

Automatische Inspektion spiegelnder Oberflächen mittels inverser Muster

*Stefan Werling, Universität Karlsruhe (TH),
Jürgen Beyerer, Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung*

Manuskripteingang: 18. Januar 2007; zur Veröffentlichung angenommen: 26. Januar 2007

Der Einsatz von inversen Mustern zur schnellen und robusten Prüfung spiegelnder Freiformflächen wird vorgestellt. Beobachtet man bekannte Muster, die z. B. in einem LC-Display dargestellt werden, über eine spiegelnde Oberfläche, erscheinen diese dem Betrachter deformiert und verzerrt. Mittels bekanntem 3D-Modell des Prüfobjekts bzw. Messung an einem Referenzobjekt können vorab sogenannte inverse Muster berechnet werden. Diese Muster erzeugen über die Abbildung des Prüfobjekts unverzerrte Muster in der Kameraebene. Damit ist die Oberflächentopographie im inversen Muster implizit vorhanden. Die automatische Oberflächenprüfung beschränkt sich jetzt auf die Auswertung eines Musters, womit ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil zu den bisherigen deflektometrischen Verfahren erzielt wird.

Schlagwörter: Deflektometrie, inverse Muster, automatische Sichtprüfung, Bildverarbeitung, spiegelnde Freiformflächen

Inspection of Specular Surfaces with Inverse Patterns

The application of inverse patterns to fast and robust mirror surface evaluation is shown. In a well controlled environment, one observes via the mirror surface a screen onto which a well-defined pattern is displayed. Evaluation of the deflected pattern is used to determine surface defects of the object under test. In some cases it is possible to calculate inverse patterns in advance, in which the surface topography is given implicitly. Using these inverse patterns results in bottom-of-the-range and fast surface examination, which is a benefit compared to the commonly used deflectometric methods.

Keywords: Deflectometry, shape from specular reflection, inverse patterns, image processing, specular free forms

1 Einleitung

Ein Ziel aktueller Forschung am Lehrstuhl für interaktive Echtzeitsysteme ist die Entwicklung eines robotergestützten Systems für das Rapid-Prototyping von Bildverarbeitungssystemen auf Basis der Deflektometrie. Gerade bei komplex geformten Bauteilen

wie z. B. Automobilstoßfängern oder Motorhauben ist eine Planung und optimale Bestimmung der erforderlichen Systemparameter (Bildfeld, Bildauflösung, Schärfentiefe, Anzahl der erforderlichen Bildaufnahmen, Positionen der Beleuchtung und der Kamera, Bahnplanung des Sensorkopfes usw.) notwendig. Die optische, industrielle Onlineinspektion technischer Objekte er-

fordert dabei regelmäßig die Erfassung und Kontrolle deren Form- und/oder Reflektanzabweichungen von ihren Sollwerten. Die Erfassung der Formabweichung (3D-Gestalt, Krümmung) bedarf, insbesondere bei spiegelnden bzw. teilspiegelnden Oberflächen, neuer Ansätze der 3D-Messtechnik, da etablierte Verfahren auf der Basis teil-diffuser Reflexion wie Lasertriangulation oder Streifenprojektion auf Grund der Reflektanzeigenschaften dieser Objekte nicht eingesetzt werden können.

Deflektometrische Verfahren erlauben bei spiegelnden Objekten die Bestimmung der Oberflächengestalt bzw. deren lokalen Eigenschaften (Neigung) mit hoher Genauigkeit. Dabei werden bekannte Muster über die zu untersuchende Oberfläche auf einen Sensor abgebildet und auf Grund der gemessenen Verformung dieser Muster die Oberfläche bestimmt. Die Zuordnung eines Kamerapixels (gemessenes Muster) zur Position auf einem LC-Display oder Projektionsschirm (bekanntes Muster) erfolgt in der Regel durch die Dekodierung einer Bildserie, wobei durch die zeitliche Abfolge unterschiedlicher Muster eine örtliche Kodierung erfolgt. Übliche Kodiervverfahren sind im einfachsten Fall Gray-Code-Sequenzen; elaboriertere Verfahren benutzen mehrstufige Phasenshiftmethoden. Diese aufwendigen Kodiervverfahren sind auf Grund der Notwendigkeit, umfangreiche Bildsequenzen aufzunehmen, für die takthaltende Prüfung im industriellen Umfeld nur bedingt geeignet. Der Einsatz inverser Muster ermöglicht die Prüfung technischer Objekte mittels weniger Bildaufnahmen und den Einsatz von deflektometrischen Verfahren in der industriellen Onlineprüfung.

Die Generierung inverser Muster stellt darüber hinaus einen Teilaspekt des robotergestützten Planungs- und Evaluierungssystems zur Lösung von Bildverarbeitungsaufgaben dar. Oft können menschliche Experten keine quantitativen Aussagen über Fehlertopographien an Bauteilen liefern, sondern beschreiben IO/NIO-Teile auf Grund ihrer visuellen Erscheinung. Bei spiegelnden Oberflächen führt dies zu einer Bewertung der Deformation von Bildern von an sich bekannten Mustern. Dies ermöglicht uns zum einen, in einer Simulationsumgebung dem Experten die Auswirkungen von Oberflächendeformationen zu präsentieren und damit im Sinne eines kontrollierten Lernens einen Klassifikator hinsichtlich der deflektierten Muster aufzubauen und zum anderen, in einer Inspektionsstation technische Objekte auf Grund der Eigenschaften der deflektierten Muster zu prüfen.

Im Gesamtsystem Simulation, Prüfplanung, Validierung und Inspektion spiegelnder Oberflächen hat die Generierung und Auswertung von Mustern, insbesondere von inversen Mustern auf Grund ihrer einfachen Auswertbarkeit, eine zentrale Rolle.

2 Systemaufbau

Beobachtet man einen menschlichen Experten bei der Prüfung von spiegelnden Objekten, so betrachtet dieser die von der Oberfläche reflektierten und verzerrten Muster von Dingen in der Umgebung. Zusätzlich wird er in explorativer Weise die Oberfläche bewegen, bis er zur Überzeugung kommt, aus allen relevanten Beobachtungspositionen die Deformationen bewertet zu haben.

Aus diesem Leitbild ergeben sich folgende Forderungen an den Prüfaufbau:

- Beleuchtungsrichtung und Beobachtungsrichtung lassen sich unabhängig voneinander, flexibel und mit großer Genauigkeit einstellen.
- Beleuchtungsmuster lassen sich flexibel und mit hoher geometrischer Genauigkeit erzeugen.
- Kameraparameter lassen sich automatisch und reproduzierbar einstellen.

Alle drei Forderungen werden durch den Einsatz zweier kooperierender Roboter, eines LC-Displays zur variablen Mustererzeugung und einer Kamera mit motorischem Zoom und Blende erfüllt und in Bild 1 dargestellt.

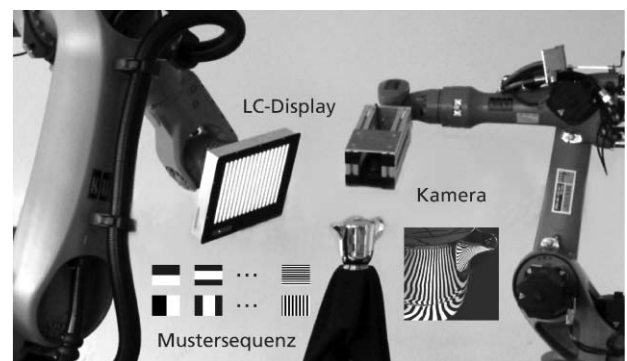


Bild 1: System zum Rapid-Prototyping von Sichtprüfungsanlagen auf Basis der Deflektometrie.

Figure 1: System for the rapid prototyping of image processing systems.

3 Deflektometrie

Zunächst wird das deflektometrische Problem im Kontinuum betrachtet (Darstellung nach [1]). Es bezeichnen bei Parametrierung in Kamerakoordinaten (u, v)

$$s = f(u, v) \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{n} = \begin{pmatrix} -\partial_u f \\ -\partial_v f \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{pmatrix} l_1(u, v) \\ l_2(u, v) \\ 0 \end{pmatrix}$$

den Sichtstrahl zur Oberfläche, den Normalenvektor am Oberflächenpunkt und den Vektor zum Muster (LC-Display) (vgl. Bild 2).

Nach Voraussetzung gilt für den Sichtstrahl und den reflektierten Strahl $r = l - s$ das Reflexionsgesetz:

$$\left\langle l + \left(\frac{\|l - s\|}{\|s\|} - 1 \right) s, n \right\rangle = 0$$

$$(l \times s, n) = |l, s, n| = 0 \tag{1}$$

Aus der Anwendung der Gleichung (1) auf die Parametrierung in Kamerakoordinaten ergibt sich nach wenigen Umformungen die deflektometrische Differentialgleichung (DGL):

$$\frac{\partial f}{\partial u} (u^2 l_2 - u v l_1 + l_2) - \frac{\partial f}{\partial v} (v^2 l_1 - u v l_2 + l_1) = (v l_1 - u l_2) f \tag{2}$$

Dabei sind $l_1(u, v)$ und $l_2(u, v)$ der Messung zugänglich. Durch Kodierung der Punkte auf L lässt sich jedem Kamerapixel (u, v) eine Schirmposition l zuordnen. Literaturübliche Methoden sind neben der Dekodierung von Gray-Code-Sequenzen [2; 3] vor allem Phasenschiebverfahren, die genaue und robuste Ergebnisse zeigen [3; 4].

Gleichung (2) ist eine partielle Differentialgleichung erster Ordnung, wobei keine Anfangswerte gegeben sind. Dies erlaubt keine eindeutige Lösung der deflektometrischen DGL. Das deflektometrische Problem ist damit ohne Zusatzwissen ein schlecht gestelltes.

Unter den zahlreichen in der Literatur beschriebenen Lösungen seien nur die große Klasse der Stereoverfahren (Regularisierung durch eine zweite Messung entweder durch Verschiebung des Schirms oder der Kamera) [5–8] und Verfahren, die Annahmen über die Oberfläche treffen [9; 10] erwähnt.

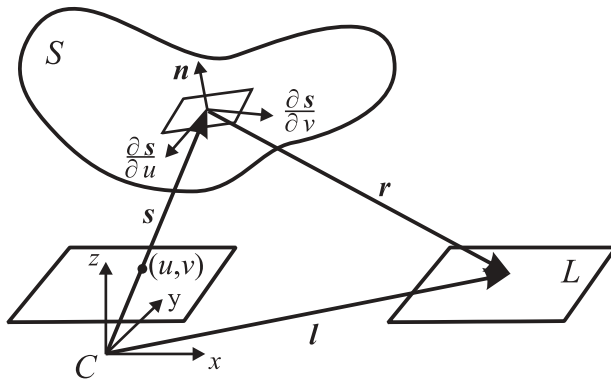


Bild 2: Geometrie der Reflexion.
Figure 2: Reflection geometry.

4 Inverse Muster

Im Folgenden bezeichne $h_{i,j}$ den Intensitätswert eines LC-Displays an der Position $(i, j)^T \in \mathbb{N}_{lcdR} \times \mathbb{N}_{lcdC}$ auf dem LC-Display und $g_{u,v}^T$ das Kamerasignal an der Position $(u, v) \in \mathbb{N}_{camR} \times \mathbb{N}_{camC}$ für eine gegebene und feste Konfiguration. Für die Abbildung $h \rightarrow g$ gilt

$$g_{u,v} = \sum_{i,j} p_{u,v,i,j} h_{i,j}$$

Das System ist damit im Allgemeinen nicht verschiebungsinvariant. Kamerasignale und LCD-Werte lassen sich unnummerieren ($(u, v) \rightarrow m, (i, j) \rightarrow n$) und als Vektoren darstellen:

$$g = Ph \quad \text{mit} \quad P \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{lcdR \cdot lcdC \times camR \cdot camC} \tag{3}$$

Der Kamerasignalvektor g lässt sich, zumindest im Prinzip, für gegebenes h messen (Einschalten genau eines LCD-Pixels und Bestimmung aller $g_{u,v}$, iterativ für alle i, j).

Wird das Kamerasignal \tilde{g} vorgegeben, führt dies direkt zum inversen Muster \tilde{h} :

$$\tilde{h} = Q\tilde{g} \quad \text{mit} \quad Q = P^{-1} \tag{4}$$

In der Praxis liegen die Werte von $lcdR, lcdC, camR$ und $camC$ in der Größenordnung von 1000, d. h. $P \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{1\,000\,000 \times 1\,000\,000}$, wobei P schwach besetzt ist. Das Problem (4) ist in der Regel schlecht konditioniert und damit nicht direkt lösbar.

Die zur Lösung des deflektometrischen Problems notwendige Messung der Abbildung $(u, v)^T \rightarrow (i, j)^T$ mittels Dekodierungs- bzw. Phasentaltungsmethoden liefert bei Separation der Dekodierung in Spalten- und Zeilenpositionen zwei Abbildungsmatrizen M_1 und M_2 mit

$$q(u, v) = (e_u^T M_1 e_v, e_u^T M_2 e_v)^T = (i, j)^T$$

Damit stellen die deflektometrischen Messungen im geometrisch-optischen Fall eine direkte Lösung des Problems in Gleichung (4) dar:

$$\tilde{h}(i, j) = \frac{c}{\sum_{u,v} \delta_{q_1(u,v)}^i \delta_{q_2(u,v)}^j} \sum_{u,v} \delta_{q_1(u,v)}^i \delta_{q_2(u,v)}^j \tilde{g}(u, v) \tag{5}$$

Somit impliziert die deflektometrische Messung eine Regularisierung des schlecht gestellten Problems (4).

Liefert die Phasentaltung nicht diskrete Werte $(i', j')^T$, können Interpolationsverfahren für die Werte $\tilde{h}(i, j)$ an den diskreten Positionen $(i, j)^T$ angewandt werden, z. B. bei triangulierenden Verfahren (vgl. dazu [11]).

In Bild 3 wird exemplarisch die Prüfung von konkaven Spiegeln dargestellt. Die Auswertung der

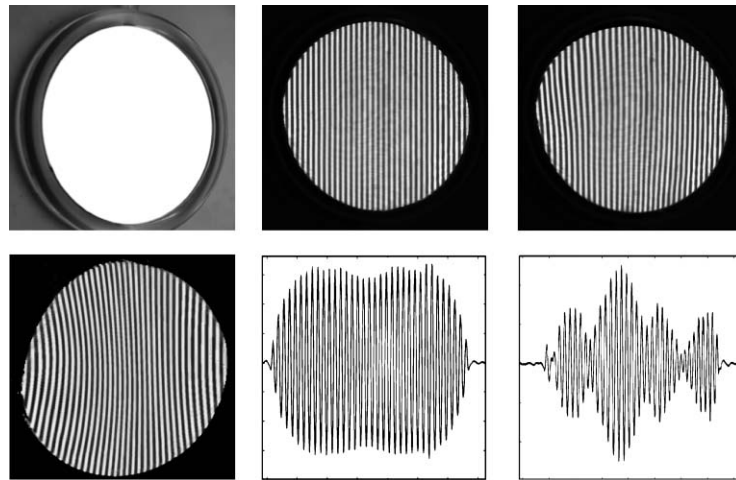


Bild 3: Obere Reihe: Prüfobjekt, Kamerabild, Referenz- und Fehlerteil. Untere Reihe: inverses Muster, Projektion der Signale von Referenz- und Fehlerteil in Spaltenrichtung.

Figure 3: First row: test object, camera image, reference and error part. Second row: inverse pattern, signals projected in column direction.

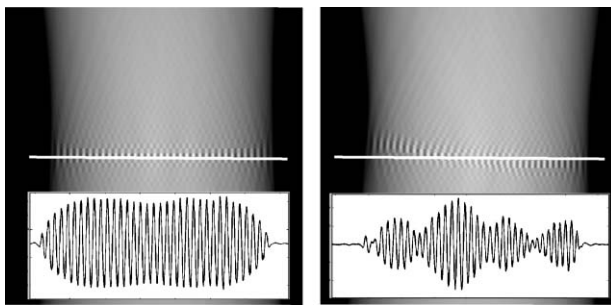


Bild 4: Radontransformation: links von Referenzobjekt, rechts von Fehlerobjekt; zusätzlich wird ein Schnitt bei $\phi = 0$ dargestellt.

Figure 4: Radon transformation: Reference and error part; cut for $\phi = 0$.

Kamerabilder erfolgt dabei effizient durch Projektion der Grauwerte in Spaltenrichtung. Diese Projektion ist ein Spezialfall der Radontransformation [12]

$$\check{g}(u, \phi) = R\{g(\mathbf{x})\} := \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\mathbf{x}) \delta(\mathbf{x}^T \mathbf{e}_\phi - u) \, d\mathbf{x}.$$

Bild 4 zeigt Bilder der Radontransformation bei einem Referenz- und einem Fehlerspiegel.

4.1 Signalmodell

Gleichung (3) kann als Signalmodell wie in Bild 5 dargestellt werden.

Dabei wird das abbildende System, bestehend aus Kameraoptik und spiegelnder Oberfläche, zerlegt in

$$\mathbf{P} = \mathbf{U}\mathbf{T},$$

wobei \mathbf{T} die geometrische Transformation des Eingangssignals und \mathbf{U} die Unschärfe auf Grund einer evtl. Defokussierung beschreibt. Gute Darstellungen der Unschärfemodellierung finden sich bei [13] und [14].

Direkte Lösung der Gleichung (3) liefert mit der Lösung (5) die Darstellung in Bild 6.

Dabei muss zur Berechnung des inversen Musters der Einfluss der kompletten optischen Abbildung berücksichtigt werden. Die optische Abbildung besitzt im Allgemeinen (Defokussierung) einen Tiefpasscharakter, d. h. es können nur Muster übertragen werden, die durch den Einfluss von \mathbf{U} nicht wesentlich gestört werden, z. B. sinusförmige Muster. Diese Unschärfe ist der physikalische Grund der schlechten Konditionszahl des Problems (4).

Bild 7 zeigt diese Offline-Auswertestrategie. Vorab wird aus dem gewünschten Muster \check{g} das inverse Muster \check{h} berechnet, dessen Abbildung durch ein Referenzsystem wiederum das Ausgangsmuster liefert.



Bild 5: Darstellung der allgemeinen Übertragungsfunktion als Signalmodell.

Figure 5: Signal model of the transfer function.

Die Übertragung durch ein Testsystem liefert im Allgemeinen jedoch ein von \tilde{g} abweichendes Signal g , womit die einfache und schnelle Möglichkeit des Testens gegen ein Referenzobjekt besteht.

Die Einflüsse von \mathbf{T} und \mathbf{U} auf das gewählte Eingangssignal lassen sich auch bildseitig korrigieren (Bild 8).

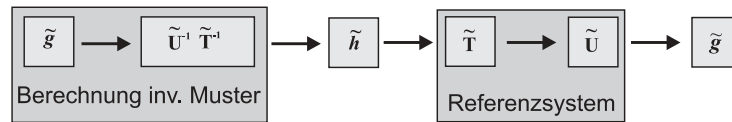


Bild 6: Allgemeine Lösung des inversen Problems als Signalmodell.

Figure 6: Solution of the inverse problem shown as signal model.

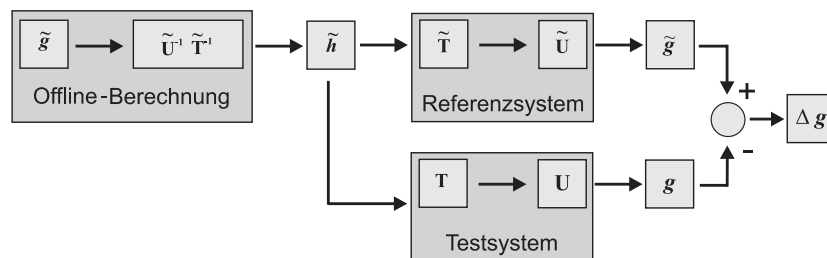


Bild 7: Signalmodell eines Prüfsystems, bei Offline-Berechnung der inversen Muster.

Figure 7: Offline generation of inverse patterns.

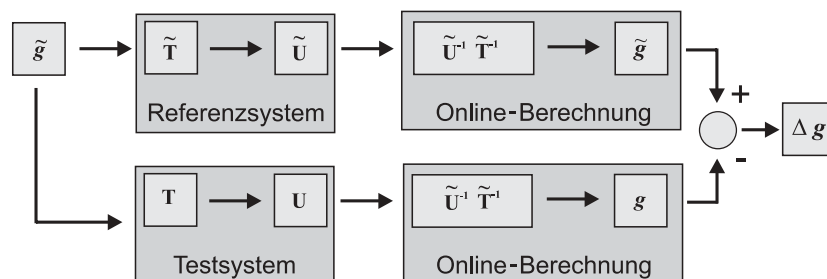


Bild 8: Signalmodell eines Prüfsystems, bei Online-Berechnung der inversen Muster.

Figure 8: Online generation of inverse patterns.

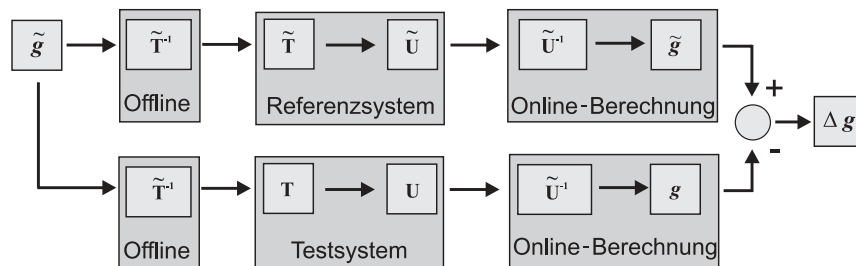


Bild 9: Signalmodell eines Prüfsystems, bei verteilter Berechnung der inversen Muster.

Figure 9: Distributed generation of inverse patterns.

Durch inverse Filterung (z. B. Wiener-Filter) und geometrische Entzerrung lassen sich damit die gewünschten Muster kameraseitig erzeugen. Nachteilig wirkt sich dabei jedoch aus, dass mit der bildseitigen Filterung eventuelle Fehlerobjekte ebenfalls transformiert werden.

Schließlich besteht noch die im Allgemeinen beste Möglichkeit, die geometrische Entzerrung im LCD-Muster und die Defokussierung bildseitig zu berücksichtigen (Bild 9).

4.2 Auswertestrategien

Zur Auswertung inverser Muster können verschiedene Strategien verfolgt werden:

- Wird am Referenzobjekt ein sinusförmiger Streifenverlauf beobachtet, so zeigt sich jede Abweichung eines Prüfobjekts von seiner Referenz eindeutig in seinem Fourierspektrum, vgl. [2].
- Wird am Referenzobjekt ein Gittermuster beobachtet, so lassen sich aus der lokalen Deformation der Linien Aussagen über die Formabweichung des Prüflings vom Modell ableiten [10].
- Kleine, lokale topographische Fehler lassen sich an Hell-Dunkel-Übergängen gut detektieren, wobei dies besonders einfach bei Beobachtung eines Streifenmusters gelingt (Bild 12).
- Die gleichzeitige Darstellung farbcodierter inverser Muster ermöglicht die simultane Erfassung zweier Linienstrukturen in einer Stereokonfiguration und damit die Regularisierung des deflektometrischen Problems.

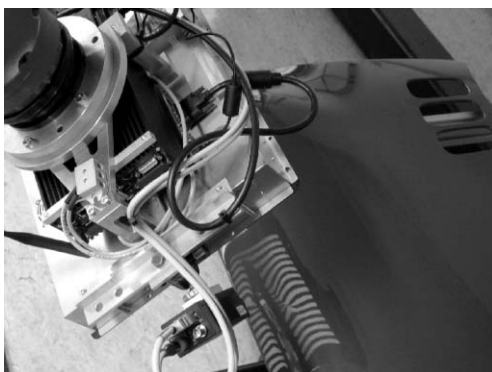


Bild 10: Robotergeführter, teilautonomer Sensorkopf zur automatischen Inspektion (teil-)spiegelnder Objekte. Der Sensor findet seine Verwendung im Robotersystem Bild 1.

Figure 10: Robot based autonomous sensor for the inspection of specular free forms. It is used in the system of Fig. 1.

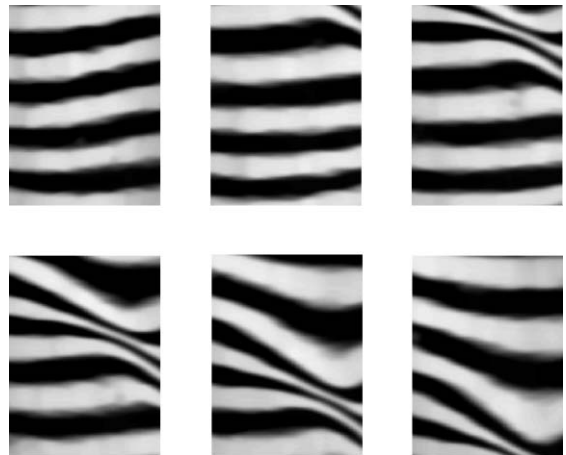


Bild 11: Detektion lokaler topographischer Fehlstelle in lackierter Motorhaube. Dargestellt (von links oben nach rechts unten) ist eine Bildsequenz, aufgenommen bei translatorischer Linearbewegung ($\Delta x = 1$ cm) des Sensorkopfes relativ zur Motorhaube.

Figure 11: Image sequence of a topographical error in an engine hood. The sensor moved translatively with $\Delta x = 1$ cm.

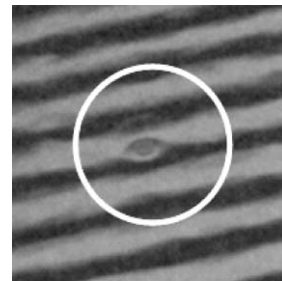


Bild 12: Detektion lokaler Fehlstellen in lackiertem Stoßfänger.

Figure 12: Local error in a bumper.

- Durch die Darstellung von der aktuellen Oberfläche angepassten Mustern lassen sich auch komplex geformte Bauteile in kontinuierlicher Bewegung prüfen. Bild 10 zeigt einen intelligenten Sensorkopf, bestehend aus Rechner, LC-Display und Kamera, bei der robotergestützten Inspektion einer Motorhaube. Bild 11 zeigt die Bildserie einer Blechbeule. Die Änderung der erwarteten Linienstruktur auf Grund der gestörten Oberflächentopographie kann leicht detektiert werden.

Damit können Oberflächen hinsichtlich ihrer Gestalt mit minimalem Bildaufnahmearbeit verifiziert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von inversen Mustern bei der automatischen Inspektion von (teil-)spiegelnden Oberflächen erlaubt:

- Eine schnelle Onlineprüfung im industriellen Umfeld.
- Eine schnelle Verifikation der deflektometrischen Messfunktion $I(u, v)$.
- Eine lokale Rekonstruktion der Oberfläche mittels deflektometrischem Stereoverfahren.
- Die Erzeugung nahezu beliebiger Muster \tilde{g} und damit die Schaffung eines auf Auswertung bekannter geometrischer Muster basierenden Klassifikationssystems zur Bewertung von Oberflächenabweichungen.

Die experimentellen Untersuchungen zur Erzeugung von inversen Mustern zeigen, dass bei Fokussierung der Kamera auf das LC-Display und bei der Wahl eines Abbildungsmaßstabs kleiner eins eine gute Darstellung der Muster gelingt. Die für diese Randbedingungen optimale Konfiguration muss für jede Aufnahmekonstellation optimal angepasst werden. Dies unterstreicht die Notwendigkeit zur Entwicklung des flexiblen Planungs- und Evaluierungssystems für Bildverarbeitungsaufgaben.

Literatur

- [1] *J. Balzer, S. Werling, J. Beyerer*: Regularization of the deflectometry problem using shading data, SPIE Optics East Boston 2006: Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology IV, Proceedings of SPIE 6382, 2006.
- [2] *D. Pérard*: Automated visual inspection of specular surfaces with structured-lighting reflection techniques, Düsseldorf: VDI Verlag, 2001.
- [3] *S. Kammel*: Deflektometrische Untersuchung spiegelnd reflektierender Freiformflächen, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- [4] *D. Giglia, M. Pritt*: Two-Dimensional Phase Unwrapping, New York: Wiley, 1998.
- [5] *M. Petz*: Rasterreflexions-Photogrammetrie – Ein neues Verfahren zur geometrischen Messung spiegelnder Oberflächen. Aachen: Shaker Verlag, 2006.
- [6] *J. Kaminski, S. Lowitzsch, M. Knauer, G. Häusler*: Full-Field Shape Measurement of Specular Surfaces, The 5th International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, S. 372–379, W. Osten (Hrsg.), Berlin: Springer, 2005.
- [7] *R. Kickingeder, K. Donner*: Stereo Vision on Specular Surfaces, Proceedings of IASTED Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, S. 335–339, 2005.
- [8] *T. Bonfort*: Reconstruction de surfaces réfléchissantes á partir d'images, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [9] *J. Beyerer, D. Pérard*: Automatische Inspektion spiegelnder Oberflächen anhand von Rasterreflexion, Technisches Messen 64(10), S. 394–400, 1997.
- [10] *S. Savarese, M. Chen, P. Perona*: Local Shape from Mirror Reflections, International Journal of Computer Vision 64(1), S. 31–67, 2005.
- [11] *W. Li, T. Bothe, W. Osten, M. Kalms*: Object Adapted Pattern Projection – Part I: Generation of Inverse Patterns, Optics and Lasers in Engineering, 41, S. 31–50, 2004.
- [12] *J. Beyerer, F. Puente León*: Die Radontransformation in der digitalen Bildverarbeitung, at – Automatisierungstechnik 50(10), S. 472–480, 2002.
- [13] *F. Mesch*: Systemtheoretische Beschreibung optisch-elektrischer Messsysteme, Teil 1: Inkohärente Systeme mit beliebigen Blenden und mit Defokussierung – Einführung und Übersicht, Technisches Messen atm, 7/8, S. 249–258, 1977.
- [14] *P. Stocketh*: Properties of a Defocused Optical System, Journal of the Optical Society of America, 59(10), S. 1314–1321, 1969.



Dipl.-Ing. Stefan Werling ist wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für interaktive Echtzeitsysteme, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH).

Hauptarbeitsgebiete: Informationsgewinnung aus multidimensionalen Bildserien, Deflektometrie, 3D-Rekonstruktion, Bildverarbeitung.

Adresse: Institut für Technische Informatik, Universität Karlsruhe (TH), Adenauerring 4, 76131 Karlsruhe, E-Mail: stefan.werling@ies.uni-karlsruhe.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer ist Leiter des Fraunhofer-Instituts IITB und Inhaber des Lehrstuhls für interaktive Echtzeitsysteme an der Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH).

Hauptarbeitsgebiete: Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung, Fusion heterogener Informationsquellen, Informationstheorie, Systemtheorie, Statistische Verfahren, Messtechnik.

Adresse: Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, E-Mail: juergen.beyerer@iitb.fraunhofer.de