

学位論文題名

Statistical Properties of Laser Speckles
Produced by Curved Rough Surfaces

(粗曲面により生成されるレーザスペckルの統計的特性)

学位論文内容の要旨

レーザの出現以来、この新しいコヒーレントな光源はさまざまな光学技術に応用されている。しかし、コヒーレント光であるために、物体との相互作用の結果としてスペckルと呼ばれる現象が必ず発生する。このスペckル現象を積極的に利用した研究が数多くなされ、表面粗さ計測、速度計測などがある。しかし、現在までのスペckルに関する研究において、主に平面状の物体が仮定されている。しかし、現実の物体面は曲面であることが多い。曲面により生成されるスペckル場には曲面の粗さ情報だけではなく、巨視的な曲面についての情報も含まれており、これを取り出すことは有効と考えられる。本論文は、レーザスペckルの曲面計測への応用のために、曲面により生成されるレーザスペckルの統計的特性を解析することを目的とする。

第1章では、レーザスペckルに関する研究の発展に関する概説を行ない、さらに本論文の目的と各章の内容について述べている。

第2章では、本論文の背景となるレーザスペckルに関する基本的物理概念をまとめている。レーザスペckルの形成が照明された物体面の各点からのコヒーレントなランダムな光波の重ね合わせによることを示し、二次元ランダムウォーク問題に帰着することを示している。さらにレーザスペckル場の統計的な解析の基礎となる強度および位相の確率密度関数、動的スペckルの解析に用いる時空間相互相関関数についての物理的・数学的基礎理論を示している。

第3章では、粗曲面により回折場に生成されるスペckル位相の統計的特性についての解析を行なっている。粗曲面のモデル化として、ここでは球面を考え、また物体面から観察面までの光の伝搬を統括的に記述するために光学的システム関数を用い、その関数の中に物体表面の曲面情報を位相変化項として繰り入れることにより、粗曲面により生成されるスペckル場の統計的特性を記述するための基本パラメータの一般形を導出している。これを基に等確率密度楕円の挙動を物体表面の曲率半径との関係で解析し、さらにスペckル位相の確率密度関数に及ぼす物体面の曲率半径の影響について解析している。

第4章では、第3章で得られた結論を発展させ、より一般化された粗曲面として回転楕円体によりモデル化し、その主軸曲率半径によって曲面を表し、このような曲面によって回折場に生成されるスペckルの位相と強度についての統計的特性の解析を行なっている。スペckル場に及ぼす物体表面の曲率半径の影響を等確率密度楕円の変化によって解析し、スペckル位相の確率密度関数の変化を曲率半径による光軸上での変化および光軸

に垂直な方向への非等方的変化として明らかにしている。さらに、スペックル強度の統計的特性に及ぼす物体表面の曲率半径の影響を円形性、対称性、可視度という統計量を用いて解析し、スペックルが非円形ガウス統計に従う領域が非等方的に広がることを示している。

第5章では、前章までの静的なスペックル場の解析から、回転曲面により生成される動的スペックルの解析へと発展させている。動的スペックルの強度ゆらぎの時空間相互相関関数を導出し、これに及ぼす物体表面の影響を解析している。空間的な相関の程度を示すスペックルの相関距離についての検討を行ない、これを基に動的スペックルが並進運動とボイリング運動を示す範囲についての解析を行なっている。物体表面が曲面である場合、特に凸面の場合にはボイリング運動を観測できる領域が次第に減少し、回折場の多くの領域にわたって並進運動のみが観測されることを明らかにした。さらに時空間相互相関関数についての検討を行ない、回転物体の曲率半径の計測への応用の可能性を示している。

第6章では、光応用計測で一般的に用いられる有限開口によって検出される動的スペックルの積分強度の統計的特性について解析している。有限開口によるスペックルの相関距離の変化について検討し、さらに動的スペックルの積分強度ゆらぎの時空間相互相関関数に及ぼす物体表面の曲率半径の影響について解析し、曲率半径と相互相関関数の関係を明らかにしている。さらに、これらの解析を実験的に検証するために、円筒粗面を対象として動的スペックルの時空間相互相関関数の測定を行ない、動的スペックルの物体の曲率半径計測への応用を行ない、解析の正当性を明らかにしている。

第7章では、本研究で得られた結果を総括し、結論が述べられている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	朝倉利光
副査	教授	三島瑛人
副査	教授	小柴正則
副査	教授	大塚喜弘
副査	助教授	魚住純

学位論文題名

Statistical Properties of Laser Speckles Produced by Curved Rough Surfaces

(粗曲面により生成されるレーザスペckルの統計的特性)

レーザスペckルの研究においては、多くの場合、スペckルを生成する粗面は平面であり、研究の主眼は粗面の平均粗さや平均移動速度などの統計量であることが多い。しかし、平面は物体表面の一例であり、一般的には曲面としてとらえることができる。さらに、曲面により生成されたスペckルは表面粗さや移動速度の情報のみならず、曲面に関する情報を含んでおり、スペckルの解析により、この曲面情報を取り出すことができると考えられる。本論文は、曲面により生成されるスペckルの統計的時空間特性に関する研究とその計測への応用についての研究をまとめたものである。

第1章では、レーザスペckルの研究の発展に関する概説を行い、さらに本論文の目的と各章の構成について述べている。

第2章では、本論文の背景となる平面散乱物体によるレーザスペckルの生成に関する基本的物理概念をまとめ、さらに解析の基本となるスペckル強度および位相の一次統計、および動的スペckルの時空間相互相関関数についての数学的基礎について述べている。

第3章では、曲面により回折場に生成されるスペckルの位相統計についての解析を行っている。光学的システム関数を導入し、物体の曲面に関する情報を光学的システム関数の位相項として繰り入れることにより、スペckル場の基本統計量に関する一般式を導出し、これを用いて等確率密度楕円を解析することにより、スペckル場に及ぼす物体表面曲率の影響について明らかにしている。また、スペckル場の生成において重要なスペckル位相の確率密度関数について、物体表面曲率の影響について解析している。

第4章では、対象となる粗曲面のモデルを回転楕円体により一般化し、スペckル場の位相および強度の統計的特性についての解析を行っている。等確率密度楕円を用いてスペckル場に及ぼす物体表面の曲率半径の影響を解析し、さらにスペckル位相の確率密度関数に及ぼす影響についても解析している。スペckル強度の統計的特性については、円形性、対称性、可視度を用いて解析し、粗曲面の曲率半径の変化に伴い、特に

回転楕円体の二つの主軸曲率半径が異なる場合にはスペckル場が非等方的な場となり、非円形ガウス統計に従う領域が拡大していくことを明らかにしている。

第5章では、回転曲面により回折場に生成される動的スペckルの強度ゆらぎの統計的特性について解析を行っている。動的スペckルの強度ゆらぎの時空間相互相関関数を導出し、これを用いて動的スペckルの相関距離に及ぼす曲面の曲率半径の影響について検討し、曲率半径と相関距離が逆比例関係にあることを示している。さらに、回折場における動的スペckルの運動についての解析を行い、ボイリング運動が観察される領域の減少を明らかにしている。これらの解析から、動的スペckルの時空間相互相関関数と物体の曲率半径の関係を明らかにし、相関関数に基づく物体の曲率半径計測の可能性を示している。

第6章では、有限開口による動的スペckルの積分強度の統計的特性について解析を行っている。一般に用いられる検出開口は有限であり、したがって検出されるものは積分強度となる。この章では、物体の曲率が積分強度ゆらぎの時空間相互相関関数に及ぼす影響について研究を行っている。具体的には、積分強度ゆらぎの時空間相互相関関数を導き、これを基に物体の曲率半径と相関関数の関係を明らかにしている。さらに、回転円筒により回折場に生成される動的スペckルの時空間相互相関関数を測定し、曲率半径計測の原理を示している。

第7章では、本研究で得られた結果を総括し、結論を述べている。

これを要するに、著者は、粗曲面により生成されるレーザスペckルの統計的特性に関する解析を行い、曲面の形状計測への応用を行うことにより、レーザスペckル基礎理論およびレーザスペckル応用計測に関する有益な新知見を得たものであり、光物理学および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。