

学位論文題名

Characterization and Applications of the Image Fiber
by Using the Properties of Laser Speckle

(レーザスペckルを用いたイメージファイバの解析と応用)

学位論文内容の要旨

イメージファイバは、工学や医学の分野において現在広く利用されている。例えば、エンジン内部や油田の油送管の監視、あるいは人体の各種器官の状態観察や手術などにイメージファイバが用いられている。さらに最近では、外径数百 μm 以下、また長さ100m以上のイメージファイバが通信用光ファイバ製造技術を利用して開発され、新たな応用分野を広げつつある。このように、イメージファイバは実際の利用に関しては多くの事例があるが、その利用法は画像伝送に限られており、その結果イメージファイバに関する研究のほとんどはインコヒーレントな画像伝送という観点からのみ行われてきた。しかし、イメージファイバは画像伝送に限らず、さまざまな光応用計測の分野に活用できる可能性を秘めている。特に、レーザの開発と共に発展したさまざまなコヒーレント光計測法と組み合わせることで、従来非破壊計測が困難であった物体に対する高精度な測定が可能となる。本論文は、コヒーレント光学系に特有の現象であるレーザスペckルを用いたイメージファイバの特性解析およびその計測への応用について、理論的および実験的に考察したものである。以下、本論文の各章についての概略を述べる。

第1章では、イメージファイバおよびレーザスペckル現象を利用した光計測法の歴史的背景について説明したのち、本論文の概略を述べる。

第2章では、イメージファイバの基本理論について概説する。ここでは、イメージファイバ中の光伝搬特性を波動光学および幾何光学を用いて解析する。さらに、イメージファイバのスペckル透過率と減衰、および偏光状態の変化を議論する。

第3章では、レーザスペckルの統計的特性、および電子的スペckルパターン干渉計の基本原理について概説する。特に、本干渉計において問題となる、スペckルパターンの相関度が増減する要因について詳しく議論する。

第4章では、イメージファイバを用いたデジタルスペckルパターン干渉計の特性を理論と実験の両面から解析している。粗物体からのコヒーレント散乱光は対物レンズを通してイメージファイバの入射端にスペckルパターンを形成する。このスペckルパターンをイメージファイバによって伝送し、ビデオカメラで検出する。コンピュータで変位前後のスペckルパターンの差をとることによって干渉縞が得られ、干渉縞の可視度を求める

ことで物体の面内変位が測定できる。干渉縞の可視度は、スペックルサイズとイメージファイバの空間フィルタリング特性との関係で決定されることが明かとなる。スペックルサイズが一本のイメージファイバエレメントの直径に比べて十分大きい場合、スペックルパターンは忠実に伝送されるため、イメージファイバを用いない従来の手法とほぼ同じ測定領域および精度が得られる。それに対し、スペックルサイズが小さいときには、測定できる面内変位の最大値を従来の手法に比べて大きくすることが可能となる。この結果は、イメージファイバを単に画像伝送に用いるだけではなく、ファイバの空間サンプリング特性を生かしてコヒーレント光計測に積極的に活用すべきであることを示唆している。

第5章では、イメージファイバの位相シフトスペックル干渉計への応用を研究している。位相シフト法は、スペックル干渉を用いた計測法のひとつであり、参照波の位相を変化させて干渉パターンをとり、そこから位相分布の絶対値を求めるものである。本章では、イメージファイバを偏光技術を用いた位相シフトスペックル干渉法へ応用し、物体の面外変位の測定を行う。レーザ光を偏光ビームスプリッタで二つの直交する直線偏光のビームにしたのち物体に照射する。そこからの散乱光は、対物レンズを通してイメージファイバの入射端に二つの直交偏光したスペックルパターンを形成する。イメージファイバを通して出射面から出たこれら直線偏光スペックルパターンは、四分の一波長板によってそれぞれ逆回りの円偏光になり、検光子を通すことにより同偏光成分のみが干渉する。この検光子を回転させることによって、二つの偏光成分の位相差を変化させる。最後に、干渉したスペックルパターンをビデオカメラで検出し、コンピュータで変位前後のスペックルパターンの差をとることによって干渉縞が得られ、その位相分布から物体の面外変位が測定できる。実験の結果、イメージファイバがスペックルパターンの偏光状態を変化させない限り、変位情報を含むスペックルパターンを検出システムで忠実に再生・利用できることが確認される。さらに、物体の面外変位分布を精度よく測定できることが示される。

第6章では、イメージファイバ中を伝搬する光の偏光特性を実験的に解析している。イメージファイバをコヒーレント光を用いた計測の分野で利用しようとする、ファイバの複屈折性とモード結合によって、その中を伝搬する光の偏光状態が変化してしまうという問題が生じる。そこで、この変化の状態を正しく知ることが必要となる。本章では、イメージファイバの出射面に形成されたスペックルパターンのストークスパラメータを測定し、それを統計的に解析する。直線偏光したレーザ光を測定対象のイメージファイバに入射し、その出射面から出たスペックルパターンを四分の一波長板と検光子を通してビデオカメラで検出する。ビデオ信号はコンピュータに送られ、ここでストークス (Stokes) パラメータの確率密度関数が計算される。この密度関数から、最終的に伝搬光の直線偏光からのずれ、および偏光度が計算される。実験の結果、伝搬距離に比例して偏光度の値が小さくなることが示される。また、高い分解能をもつイメージファイバほど、強い偏光状態の変化を引き起こすことが明らかとなる。

第7章では、本研究で得られた結果を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 朝 倉 利 光
副 査 教 授 伊 藤 精 彦
副 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 大 塚 喜 弘
副 査 教 授 大 場 良 次

学 位 論 文 題 名

Characterization and Applications of the Image Fiber by Using the Properties of Laser Speckle

(レーザスペckルを用いたイメージファイバの解析と応用)

イメージファイバは、工学や医学の分野において現在広く利用されているが、その利用法は画像伝送に限られており、その結果イメージファイバに関する研究のほとんどはインコヒーレントな画像伝送という観点からのみ行われてきた。しかし、イメージファイバは画像伝送に限らず、さまざまな光応用計測の分野に活用できる可能性を秘めている。特に、レーザの開発と共に発展しているさまざまなコヒーレント光計測法と組み合わせることで、従来非破壊計測が困難であった物体に対する高精度な測定が可能となる。本論文は、コヒーレント光学系に特有の現象であるレーザスペckルを用いたイメージファイバの特性解析およびその計測への応用について、理論的および実験的に考察したものである。

第1章では、イメージファイバおよびレーザスペckル現象を利用した光計測法の歴史的背景について説明したのち、本論文の概略を述べている。

第2章では、イメージファイバ中の光伝搬特性を波動光学および幾何光学を用いて解析している。さらに、イメージファイバのスペckトル透過率と減衰、および偏光状態の変化が議論されている。

第3章では、レーザスペckルの統計的特性、および電子的スペckルパターン干渉計の基本原理解について概説している。特に、干渉計において問題となる、スペckルパターンの相関度が変化する要因について詳しく議論されている。

第4章では、イメージファイバを用いたデジタルスペckルパターン干渉計の特性が理論と実験の両面から研究されている。粗物体からのコヒーレント散乱光によって形成されたスペckルパターンをイメージファイバによって伝送し、ビデオカメラで検出する。コンピュータで変位前後のスペckルパターンの差をとることによって干渉縞が得られ、干渉縞の可視度を求めることで物体の面内変位が測定できる。干渉縞の可視度は、スペckルサイズとイメージファイバの空間フィルタリング特性との関係で決定されることが明かにされている。特に、スペckルサイズが小さいときには、測定できる面内変位の最大値を従来の手

法に比べて大きくすることが可能となることが示されており、これはイメージファイバを単に画像伝送に用いるだけではなく、ファイバの空間サンプリング特性を生かしてコヒーレント光計測に積極的に活用すべきであることを示唆している。

第5章では、イメージファイバの位相シフトスペckル干渉計への応用を研究している。位相シフト法は、スペckル干渉を用いた計測法のひとつであり、参照波の位相を変化させて干渉パターンをとり、そこから位相分布の絶対値を求めるものである。本章では、イメージファイバを偏光技術を用いた位相シフトスペckル干渉法へ応用し、物体の面外変位の測定を行なっている。実験の結果、イメージファイバがスペckルパターンの偏光状態を変化させない限り、変位情報を含むスペckルパターンを検出システムで忠実に再生・利用できることが確認される。さらに、物体の面外変位分布を精度よく測定できることが示されている。

第6章では、イメージファイバ中を伝搬する光の偏光特性について実験的研究を行っている。イメージファイバをコヒーレント光を用いた計測の分野で利用しようとする、ファイバの複屈折性とモード結合によって、その中を伝搬する光の偏光状態が変化するという問題が生じる。そこで、この変化の状態を正しく知ることが必要となる。本章では、イメージファイバの出射面に形成されたスペckルパターンのストークス (Stokes) パラメータを測定し、それを統計的に解析している。直線偏光したレーザー光を測定対象のイメージファイバに入射し、その出射面から出たスペckルパターンを四分の一波長板と検光子を通してビデオカメラで検出する。ビデオ信号はコンピュータに送られ、ここでストークスパラメータの確率密度関数が計算される。この密度関数から、最終的に伝搬光の直線偏光からのずれ、および偏光度が評価される。実験の結果、伝搬距離に比例して偏光度の値が小さくなることが示されている。また、高い分解能をもつイメージファイバほど、強い偏光状態の変化を引き起こすことが明らかにされている。

第7章では、本研究で得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、イメージファイバをレーザースペckル応用計測に利用する際に生じるいくつかの問題について理論・実験の両面から解析を行うことにより、コヒーレント光学におけるイメージファイバの特性について有益な新知見を得ると共に、新しいイメージファイバ利用の計測装置の提案を行っており、光工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。