

氏 名	ちょう せい ZHANG JING
本籍（国籍）	中華人民共和国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第7号
学位授与年月日	令和4年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科デザイン・メディア工学専攻
学位論文 題目	Automatic Defect Detection System for Automotive Painted Surface (自動車塗装表面の欠陥自動検出システム)
学位審査委員	主査 准教授 明石 卓也 副査 教授 今野 晃市 副査 教授 田中 隆充

論 文 内 容 の 要 旨

In recent years, with the development of industrial technology, competition in the automotive industry has become fiercer, and consumers have higher requirements for automobiles. The surface of the car is mostly coated, and the quality of the coating is the consumers' intuitive evaluation of the quality of the car. At the same time, the coating can improve the corrosion and oxidation resistance of automobiles, which is one of the main measures to prolong the life of automobiles. Therefore, the quality of coating can directly affect the market competitiveness of automobile manufacturers, and defect detection of coating surfaces is a very important work in the automobile manufacturing industry. In the process of car manufacturing, some minor errors, such as foreign objects mixed in the paint, dust in the air, etc., cause some bumps and dents on the surface of the car coating. These defects cannot be completely detected, and every year many cars are returned to the factory to repair, for this reason, causing a lot of damage to the automobile company. In the automotive industry, the detection of surface defects of automotive coatings is highly dependent on human vision and experience. The car company will arrange for some professional inspectors to inspect the coated car surface. However, the inspector's vision and attention will be affected by long-term work in this light environment. This manual defect detection method has many problems,

such as strong subjectivity, low stability, and low efficiency. Therefore, an automatic defect detection method for coated surfaces is required.

Automatic defect detection of automotive coated surfaces is usually based on the simulation of visual detection steps. There are three main steps: First, you must create an environment that is easy to detect defects. Then, collect the images. Finally, the defect is detected and identified by image processing. In the captured image, there is a lot of interference on the surface of the coating, which makes it difficult to detect. For example, during the drying process of the coating, uneven fine lines will be formed due to the drying speed and uniformity of the coating. These uneven, thin lines cause the surface drawn in the image to produce a point that looks like a cloud or orange peel. This is called the cloud or orange-peel effect and is not considered a defect. Because these noises reduce the accuracy of automatic defect detection, it is necessary to remove these noises.

In this paper, the following studies have been done to remove the noise from the detection results. First, a method based on brightness difference to evaluate the difficulty of defect detection is presented. Using this method, the area most prone to orange peel effects in images were determined experimentally and statistically. Next, a method for automatically exploring the optimal threshold value for image binarization is presented to detect all possible candidates for defects. These candidates are filtered through the distribution area of orange peel effect and the brightness difference index to remove the noise. Finally, for the accuracy of detection results, the results are further filtered by continuous frames.

Many common automatic detection methods are based on a single image. Therefore, when noise is detected in the image, it is considered a defect, which is a problem encountered by common methods. In order to further screen for noise in defect candidates, some studies have proposed methods for merging continuous images to enhance defect performance, but these methods require the assistance of specific external equipment conditions. Other studies use the detection results of the previous frame to infer the results of the next frame and compare them with the actual results to determine whether the defect is true or false. However, this method requires not only a certain relative moving speed between the detected surface and the camera, but also an unstable effect on the curved surface. This study presents a new method based on continuous images. Specifically, many labels are attached to the test vehicle to simulate defects, and the label coordinates of each frame are captured and recorded. The results are then analyzed to

obtain the calibration reference lines. The track of defect candidates in continuous images is compared with the calibration reference line to determine whether it is qualified. The experimental results demonstrate that, compared with the traditional method based on moving distance, the proposed method has higher stability and less strict requirements for the relative moving speed of the camera and detected surface. But this method still has a serious shortcoming. When a new type of car is detected, its calibration reference line needs to be retrieved.

論文審査結果の要旨

本論文では、自動車の塗装面の欠陥を自動検出するシステムを提案している。自動車表面の大部分は塗装されており、自動車の耐食性や耐酸化性を向上させ、自動車の寿命を延ばす主な手段のひとつである。一方で、消費者は塗装品質によって自動車品質を直観的に評価する。自動車製造の過程では、塗料に混入した異物や空気中の塵などの影響で、塗装後の表面にいくつかの突起などの欠陥が発生する。これらの欠陥は完全には検出できず、毎年多くの車が工場に返却され、自動車会社に大きな損害を与えている。本論文はLED管、USBカメラ、パソコンから構築された低コストの欠陥自動検出システムを提案している。通常、欠陥の自動検出手法は人間による視覚検査のシミュレーションに基づいており、三つの主要な手順がある。まず、欠陥を検出しやすい環境を作成する必要がある。次に、画像を収集する。最後に画像処理により欠陥を検出する。撮影された画像では、塗装表面に多くのノイズがあり、検出が困難である。例えば、塗工乾燥時には、乾燥速度や塗膜の均一性などによって、細かい線、雲、オレンジの皮のようなノイズを生じる。これは、ゆず肌と呼ばれ、欠陥とは見なされない。これらのノイズは自動欠陥検出の精度を低下させるため、これらのノイズを除去する必要がある。本論文では、これらのノイズにロバストな塗装欠陥検出手法を提案している。まず、欠陥検出の困難性を評価できる輝度差を計算する方法について述べられている。この方法を用いて、画像中のゆず肌の影響を最も受けやすい領域を実験的および統計的に決定している。次に、画像二値化のための最適しきい値を自動的に探索する方法を提案し、欠陥の候補を検出している。欠陥候補は、ゆず肌と輝度差指数の分布領域によってフィルタリングされる。最後に、検出結果の精度をさらに向上させるために、連続フレームにより候補を再度フィルタリングする。実験結果は、提案された方法が高い精度を達成できることを示している。提案した追跡手法は、移動距離に基づく従来法と比較して、ロバスト性が高く、このような実用的な手法は他に類を見ない。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、この研究の背景や取り組んでいる内容、塗装面の欠陥自動検出の問題点、提案手法の概要が記述されている。

第 2 章では、欠陥自動検出の既存研究に関して記述されている。一般的に静止画扱う手法が多いが、動画像を使用する研究についても調査している。また、検出アルゴリズムにおいて、シンプルな画像処理手法を利用する手法だけではなく、ディープラーニングを用いた手法も記述されている。

第 3 章では、提案手法のハードウェアシステムとソフトウェアシステムについて記述している。ハードウェアシステムについては、撮影環境と構成について述べられている。ソフトウェアシステムは、以下の三つの部分により構成されている。(1) 静止画像における欠陥候補の検出：LED 管周辺の関心領域の検出、新たな最適二値化閾値探索手法を利用し、欠陥候補を検出。(2) 静止画像における欠陥候補のフィルタリング：差分画像の利用、ゆず肌と欠陥の輝度差指数の分布を利用してフィルタリング。(3) 動画像から欠陥を決定：キャリブレーション基準線の作成と連続性を考慮した欠陥の決定。

第 4 章では、提案手法の有効性を検証するための実験について述べられている。具体的には、まず、使用するデータと正解データの構成について説明されている。次に、これらのデータを利用して、提案手法の欠陥候補検出手法と欠陥の決定手法の実験結果について記述されている。最後に、他の手法との比較実験の結果について記述されている。これらの実験結果は、既存の二値化手法と比較して提案した最適二値化閾値探索手法が優位であるという結果を示している。

第 5 章では、結論と今後の課題について述べている。本論文で提出された欠陥自動検出システムの有効性と有用性について述べ、提案手法の将来性を検討、分析している。

以上、本論文は自動車の塗装面の欠陥を自動検出するシステムを提案し、その有効性と有用性を示したものであり、メディア工学分野やコンピュータビジョンの発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

Jing Zhang, Masaki Kikuta, Chao Zhang, Akiyoshi Ito, Kenichi Anmi, Yoichi Matsui, Takuya Akashi, "Defect Inspection of Coated Automobile Roofs Using a Single Camera", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.15, No.4, pp.616-625, 2020/1