

学位論文題名

光波干渉法に基づく動的精密計測とその応用

学位論文内容の要旨

光波干渉技術は光の波長や周波数などを基準にして計測を行う技術である。光の波長は自然界に存在する物理量であり、現在は光の速度が時間標準を介して長さの標準として取り扱われている。安定性、強度、可干渉性のすぐれた光源であるレーザが実用化されてからは、光波干渉技術は国際的な標準から工場用の測定器まで、非常に幅広い分野での精密測定に応用されるようになった。

従来の光波干渉技術が、主に静的な物体を対象にしたものと考え、基本的に移動する物体を対象として考える測定方法を動的な方法としてとらえることができる。レーザの出現により動的な計測が可能となったことに注目することもたいへん興味深いことである。

このような測定対象となる動的な量としては、変位、変形、振動、速度、加速度などがあげられる。特に変位、速度、加速度はそれぞれが変位の時間的な微分及び2階の微分関係にあるため、様々な方法によって測定が可能である。例えばレーザドップラ法は、本来は移動する粒子の散乱光の周波数変化からその粒子の速度を求める方法であるが、信号の周期の数を計数することにより変位を求めることも可能である。スペックル干渉法は散乱光の統計的性質を利用したものであり、統計処理の方法により様々な情報を引き出すことができる。ホログラフィ干渉法は時刻の異なった波面間の干渉を実現する時間分割の干渉法であり、変形や振動の測定に使われることが多いが、干渉縞の局在性を用いて比較的大きな3次元変位の測定に応用することもできる。このように動的な量の計測に、光波干渉技術を応用することにより、高精度計測の可能性が飛躍的に向上するものと期待される。

本論文では、光波干渉法の動的精密計測への応用という立場から、最初に第1章で本研究の目的と必要性について述べている。特に変位、速度、加速度などの動的な量の精密測定に、可干渉性の高い光源を利用した光波干渉技術が重要であ

ることを述べた。

つぎに第2章で、光波干渉技術による速度の精密計測法として知られているレーザドップラ速度計測法を微小領域の流速測定に応用し、その時に生ずる信号処理上の問題として、ベドスタル成分と本来の信号成分の分離について論じている。微小領域における流速測定の対象として最も注目されている分野のひとつに、生体内の微小循環の血流の測定がある。しかし、微小循環の流速の測定のような場合には、ベドスタル成分の影響を考慮しなくてはならない。これは測定領域の大きさを小さくすると、それにつれて周波数の高い方へ広がる性質がある。通常のレーザドップラ速度計測法では、信号成分とベドスタル成分は分離しているが、微小血管内の血液の流速を測定するような場合、両者は接近し、そのままでは速度測定を行うことが困難になる。これを解決するため、ここではレーザ光の周波数を変調し、信号成分のみを周波数シフトして分離する方法を応用した。測定する微小循環の血管内での赤血球の速度は、およそ秒速1 mm以下であり、それに対応するドップラビート周波数は数百Hz程度である。この程度の量の周波数シフトを得るためには音響光学素子による方法ではシフト量が大きすぎるので、新たに入射するレーザビームの片方の光路中にクサビ型のプリズムを置き、連続的に一定の速度で移動させることによって入射した光の周波数を変調させる方法を検討し、測定に応用した。これを基に、顕微鏡型のレーザドップラ速度計を試作し、小動物の血管内流速分布、血流速度の電気刺激応答の測定に応用した。

第3章では、工作機械の主軸などの精密機械の回転軸の運動中心位置の測定にレーザドップラ速度計の応用を試みた。精度の高い製品を作るためには、工具や被加工物を平行移動させたり回転させたりしながら加工を進める場合には、工作機械などを精密に制御しながら加工することが必要である。例えば移動距離の精密測定はヘテロダインレーザ干渉計を用いた装置が広く普及しており、ナノメートルオーダの測定も可能である。回転軸回りの測定も必要であるが、現在用いられている方法の多くは特別な工具を必要とするため、主軸の検査診断や調整の目的には適しているが、インプロセスでの計測方法としては適当ではない。動圧軸受けでは、回転数によって主軸の位置が変化するのは当然であるが、静圧軸受けの場合でも回転速度の変化により、回転中心の位置が10ミクロン以上変位する。また、切削加工するとき、その反力が主軸に働き、主軸の位置に影響を与えることが予想されるので、実際の加工と同じ状態で測定できることが望ましい。そこで、回転中心の位置では物体表面の接線速度が零になることに注目して、レーザドップラ速度計で回転中心（と物体表面の交点）付近の速度を測定し、速度が零

になる位置として回転中心位置を求める方法を提案し、実験を行った。

多くの測定点からのレーザドップラ信号を高速に処理できる方法として、光学的情報処理用の空間光変調素子として注目されている液晶パネルを応用した実時間周波数解析を試みた。液晶パネルは、携帯用のテレビなどに用いられるもので、計算機の画像メモリーと組み合わせることにより書き込みパターンを自由に制御できること、計算機がなくても、簡単な同期信号を加えるだけで電気信号をA/D変換することなく表示できることなどの特徴をもっている。テレビジョンは基本的に、時系列の電気信号の電圧パターンを空間的な光の強度パターン（液晶テレビの場合は透過率パターン）に変換するものなので、一本の走査線について考えてみれば音響光学素子と同じで、適当な電気回路を用いてレーザドップラビート信号を空間的な透過率パターンに変換することができ、信号周波数の解析に応用可能である。信号源の数は、原理的には液晶パネルの走査線の数まで可能であり今回のパネルでは210である。

第4章では、物体の三次元的変位を無限遠に局在するホログラフィ等傾角干渉縞を利用し、途中の経過を積算することなく測定可能なホログラフィ干渉計について、その方法と実験結果について述べている。市販されているレーザ干渉計は、高精度かつ高速な応答性をもっているが、変位置そのものではなく時刻間の移動量を積分して測定しているものが多い。この場合、干渉計を構成する光路が測定中に遮られると、その間の移動量が測定できず、最初から測定をやりなおさなければならない。一方、ホログラフィ干渉法では、物体の様々な変位による干渉縞の空間的位相分布について詳細な研究がなされており、干渉縞の空間的な位相分布から、物体の変位置を測定する干渉計を構成することが可能であることが示されている。従来の解析では変位のある場合に生ずる干渉縞の性質について論じていたが、ここでは逆に等傾角ホログラフィ干渉縞の測定に位相ステップ法を応用し、物体面の動的な3次元変位を精密に測定する技術について検討した。このような方式の干渉計では、物体の移動中に一時的に光路が遮られることがあっても全く影響なく変位置を求めることができることを示した。

最後に第5章では、本研究で得られた結論について述べている。この研究を通じて、血流速測定、回転中心位置測定、3次元変位測定などの動的対象物の精密測定に光波干渉法を応用し、その有効性を確認することができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 朝 倉 利 光
副 査 教 授 小 川 吉 彦
副 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 大 塚 喜 弘

学 位 論 文 題 名

光波干渉法に基づく動的精密計測とその応用

光波干渉技術は、自然界に存在する物理量である光の波長や周波数を基準にして計測を行う技術であり、国際的な標準から工場用の測定器まで、幅広い分野で応用されている。また、従来の光波干渉技術は、主に静的な物体を対象にしているが、基本的に移動する物体を対象として考える測定方法を動的な方法としてとらえることができるが、この方向への実用化のためには種々の問題を個々に解決することが必要である。本論文では、レーザドップラ速度計測法やホログラフィ干渉法などの光波干渉法に基づき生体や工作機械における速度や変位の動的精密計測を行う方法を開発し、その有用性を確認した一連の研究成果をまとめている。

まず、光波干渉法の動的精密計測への応用という立場から、最初に第1章で本研究の目的と必要性、特に変位、速度、加速度などの動的な量の精密測定に可干渉性の高い光源を利用した光波干渉技術が重要であることを述べている。

第2章では、レーザドップラ速度計測法を微小領域の流速測定に応用した時に生ずる信号処理上の問題として、ペDESTAL成分と本来の信号成分の分離について論じている。レーザドップラ速度計測法では、信号成分とペDESTAL成分は普通は分離しているが、微小血管内の血流速度測定では、ペDESTAL成分の影響が無視できず、そのままでは速度測定が困難であることが示されている。これを解決するため、レーザ光の周波数を変調し、信号成分のみを周波数シフトして分離する方法を試みている。測定される赤血球の速度は、およそ秒速1 mm以下であり、それに対応するドップラビート周波数は数百Hz程度なので、レーザビームの片方の光路中にクサビ型のプリズムを置き、連続的に一定の速度で移動させることによって入射した光の周波数を同程度に変調させ、測定に応用している。これを基に、顕微鏡型のレーザドップラ速度計を試作し、小動物の血管内流速分布、血流速度の電気刺激応答の測定に応用し、良好な結

果を得ている。

第3章では、工作機械の主軸などの精密機械の回転軸の運動中心位置の測定にレーザドップラ速度計を応用することについて述べている。機械部品の高精度加工には、工作機械の各部を精密に制御することが必要であり、静圧軸受けの場合でも回転速度の変化により回転位置が10ミクロン以上変位することが知られており、回転軸の測定も重要な点の一つである。しかし、現在の測定方法の多くは特別な工具を必要とするため、主軸の検査診断や調整には適しているが、加工中の計測方法としては適当ではない。また、切削加工する時、その反力が主軸に働き、主軸の位置に影響を与えるので、実際の加工と同じ状態で測定することが望ましい。そこで、回転中心の位置では物体表面の接線速度が零になることに注目して、レーザドップラ速度計で回転中心付近の速度を測定し、速度が零になる位置として回転中心位置を求める方法を提案し、実験を行っている。このとき、多くの測定点からのレーザドップラ信号を高速に処理することが必要となるため、光情報処理用の空間光変調素子（液晶パネル）を応用した高速な周波数解析を試みている。液晶パネルは、簡単な同期信号を加えるだけで、レーザドップラビート信号を空間的な透過率パターンに変換することが可能であり、光学的フーリエ変換による信号周波数の解析に応用可能であることを示している。

第4章では、物体の三次元的変位を無限遠に局在するホログラフィ等傾角干渉縞を利用し、途中の経過を積算することなく測定可能なホログラフィ干渉計について、その方法と実験結果が述べられている。市販のレーザ干渉計は、高性能であるが、光路が測定中に遮られると、その間の移動量が測定できないという問題点がある。一方、ホログラフィ干渉法では、等傾角干渉縞の空間的な位相分布から物体の変位量を測定する干渉計が構成可能であることが示されている。従来は解析はある変位に対する干渉縞の性質が論じられていたが、ここでは等傾角ホログラフィ干渉縞の位相分布を測定して、物体面の動的な3次元変位を精密に測定する技術が検討されている。この干渉計では、物体の移動中に一時的に光路が遮られることがあっても全く影響なく変位測定が可能であることが示されている。

最後に第5章では、本研究で得られた結論について述べている。

これを要するに、著者は、レーザを光源とする光波干渉法に基づく新しい動的精密計測技術を開発し、それを血流速度測定、回転中心位置測定、三次元変位測定などの動的対象物の精密測定に応用し、その有効性を確認している。これらに関する新知見は、光計測工学および光情報処理工学の進歩に寄与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。