

Diss. ETH No. 19815

Measurement of raw sheet metal objects with deflectometry method in the infrared spectrum

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
ZOLTÁN SÁROSI

MSc. in Information Engineering, University of Miskolc
born 27. September 1977
citizen of Hungary

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Konrad Wegener, supervisor
Prof. Dr. Pavel Hora, coexaminer
Dr. Ernst Müller, coexaminer

2011

Abstract

The early detection of surface defects on raw sheet metal parts is a critical problem in the automotive industry. Some defects become visible and disturbing only in the later production steps, in which the parts get painted and varnished, meaning they become specular reflecting.

A measurement method was developed, that is based on the deflectometry method, and takes it to the infrared spectrum, in order to overcome the surface scatter of the raw objects in the visible range of light.

The range of techniques, that can quickly measure large, car body panel sized objects, can be narrowed down to triangulation principle based projected light volume and the reflection based deflectometry methods. Comparing the two methods' basic principles, also by making simulations, the deflectometry method showed higher sensitivity for small changes in the surface slope, which is characteristic for the defects in smooth, sheet metal objects. In order to reach the level of specular reflection required for the function of the deflectometry method, the working wavelength of the system has to be shifted to the infrared spectrum. A new, thermal camera based method was developed to evaluate the reflectivity of surfaces in the mid wave infrared range. The measurements showed good coincidence with the results of the reflectance models, that supported the infrared deflectometry concept.

Different pattern geometries, as well as evaluation methods were compared. It was shown with simulations, that grating patterns (quadratic and hexagonal) are more sensible to small changes of the surface than the fringe pattern, since they can indicate phase deviations in two or three different directions. The single exposure Fourier transform method was proposed to the concept of the industrial measurement technique, due to it's tolerance to noise and environmental instabilities like vibration, air turbulence, and changes in the ambient illumination.

A simple and robust display device was designed and built from many small incandescent lamps, in order to produce a high contrast grating pattern in the thermal radiation spectrum, which is used as reference for the infrared deflectometry system. The position of the lamps was fixed in the grid points with a metal plate with drilled holes. The phase uncertainty of the produced pattern, due to the position inaccuracies of the lamps' filaments, was reduced by the application of black lacquer paint on the lamps.

The analysis and the development of the measurement system was supported by a ray-tracing based simulation tool, that can model both deflectometry and projected light volume systems, with a wide range of different parameters. For studying the scatter of light due to surface roughness, which results in the filtering effect on the reflected images, the He-Torrance-Sillion-Greenberg reflection model [89] was implemented in a tool, that can generate filter kernels for different measurement scenarios.

A geometric camera calibration method for the thermal camera was developed on the basis of the camera calibration toolbox from Bouguet [32], that uses the infrared display device as calibration object, which reduced the uncertainties in the camera parameters considerably.

Test measurement with the prototype infrared deflectometry system showed, that it is capable of the detection of relatively small surface defects (with $26\mu m$ height and with a diameter of 10mm) on a $100 \times 100 \text{ mm}^2$ object, based on a single image.

Kurzfassung

Die frühzeitige Detektierung von Oberflächenfehlern auf Metallblechen mit rauhen Oberfläche ist ein kritisches Problem in der Automobilindustrie. Manche Oberflächenfehler werden erst während der letzten Produktionsschritte sichtbar und relevant, in denen die Teile lackiert, und somit glänzend werden.

Es wurde eine Messmethode entwickelt, die auf dem deflektometrischen Prinzip beruht. Die Messungen werden im infraroten Spektrum ausgeführt, damit sich die Streuung von der rauhen Oberfläche, die die Messung im sichtbaren Spektrum behindert, reduzieren lässt.

Die breite Palette unterschiedlicher Messmethoden, die geeignet sind Teile, mit einer Grösse von einem Autokarosserienpanel schnell vermessen zu können, kann auf die Verfahren Projizierter Muster und die Deflektometrie eingeschränkt werden. Bei dem Vergleich der zwei Methoden zeigte die Deflektometrie höhere Sensitivität für kleinen Neigungsänderungen der Oberfläche die charakteristisch sind für Oberflächenfehler auf glatten Metallblechteilen. Der Unterschied in der Sensitivität zwischen den zwei Prinzipien wurde auch in Simulationen bestätigt.

Um bei der Oberfläche einen höheren glänzenden Reflexionsgrad, der für die Deflektometrie nötig ist, zu erreichen, muss der Wellenlängenbereich des Messsystems in das infraroten Spektrum verschoben werden. Eine neue Messmethode unter Verwendung einer Thermokamera wurde entwickelt, um den Reflexionsgrad von Oberflächen im mittleren infraroten Spektrum zu bestimmen. Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des theoretischen Modells, was das Konzept der Deflektometrie im infraroten Spektrum unterstützt.

Verschiedene Muster und deren Auswertung wurden verglichen. Mit Hilfe von Simulationen konnte gezeigt werden, dass quadratische und hexagonale Gittermuster empfindlicher auf kleine Abweichungen der untersuchten Oberfläche sind als Streifenmuster, da die Gittermuster Phasenverschiebungen in zwei oder drei verschiedenen Richtungen erfassen können.

Unterschiedliche Auswertungsmethoden für die Musterverzerrung wurden verglichen, wobei die Einzelbild Fourier Transform Methode wegen ihrer Toleranz gegen Rauschen und Umgebungseinflüsse wie Vibration, Luft-Turbulenzen und Änderungen im Umgebungslicht für das Konzept des industriellen Messsystems vorgeschlagen wurde.

Ein einfaches und robustes Anzeigergerät wurde konstruiert. Das Gerät besteht aus vielen kleinen Glühlampen, die eine kontrastreiches Gittermuster in dem Spektrum der thermischen Strahlung erzeugen können, womit es als Referenz für das infrarote Deflektometriesystem verwendet werden kann. Die Positionsungenauigkeit der Glühfaden in den Lampen verursacht eine Unsicherheit der Phasenwerte im dargestellten Muster. Die Unsicherheit der Phasenwerte konnte durch die Lackierung der Lampen mit einer schwarzen Farbe wesentlich reduziert werden.

Die Auswertung der Daten und die Entwicklung des Messsystems wurde mit einer Simulationssoftware, die auf der Ray-Tracing Methode basiert, unterstützt. Die Simulationssoftware kann sowohl Deflektometrie als auch projizierte Muster simulieren, womit der Einfluss von vielen unterschiedlichen Parametern untersucht werden kann. Eine weitere Simulationssoftware, die auf dem He-Torrance-Sillion-Greenberg Reflexionsmodell [89] basiert, wurde für die Visualisierung der Lichtstreuung, und für die Berechnung des Filterkernes, der die reflektierten Bildern verzerrt, entwickelt.

Ein Kalibrierverfahren für die Geometrie der Thermokamera wurde auf Basis der Kamerakalibrierung gemäss Bouguet [32] entwickelt, die das Infrarotdisplay als Kalibrierobjekt benutzt, wodurch sich die Unsicherheiten in den Kameraparametern wesentlich verkleinern lassen.

Testversuche mit dem infraroten Deflektometriesystem haben gezeigt, dass schon ein relativ kleiner Oberflächenfehler (mit einer Tiefe von $26\mu m$ und mit einem Durchmesser von 10 mm) mit dem System anhand einer einzigen Aufnahme, auf einer 100 x 100mm grossen Oberfläche detektiert werden kann.