



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 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	米田, 謙太
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	<a href="https://hdl.handle.net/2115/85157">https://hdl.handle.net/2115/85157</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Kenta_Yoneta_abstract.pdf, 論文内容の要旨



## 学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 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）は、天文学における重要な観測ターゲットとなっている。2021年12月現在、4500個を超える太陽系外惑星が、主に間接的な検出法により発見されている。中には、恒星が複数ある系（連星系）を公転する惑星も発見されている。太陽系外惑星観測の究極目標として、惑星の詳細な特徴づけにより、生命活動の痕跡を検出することや、惑星系の多様性を理解することなどが挙げられる。惑星の詳細な特徴づけのためには、惑星光の直接検出が有効である。しかしながら、そのためには、惑星検出を妨げる明るい恒星光が問題となる。したがって、恒星光を除去する高コントラスト観測装置が必要とされる。高コントラスト観測装置は、望遠鏡の主鏡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、波面測定・補正により装置内の光学素子に起因する恒星散乱光を除去する波面制御系から構成される。天体検出面において、恒星光が除去され惑星探査が可能となる領域は、ダークホールと呼ばれる。このような波面制御技術を本論文では、ダークホール技術と呼ぶ。

将来の太陽系外惑星観測に向けて、世界中の室内テストベッドにおいて高コントラスト観測技術の開発が進められている。これらの開発では、波面制御デバイスとして主に可変形鏡（DM: deformable mirror）が用いられている。これまでの室内実験では、恒星近傍において、地球型系外惑星の直接観測が期待される  $10^{-10}$  レベルのコントラスト（恒星光の除去レベル）が達成されている。

本研究の目的は、空間光変調器（SLM: spatial light modulator）を用いたダークホール技術を開発することである。SLMの特長は、DMに比べ圧倒的に制御素子数が多いことである。SLMを用いたダークホール技術の研究開発の意義は大きく2つある。1つは、より多素子のDMが将来実現することを想定し、SLMの制御素子数の多さを活かした新たなダークホール技術の研究をいち早く行うことである。もう1つは、SLMを導入した実観測を目指した技術開発を行うことである。本研究では、SLMの制御素子数の多さを活かした3つのダークホール技術を提案する。

1つは、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広範囲ダークホール技術である。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。 $N \times N$ 素子の波面制御デバイスの場合、Nyquist領域の大きさは、恒星を中心に  $N\lambda/D \times N\lambda/D$  となる（ $\lambda$ は観測波長、 $D$ は望遠鏡主鏡の直径）。ダークホール技術の開発に用いられているDMの制御素子数は、数10×数10程度であり、惑星の観測領域は恒星近傍に限られる。一方、制御素子数が多いSLMでは、広い領域で惑星観測が可能になると期待される。そこで、SLMを用いた広範囲ダークホール技術の原理実証として、2種類の観測モードを想定した数値シミュレーションを行った。1つは、未知の太陽系外惑星探査のため、広い領域にダークホールを形成する broad survey 観測である。256×256素子のSLMを仮定し、DMのNyquist領域を大きく超える半径  $125\lambda/D$  の半円状ダークホールの形成に成功した。このときのコントラストは、 $1.1 \times 10^{-9}$  に達した。このダークホールの大きさは、10 pc（およそ33光年）遠方の太陽系を、 $D = 6$  m、 $\lambda = 760$  nmのパラメータを仮定して観測した場合に、海王星軌道まで入る大きさである。もう1つの観測モードは、既知の太陽系外惑星を詳細に調査するため、高いコントラストの小さなダークホールを形成する deep survey 観測である。前述の観測パラメータを仮定し、地球、木星、土星、海王星軌道にダークホールを形成することを実証した。このとき各軌道において、 $10^{-10}$  から  $10^{-11}$  レベルのコントラストを達成した。今後は、本研究で検討した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である。

提案する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技術（ハーフトーンダークホール技術）である。ダークホール技術において、波面制御デバイスの位相変調量は、位相分解能

によって量子化される。このため、達成できるコントラストは制限されてしまう。この問題を解決するため、ダークホール技術にハーフトーン手法を適用することを提案する。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。提案する技術により、有限の位相分解能をもつ波面制御デバイスでも連続的な波面制御が可能となり、ダークホールのコントラストが改善されると考えられる。ハーフトーンダークホール技術には、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。まず、ハーフトーンダークホール技術の原理実証のため、数値シミュレーションを行った。その結果、ハーフトーン手法の適用によりコントラストを $1.4 \times 10^{-9}$  から  $3.8 \times 10^{-10}$  に改善することに成功した。次に、数値シミュレーションの結果を受け、室内実証実験を行った。実験では、レーザー光源を恒星モデルとして用いた。SLMの位相分解能を $2\pi/256$ に設定し、 $10\lambda/D$ 四方のサイズのダークホール形成実験を行ったところ、ハーフトーン手法の適用によりコントラストを $2.2 \times 10^{-7}$  から  $6.0 \times 10^{-8}$  に改善することに成功した。しかしながら、SLMの位相分解能を $2\pi/1024$ に設定したところ、ハーフトーン手法の有無に依らずにコントラストはおよそ $5 \times 10^{-8}$ であった。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ところ、位相分解能が $2\pi/1024$ のとき、およそ $3 \times 10^{-8}$ でハーフトーン手法の効果が現れはじめた。したがって、室内実験では、実験上の要因によりハーフトーン手法の効果が現れるコントラストに達していないと考えられる。今後の課題は、実験でコントラストが制限される要因を調査し、数値シミュレーションで示された $10^{-10}$ レベルのコントラストを達成することである。

提案する3つ目の技術は、連星系におけるダークホール技術(連星ダークホール技術)である。冒頭で述べた通り、連星系周りにも惑星が発見されており、直接検出の興味深いターゲットである。連星系周りの惑星検出のためには、複数の恒星光を除去する高コントラスト観測装置が要求される。連星ダークホール技術では、少なくとも1つの恒星から離れた位置にダークホールを形成する必要がある。したがって、Nyquist領域が広いSLMは、連星周りの惑星探査に向けた技術開発に有効であると考えられる。そこで、連星モデルとして2つのレーザー光源を用いて、連星ダークホール技術の室内実証実験を行った。実験では、片方の恒星近傍、および両方の恒星から等距離の位置にダークホールを形成する2つの観測モードの実証を行った。その結果、いずれの場合においても $10^{-8}$ レベルのコントラストを達成した。本研究の実証実験では、ダークホール形成のため、9回の波面測定を要した。今後は、連星ダークホール技術による実観測に向け、波面測定回数を削減した観測手法を確立することが課題となる。

本論文の構成は、以下の通りである。第1章では、系外惑星観測の現状と将来計画についてまとめ、SLMを用いたダークホール技術開発の意義を述べる。第2, 3, 4章ではそれぞれ、本論文で新たに提案した上述の3つのダークホール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、本論文の結論と今後の展望を述べる。