

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	津久井 遼
論文題目	Development of the point-diffraction interferometer wavefront sensor for extreme adaptive optics (極限補償光学のための点回折干渉計型波面センサの開発)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は系外惑星を直接撮像するための補償光学装置にとって最も重要なデバイスである波面センサの新方式を提案し開発実証を行ったものである。申請者は上記の目的のため、独自の複屈折材料を用いた点回折干渉を原理とした波面センサを考案し (本論前半)、実際に設計および試作し、実験室内での実証を行った (本論後半)。</p> <p>第 1 章では系外惑星直接撮像のサイエンスにおける意義について述べる。系外惑星の形成シナリオを分類するために直接撮像に必要な空間分解能とコントラストについて要求性能を定義した。またバイオマーカーと観測波長の関係を示し、波面センサに求められる帯域を定義した。</p> <p>第 2 章では補償光学技術一般を概観する。特に、波面センサによる計測で生じうる誤差を分類し、波面センサへの要求性能を定義した。</p> <p>第 3 章では補償光学のうち系外惑星に特化した極限補償光学技術の概要を説明し、サンプリング点数、サンプリング速度がそれぞれ 4 万点と 2kHz が要求されることを具体的に示した。</p> <p>第 4 章では既存の波面センサを取り上げ、特に光子の利用効率、サンプリング速度、計測誤差、ダイナミックレンジの観点から比較検討を行い、現状の性能の限界と問題点を指摘する。</p> <p>第 5 章では以上のイントロダクションを踏まえ、2020 年に出版された論文を元に、新方式の波面センサを提案した。本波面センサは点回折干渉計を応用したものである。本方式では透明基板に複屈折材料を、ピンホールに透明基板とは異なる屈折率の材料を用いる。複屈折部を透過する被験波面は偏光方向により位相差が生じる。またピンホールを透過する参照波面にもピンホールの深さを制御することで意図的な位相差を与えることができる。こうすることで、透過側の被験波面と参照波面に異なる偏光方向で 2 種類の位相差を有する干渉縞を発生させる。これらとは別に基板表面で反射した波面同士は位相差ゼロで干渉を起こす。以上により 3 通りの干渉縞を得ることで、本方式は直接被験波面の位相計測を実現する。</p> <p>第 6 章は本波面センサの実用性と製造誤差について議論し、第 7 章では本波面センサの開発と実験室実証の結果を報告する。まず、実際に製作するピンホールなどのパラメータを決定した。次に、本波面センサの製作工程を説明し、実際に製作した本波面センサの製作誤差を報告した。</p> <p>第 8 章ではこの波面センサを実験室内で検証した。可変形鏡により平面波に意図的に波面誤差を与え、その波面を本センサと検証用に市販の波面センサとで計測し、両者を比較した。その結果、本波面センサがほぼ当初の設計値通りの性能を有し、十分な測定精度を達成したことを確認した。また高速で、高効率でありながら従来の波面センサに比べて、2 倍ほどの測定レンジを達成したことも実証した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

天文学研究において重要な課題の一つに太陽系外の惑星系の直接撮像が挙げられる。ノーベル賞が授与された 1995 年の系外惑星の初検出以降、これまで数千を超える系外惑星が見つかってきているが、ほぼすべてが間接的な手法による検出である。間接的な観測で得られる情報は限定される。惑星大気の組成や、興味深い生命の証拠となる信号をとらえるには直接撮像が不可欠であるが、これまで直接撮像の観測例は、冷たい巨大ガス惑星に限定される。

近い将来、空間分解能が既存の大型望遠鏡に比べて 4 倍にもなる望遠鏡が建設され、それら望遠鏡を用いた系外惑星の直接撮像による研究が俟たれるところであるが、回折限界像を達成するための高性能な補償光学装置が必要となる。申請者はこの極限補償光学用の波面センサに求められる高空間で高速なサンプリング、高い効率と測定レンジの性能を達成する新機軸の波面センサを開発実証した。この業績は超大型望遠鏡時代に向けて一つの技術課題であった波面センサの実現に先鞭をつけたと評価できる。

申請者が提案した波面センサは点回折干渉計をベースにしたものであるが、その非効率性の問題を独自のアイデアで解決した。点回折干渉計は波面誤差をもった点像付近に像より十分小さな回折体（ピンホール）を配置し、ピンホールで生まれる球面波（参照波面）とその周囲の波面誤差をもった波面（被験波面）とを干渉させる。被験波面の波面誤差を計測するためには、最低でも両者を相対的に 3 つの位相をずらした干渉縞を取得する必要があるが、複屈折材料で基板を製作し、反射光を活用することでこれを実現したことは高く評価できる。

申請者は動作原理の証明の際に、フレネル回折をもとに斜入射の影響なども考慮するなど極めて緻密な検証作業を行った。また、実用化のために想定される候補の物質の選定を行った。さらに上記で説明した位相差が理想とはことなる場合の干渉像を用いた場合の波面計測の性能を検証した。またピンホールの製作誤差や焦点での設置誤差、波長による性能の偏りについても検討を行った。同時に、予想される波面センサの性能からシステム全体で取得されるコントラストのシミュレーションを行うなど、考えうるすべての誤差要因を検討したことは特筆に値する。

申請者は、東京工業大学のオープンファシリティセンターの支援の下、本波面センサの微細加工を自らの手で行った。まず、複屈折基板にピンホール部分以外をマスクするフォトレジストを施し、イオンエッチングによりピンホールを製作した。次に基板に酸化ニオブをスパッタリングによりピンホール内に充填させた。最後に基板全体に形成された酸化ニオブの層を研磨によって除去した。これらの工程を自ら考案し、実現させるなど、その実行力も高く評価できる。

さらに申請者は製作した波面センサの各経路の光路長を計測し、その影響を見積もるなど、徹底した慎重さと遂行能力を有する。

以上のように本研究では、系外惑星の直接撮像を実現する高性能な新方式の波面センサを提案し、実験室実証までを行ったものであり、非常に高く評価できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 1 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降