

サイゴウ トモヤス

氏 名 西郷 知泰

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1153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 ホログラフィック光学素子を用いた光沢表面の検査方式に関する研究
(A Study of Inspection System with Holographic Optical Element for Glossy Surfaces)

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

現在の量産製造ラインでは位置決めや外観検査などの作業に対し、画像処理技術を活用したマシンビジョンシステムによる自動化が進んでいる。しかし、自動車ボデーやスマートフォンの筐体、ヘッドアップディスプレイ等で用いられる凹面ミラー等の光沢表面に対する外観検査へのマシンビジョンシステムの導入は限定的である。これは光沢表面の場合、表面形状や設置位置により撮影される画像が大きく変化し、安定した撮影が可能なシステムの構築が困難、ということが原因である。近年、大面積アクティブ照明を用いて縞パターンを投影し、光沢表面からの反射光における「濃淡のゆがみ」から外観検査を行うマシンビジョンシステムが提案されている。しかし、この従来法では設備が大型となりコストも高いことが課題である。また、検査時には光学系と対象物が静止したまま複数の投影パターンに対して撮影する必要がある。このことは、従来法が、移動物体の測定や複数視野での広範囲高速検査に不適であることを示している。そこで本研究では、これらの課題を克服する新しい光沢表面外観検査方式を提案する。提案法で用いる照明は、内部にホログラフィック光学素子（HOE）を搭載し、HOEによる回折光を照明光とすることにより、従来のマシンビジョン用照明には存在しない特徴を有する。HOEの特徴とは入射光を特定の回折角度に回折させ、また、回折角度が波長に応じて変化する、というものであり、これらを利用すれば1枚の撮影画像中の「色の変化」から光沢表面の外観検査を行うシステムを構築することができ、上記課題を克服可能となる。

第 1 章では外観検査，特に光沢表面での外観検査の現状と問題点を示し，本論文の目的について述べる．第 2 章では，光沢表面での散乱反射と直接反射の特徴，およびその特徴が外観検査に及ぼす影響を述べる．また，従来の光沢表面外観検査方式を説明するとともに，本論文で提案する検査方式の概要を示し，従来法と提案法の特徴を比較する．

第 3 章では，提案法において非常に重要な構成部品である HOE の種類と特性，及び製造技術について述べる．提案法は，HOE を除けば通常のマシンビジョンシステムの構成部品で構築できる．そのため，HOE の製造コストを抑えることが安価なシステムの構築に重要となる．しかし，ホログラフィでは光の干渉縞を記録するため，一般的な製造法では製造時間が遅く HOE の大面積化が困難であった．そこで本研究では，コリニア方式と Q スイッチレーザーを用いた光学系の最適化を行い，振動に強い HOE 製造装置を実現した．本製造装置により，製造速度 240[mm/s]で回折効率 74[%]を有する 300[mm]角の HOE の製造を実現した．

光沢表面の外観不良は表面の法線方向の変化を有しており，提案法ではこの法線方向変化を色相の変化として検出することができる．第 4 章では，提案法が，外観検査に適用可能な法線方向変化の検出能力を有することを述べる．光沢表面の法線方向の角度を定量的に測定する原理を提案するとともに，光学ミラーを用いた評価実験を行い，繰返し精度 0.083[deg]で法線方向の測定ができることを示す．また曲面ミラーによる実験にて，曲面形状でも平均二乗誤差 0.08[deg]で測定可能であることを示す．これら実験から，提案法が 1[deg]オーダーの法線方向変化を持つ外観不良の検査に十分な性能を有することを確認した．さらに，分光器を用いて照明光源，及び HOE による回折光の波長分布を解析して，回折された光線の角度と，実際の撮影画像から計算される色相との関係式を提案する．

外観検査で要求される性能は，不良の検出及び不良の大きさ測定であり，法線方向の角度の定量は現状求められない．そのため，光沢表面での 1[mm]以下の微小な不良を 1 回の撮影で検出可能なシステムを構築することを目的とした．第 5 章では白色光源，HOE，カメラを使用して検査システムを構築し，実際のブツ不良に対する評価を行った．また，周辺の色相との差を用いて不良を検出する画像処理アルゴリズムを構築した．提案法と従来法との不良検出性能を比較した結果，従来法での S/N 比は最大 3.13[dB]であったのに対し，提案方式では 37.6[dB]であり，優位性があることを確認できた．

第 6 章では，HOE を使用したコンパクトな検査システムを構築して，樹脂表面，ガラス表面，塗装面等の実際の不良に対する検査結果を示す．また，均一色相型や同軸型等，光学レイアウトを変更した構成例について述べる．このような光学レイアウトの変更により，棒状や加工端等の検査にも応用できる可能性を示した．

最終章にて，本論文で得られた知見を総括して，本提案法がコンパクトかつ低コストな検査システムであり，移動物体の測定ができ，かつ広範囲の対象物での微小不良を複数視野・1 回の撮影で検出できるという結論を述べる．

論文審査結果の要旨

現在の量産製造ラインでは位置決めや外観検査などの作業に対し、画像処理技術を活用したマシンビジョンシステムによる自動化が進んでいる。しかし、自動車ボデーやスマートフォンの筐体、ヘッドアップディスプレイ等で用いられる凹面ミラー等の光沢表面に対する外観検査へのマシンビジョンシステムの導入は限定的である。これは光沢表面の場合、表面形状や設置位置により撮影される画像が大きく変化し、安定した撮影が可能なシステムの構築が困難、ということが原因である。近年、大面積アクティブ照明を用いて縞パターンを投影し、光沢表面からの反射光における「濃淡のゆがみ」から外観検査を行うマシンビジョンシステムが提案されている。しかし、この従来法では設備が大型となりコストも高いことが課題である。また、検査時には光学系と対象物が静止したまま複数の投影パターンに対して撮影する必要がある。このことは、従来法が、移動物体の測定や複数視野での広範囲高速検査に不適であることを示している。

そこで、本論文では従来のマシンビジョン用照明には存在しない光沢面のセンシングに適した特徴を有した新しい光沢表面外観検査方式を提案している。提案法で用いる照明は、内部にホログラフィック光学素子 (HOE) を搭載し、HOEによる回折光を照明光としている。連続波長の白色平行光をHOEに照射することで発生する回折光は、回折角度に応じて波長が連続的に変化する。この特性を利用することで、光学面からの反射光の「色の変化」から表面角度変化をセンシングするシステムを構築することができ、上記課題が克服可能される。

第1章では外観検査、特に光沢表面での外観検査の現状と課題を示し、本論文の目的を述べている。

第2章では、光沢表面での散乱反射と直接反射の特徴、およびその特徴が外観検査に及ぼす影響を述べ、従来の光沢表面外観検査方式を説明するとともに、本論文で提案する検査方式の概要を示し、従来法と提案法の特徴を比較している。

第3章では、提案法において非常に重要な構成部品であるHOEの種類と特性、及び製造技術について述べている。本研究では、コリニア方式とQスイッチレーザーを用いることで、振動に強く、HOEの大面積化が可能な装置を構築し、製造速度240[mm/s]で回折効率74[%]のHOEの製造を実現している。

第4章では、提案法により光沢表面の法線方向の角度を定量的に測定する原理を提案している。平面、及び曲面ミラーを用いた評価実験を行い、平均二乗誤差0.08[deg]で測定可能であることを示しており、これら実験から、提案法が1[deg]オーダーの法線方向変化を持つ外観不良の検査に十分な性能を有することを確認している。さらに、分光器を用いて照明光源、及びHOEによる回折光の波長分布を解析して、回折光線の角度と、実際の撮影画像から計算される色相との関係式を提案している。

第5章では白色光源、HOE、カメラを使用して検査システムを構築し、実際のブツ不良に対して評価している。周辺の色相との差を用いて不良を検出する画像処理アルゴリズムを構築し、提案法と従来法との不良検出性能を比較した結果、従来法でのS/N比は最大3.13[dB]であったのに対し、提案方式では37.6[dB]であり、優位性があることを確認している。

第6章では、HOEを使用したコンパクトな検査システムを構築して、樹脂表面、ガラス表面、塗装面等の実際の不良に対する検査結果を示している。また、均一色相型や同軸型等、光学レイアウトを変更した構成例について述べ、棒状や加工端等の検査にも応用できる可能性を示している。

第7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、これまで検査が困難であった光沢表面の外観検査に対し、HOEを用いた新しい検査方式を提案している。HOEの高速製造技術を確立し、表面法線角度の測定精度について評価した上で、具体的な検査システムの構築に成功した。よって本論文は工学上および社会的に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。