

博士論文（要約）



光コム 2 台を利用した粗面に対する 非接触絶対計測手法の開発

指導教員 高増 潔 教授

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

学生証番号 37-137233

尾上 太郎

近年、大型機械の製造工場では、粗面物体に対する非接触絶対計測が可能な計測手法が求められている。本研究ではこの要求に応えるために、光による三次元座標計測装置に適用するための基本的性能を有する、光周波数コムレーザを光源とした粗面物体に対する非接触絶対計測装置の開発を行う。具体的には以下のような性能を持つ光計測器を開発する必要がある。

- ・計測精度 100 μm (入射角 15 度まで)
- ・近距離 (3 m ほど) 垂直入射時、計測精度 10 μm
- ・曲率半径 1 m 以上の曲面に対して計測が可能
- ・粗面 (金属面[$Ra=1.6 \mu\text{m}$ 以上]、非金属面) に対して計測を行うことが可能
- ・非接触な計測 (ノンプリズム) が可能
- ・絶対計測が可能
- ・周期誤差フリー

ノンプリズムというのは、粗面物体に対しプリズムを設置することなく直接計測可能であるということである。本研究ではこのような計測性能を持つ計測器を開発することを目標とする。光波距離計では周期誤差が大きくなるという理由で計測精度の向上を実現することが困難であったため、本研究手法では光波距離計や先行研究で課題となっていた周期誤差を排除する。これにより周期誤差の補正が不要となるので、リアルタイムに高精度な計測を実現することができ、さらに目標とする精度を達成することのできる計測器を開発することができる。

第二章では、目標とする性能を実現するための高周波発振器を利用しない光コムを二台利用した計測手法を提案した。具体的には、先行研究では高周波発振器によるビートダウンを利用して位相差計測を行っていたが、本研究では光コム二台の受光信号をミキシングし、その後低周波信号をさらにミキシングして高周波発振器なしでビートダウンを行う手法を提案した。本手法での変位計測実験の結果を確認すると、計測対象面の表面粗さが大きい場合には受光信号強度が低下して計測精度が悪化することが分かる。そこで、信号処理の過程で生じる信号損失を減じ、さらに高精度に計測を行うための、音響光学変調器を利用した計測手法を提案した。また、その効果を確認したところ、7 倍程度結果が良くなることが確認された。

第三章では、周期誤差シミュレーションを利用して、一周期分の位相変化に対して二周期分の周期誤差が発生する原因が位相雑音であることを示した。特に、位相雑音成分の二乗の平均値が大きな影響を持つことが明らかになった。したがって、周期誤差を排除した計測を行うためには、低位相雑音信号を計測に利用する必要があることが分かった。また、光コムを受光信号が低位相雑音信号源として優れていることを示し、第二章で提案した二台の光コムによる計測手法が周期誤差を排除する上で有効な手法である

ことを示した。実際に He-Ne レーザとの比較による変位計測実験を行い、周期誤差を排除することができた。また、計測周波数 3.6 GHz を利用して不確かさ 12.6 μm で計測を行うことができた。

第四章では、絶対計測手法である合致法による光コムを用いた絶対計測手法の提案を行った。特に、繰り返し周波数が 100 MHz の場合、隣り合った信号による絶対計測では片道 1.5 m までしか絶対計測ができないことが分かった。そこで本研究では、二台の光コムを利用して計測周波数の差を小さくし、計測可能距離の長距離化を実現する手法を提案した。実際に絶対計測が可能か確認するために、150 mm の距離に対して絶対計測を行い He-Ne レーザによる結果と比較した。その結果、差がおよそ 30 μm となり、適切に絶対計測を行うことができていることが分かった。また、二台の光コムを入れ替えた計測を行うことにより、片道 8~9 m の距離を絶対計測し、片道 1.5 m を超える距離に対しても絶対距離を計測することができていることを示した。

第五章では粗面物体における乱反射モデルについての調査を行い、そのモデルに基づいて入射角に対する反射光量を推定した。また、入射角と受光量の関係を実際に実験で確認し、理論の妥当性を検証した。さらに、様々な計測対象物に対する入射光量とロックインアンプに入力される信号強度の関係、信号強度と計測精度の関係について調査を行い、計測精度が信号強度に反比例していることが確認され、理論的解析によってもその妥当性を確認した。また、入射角と受光量の関係を利用して、入射角と計測精度の関係を導き、実測値と理論値が定量的に一致することを確認し、さらに詳細に計測精度の理論的解析を行い、空気屈折率の不確かさなどを考慮したうえで、実際の実験と同様のシステムで入射光強度を 100 倍の 1 W、計測周波数を 10 倍の 36 GHz にした場合の大型物体計測時の計測精度を求めた。その結果、大型物体をこの条件で計測する場合には、 $L=40$ m から計測すれば、最も広範囲に対して目標精度を満たして計測することができることがわかった。また、本手法による形状計測の妥当性を検証するために実際に曲率のある物体を計測した(曲率半径 56.6 mm、入射光強度 10 mW、計測周波数 3.6 GHz)。4 回の計測結果に平均と CMM の計測結果を比較すると、この時の計測精度は 200 μm 程度であり、また、大部分がランダム誤差であることが確かめられた。さらに数値計算により、曲率半径が 56.6 mm とビーム径よりも十分に大きい場合には広範囲で大きな系統誤差が存在していないこともわかった。特に曲率半径が 1 m を超えていれば、全体の 98.5 %の形状を系統誤差 10 μm 以下で計測することが可能であることが分かった。さらに、本手法を応用した座標計測システムを提案し、金属粗面物体(曲率半径 1 m)に対して座標計測を行い、本手法の応用が可能であることを示した。以上のことから、曲率半径 1 m 以上の物体に対して入射光強度を 100 倍の 1 W、計測周波数を 10 倍の 36 GHz にした場合、目標性能を実現する計測手法となることが分かった。

以上のように第三章~第五章で、第二章で提案した手法が要求性能を満たし、座標計測システムに適用可能であることを示した。したがって、本研究により、座標計測シス

テムに適用可能な基本的性能を有する光計測手法を開発することができたと言うことができる。