ、格段に広い範囲に個々の望遠鏡を配置せねばならない。

電波におけるALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: 66台の電波望遠鏡を最大基線長18.5kmで展開)のようなことが光赤外領域で可能となればよい。しかし、光赤外領域では波長が短いため光波を干渉させ干渉縞からコントラストと位相を測定し、被観測天体のフーリエ成分を求めていくには多大な困難を伴う。また、各フーリエ成分を逐次求めていくという方法では時間を要してしまう。系外惑星の大気の変動などを観測しようとするれば、スナップショット的に撮像できることが望ましい。このような目的のためにLabeyrieによって提案されたのがハイパー望遠鏡である。(Labeyrie, 1996, *Astron. Astrophys. Suppl.* **118**, 517)

電波干渉計はマイケルソン型干渉計であるが、ハイパー望遠鏡は中口径望遠鏡をマイケルソン型に配備し各望遠鏡からのビームをフィゾー干渉的にコンバインして像を得る方法と言える。ただ、ここにおいて、フィゾー型干渉の前に瞳の再配置・高密度化 (pupil densification) を行うのが大きな特徴である。各望遠鏡からのビームを相似形的に縮小してコンバインすると、干渉縞の重ね合わせとなり画像として捉えることが出来ない。瞳の高密度化によって、画像として捉えることができるようになるのである。

しかし、ここにおける瞳の高密度化は各望遠鏡からのビームを広げるのみで、被観測天

体に関する情報を増やすものではない。いわば、内挿的近似を行っているのみと言える。このような手法により形成された像は、最大基線長に相当する口径の望遠鏡で撮像されるものとは異なる。極めて多数の中口径望遠鏡を配置できればこの問題は解決できるが、経費的に実現できそうに無い。

ハイパー望遠鏡で得られる像に対して如何なる画像処理が有効であるかを考究する必要がある。研究開始当初まで、ハイパー望遠鏡に対する画像処理を扱った論文はほとんど発表されていなかった。瞳の再配置や高密度化によって、ハイパー望遠鏡で得られる画像はspace variant (または、shift variantとも言う) な特性となり、PSF (Point Spread Function) が像点の位置により異なってくるという問題がある。

### 2. 研究の目的

ハイパー望遠鏡で結像される画像を如何にして処理し良い画像にするのが、本研究の主要な目的となる。このために、ハイパー望遠鏡の結像特性と像回復の基本的な特性を明らかにすることを目的に、ノイズ無しの場合について計算機シミュレーションに基づいて考察する。しかし、実際の観測においてはノイズによる画像劣化は避けようもないので、フォトンノイズやディテクターノイズ混入の場合の画像回復についても研究する。

### 3. 研究の方法

計算機シミュレーションにおけるモデル天体として木星の画像 (図1) を用いた。木星の外径を20ピクセルとし、2048×2048ピクセルサイズの黒地の中に埋め込んだ。ハイパー望遠鏡の素子望遠鏡配列には図2のような非冗長アレイ (素子望遠鏡対の間隔及び方向で同じものが無い) を想定した。この配列は、Relative Difference Set という手法で得られたものである (Kopilovich, 1988, *Opt. Commun.* **68**, 1)。

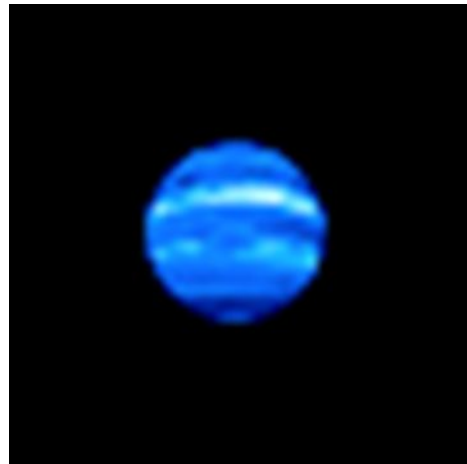


図1 モデル天体像

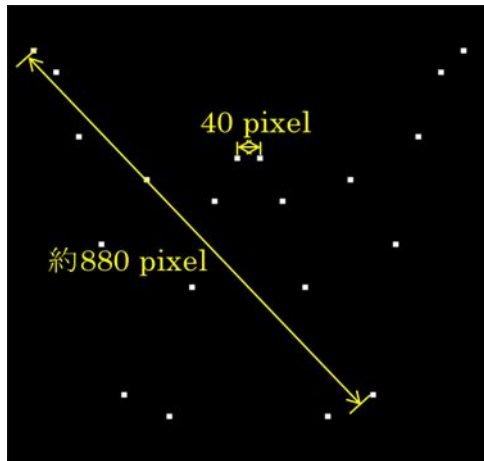


図2 望遠鏡配列

ハイパー望遠鏡においては、1ピクセルの間隔が数10m以上に相当することになる。個々の素子望遠鏡では系外惑星を解像することは出来ない。各望遠鏡からの光ビームを集めて単一のレンズまたは鏡で結像する際に、ビーム配列は図2の相似形を保つもののビーム径を広げて、粗から密のビーム合成、すなわち瞳の高密化を行う必要がある。この瞳の高密化においては、Aimeらが提唱したFSD: Full Spectrum Densification (Aime et al, 2012, Astron. Astrophys. **543**, A42)に従った。これは画像処理におけるエイリアシングを防ぐためである。

画像回復の評価には、モデル画像からの二乗誤差に基づく、Root Mean Square Error (RMSE)を用いる。回復像も基本的には周期的画像となるため、RMSEの計算範囲は、モデル画像より一回り大きな正方形領域とする。

画像処理アルゴリズムには種々のものが提案されているが、天体画像回復によく用いられている、擬似ウィナーフィルタリング(PWF)、リチャードソン・ルーシーアルゴリズム(RLA)および電波画像処理の代表的手法であるクリーンアルゴリズム(CLA)を本研究で応用する。画像回復においては、各アルゴリズムで設定が必要な各種パラメータをいろいろと変えて、回復像のRMSEが小さくなるようにした。

#### 4. 研究成果

ハイパー望遠鏡に対する画像処理の特性を調べるために、先ず、画像データにノイズが含まれない場合について調べた。図2の望遠鏡アレイで、FSDによる瞳高密化により観測される画像は、図3のようになる。観測像は周期的となるが、図3はその中心部を抽出したものである。この画像のRMSEは0.422であり、画質は良くなく、像回復処理が必要である。

ここで問題となることは、瞳高密化操作により、観測像はshift-variantなPSF特性と

なり、単一のPSFによるデコンボリューション処理が本質的には出来ないことである。ただ、撮像物体の拡がりにも依るが、近似的にshift-invariantな系と見なしてデコンボリューション処理は可能となる。瞳高密化操作の補正には、ビーム拡大開口による回折パターンを除算が必要となる。

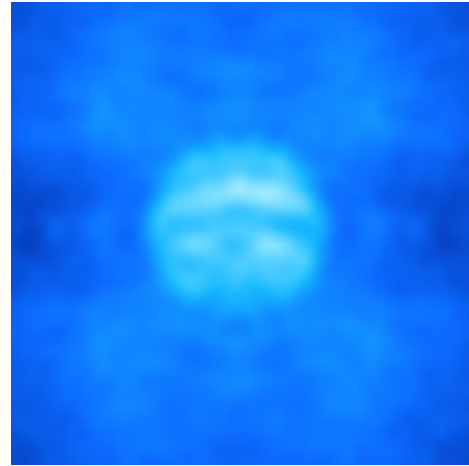


図3 観測像

観測像にノイズが無い場合、最も良好な画像回復が成されたのはCLAであった。この回復画像が図4で、RMSEは0.138となった。この要因は、CLAではshift-variantなPSFであっても画像回復が出来、前処理の除算を必要としないためである。PWFに依る画像回復の最良値RMSEは0.179、RLAでは0.187であった。

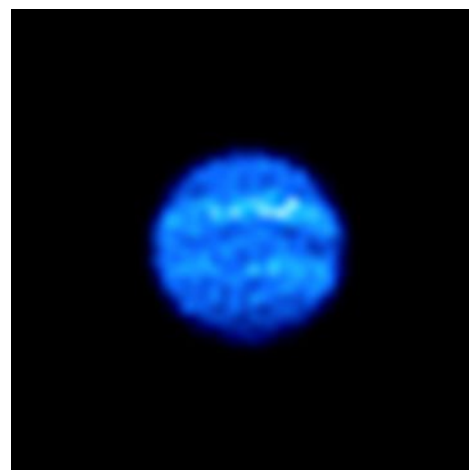


図4 クリーンアルゴリズムに依る回復像

次に、観測画像にノイズが含まれる場合について調べる。本研究では、ノイズとしてフォトンノイズ(ポアソンノイズ)およびディテクターノイズ(ガウシアンノイズ)を独立に与えた。例として、図5はフォトンノイズにより劣化した観測像を示しており、RMSEは0.427である。

フォトンノイズ含有画像に対する像回復における共通の特徴は、ノイズが無い場合に最も良好であったCLAがノイズの影響を大きく受けて像回復が十分に行われなかったことである。このため、ノイズ低減用にメディアンフィルターを前処理に使用することも行ったが、その効果はあったものの他の方法よりは劣った像回復結果となった。また、PWFおよびRLAの適用における拡大ビーム口径のPSFによる除算前処理は、概してノイズを強調することにもなり、その有効性を十分に確認できなかった。

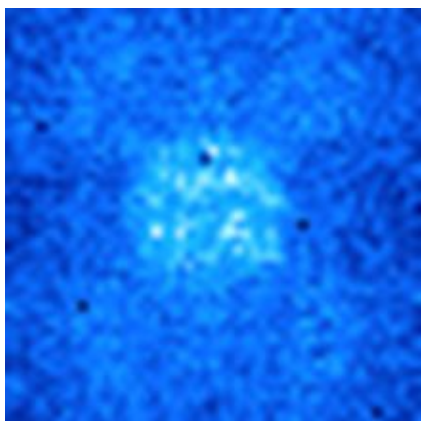


図5 フォトンノイズ含有画像

フォトンノイズ含有と同様に、ガウシアンノイズ含有においても最も良好な像回復結果となったのはPWFであった。ただ、この場合、観測画像の像回復範囲を制限して低強度部分を除外し(当然のことながら0次画像は完全に含まれる)PWF処理することが有効であった。フォトンノイズ含有の場合の図5に対する回復像を図6に示す。RMSEは0.199となっており、図5からの回復度が明瞭となっている。

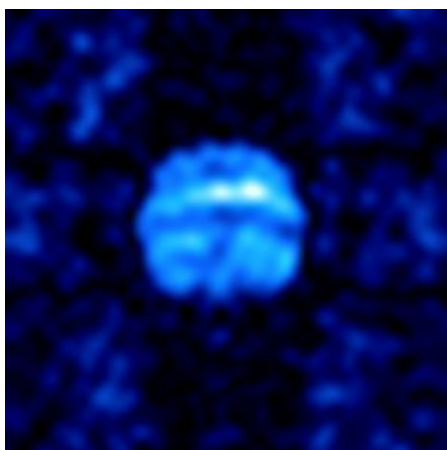


図6 回復像

系外惑星を直接撮像するには、恒星光を除去する必要がある。これは、恒星と惑星との

強度比が $10^6 \sim 10^{10}$ に及ぶためである。ハイパー望遠鏡を構成する個々の望遠鏡は中小口径ではあるが、多分現実的には、個々の望遠鏡で恒星光を除去することになるであろう。何故ならば、ハイパー望遠鏡の結像においては、周期的な像が形成されることになり、周辺からの恒星光が系外惑星の撮像に多大な影響を及ぼすからである。したがって、ハイパー望遠鏡の各素子望遠鏡において、ナル干渉型ステラコロナグラフなどの機能を持たせる必要がある。更に、ビーム合成には極めて高質な波面が要求されるため、極端補償光学の開発が必須となる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

N. Miura, A. Oh-ishi, S. Kuwamura, N. Baba, S. Ueno, Y. Nakatani, and K. Ichimoto, "Deconvolution of partially compensated solar images from additional wavefront sensing," *Appl. Opt.* **55**, 2484-2488 (2016) 査読有.

DOI: 10.1364/AO.55.002484

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, G. 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**, 955, 890-910 (2015) 査読有.

DOI: 10.1086/682989

N. Miura, A. Oh-ishi, S. Aoki, H. Magaki, S. Kuwamura, N. Baba, Y. Hanaoka, M. Yamaguchi, S. Ueno, Y. Nakatani, and K. Ichimoto, "Development of a new solar adaptive optics system at the Hida Observatory," *Proc. SPIE* **9148**, 914831-1 ~ 6 (2014) 査読無.

DOI: 10.1117/12.2055786

〔学会発表〕(計12件)

Y. Nakai, N. Baba, N. Murakami, N. Miura, and M. Tamura, "Image restoration for a hypertelescope," *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, 30 June (2016), Edinburgh (UK)

中井悠人、馬場直志、村上尚史「ハイパー望遠鏡における撮像画像処理の計算機シ

ミュレーション II」, 日本天文学会 2016 年春季年会、2016 年 3 月 15 日、首都大学東京(東京都八王子市)

馬場直志「太陽系外惑星直接検出のための技術開発」(基調講演) 平成 27 年度光産業技術シンポジウム 光加工・計測が創る新たな社会と産業イノベーション、2016 年 2 月 3 日、リーガロイヤルホテル東京(東京都新宿区)

馬場直志「ハイパー望遠鏡 - 系外惑星の解像に向けて -」, 2015 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム「光赤外将来計画：報告書の最終取りまとめと長期戦略への布石」, 2015 年 9 月 14~16 日、国立天文台(東京都三鷹市)

中井悠人、馬場直志、村上尚史「ハイパー望遠鏡における撮像画像処理の計算機シミュレーション」, 日本天文学会 2015 年春季年会、2015 年 3 月 20 日、大阪大学(大阪府豊中市)

〔その他〕

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/engineering/2014-10/feature1410-02.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

馬場 直志 (BABA, Naoshi)  
北海道大学・名誉教授  
研究者番号：7 0 1 4 3 2 6 1

### (2) 連携研究者

田村 元秀 (TAMURA, Motohide)  
東京大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：0 0 2 6 0 0 1 8

村上 尚史 (MURAKAMI, Naoshi)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：8 0 4 5 0 1 8 8

三浦 則明 (MIURA, Noriaki)  
北見工業大学・工学部・教授  
研究者番号：3 0 2 0 9 7 2 0