

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐藤 世智

光学計測とは、光を媒体とした各種の物理現象の計測手法であり、その優れた2次元並列性によって、高い性能と非常に幅広い応用を有している。しかし、従来の光学計測は2次元並列性を求めようとする検出デバイスであるイメージセンサの時間分解能の低さから時間分解能が大幅に制限され、時間分解能を求めようとする光検出子による点計測に限定されるという大きな問題が付随していた。本論文は「多次元変調を活用する二次元並列光計測に関する研究」と題し、近年実用化に向けて開発が進められている時間相関型イメージセンサを導入し、このデバイスに適した測定対象や測定媒体の変調技術を組み合わせ、新たな計測手法を考案し理論的な定式化を行うとともに、その実用性を確認するために装置の開発と定量的実験を行ったもので、全体で6章から構成されている。

第1章の序論においては、計測技術における変調の役割について、波動現象の利用との関係でその手法を整理している。特に、振幅変調や位相変調や周波数変調など、測定対象に依存した変化を受けるプローブ波形のパラメータを計測データから取得することが変調計測の高度化に課せられる重要な課題であることを論じ、そのための基本的な演算としての相関検出法を導入している。

第2章は「荷重積分法による白色光干渉計測」と題し、近年のマイクロナノ計測や生体計測に重要性を増している白色光干渉計測法に関する新しいパラメータ抽出法を、荷重積分法という新たな数学的手法に立脚して提案している。すなわち、白色干渉のインターフェログラムの多くがガウス包絡を有する正弦波形となることを指摘し、この関数を解にもつ微分方程式を出発点として、有限な走査範囲の荷重積分観測量と、干渉中心などのインターフェログラムパラメータを結びつける代数方程式を厳密な形で導いている。この式を陽に解いて干渉中心を求めることにより、測定対象の反射面の高さ分布を精度よく推定可能であることを示している。また、統計量の有効性に関する理論的解析と数値的評価とを行い、他の現存する手法に対して提案法が大きな優位性を有していると結論付けている。

第3章は「ヘテロダイン光干渉振動計測」と題し、MEMSに代表される微小構造体の面外振動の振幅・位相分布を実時間で映像化する振動計測手法について述べている。振動によって生じた入射光の周波数シフトに同期したヘテロダイン干渉工学系に三相三系統の時間相関イメージセンサを適用し、振幅が3.5nm、位相が0.5度の精度で計測が可能であることを実験的に示している。また、開発された装置を、生物模倣型MEMS音響センサやMEMS音源定位センサ、AFMのカンチレバーの共振モードの計測などに適用している。

第 4 章は「多重零点ビームによる遠隔多自由度変位計測」と題し、近年、その安全性の確保やリスク管理が強く求められる社会基盤インフラに対して、その静的で微小な変形を常時モニタリング可能な新たな光学計測法について、独自の方法論と計測システム構成とを展開している。具体的には、遠方まで断面形状を変えずに伝搬し、かつ 6 軸変形を検出可能な断面パターンを有するプローブ光ビームとして、高次の **Laguerre-Gaussian** ビームの重ね合わせとして生成される多重零点ビームの使用を提案している。さらにその検出方式として、ヘテロダイン参照光ビームを多重零点ビームに重ねて同軸に伝搬させる方法と、これを時間相関イメージセンサによって実時間で振幅位相復調する方式を考案した。この性能を 19 次の多重零点ビームを用いて実験的に検証するとともに、次数に応じた精度の改善を数理統計理論により明らかにしている。さらに、この光ビームを何段かに置かれた開口を通して伝搬させたときに、開口の横方向に微小移動により、多重零点ビームの零点分布がどのように変化するかについて理論的に検討し、この移動量から開口が接続された構造物の変形量が測定可能であることを具体的な実験により示している。

第 5 章は「干渉型二次元エリプソメトリー」と題し、対象表面の複素反射率分布や、多層膜のパラメータを面的に同時に検出可能な映像型のエリプソメトリーに関して、その多波長化のための新しい測定系の構成方法について述べている。具体的には、**Polarizer-Sample-Analyzer (PSA)**構成と呼ばれる光学系において、その入射光を可動型の白色干渉系から導いて波長の自由な走査を可能にした。これを時間相関イメージセンサで 2 次元並列的に観察し、複数枚の撮像結果から逆フーリエ変換により時間軸での反射率関数を得る。これをさらにフーリエ変換すると、偏光のストークスパラメータが波長の関数として得られることを示し、実際の測定系を構築してその正当性を確認している。

第 6 章は「全体総括」と題し、以上の成果を総括し将来の発展方向を論じている。

以上、要するに、本論文は、各種の変調手法を駆使し、その検出手段として時間相関イメージセンサを利用することで、マイクロナノ三次元計測から振動計測、遠隔における多自由度の微小変形計測、複素の反射率分布などの新しい計測の方法論を考案し、それを理論的に定式化するとともに実際の装置として構築し、基本的な性能と原理的な正当性を確認したもので、本研究で展開された方法論は今後の計測技術や物理現象のイメージング技術の発展に大きな波及効果が期待でき、システム情報工学上の貢献が十分にあると判断される。よって、本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。