

学 位 論 文 題 名

OPTICAL HETERODYNE POLARIZATION
INTERFEROMETRY FOR DYNAMIC
PRECISION METROLOGY

(動的高精度計測のための光ヘテロダイン偏光干渉法)

学位論文内容の要旨

光ヘテロダイン検出を用いた干渉計は、測定対象の変位とビート光電流の位相出力が線形の関係にあり、また、光源強度の変動や電子回路に起因する雑音の影響を受けにくいなどの優れた特徴を持っている。特に、直交2周波成分を有するレーザビームを用いた光ヘテロダイン偏光干渉法は、現用の偏光計測法の中で最も高感度であり、物質の光学的異方性などを研究する手段としてもその有用性が広く認められている。しかしながら、この偏光干渉計には、直交2周波光源の偏光軸の調整の繁雑さなど、種々の未解決の問題があり、これらが従来、光ヘテロダイン偏光干渉計測法の応用分野を制約する大きな要因となっていた。この問題を背景として、本論文では新しい光ヘテロダイン偏光干渉計測法を述べるとともに、その偏光計測分野への応用を示す。本論文は7章で構成されている。以下、各章について概要を述べる。

第1章は序論で、光ヘテロダイン干渉計測法に関する歴史的背景と研究動向を概説し、本研究の目的について述べている。

第2章では、偏光状態の時空間分布計測を実現する目的で開発された光ヘテロダイン干渉偏光計測法と、その手法を空間周波数領域に拡張した干渉偏光計測法について述べている。前者の偏光計では、被測定楕円偏光は光検出器アレイ上で直交2周波参照光と重畳され、各アレイ素子からビート光電流が得られる。異なる中心周波数を持つ2つのビート成分は、被測定楕円偏光の互いに直交する偏光成分の複素振幅の情報を有している。このビート光電流の時間に関するフーリエ成分から偏光状態の時空間分布の決定に必要なパラメータが抽出される。一方、後者の偏光計では、偏光方向が互いに直交した2つの参照直線偏光(同一周波数)が用いられる。それぞれの参照光の波面を被測定光の波面に対して若干傾けておくと、2種類の干渉縞が光検出器アレイ上に生じ、それぞれの空間周波数スペクトルから偏光状態の分布を決定できる。これらの干渉偏光

計の特徴は、光学系の回転検光子などの機械的可動部を必要とせず、かつ、一個の光検出器アレイのみで偏光計を構成している点にある。従って、時間的には検出器の時間周波数帯域内で、空間的には光学系で決まる空間周波数帯域内での時空間偏光計測が可能となる。また、本法を光弾性効果を用いた応力解析に適用すれば、主応力差のみならず、2つの主応力の向きと大きさを独立に決定できる。

第3章では、複屈折の高精度測定を目的として開発された、光ヘテロダイン偏光干渉計について述べている。本干渉計では、直交2周波光が信号光として複屈折サンプルに入射される。被測定物体のそれぞれの複屈折軸を伝搬した光波は、偏光ビームスプリッタで分割され、光検出器上で第3の周波数を持つ局発光と重畳され、ビート光電流を生ずる。光電流中に含まれる直交偏光間のクロスカップリングによる干渉成分は、周波数フィルタリングにより除去されるので、直交2周波光源の消光比の劣化や、光学素子の偏光軸のミスアライメントなどの影響を受けずに複屈折計測が可能となる。検証実験により、信号光の消光比が20 dB以上で、偏光クロスカップリング誘起過剰誤差を位相角で1度以下に抑えられることが示されている。

第4章では、光ヘテロダイン偏光干渉計から得られるビート光電流の位相を広帯域、かつ、広ダイナミックレンジで復調するための2種類の位相復調法が述べられている。第一の方法では、光ヘテロダイン干渉計から得られた信号ビート光電流と参照ビート光電流をそれぞれ2値化し、周波数通倍回路(PLL)から得られるパルスを用いて両者の立ち上がり時間差から位相復調がなされる。この方法を用いると、約20 kHz程度までの位相変動を実時間で復調できる。試作された位相復調回路では、ダイナミックレンジ 32π 、最小検出可能位相 $2\pi/128$ が得られている。第二の方法では、コンピュータによるデジタル信号処理を用いて位相復調がなされる。光ヘテロダイン干渉計から得られる信号ビート光電流をコンピュータに取り込み、高速フーリエ変換を用いてフーリエ変換する。得られるフーリエスペクトルは低周波成分と2つのビート成分を有する。このうち、ビート周波数を中心とする1つの成分のみを取り出し、逆フーリエ変換することにより、ビート成分の複素振幅の時間変動を求めている。参照ビート光電流についても同様の処理を施し、その複素振幅変動を求める。両者の偏角の差から、信号ビート光電流の位相の時間変化が求められる。この手法では、実時間での位相復調は不可能であるが、ビート位相の復調が比較的広帯域で実現される。実験により、約4 MHzの帯域を持つ位相変動が復調されることが示されている。

第5章では、複屈折ファイバ伝搬光波の相関処理システムについて述べられている。このシステムでは、高速で変動する位相変動の相関を求めるため、PLLを用いた位相復調器が用いられ

ている。また、局発光を用いた光ヘテロダイン偏光干渉法により、ファイバ伝搬光波の励起モード成分のみならず結合モード成分（漏洩成分）についても、その相関処理を可能としている。本方式では、干渉計の光路差を無くすことにより、光源自身のゆらぎが相殺され、かつ、干渉計の光路差を可変とせずに電子的に相関処理がなされるという特徴を有するので、ファイバによる伝搬光波のゆらぎのみについて統計処理がなされる。また、自己相関のみならず、相互相関や伝達関数も求められる機能を有している。このファイバ伝搬光波相関処理システムを用いると、従来ほとんど成されていなかった音波や振動などの動的環境変動に対するファイバ伝搬光波の応答特性を調べることも可能となる。ファイバの長手方向と横手方向に加えられた振動に対する応答特性が調べられている。

第6章では、機械的変位と温度変化の同時測定のために開発された2重ファイバコイルセンサについて述べられている。2本の平形PANDAファイバを、両者の主軸方向が直交する配置でコイル状に巻くと、コイルの曲率の変化に伴い、それぞれのリタデーションが逆符号で変化する。このリタデーションの差から機械的変位と温度変化が独立に求められる。センサの感度はファイバコイルの巻き数にほぼ比例する。検証実験により、感度ならびに外的擾乱除去性能が確認されるとともに、振動に対する周波数応答特性も調べられている。

第7章では、本論文で得られた結果が総括され、結論が述べられている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	大塚喜弘
副査	教授	朝倉利光
副査	教授	大場良次
副査	教授	田中啓司

直交2周波成分を有するレーザービームを用いた光ヘテロダイン検出は、信号光波と局部発振光波が共通光路を伝搬するため、光学系に起因する擾乱等が相殺され、高安定かつ高感度偏光計測法として、その有用性が広く認められている。しかしながら、この偏光干渉計測法には、直交2周波成分間で生ずるクロストークや複雑な光学系の調整など、種々、未解決の問題があり、従来、これらが光ヘテロダイン偏光干渉計測法の利用分野を制約する大きな要因となっていた。本

論文は、これらの諸問題を解決するための新しい光ヘテロダイン偏光干渉計測法の開発研究を行い、その偏光計測分野への多面的な適用を示したものである。

第1章では、光ヘテロダイン偏光干渉計測法に関する研究の歴史的背景と研究動向を概説するとともに、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第2章では、偏光状態の時空間分布計測を実現する目的で開発された光ヘテロダイン干渉計測法が述べられている。直交2周波成分を有するレーザービームと、これら2周波数と異なる第3の周波数を有する可干渉なレーザービームをアレイ型テレビカメラ上で重畳し、3周波数成分の光ヘテロダイン検出を行っている。各アレイ素子から得られるビート光電流を計算機に取り込み、時間に関するフーリエ成分から、偏光状態の時空間分布の決定に必要なパラメータが算出される。回転検光子等の機械的可動部を必要とせず、かつ、一個のアレイ型光検出器を用いているため、時間的には検出器の時間周波数帯域内で、空間的には光学系で決まる空間周波数帯域内での時空間偏光計測が可能なが示されている。また、本光ヘテロダイン干渉偏光計測法を光弾性応力解析に適用すれば、応力状態にある光弾性材料の主応力差のみならず、2つの主応力の向きと大きさを独立に決定できることを示すとともに、現用の偏光計ではこの決定が困難なが述べられている。

第3章では、複屈折の高精度測定を目的として開発された光ヘテロダイン偏光干渉計が述べられている。本干渉計では、ビート光電流中に含まれる直交偏光間のクロストークによる干渉成分が、第3の周波数を持つ局部発振光の導入と周波数フィルタリングにより除去されるため、直交2周波光源の消光比の劣化や、光学素子の偏光軸のミスアライメントなどの影響を受けずに、高精度複屈折測定が可能である。直交2周波成分を持つ信号光の消光比が20dB以上で、上述のクロストークが位相角で1度以下に抑えられることが実証実験で明らかにされている。

第4章では、光ヘテロダイン偏光干渉計から得られるビート光電流の位相を広帯域、かつ、広ダイナミックレンジで復調するための2種類の位相復調法が開発され、その動作特性が述べられている。これらの位相復調法を振動計測などに用いると、測定対象の動的応答特性は従来の偏光干渉計よりも広帯域、かつ、高精度に調べられるなが示されている。

第5章では、複屈折ファイバ伝搬光波の相関処理システムが述べられている。このシステムでは、干渉計の光路差を可変とせずに電子的に遅延時間を作り、自己相関のみならず、相互相関や伝達関数も求められる。このシステムを用いて、ファイバの動的変形による伝搬光波のゆらぎに関する統計処理が可能となり、従来、困難だった音波や振動などの環境変動に対するファイバ伝搬光波の統計的応答特性が明らかにされたなが述べられている。

第6章では、機械的変位と温度変化の同時測定が可能な2重ファイバコイルセンサの開発について述べられている。実証実験により、高感度測定及び外的擾乱除去性能が確認されるとともに、振動に対する周波数応答特性も調べられることが示されている。

第7章は、本論文の総括である。新しい開発された光ヘテロダイン偏光干渉計測法が偏光状態の高精度時空間応答特性の研究を可能とするとともに、偏光計測の分野へ大きく貢献するものであることが結論づけられている。

これを要するに、著者は新しく開発された光ヘテロダイン偏光干渉計測法の諸特性を明らかにするとともに、その有用性を光弾性解析、反射鏡の振動測定、ならびに、光ファイバの外的擾乱に対する伝搬光波の動特性測定によって実証したものであり、応用物理学及び偏光計測法の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。