

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22137

研究課題名（和文）光渦を利用した極限精度の波面センシングに関する研究

研究課題名（英文）Study of ultimate-precision wave-front sensing using optical vortex

研究代表者

村上 尚史（Murakami, Naoshi）

北海道大学・工学研究院・講師

研究者番号：80450188

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：高精度な光波面揺らぎの測定を目指し、光渦コロナグラフという天文観測技術を応用した新たな原理の波面センシング法を提案し、計算機シミュレーションおよび室内実験を通じてその原理実証を行った。計算機シミュレーションでは、光渦コロナグラフにより平面波成分を除去することにより、波面揺らぎを高精度で計測できることを示した。また実証実験のための試験機を構築し、tilt誤差（波面の傾き誤差）を導入した波面センシングの実証試験も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波面センシング（波面揺らぎの計測）により、光波が伝搬してきた屈折率の揺らぎや、光学面形状の情報などを知ることができる。提案する波面センシング法は、ノイズ源となり得る平面波成分を除去することで、高い精度の測定を目指すものである。本研究の成果として、提案する手法による波面センシングに向けた見通しを得ることができた。提案する手法は、天文観測やバイオイメージング、光学デバイスの評価や医療診断、プラズマ計測など、幅広い分野への応用を目指している点において、大きな意義があると期待している。

研究成果の概要（英文）：We proposed a novel wave-front sensing method based on an astronomical instrument called an optical vortex coronagraph. We demonstrated the principle of the proposed method by means of numerical simulations and laboratory experiments. In the numerical simulations, we demonstrated that wave-front errors could be measured with high precision using the proposed method by rejecting a component of a plane wave. In addition, we constructed a laboratory simulator of the proposed method and conducted experiments to demonstrate the wave-front sensing of a slightly tilted wave front.

研究分野：応用光学

キーワード：波面センシング 補償光学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光波面の振幅や位相の揺らぎを計測すること(以後、波面センシング)により、その光波が伝搬してきた屈折率の揺らぎや、光学面形状の情報などを知ることができる。これまでに、多くの波面センシング法が提案され、天文観測やライブイメージング計測における補償光学、光学デバイスの評価や医療診断、プラズマ計測など、多岐にわたる分野に応用されている(例えば、文献)。波面センシングの高精度化に対する取り組みは、幅広い分野における重要な研究テーマとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、高精度な波面センシングを目指し、光渦コロナグラフ(文献)という天文観測技術に応用した新たな原理の計測法の開発を目的とする。光渦コロナグラフとは、系外惑星(太陽以外の恒星の周りを公転する惑星)を観測するために提案された装置である。系外惑星を観測するためには、そのすぐ近くに存在する明るい恒星の光を除去する必要がある。光渦コロナグラフは、恒星からの光が平面波である場合、恒星光を理論上完全に除去することができる。しかしながら、光波面にわずかな揺らぎがあると、恒星光が除去できず、残留光が惑星観測の妨げとなってしまう。そこで、特殊な光波面制御(ダークホール制御)により、残留光をさらに除去する手法が提案されている。特に、将来の究極目標である地球型惑星探査のためには、恒星光を10桁レベルにまで除去しなければならず、特定の空間周波数帯域において $\lambda/10000$ rms 精度のダークホール制御が必要とされている(λ は光の波長)。本研究では、光波面揺らぎに弱いという光渦コロナグラフの特性に着目し、上述の惑星探査技術をベースにして、0次光成分の制御により、微細な光位相分布の高精度な測定を目指した新たな波面センシング法を提案する。

3. 研究の方法

図1左に、本研究で提案した波面センサー光学系を示す。波面センサーは、Fourier変換を3回行う6f光学系から構成され、「被測定面1」に入射する光波面の揺らぎを測定する。そのため、光渦を発生させるフィルタ(以後、渦位相マスク)を「Fourier面1」に導入する。光渦とは、一周で 2π の整数倍(この整数を、トポロジカルチャージと呼ぶ)の螺旋状位相をもつ波面のことである。光渦コロナグラフにおける強力な恒星光除去のためには、偶数のトポロジカルチャージが必要である。

渦位相マスクを通過後に被測定面を再結像すると(被測定面2)、光の大部分はビーム領域外へ追いやられる。そこで、領域外の光をしばりで遮蔽する。被測定面1に入射する波面が平面波である場合、被測定面2においてビーム領域内の光強度は理論上ゼロになることが知られている。一方、被測定面1における波面に揺らぎがある場合、被測定面2ではビーム領域内に残留光が現れる。光渦コロナグラフにより平面波成分を取り除き、残留光(揺らぎ成分)の複素振幅を測定する。その測定データを用いて、光学系をさかのぼる方向に演算を行うことにより、被測定面1での入射波面揺らぎの復元を行う。揺らぎ成分の複素振幅を測定するため、被測定面2においてしばりのそばにピンホールを設置する(後述)。

本研究課題では、提案する波面センシング法について、計算機シミュレーションおよび実験室での実証試験を実施し、原理の実証、波面復元アルゴリズムの確立、高精度・多機能波面センシング実現に向けた取り組みなどを行った。

4. 研究成果

まず、計算機シミュレーションにより、提案する波面センシング法の原理実証を行った。被測定面1において単一Zernikeモードの波面揺らぎが入射した場合の、被測定面2における残留光の複素振幅を計算した。さらに、波面復元計算コードを構築し、被測定面1における波面揺らぎを計算した。その結果、トポロジカルチャージ2の渦位相マスクにより、すべてのZernikeモードの波面揺らぎを復元できることを確かめた。この結果は、光渦コロナグラフの開発研究の文脈で行われた先行研究とも矛盾しない結果であった。

光渦コロナグラフの残留光の複素振幅を測定するため、セルフコヒーレントカメラ法(文献)に着目した。図1左に示すように、しばりのそばにピンホールを設置する。ピンホールは、渦位相マスクによりビーム外側に追いやられた光により参照光を作り、「Fourier面2」において残留光と干渉させる。この干渉縞から、複素振幅を測定する。提案手法の実証試験として、ランダムな波面揺らぎを発生させ、構築した計算機シミュレーションコードにより残留光を計算した。さらに、残留光の複素振幅をセルフコヒーレントカメラ法により測定し、そのデータをもとに波面揺らぎ復元を行った。その結果、 $\lambda/1000$ rms のランダム位相揺らぎをもつ入射波面を3%の精度で測定することができた。

研究開始当初は予期していなかった課題として、実験的に提案手法を実証する際には、被測定面2のしばりサイズについて考察する必要があるとの認識を得た。上述の計算機シミュレーションでは、しばりサイズは被測定面1のビームサイズと同一に設定した。しかしながら実際は、光学系の収差や解像度の影響によりビームエッジ付近がぼやけてしまうため、しばりは若干小

さくしなければならない。そこで、しぼりサイズを小さく設定して波面揺らぎ復元の検証を行った。その結果、しぼりサイズを変更しても、精度は大きく劣化しないことを確かめた(図1右)。

さらに、予期していなかった課題として、振幅収差の影響についても考察した。上述の原理は、入射波面が位相誤差のみをもつ場合に有効であった。しかしながら、振幅および位相の両方に誤差がある場合、両者の影響が縮退してしまうことが明らかとなった。解決策として、渦位相マスクとは別種の分割位相マスク(文献)を導入することで、この縮退が解ける可能性があるとの知見を得た。本研究では分割位相マスクを製作し、コロナグラフ観測の基礎試験までを実施した。

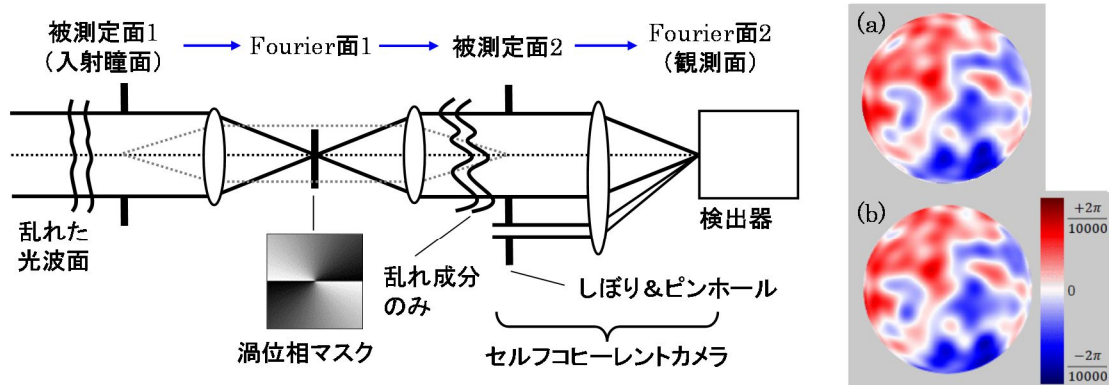


図1: (左) 光渦を利用した波面センシングの概要。(右) 波面復元のシミュレーション。(a)は仮定した入射波面、(b)は復元した波面。しぼりサイズは、ビームサイズの95%に設定。

最後に、提案する波面センシングのための試験機を実験室に構築し(図2)、原理実証実験を実施した。残留光の複素振幅測定のためのセルフコヒーレントカメラとして、従来法(文献)の機能を拡張させ、2 偏光および多波長測定が可能な新手法を提案した。提案する機能拡張型セルフコヒーレントカメラを波面センサーに導入できれば、2 偏光および多波長同時に高精度な波面センシングが可能になると期待される。構築した試験機に、もっとも低次の tilt 誤差をもつ波面を導入し、残留光の複素振幅を計測した。その結果、わずかな tilt 誤差による出力変動を観測することができた(図2右)。今後は、測定誤差やノイズを低減させるための取り組みを継続し、最終的には入射波面揺らぎの復元を実験的にも実証したい。

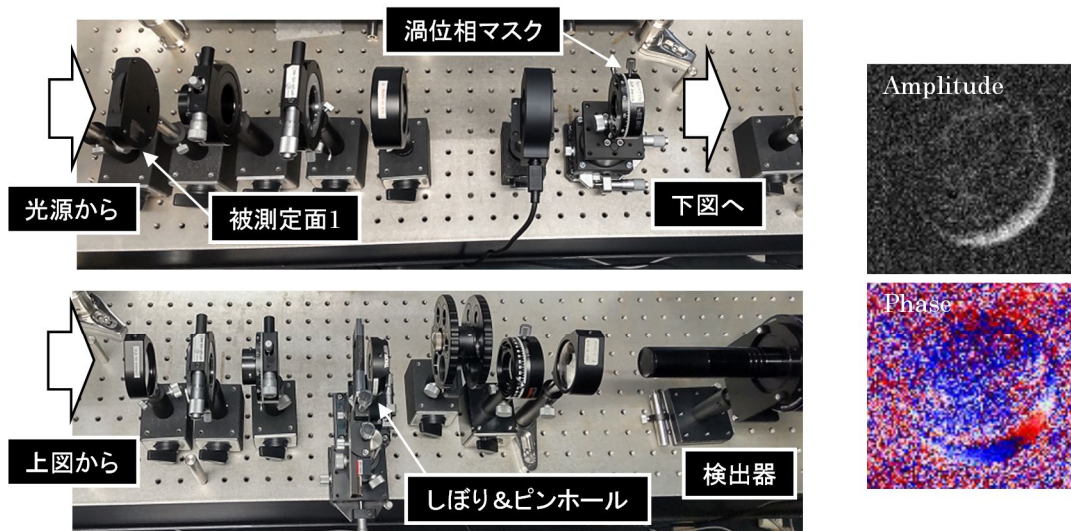


図2: 左の写真は、実験室に構築した波面センシングの実証試験機。(上)前半の光渦コロナグラフ部分。(下)後半の機能拡張型セルフコヒーレントカメラ部分。右画像は、わずかなtilt誤差を導入した波面に対する残留光計測の初期結果(振幅および位相)。

研究開始当初は、提案する波面センサーにダークホール制御(装置内部の自己揺らぎに起因する初期ノイズを低減)を組み合わせることで、極限精度のセンシングを目指すことを計画していた。このような目標に向けたダークホール制御技術の研究を、系外惑星探査のための将来テクノロジーの開発研究の文脈と並行して実施した。その結果、ダークホール制御試験が定常的に推進できる環境が整備され、そのなかで独自の制御法の提案や実証試験なども実施した。今後は、提案する波面センシング法にダークホール制御を組み合わせることで、より高精度な波面センシングを目指した研究を継続したい。

<引用文献>

- 服部雅之, 早野裕, 「すばる望遠鏡の補償光学と顕微鏡への応用」, 光学 **44**, 370 (2015).
- 玉田洋介, 「葉緑体レーザーガイド星を用いた補償光学ライブイメージング」, 光学 **44**, 384 (2015).
- 秋山毅志, 早野裕, 服部雅之, 玉田洋介, 「5. 新たな計測へ 5.1 波面センサーによる密度揺動計測」, J. Plasma Fusion Res, **92**, 912 (2016).
- G. Foo et al., "Optical vortex coronagraph," Opt. Lett., **30**, 3308 (2005).
- D. Mawet et al., "Annular groove phase mask coronagraph," Astrophys. J., **633**, 1191 (2005).
- P. Baudoz et al., "The self-coherent camera: a new tool for planet detection," Proc. IAU Colloq., **200**, 553 (2006).
- D. Rouan et al., "The four-quadrant phase-mask coronagraph. I. principle," Publ. Astron. Soc. Pacific, **112**, 1479, (2000).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Naoshi Murakami, Kenta Yoneta, Kenya Kawai, Hajime Kawahara, Takayuki Kotani, Motohide Tamura, and Naoshi Baba	4. 巻 163
2. 論文標題 Polarization-based Speckle Nulling Using a Spatial Light Modulator to Generate a Wide-field Dark Hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 129 (12pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac3510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenta Yoneta, Naoshi Murakami, Hikaru Ichien, Seiji Sudoh, and Jun Nishikawa	4. 巻 163
2. 論文標題 Half-tone Wave Front Control: Numerical Simulation and Laboratory Demonstration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 112(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac35e0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoshi Murakami, Kenta Yoneta, Hikaru Ichien, Seiji Sudoh, Keiichiro Habu, Jun Nishikawa	4. 巻 11443
2. 論文標題 Construction of EXIST (Exoplanet Imaging System Testbed) toward future space coronagraphs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 114432M-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560450	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大平泰広, 村上尚史, 須藤星路, 西川淳
2. 発表標題 偏光2チャンネル型位相マスクコロナグラフのための焦点面波面センサーの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米田謙太, 村上尚史, 一圓光, 須藤星路, 西川淳
2. 発表標題 ハーフトーン手法を用いた高コントラスト観測のためのダークホール制御技術の開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上 尚史, 米田 謙太, 西川 淳
2. 発表標題 太陽系外惑星探査を目指した波面揺らぎ補正技術の開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第42回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米田謙太, 村上尚史, 一圓光, 小池隆太, 須藤星路, 西川淳
2. 発表標題 高コントラスト観測システムテストベッドEXISTの開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤星路, 村上尚史, 早野裕, 服部雅之, 玉田洋介, 秋山毅志, 稲垣滋
2. 発表標題 光渦を利用した高感度波面センシングの数値シミュレーション
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤星路, 村上尚史, 早野裕, 服部雅之, 玉田洋介, 秋山毅志, 稲垣滋
2. 発表標題 光渦を利用した高感度波面センシング法の開発
3. 学会等名 第9回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoshi Murakami, Kenta Yoneta, Hikaru Ichien, Seiji Sudoh, Keiichiro Habu, Jun Nishikawa
2. 発表標題 Construction of EXIST (Exoplanet Imaging System Testbed) toward future space coronagraphs
3. 学会等名 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米田謙太, 村上尚史, 一圓光, 小池隆太, 須藤星路, 西川淳
2. 発表標題 高コントラスト観測システムテストベッドEXISTの開発2
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Murakami
2. 発表標題 Photonics technology toward high-contrast imaging instruments
3. 学会等名 In the Spirit of Lyot 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須藤星路、村上尚史、早野裕、服部雅之、玉田洋介、秋山毅志
2. 発表標題 光渦コロナグラフを利用した波面センサーの数値シミュレーション
3. 学会等名 第55 回応用物理学会北海道支部 / 第16 回日本光学会北海道支部合同学術講演会
4. 発表年 2020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
研究協力者	早野 裕 (Hayano Yutaka)		
研究協力者	服部 雅之 (Hattori Masayuki)		
研究協力者	玉田 洋介 (Tamada Yosuke)		
研究協力者	稲垣 滋 (Inagaki Shigeru)		
研究協力者	西川 淳 (Nishikawa Jun)		

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