

京都大学	博士（工学）	氏名	小林 和弘
論文題目	Geometric phases in optical interferometry (光学的干渉における幾何学的位相)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、光の偏光状態の変化に伴う幾何学的位相について、特に光学的干渉に内在する幾何学的位相の存在とその振る舞いを明らかにするとともに、幾何学的位相の非線形な変化の高感度測定への応用を提案するものであり、7章からなっている。 第1章は序論であり、研究の背景と全体の構成を述べている。 第2章では、準備として幾何学的位相の基礎について述べている。まず、Pancharatnamにより導入された2状態間の同位相関係に基づいて、3つ以上の状態に対して定義されるゲージ不変量として幾何学的位相を導入している。このように定式化された幾何学的位相は状態空間における幾何学的構造の情報を含んでおり、特に、偏光状態のような2状態系においては幾何学的位相は状態空間であるポアンカレ球(あるいはブロッホ球)上の球面多角形の面積に比例することが示されている。 第3章では、3光束干渉計を用いた幾何学的位相の直接観測を提案している。従来、幾何学的位相を観測するためには、系を時間的に発展させて元に戻した状態と元のままの状態を干渉させることで行われてきた。しかし、幾何学的位相は時間発展とは無関係に、状態空間の幾何構造のみに依存して定義される量である。本論文では、3つの偏光状態で決まる幾何学的位相を、3光束干渉計における干渉模様から抽出する方法を考案し、実験的に検証した。このように時間発展に依らない直接的な観測は、幾何学的位相の本質的定義に忠実な手法であるという点で、非常に重要なものである。さらに、光状態だけでなく、一般の量子系に適用可能であり、時間発展の制御が必ずしも容易でない系に関する幾何学的位相を観測する手段としても有用である。また、幾何学的位相のゲージ不変性を明瞭に示す実験も行っている。 第4章では量子消去系における幾何学的位相について述べている。干渉計内に光子の経路を識別する装置を導入すると、経路の重ね合わせ状態が破壊され、干渉縞が観測されなくなる。しかし、干渉が破壊された後であっても、状態の事後選択により経路の識別情報を消去することが出来れば、干渉縞を回復することができる。このような考えは、ScullyとDruhlによって量子消去と名付けられている。干渉縞の存在は量子の波動性を、光路識別による干渉縞の消失状態は粒子性を、それぞれ示しており、干渉の有無に係わる量子消去系は量子の波動・粒子相補性を示す重要な実験である。本論文では、このような量子消去の系において、幾何学的位相が本質的な役割を担っていることを見い出した。実際、ダブルスリット干渉計を用いて、経路識別による干渉縞の消失と、量子消去による干渉縞の回復が幾何学的位相を用いて説明できることを示している。さらに、パラメータに対する幾何学的位相の非線形な依存性のために、わずかな偏光状態の変化に対して、干渉縞が大きく移動する現象を観測している。幾何学的位相の非線形性を偏光の状態空間であるポアンカレ球上の幾何学的性質として解析している。量子消去と幾何学的位相という基本概念とそれらの間の関係を統一的に議論できるという点で、本論文で提示された系は非常に有用である。			

第 5 章では、2 光子に対する幾何学的位相についての理論的検討と実験を行っている。4 章で示したような幾何学的位相の非線形性は、変化が急峻となる領域の幅とその勾配の大きさの間にトレードオフ関係が存在する。これは、幾何学的位相の全変化量として、ポアンカレ球 1 個に対応する位相 ($0 \sim 2\pi$) しか利用できないために生じる制約である。2 光子分の位相を利用できれば、幾何学的位相の傾きを 2 倍に増大させることが可能である。光子対と呼ばれる時間相関を持った 2 光子の干渉縞を観測することで、2 光子に対する幾何学的位相をその干渉縞の動きとして取得することができる。本論文では偏光素子を含むマッハ・ツェンダー干渉計に光子対を入射し、同時計数によって観測される 2 光子干渉縞の移動を見ることで、1 光子に対して 2 倍の幾何学的位相が得られることを示し、さらに非線形性がそれに応じて大きくなることを実証した。

第 6 章は、幾何学的位相の非線形性を利用した高感度測定に関して論じている。状態の事後選択を適切に行なうことで、幾何学的位相は非線形に変化し、干渉縞は大きく移動する。この増幅効果により測定の感度向上が期待できる。しかし、事後選択に伴い、検出される光強度が小さくなる。ショット雑音が支配的となるような状況下では、SNR は光強度の平方根に比例するため、干渉縞の移動距離が大きくなっても、光強度が小さいため SNR を改善することはできない。しかし、光源の雑音などの技術的な雑音が卓越する状況においては、SNR は光強度に依存しなくなるため、干渉縞の移動量の増幅により SNR が改善されることを示している。さらに、多光子の場合についても議論を展開している。

第 7 章は結論であり、本論文の成果をまとめるとともに、将来の展望を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

幾何学的位相は、量子系をはじめとする多くの振動・波動系に現れる普遍的な構成要素であり、状態空間の幾何学的な構造を反映している量である。最近では、幾何学的位相の摂動に対する安定性を利用した量子計算ゲートへの応用も注目されている。本論文は、光の偏光状態の変化に伴う幾何学的位相に着目し、光学的干渉における幾何学的位相の役割とその振舞を明らかにするものである。また、そのパラメータに対する非線形的変化を利用した高感度測定への応用に関する提案を行っている。主な内容は以下のとおりである。

(1) 幾何学的位相の基礎として、2状態間の相対位相関係を導入し、3つの状態によって定まるゲージ不変量として、幾何学的位相を定式化している。この幾何学的位相は状態空間の幾何学構造を反映しており、2状態系ではポアンカレ球上の球面多角形の面積に比例する。

(2) 従来、幾何学的位相は時間的发展させた系と元の系を干渉させ、それらを位相比較することによって測定されてきた。一方、本論文では3つの状態で定まる要素的幾何学的位相を時間发展なしに直接観測する新しい方法を提案している。そして、偏光の自由度を有する3光束干渉系を構成し、幾何学的位相の直接測定に初めて成功した。

(3) 経路識別と事後選択の自由度を有する量子消去系の干渉を詳しく解析し、経路識別による干渉縞の消失と量子消去による干渉縞の回復において、幾何学的位相が本質的な役割を果たしていることを見出した。また、幾何学的位相の非線形変化のために、わずかなパラメータ変化に対して、干渉縞が大きく移動するという現象を観測している。

(4) 幾何学的位相の非線形的振舞の程度はポアンカレ球の表面積で制限されている。その制約を回避する手段として、時間相関をもつ光子対に対する干渉計の利用を提案した。そして、2光子干渉計による実験を行い、1光子の場合の倍の幾何学的位相の変化を得た。

(5) 幾何学的位相の非線形な変化を利用した高感度測定手法の信号対雑音比(SNR)を計算し、幾何学的位相の非線形性と光子対による干渉縞の移動量増幅の有用性と限界を議論している。状態の事後選択に際して、幾何学的位相の非線形性により干渉縞は大きく移動するが、他方、検出される光強度も小さくなる。そのため、ショット雑音が支配的となるような状況下では、SNRの改善は見られない。しかし、光源由来の技術的な雑音が支配的な状況では、SNRは光強度に依存しなくなるため、干渉縞の移動量の増幅によりSNRが改善することを示した。

これらの成果は、光学的干渉における幾何学的位相の本質的な理解とその拡張を実験と理論両面から明らかにするものである。さらに、幾何学的位相の非線形性に着目し、高感度測定への応用についての議論も行なっており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成23年3月23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。