

博士論文の要旨及び審査結果の要旨	
氏名	Pu Haosen
学位	博士 (工学)
学位記番号	新大院博 (工) 第 541 号
学位授与の日付	令和 5 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	Study on the measurement of phase distribution of vortex beams by sinusoidal phase modulation method (正弦波位相変調法を用いた光渦の位相分布計測に関する研究)
論文審査委員	主査 教授・鈴木 孝昌 副査 教授・大河 正志 副査 教授・村松 正吾 副査 准教授・崔 森悦 副査 准教授・大平 泰生
博士論文の要旨	
<p>光渦 (Vortex beam) は、1992 年 L. Allen によって、光渦の光軸上に位相不定で振幅がゼロの位相特異点が発生し、その各光子が軌道角運動量を持つことが実証され、その後、光通信や量子光学などの分野で軌道角運動量の性質を利用した応用が目覚ましく発展している。従って様々な実験条件下で高品質な光渦を生成し、光渦のトポロジカルチャージなどの特性を定量的に測定する研究は、光渦を用いた光応用の発展に大きく寄与すると考えられる。しかしながら、光渦の回折・干渉パターンに基づくトポロジカルチャージの推定方法は、位相情報が不確かなため、トポロジカルチャージの推定が大雑把になってしまう。一方、光渦の位相を直接計測し、高精度・高感度な推定を可能にするために、干渉計を用いた位相感度干渉計測が採用されてきたが、これらの方法は、複雑な実験構成や位相特異性に起因するデータ処理上の測定誤差などの課題が残っている。このような背景に鑑み、本論文では、より簡便な構成で、光渦の位相計測を目指した「正弦波位相変調 (Sinusoidal phase modulation: SPM)」に基づく方法を提案し完全な光渦及び不完全な分数次の光渦における位相計測とトポロジカルチャージの推定が高精度で可能であることを実験的に示した。</p> <p>第 1 章では、先ず、軌道角運動量を持つ光波伝搬に関する原理を体形的に論じ、ラゲールガウシアンビームとベッセルビームによる光渦発生原理について述べている。次に、光渦を生成するための諸技術について網羅的に概説し、さらに光渦ビームの応用例を示している。最後に、光渦波面の位相を計測する従来手法について概説し、光渦が関連する研究の全体像の背景について述べている。</p> <p>第 2 章では、従来の干渉計による光渦の位相計測の課題を明らかに提示し、その解決法として SPM 干渉計による計測法を提案している。SPM 干渉法による波面の位相計測の原理及び、本研究で実施した SPM 干渉計の実験系について詳細に述べている。即ち、SPM 干渉計は、信号発生器付き PZT に取り付けられたミラーを介してマイケルソン干渉計を改良した光学系であり、光渦の干渉像の時間波形は 8 周期にわたって記録され、この正弦波変調された信号から FFT を用いた離散信号処理によって位相と強度の分布を直接得ることができた。</p> <p>第 3 章では、光渦の生成結果及び SPM 干渉計を用いた位相分布、強度分布及びトポロジカルチャージの推定結果について述べている。本研究では、先ず空間光変調器 (SLM) による波面操作によって光渦を生成した。次に、SPM 干渉計によって CCD 上に結像する光渦とラゲールガウシアンビームの干渉縞パターンの時間変化を計測し、2 章で述べた原理に基づく信号処理を施</p>	

別記様式第 10 号の 1 (第 8 関係)

すことで 2 次元平面の位相分布と強度分布を得た。さらに、トポロジカルチャージの推定に於いて、位相特異点付近での位相アンラップ誤差を避けるために新たなアンラップ手法を考案し、アンラップ誤差無く高次の光渦の位相分布を求めることに成功し、その有用性を示した。これらの手法と干渉技術を適用することで、高次光渦及び分数次の不完全な光渦について位相分布を計測することが出来た。さらに、これの位相分布のらせん構造における位相飛びから正確なトポロジカルチャージの推定が可能であることを示した。最後に、本研究で用いた光学系の測定誤差について考察し検証を行っている。つまり、SLM を介して測定されるガウスビームの波面の揺らぎから、自由空間伝播後の参照波の測定誤差を推定した。

第 4 章では、SPM 干渉計による提案手法の有用性と実験結果をまとめ、以下の様に総括している。光渦は SLM によって生成され正弦波変調された SPM 干渉信号から位相分布を直接得ることができた。次に、トポロジカルチャージを定量的に推定するために、新たな位相アンラップ法を提案し、その測定結果における位相特異性の影響を低減した。その結果、分数・整数のトポロジカルチャージを定量的に推定することに成功した。11 回の繰り返し測定により、測定結果の平均値と標準偏差で評価した結果、最大測定誤差は約 4%であり、本装置による光渦の位相測定は高い測定精度と安定性を有していることが明らかになった。

最後に、第 5 章では、本研究の意義と今後の計画について述べている。本研究で構築した光渦発生系と検出系は Optical coherence tomography(OCT)と散乱媒質中の段差形状計測への適用できるため、生体計測及び光検出技術発展への寄与が期待されることが述べられている。

審査結果の要旨

従来から、光渦の計測に用いる位相感応型干渉計として、4 段階の位相シフト法や、ヘテロダイナミクス干渉計などが採用されてきた。しかし、4 段階の位相シフトアルゴリズムでは、少なくとも 3 つの事前定義された位相シフトとそれに対応するインターフェログラムが必要であり、わずかな位相シフトのずれが、測定結果に大きな誤差を与える可能性がある。さらに、ヘテロダイナミクス干渉計では、時間的に変調される干渉信号の低周波ノイズの影響を受けやすい。これらの従来法と比較して、本研究で提案している SPM 法では、サンプリング周波数の制御が可能であり、高周波の位相変調信号の選択的抽出による低周波ノイズの除去と簡便な装置構成に酔い実装が容易であるという利点がある。申請者は、SPM 干渉計を実装し、SLM によって生成した様々な条件下の光渦の位相・強度分布及びトポロジカルチャージの定量的計測を実現した。測定された光渦の等位相面の波面誤差は 11 回の計測において 4%程度であった。

以上のように、本論文では位相シフト法やヘテロダイナミクス法などの従来技術の課題を解決できる正弦波位相変調干渉(SPM)法を取り入れることによって、光渦の波面位相とトポロジカルチャージ計測の簡便化および高精度化を実現している。また、正確な推定が困難であった従来の位相アンラップ法を改良し、光渦に特化した方位角方向のアンラップ法を用いる事で、分数次の不完全な光渦に於いても正確な計測が可能となっている。これらの本論文の成果は光渦を用いた諸分野及び OCT を含む様々な光計測技術、及びナノレベルのレーザー加工分野における位相構造の品質向上を実現するものであり、干渉計測の発展および高精度加工技術の向上に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値あるものと認定した。