

氏名（本籍）	李志遠（中華人民共和国）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第17号
学位授与日付	平成19年3月23日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	位相信頼性評価値とDMDカメラを用いた三次元形状計測
学位論文審査委員	（主査）教授 森本吉春 （副査）教授 戸田裕己 教授 和田俊和

論文内容の要旨

1. 研究の背景

近年、物体の三次元形状を高精度高速に計測する技術には多くの分野から高い関心が寄せられている。特に製造業の分野では自動生産技術の発展にともない、物体の表面形状を非接触・高速・高精度に検査する手法の必要性が高まっている。

非接触式三次元計測手法の一つに投影格子位相解析法があり、全視野で高精度に形状計測を行える。しかし、格子投影法では、格子パターンを投影してカメラで撮影して位相解析を行うため、1回の測定では影部分や物体の裏の情報を得ることができない。また多反射率をもつ物体や鏡面反射が起こりやすい金属試料に対しても表面を塗装することなく計測できる手法が求められる。このように計測条件を変えて計測し、得られた複数のデータを精度よく形状合成を行える手法が必要である。その際に複数枚の結果データに対して、同じ場所に複数のデータが存在した場合に、どのように誤差の少ないデータを採用するのかが重要になる。

一方、近年ではDigital Micro-mirror Device (DMD) が開発され、主にDLPプロジェクタに使われている。DMDとは、1987年米国のテキサスインスツルメンツ (TI) 社のLarry J. Hornbeck氏によって開発された新しい光学素子である。この素子では1チップ上に数十万個～百万個の微小ミラーがずらり並んでいる。それぞれのミラーは独立かつ高速にミラーの反射方向を制御することができる。この特徴を利用して、CCDとDMDを組み合わせた新しいタイプのカメラ（DMDカメラ）を開発すれば、従来ではできないような画像を撮影することができ、新たな位相解析・形状計測手法を開発することが可能になる。

2. 研究の目的

以上の研究背景を受けて、本研究では、産業品の測定において様々な問題を解決する形状計測手法の開発を行うことを目的とする。本論文の前半ではフーリエ変換位相シフト法において新たに位相信頼性評価値を提案する。この評価値を指標に計測条件を変えて複数のデータを合成することで解決する。具体的に(1) 広ダイナミックレンジの高精度形状合成手法、(2) 鏡面反射の影響を取り除く形状合成手法、(3) 広輝度レンジの形状合成手法、(4) 高精度全周形状合成手法をそれぞれ開発する。

本論文の後半では、最近の新しい光学素子であるDMDに注目し、位相解析や形状計測向けのDMDカメラの開発を行い、新たな位相解析・形状計測手法を開発する。その際に、DMDの各ミラーの高速制御とDMDの各ミラーとCCDの各素子の正確な画素対応が大きな課題であった。これらの課題に対して、専用高速制御ボードの導入と簡単かつ精度よく画素対応できる調整手法を開発する。

3. 研究成果と本論文の構成

本論文は全7章で構成され、それぞれの内容及び成果を以下にまとめる。

第1章は緒言で、歴史的な研究背景について述べ、従来行われてきた研究成果を概観し、問題点を明らかにするとともに、本研究の目的および目指すべき目標を述べる。

第2章では、投影格子位相解析法を用いた三次元形状計測の基本原理および液晶基準面を用いて位相分布から空間座標への計算方法について具体的に述べる。

第3章では、位相解析で用いるフーリエ変換位相シフト法において、解析した位相値の信頼性を正しく評価できる位相信頼性評価値に提案し、その原理について述べる。これは基本周波数である1次のスペクトルとそれ以外の高次周波数のスペクトルの和の平均の比とし、フーリエスペクトルの視点から見たS/N比に相当する値と言える。特に位相信頼性評価値を用いることで、合成を行う際に同じ位置に対して複数の計測データが存在する場合には、画素ごとに信頼性の高い測定データを採用することができる。

計測条件が悪く、誤差になりやすい部分の計測データを採用せず、精度よく計測できた点のみを用いて合成することができる。ランダムノイズ、輝度のサチュレーション、輝度非線形性による位相値の誤差と提案する位相評価値の関係についてシミュレーションより調べ、その有効性を検討した。

第4章では、位相信頼性評価値を用いて条件を変えて計測して得られた複数枚のデータを用いて、以下の形状合成手法を提案し、実験よりそれぞれの手法の有効性を確認した。

(1) 広ダイナミックレンジの形状合成手法では、奥行きが深い三次元物体をz方向に平行移動させて計測し、2枚の基準面間の常にフォーカスが合っているデータのみを用いて、複数の位置での計測結果を合成することによって、広ダイナミックレンジで高精度に三次元物体の形状を計測することができた。

(2) 鏡面反射の影響を取り除く形状合成手法では、複数台のカメラを異なる角度から計測したデータを合成することで金属のような鏡面反射が起こる物体でもその影響を取り除き、三次元形状を得ることができた。

(3) 広輝度レンジの形状合成手法では、カメラのシャッター速度を変え、撮影輝度を数段階に変化させて数回の計測を行い、それぞれの計測結果のうちで精度よく計測できた部分を合成することで反射率が低い部分と高い部分の両方を精度よく計測することができた。

(4) 全周囲の形状合成手法では、得られた複数枚の多方向のデータを合成することによって、影となる部分や裏側までの部分を計測することができた。

第5章では、新しい光学素子であるDMD (Digital Micro-mirror Device) と CCD カメラを組み合わせ、画素ごとに露光時間を制御できるDMDカメラ (DMD 反射式 CCD カメラ) の開発を行った。Modulation transfer function (MTF) を指標としてDMDカメラの最適のレンズ選びと各ミラーを高速に制御できるDMDコントロール専用ボードの導入を行った。DMDカメラにおいて、正確にCCDの各画素とDMDの各ミラーを1:1に対応できるように、簡単な目視によるモアレパターンを用いた調整手法と精度の高いモアレパターンの位相を解析できる調整手法を開発し、実験よりそれぞれの手法の有効性を確認した。モアレパターンを用いた調整手法は、リアルタイムで視覚的にずれを知ることができ、CCDの画素オーダーの精度で容易に調整を行うことができる。一方、提案した位相シフトモアレ法においては、1枚の画像により得られた画像データから光学系のずれを示すモアレパターンの位相分布を得ることが可能になった。その結果、従来DMDカメラにおいて非常に困難だった画素対応を画素オーダー以下の精度 (実験では1/25画素以下) で調整を行うことができ、DMDとCCDの正確な画素対応が可能になった。

第6章では、開発したDMDカメラを用いて、投影格子位相解析法による三次元形状計測に適用した。まず、1枚の画像から位相分布を求められる「DMD積分型相関位相シフト法」に適用することで、比較的高速に動いている物体でも位相解析を行うことができる。次に、DMDカメラの特徴を生かして、物体の反射率に合わせて画素ごとに適切な露光時間を調整することで、計測時間を増やすことなく広輝度レンジで計測できる手法を開発した。その結果、従来のCCDカメラでは実現できなかった広輝度レンジの位相解析ができるようになる。この手法は複数回の計測に伴う測定時間の増加という問題点を克服した手法である。実験よりそれぞれの手法の有効性を確認した。

第7章では、本研究の成果を総括した後、今後の課題・展望について議論する。

論文審査結果の要旨

本論文は、投影格子の位相解析法を用いて非接触で三次元形状を計測する方法の新しい提案である。S/N 比に相当する位相信頼性評価値をフーリエ変換を用いて定義を行った。さらにDMDカメラを開発し、種々の形状計測に適用した。これらにより、従来計測が困難であった鏡面反射物体や回転物体などの計測が可能となり、計測のダイナミックレンジを拡げ、高精度化を行った。博士論文として価値ある業績と判断する。

最終試験結果の要旨

公聴会（平成19年2月7日）において、全審査委員を含み22名の出席者のもと、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明により、質問者の理解が得られた。研究成果の一部実用化も進めており、極めて高い有用性と独創性がある。また、多数の学術雑誌と国際会議等における論文発表、特許取得、日本学術振興会特別研究員等多くの業績がある。よって専門分野の学術研究を行うに十分な教養と研究能力を有していると判断でき、博士の学位論文として合格と判定する。