

氏 名	鷺見 典克
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博第1150号
学位授与の日付	平成31年3月27日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学 位 論 文 題 目	位相シフト法を用いた高精度計測・検査に関する研究 (Precise Three Dimensional Measurement and Inspection using Phase-shifting Method)

論文審査委員	主 査	教授	梅崎 太造
		教授	佐藤 淳
		教授	本谷 秀堅

論文内容の要旨

近年、三次元計測技術は様々な分野に普及しており、特に製品の外観・形状検査で広く活用されている。これらの検査では、ミクロンやナノオーダーの精度を要求されるため、一般的に焦点法、光切断法、アクティブステレオ法、干渉法などの計測法が用いられる。このうちアクティブステレオ法や干渉法は、静止した対象に光を投影し、短時間かつ高精度に広範囲を計測できる。これらの計測法では、少ない撮影回数で深度を解析するため、位相シフト法が多く用いられる。この手法は、時間的に走査した投影光の位相を最低3回の撮影で検出できる手法である。本研究では、位相シフト法を用いた計測に着目し、「実利用に向けた自動外観検査」と、「静止物体の計測を前提とすることに起因する計測の不安定性に関する問題」の2点に対して、有用な手法をそれぞれ提案し、その有効性を示す。

第一に、航空機組立の省力化を目指した外観検査システムを提案する。外観・形状検査は様々な産業でFA化が進んでいるが、航空機産業は自動車などの産業と比較してFA化が遅れている。これは生産台数の少なさに起因するが、近年、国内旅客機就航に向けて製造工程の効率化が進んでいる。その中で航空機用ファスナの装着状態検査が注目されている。ファスナとはリベットの一種であり、機体を構成するCFRPパネルなどの接合に利用される。しかし装着に異常があるファスナが被雷した場合、抵抗の大きい接合部で放電して、主翼内部の燃料タンクに引火する危険性がある。ファスナの装着状態は機体の安全性に大きく影響するため、手動で接触式測定器による全数検査を行うが、非効率である。これに対し

て、本研究ではプロジェクタとカメラを用いた小型三次元計測器を構築し、ロボットアームに搭載した自動検査システムを提案する。計測で得る撮影画像と三次元形状から、装着状態の良否判定に必要なファスナの傾きと深さを算出して検査する。具体的には Snakes を用いたファスナの画像切り出し法、RANSAC を用いた平面推定による傾きと深さの計測法を提案する。信頼区間 5σ で検査精度を評価した結果、ファスナの直径 12 [mm] では深さ 42.8 [μ m]、傾き 0.269 [deg]、直径 10 [mm] では深さ 42.3 [μ m]、傾き 0.185 [deg] 以内の誤差で検査できる。さらに検査時間 5.6 [秒/個] を達成し、工数削減に寄与することを示した。

第二に、位相シフト法を用いたナノオーダ計測における計測精度の評価手法を提案する。位相シフト法を用いた計測装置は広く普及しているが、問題点も存在する。中でも計測物体の静止を前提とする点は、要求精度がミクロン単位の場合、一般的な静止環境でも大きな影響はない。しかし、干渉計のようなナノ単位の計測では、一般的な環境でも光源波長を超える振動が往々にしてあり、精度に大きく影響する。これに対して、Zygo 社を筆頭に振動の影響を補正して計測可能な装置が実用化されている。Zygo 社の手法は QPSI と呼ばれ、画素毎に位相の信頼性を評価し、その評価値を基に参照位相を繰り返し最適化して計測する。しかし、この計測器においても 150 [nm] 程度の振動しか許容していない。依然として光源波長オーダ程度の振動環境では、安定な計測が困難である。そこで、本研究では位相信頼性の評価に着目し、計測精度を保証する手法を提案する。振動では垂直方向の振動が支配的であるため、本手法では撮影範囲単位で信頼性を評価する。垂直な振動は対象全体が同じ距離だけ移動するのであり、従来の画素単位の評価よりも高精度化できると仮説を立てた。本手法は、位相シフト法で求める振幅画像と物体光の撮影画像との相関値を評価値とする。これを基に、複数の計測結果から計測誤差の少ない結果を選択できる。ナノオーダの基準器を用いた実験で、評価値と計測誤差の相関関係を明らかにし、有効性を示した。

さらに、計測精度を評価するだけでなく、実環境においてもロバストに計測可能な二波長位相シフト計測法を提案する。近年、QPSI のように参照位相を繰り返し最適化する手法ではなく、参照位相を未知としても計測可能なリサージュ曲線に基づく手法が提案されている。中でも ICA を用いた手法は、二波長計測をも実現した。しかし ICA の計測法は、実環境でノイズを含むような物体・環境では検証されていない。これに対して、本研究では実環境で観測されるノイズが ICA の計測法に及ぼす不安定性を示す。さらに、そのノイズを除去する手法を提案し、ロバストな計測を実現する。具体的には、ノイズの判定にリサージュ曲線に基づいた評価値を定義し、それを基に除去して ICA による手法を適用する。

本稿では、第 3 章で位相シフト法による計測と画像処理を組み合わせた応用例として航空機用ファスナの外観検査を述べる。第 4 章では、位相シフト法による計測で問題とされる計測時の振動に着目し、計測の安定性を評価する手法を述べる。第 5 章では、二波長位相シフト計測について、振動環境で実物体の計測にも適用可能なロバスト計測法を述べる。

論文審査結果の要旨

近年、三次元計測技術は様々な分野で利用されており、特に工業製品の外観・形状検査で活用されている。これらの検査ではミクロンやナノオーダーの精度を要求されるため、一般的に焦点法、光切断法、アクティブステレオ法、干渉法などの計測法が用いられる。このうちアクティブステレオ法や干渉法は、静止した対象として短時間に広範囲の高精度計測が実現できる。これらの計測法を使用する際には、計測の高速化を実現すべく、可能な限り少ない撮影回数での計測が求められる。そのための手法として、位相シフト法が広く用いられている。しかし、干渉法を用いた位相シフト法には、振動に弱いという問題点が存在する。さらに、外観検査への実利用化が進んでいない産業もあり、それらへの応用も期待されている。そこで本論文では、位相シフト法を用いた「航空機産業での実利用に向けた自動外観検査」と「振動に起因する計測の不安定性」の2点に対して、実用的な手法を提案している。

第1章では、本論文の目的を述べて概略を示している。

第2章では、位相シフト法を用いた三次元計測法の概要を述べている。

第3章「航空機用ファスナの自動外観検査」では、位相シフト法による計測と画像処理を組み合わせた応用例として、航空機用ファスナの外観検査について述べている。航空機業界は、自動車などの他の産業と比べて自動化の発達が遅れており、多くの検査工程は人手で行われている。その中でも航空機用ファスナは、航空機1機につき8万本装着されており、検査時間の工数は4千時間も要している。これら全てに対して、人手で接触式測定器による検査が行われており、非効率であるという問題が存在する。これに対して本論文では、プロジェクタとカメラを用いた小型三次元計測器を構築し、ロボットアームに搭載した自動検査システムを提案している。信頼区間5 σ で検査精度を評価した結果、ファスナの直径12[mm]では深さ42.8[μ m]、傾き0.269[deg]、直径10[mm]では深さ42.3[μ m]、傾き0.185[deg]以内の誤差で検査できる。さらに検査時間5.6[秒/個]を達成し、工数削減に寄与することを示している。

第4章「位相シフト法における信頼性評価」では、位相シフト法による計測で問題とされる計測時の振動に着目し、計測の安定性を評価する手法について述べている。位相シフト法を用いた計測装置は広く普及しているが、依然として様々な問題点が存在する。中でも計測物体の静止を前提とする点は、要求精度がミクロン単位の場合、一般的な静止環境でも大きな影響はない。しかし、干渉計のようなナノ単位の計測では、一般的な環境でも光源波長を超える振動が往々にしてあり、計測精度に大きく影響する。そこで、本論文では位相信頼性の評価に着目し、計測精度を保証する手法を提案している。干渉計は垂直方向の計測分解能が非常に高いため、計測精度に影響する振動は垂直方向が支配的である。また垂直な振動は、対象全体が同じ距離だけ移動する現象である。そこで、従来の画素単位の評価手法よりも、空間的に撮影範囲の単位で評価することで、評価の高精度化を果たしている。提案する評価手法により、複数の計測結果から計測誤差の少ない結果を選択でき、安定した計測を実現している。ナノオーダーの基準器を用いた実験で、評価値と計測誤差の相関関係を明らかにし、有効性を示している。

第5章「ランダム位相シフトにおける二波長ロバスト計測」では、振動に対する計測精度の評価だけでなく、実環境においてもロバストに計測可能な二波長位相シフト計測法について述べている。近年に提案されたICAを用いた手法により、振動が存在する環境においても二波長計測を実現できている。しかしこの手法では、振動以外のノイズに対する有効性は検証されていない。これに対して本論文では、実環境で観測されるノイズがICAの計測法に及ぼす不安定性を示している。さらに、その要因となるノイズを除去する手法を提案しており、計測のロバスト化を実現している。

第6章では、本論文で得られた知見を総括して結論を述べている。

以上、本論文は三次元計測手法の一つである位相シフト法に関して、「計測原理の問題点」と「実利用化に向けた課題」に有効な手法を提案している。これらの手法により、実用的な計測や検査を実現している。よって、本論文は工学的かつ社会的にも価値のあるものと考えられ、博士（工学）の学位にふさわしいものと認める。