



Title	太陽系外惑星の直接検出のための空間光変調器を用いた波面制御技術に関する研究 [全文の要約]
Author(s)	米田, 謙太
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14866号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85159
Type	doctoral thesis
File Information	Kenta_Yoneta_summary.pdf



学 位 論 文 内 容 の 要 約

応用物理学専攻

博士（工学）

氏名 米田 謙太

学 位 論 文 題 名

太陽系外惑星の直接検出のための空間光変調器を用いた波面制御技術に関する研究
(Study on wave-front control technique using spatial light modulator
for direct detection of exoplanets)

太陽系外惑星（太陽以外の恒星を公転する惑星、以後「系外惑星」）は、天文学における重要な観測ターゲットとなっている。2022年2月現在までに発見された系外惑星の数は、5000個に迫る[1]。その中には、太陽系には存在しないタイプの惑星もある。例えば、質量が木星程度で、恒星の近傍を公転する惑星（ホットジュピター）や、地球の数倍質量の惑星（スーパーアース）なども発見されている。また、恒星が複数ある系（多重連星）にも惑星が発見されている。

これまでに、間接法と呼ばれる手法によって、多くの惑星が発見されている。間接法とは、恒星の観測データから惑星の存在を間接的に見出す手法である。一方で、惑星の光を直接観測する手法（直接法）による系外惑星観測も行われている。直接法では、惑星光を観測することによって、惑星の明るさやスペクトルの情報を得ることができる。これらの情報から、惑星の温度や大気組成などの詳細な調査ができると期待される。しかしながら、直接法では、明るい恒星の光が暗い惑星の観測を妨げてしまうという問題がある。そのため、明るい恒星光のみを強力に除去する「高コントラスト観測装置」が必要となる。「コントラスト」とは、除去前の恒星光の最大強度で、除去後の恒星光強度を規格化したもので、恒星光の除去性能を示す指標として用いられる。現在、直接法により恒星の遠方を公転する大質量の惑星が発見されている。

系外惑星観測の究極目標は、生命居住可能な惑星（ハビタブル惑星）を発見し、惑星大気に酸素やメタンなどの生命活動の痕跡を検出することである。例えば、太陽型星周りのハビタブル惑星を発見するためには、 10^{-10} レベルのコントラストを達成する必要があると考えられている。さらに、ハビタブル惑星の発見だけでなく、惑星の多様性の理解や惑星系形成のメカニズムの解明も重要な課題である。このような課題に対し、恒星近傍から遠方までの広い領域にわたる高コントラスト観測が望まれる。

高コントラスト観測装置は、望遠鏡の瞳エッジに起因する恒星回折光を除去する「コロナ

グラフ」と、装置の収差に起因する恒星散乱光（スペックル）を、波面制御により除去する「ダークホール制御系」から構成される。ここで、恒星スペックルが除去され、系外惑星の観測が可能となる領域を、「ダークホール」と呼ぶ。これまでに、様々なコロナグラフやダークホール制御技術が提案、開発されてきている。例えばダークホール制御では、波面制御デバイスに可変形鏡（Deformable Mirror; DM）を用いた技術の開発が行われている。DMを用いたダークホール制御の室内実験では、ハビタブル惑星の観測が期待される 10^{-10} レベルのコントラストが達成されている（例えば、文献[2, 3]など）。

本研究の目的は、波面制御デバイスとして空間光変調器（Spatial Light Modulator; SLM）を用いたダークホール制御技術を開発することである。SLMの特長は、DMに比べ制御素子数が圧倒的に多いことである。このSLMの制御素子数を活かした3つのダークホール制御技術の研究開発を行う。

1つ目の技術は、恒星の近傍から遠方までの広い領域にダークホールを形成する技術（広範囲ダークホール制御技術）である。ダークホールの形成可能領域（Nyquist領域）は、波面制御デバイスの制御素子数に依存する。制御素子数が $N \times N$ の波面制御デバイスを用いたとき、Nyquist領域は恒星を中心に $N \lambda/D \times N \lambda/D$ の範囲となる。ここで、 λ/D は望遠鏡の解像度を表す（ λ は観測波長、 D は望遠鏡直径）。ダークホール制御技術の開発において、一般的に用いられているDMの制御素子数は現状、 32×32 から 64×64 程度である。したがって、DMのNyquist領域は恒星の近傍（恒星を中心に $32 \lambda/D \times 32 \lambda/D$ の範囲）に限られる。一方、SLMの制御素子数は、数 $100 \times$ 数 100 から 1000×1000 以上に上る。そのためSLMは、Nyquist領域が広く、恒星から離れた位置や広い領域にわたるダークホールを形成し、広い領域での惑星観測を可能にすると期待される。

広範囲ダークホール制御技術の実証のために、共通光路ナル干渉コロナグラフ（Common-Path Visible Nulling Coronagraph; CP-VNC）[4]にSLMを導入する。CP-VNCにSLMを導入した室内実験はすでに行われており、DMのNyquist領域を超えた位置におけるダークホール形成が実証されている[5]。本研究では、2つの観測モードを想定した数値シミュレーションにより、広範囲ダークホール制御技術の検証を行った。

1つ目は、恒星の近傍から遠方までの広い領域にわたって、未知の系外惑星を探索することを目的とした観測モード（観測モード1）である。広い領域にわたる惑星探索を行うために、大きなダークホールを形成する必要がある。そこで、SLMの制御素子数を 256×256 と仮定し、ダークホール領域を恒星中心から半径 $125 \lambda/D$ の半円形状に設定した。この領域は、 64×64 素子のDMのNyquist領域を超えており、望遠鏡直径 $D = 6$ m および $\lambda = 760$ nm

のパラメータを仮定した場合、10 pc (およそ 33 光年) 遠方の太陽系の海王星軌道までが入る大きさである。数値シミュレーションの結果、上記の巨大なダークホールの形成に成功し、ダークホール領域内の平均コントラストは、 1.1×10^{-9} に達した。しかし、このコントラストはハビタブル惑星の観測に要求される 10^{-10} レベルには達していない。この問題は、観測データの処理によりコントラストを改善するポストプロセス技術により解決できると考えている。DM を用いたダークホール制御の室内実験では、ポストプロセス技術により 1 桁から 2 桁程度のコントラストの改善が行われている[2]。そこで、本技術にもポストプロセス技術を組み合わせることで、広い領域にわたり 10^{-10} レベルのコントラストを達成できると期待している。

2つ目は、既知の系外惑星を詳細に調査することを目的とした観測モード (観測モード 2) である。系外惑星の詳細な調査を行うためには、高いコントラストを達成する必要がある。そこで、観測モード 2 では、惑星位置の狭い領域にピンポイントにダークホールを形成する。ここでは、上述の観測パラメータを仮定し、地球、木星、土星および海王星の軌道上にダークホールを形成した。数値シミュレーションの結果、各軌道上において 10^{-10} から 10^{-11} という、観測モード 1 よりも高いコントラストが得られた。

本研究で行った数値シミュレーションでは、2つの観測モードにおいて、それぞれの目的に合わせたダークホールの形成に成功した。今後は、2つの観測モードについて、室内実験により実証することが課題となる。

2つ目の技術は、ハーフトーン手法を適用したダークホール制御技術 (ハーフトーンダークホール制御技術) である。波面制御デバイスの位相分解能は、波面制御における量子化誤差の原因となり、所望の波面制御が行えなくなってしまう。そのため、ダークホール制御により達成可能なコントラストは、波面制御デバイスの位相分解能によって制限されてしまう。本研究では、波面制御デバイスの位相分解能による量子化誤差の影響を改善するために、ハーフトーン手法をダークホール制御技術に適用する。ハーフトーン手法とは、限られた階調で連続的な明るさを表現する印刷手法である。ダークホール制御においても、有限の位相分解能をもつ波面制御デバイスを用いて連続的な波面制御を行うために、ハーフトーン手法が有効であると考えられる。ハーフトーンダークホール制御技術には、波面制御デバイスに多くの制御素子が必要となるため、SLM が有効であると期待される。これまでに、ハーフトーンダークホール制御技術について、数値シミュレーションと室内実験による初期検証が行われてきた[6]。本研究では、ハーフトーンダークホール制御技術の確立に向け、さらなる数値シミュレーションと室内実証実験を行った。

数値シミュレーションでは、8分割位相マスク (8-Octant Phase Mask; 8OPM) コロナグラフ[7, 8]を想定した。SLM の位相分解能は、 $2\pi/1024$ に設定した。また、ハーフトーン手法として Floyd-Steinberg デザリング[9]を用いた。ハーフトーン手法を用いない場合、ダークホール内の平均コントラストは、 1.4×10^{-9} であった。ハーフトーン手法を用いることで平均コントラストは 3.8×10^{-10} に達し、ハーフトーン手法の適用によるコントラストの改善が示された。

数値シミュレーションの結果を受け、2つの実証実験を行った。実験では、レーザー光源を恒星モデルとして用いた。第1実験では、 64×64 素子の DM の Nyquist 領域を超えた位置に、 $10 \lambda/D$ 四方の大きさのダークホールを形成した。SLM の位相分解能を $2\pi/1024$ に設定した場合、およそ 5×10^{-8} の平均コントラストが得られたが、ハーフトーン手法の適用によるコントラストの改善は確認できなかった。一方、SLM の位相分解能を $2\pi/256$ に設定した場合は、ハーフトーン手法の適用により、ダークホール内の平均コントラストが 2.2×10^{-7} から 6.0×10^{-8} に改善した。第2実験では、恒星モデル像の中心から半径 $45 \lambda/D$ の半円形状のダークホールを形成した。このダークホールは、 64×64 素子の DM の Nyquist 領域を超えた大きさである。この実験では、SLM の位相分解能を $2\pi/256$ および $2\pi/1024$ に設定した場合の両方において、得られた平均コントラストはおよそ 1×10^{-7} であり、ハーフトーン手法による改善は確認できなかった。そこで、実験と同様のパラメータで数値シミュレーションを行った。第1実験および第2実験に対応した数値シミュレーションでは、どちらも実験結果よりも良い、 10^{-9} レベルのコントラストが得られた。数値シミュレーションではさらに、実験で得られたよりも良いコントラストレベルにおいて、ハーフトーン手法の効果が表れることも示唆された。そのため実験では、実験上の何らかの要因でコントラストが制限されている可能性があると考えている。また、ハーフトーン手法による改善が確認できなかった実験では、改善が確認できるレベルまでコントラストが達していない可能性があると考えている。

本研究で行った数値シミュレーションおよび実証実験から、ダークホール制御にハーフトーン手法を適用することで、波面制御デバイスの位相分解能によって制限されていたコントラストを改善できることが示唆された。しかしながら、実験では、何らかの要因によりコントラストが制限されている可能性がある。そのため、この制限要因を調査し、数値シミュレーションで得られた 10^{-9} から 10^{-10} レベルのコントラストを目指すことが今後の課題である。

3つ目の技術は、連星系におけるダークホール制御技術 (連星ダークホール制御技術) で

ある。太陽系近傍の恒星のうちおよそ半数は、多重連星に含まれると考えられている[10, 11, 12]。また、上述のように、多重連星にも惑星が発見されている。そのため、多重連星周りの惑星も直接観測の興味深い観測ターゲットであると考えられる。本研究では主に、恒星が2つの連星に着目し、連星ダークホール制御技術の開発を行った。連星周りの惑星を観測するためには、コロナグラフで連星の回折光を、ダークホール制御で連星のスペックルを除去する必要がある。特にダークホール制御では、離角の大きな連星の観測を想定した場合、どちらかの恒星から離れた位置にダークホールを形成しなければならない。したがって、上述のように Nyquist 領域が広い SLM は、連星においてダークホールを形成するために有効な波面制御デバイスであると期待される。これまでに、SLM を用いた連星ダークホール制御技術の数値シミュレーションが行われている[13]。本研究では、先行研究の結果を受け、SLM を用いた連星ダークホール制御の実証実験を行った。

実証実験では、コロナグラフとして CP-VNC を用いた。連星ダークホール制御の実証実験の前段として、CP-VNC が連星に適用できるかを調査する実験を行った。CP-VNC には、天体が観測面で結像する位置によって、天体光の透過率が変化する特性がある。透過率がゼロになる領域を中央 null フリンジと呼び、恒星をこの位置に結像するように光学系を調整することで、恒星の回折光を除去することができる。連星の場合も、中央 null フリンジ上に2つの恒星を結像させるように光学系を調整することで、連星の回折光を除去できると考えられる。そこで、中央 null フリンジ上の複数の位置に恒星モデルを結像させ、恒星光除去性能の評価を行った。この実験では、レーザー光源を恒星モデルとした。実験の結果、中央 null フリンジ上に恒星を結像させることで、恒星の回折光を除去できることを示した。特に、恒星中心から $3\lambda/D$ 以内の領域では、恒星光を2桁程度除去できることを示した。

次に、CP-VNC に SLM を導入して、連星ダークホール制御の実証実験を行った。ここでは、2台のレーザー光源を用いて、連星（恒星 A, B）を模擬した。このとき、連星モデルの離角は、 $100\lambda/D$ に設定した。これは、 64×64 素子の DM の Nyquist 領域を超えた離角である。提案技術の実証のために、2つの実験を行った。1つ目の実験では、恒星モデル A の近傍にダークホールを形成した。このとき、ダークホール内の平均コントラストは、 3.5×10^{-8} に達した。2つ目の実験では、恒星モデル A, B から遠方にダークホールを形成した。このとき、ダークホール内の平均コントラストは、 2.0×10^{-8} に達した。

これらの結果より、CP-VNC と SLM は、連星における惑星観測に有効な手法であることが実証された。連星における惑星観測は、惑星の多様性の理解や、惑星系形成メカニズムの解明につながる知見が得られると期待される。

本研究では、SLM を用いた 3 つのダークホール技術を提案し、数値シミュレーションおよび室内実験による実証を行った。本研究を通じて、北海道大学に新たに 2 つのテストベッドを構築した[14]。今後は、これらのテストベッドを活用し、高コントラスト観測技術をさらに発展させていくことが重要である。

本論文の構成は、以下の通りである。第 1 章では、系外惑星観測の手法と現状についてまとめ、SLM を用いたダークホール制御技術の開発の意義を述べる。第 2, 3 および 4 章ではそれぞれ、上述の 3 つのダークホール制御技術の研究成果についてまとめる。最後に第 5 章において、本論文の結論と展望を述べる。

【参考文献】

- [1] “The Extrasolar Planets Encyclopedia,” <http://exoplanet.eu/> (参照 2022 年 2 月 21 日).
- [2] J. Trauger and W. Traub, *Nature*, **446**, 771 (2007).
- [3] J. Trauger, D. Moody, B. Gordon et al., *Proc. SPIE*, **8442**, 84424Q (2012).
- [4] N. Murakami and N. Baba, *Opt. Lett.*, **35**, 3003 (2010).
- [5] 河合研弥, 北海道大学大学院工学院応用物理学専攻, 平成 30 年度修士論文.
- [6] 一圓光, 北海道大学大学院工学院応用物理学専攻, 令和 2 年度修士論文.
- [7] N. Murakami, R. Uemura, N. Baba et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **120**, 1112 (2008).
- [8] N. Murakami, J. Nishikawa, K. Yokochi et al., *Astrophys. J.*, **714**, 772 (2010).
- [9] R. W. Floyd and L. Steinberg, *Proc. Soc. Inf. Disp.*, **17**, 75 (1976).
- [10] H. A. Abt, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **21**, 343 (1983).
- [11] D. Raghavan, H. A. McAlister, T. J. Henry et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **190**, 1 (2010).
- [12] A. Tokovinin, *Astron. J.*, **147**, 87 (2014).
- [13] 小池隆太, 北海道大学大学院工学院応用物理学専攻, 令和 2 年度修士論文.
- [14] N. Murakami, K. Yoneta, H. Ichien et al., *Proc. SPIE*, **11443**, 114432M (2020).