Real View Thermography

Lukas BIENKOWSKI^{*}, Christian HOMMA^{**}, Max ROTHENFUSSER^{*} Siemens AG, CT RTC SET INT-DE, 81739 München, Deutschland ** Siemens AG, CT TIM VS OS, 81739 München, Deutschland

Kurzfassung. In dieser Veröffentlichung wird eine innovative Ergänzung der aktiven Thermografie bei der zerstörungsfreien Prüfung vorgestellt. Eine sog. Real-View-Vorrichtung, bei der mit Hilfe einer Projektionseinheit die Messergebnisse direkt auf den Prüfling projiziert werden und eine intuitive Interaktion ermöglicht. Darüber hinaus wird ein Analyseverfahren der Puls-Phasen-Bilder, basierend auf dem Sobel-Filter, diskutiert, um die Detektierbarkeit der Defekte bei der Induktionsthermografie zu untersuchen. Durch die Projektion dieser Information auf das Bauteil erhält der Prüfer ein Feedback, das zu einer Optimierung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit führt.

Einführung

Das Ergebnis der thermografischen Untersuchung liegt unmittelbar nach der Messung, z. B. als ein farbig-kodiertes Puls-Phasen-Bild [1], vor, und kann auf dem Computerbildschirm betrachtet werden. Ein Vergleich zwischen dem Ergebnis und dem realem Prüfteil ist nur indirekt möglich und somit die Ergebnisanalyse schwierig. Dies gilt auch für den Fall des Einsatzes einer Hybrid-Kamera, welche das infrarote mit dem farbigen Bild kombiniert.

Es wird ein Real View Thermography System (RVT-System) vorgeschlagen, bei dem mit Hilfe eines Beamers die Oberfläche des Prüflings als eine Projektionsfläche verwendet wird. Das thermografische Ergebnis wird dynamisch sowohl an die Größe, als auch die Position des Prüflings angepasst, so dass die Projektion das ganze Bauteil gut abdeckt.

Das hier vorgestellte System deckt zwei Szenarien ab:

- 1. Der statische Fall: der Prüfling ist fest in der Vorrichtung eingespannt und nicht beweglich. Um einen Parallaxenfehler zu vermeiden, haben die IR-Kamera und der Beamer durch den Einsatz eines Strahlteilers eine gemeinsame optische Achse. In dem Fall ist keine Anpassung des Projektionsbildes notwendig.
- 2. Der dynamische Fall: Der Prüfling kann in allen sechs Freiheitsgraden innerhalb eines begrenzten Arbeitsbereiches bewegt werden. Die Position des Objekts wird kontinuierlich verfolgt, sodass diese zu jeder Zeit zur Verfügung steht. Anhand dieser Daten ist eine geometrische Anpassung des Projektionsbildes in Echtzeit möglich. Da der Prüfling nach der Messung von der Vorrichtung losgelöst ist, kann er frei bewegt und betrachtet werden. Dieser Fall kann als eine Erweiterung des statischen Falles betrachtet werden.



1. Der statische Fall

1.1 Einführung

Der Aufbau des RVT-Systems für den statischen Fall ähnelt dem der Hybrid-Kamera [2], wobei anstatt der VIS-Kamera ein Beamer eingesetzt wird. Darüber hinaus, um eine parallaxenfreie Projektion zu gewährleisten, kommt ein Strahlteiler zum Einsatz. Dank diesem ist eine perfekte Überlagerung der Projektion mit dem Prüfling ohne eine geometrische Anpassung möglich.

1.2 Interaktion vor der Messung

Das RVT-System kann nicht nur bei der Evaluierung der Messergebnisse hinsichtlich der Defekte behilflich sein, es stehen auch einige nützliche Funktionen während der vorausgehenden Vorbereitung einer Messung zur Verfügung. In unserer Konzeptstudie werden diese Funktionen, wie Positionierungshilfe des Prüflings oder Initialisieren einer Messung, vorgestellt (Abb. 1).

Im ersten Schritt wird der Typ des zu untersuchenden Bauteils durch das System erkannt. So können alle weiteren Schritte, wie z. B. Messparameter, Positionierung oder Evaluierungskriterien, diesem Bauteil angepasst werden. Eine Positionierungshilfe in Form eines Zeigers wird so lange eingeblendet, bis der Prüfling die korrekte Messposition erreicht. Die Messmethode wird direkt auf dem Bauteil ausgewählt, ähnlich einem



d) Echtzeitprojektion des Infrarotbildes (der vergrößerte Ausschnitt ist nicht Teil der Projektion, nur für Vergleichszwecke)

Abbildung 1. Real-View-Konzept während dem Positionieren des Bauteils und der Messung.

Touchscreen. Dazu wird eine Liste der verfügbaren Messmethoden auf den Prüfling projiziert und der Prüfer kann eine davon durch eine 2D- oder 3D-Geste auswählen. Ein Verfahren, das dabei zum Einsatz kommen könnte, nutzt das Microsoft Kinect System mit zugehörigen Algorithmen. Anschließend wird die ausgewählte Messung gestartet und die aufgenommene Infrarotserie in Echtzeit auf das Bauteil projiziert, um den Verlauf des IR-Signals visuell darzustellen.

Im letzten Schritt wird die IR-Serie einer für das erkannte Bauteil geeigneten Analyse unterzogen und das Ergebnis für die finale Evaluierung auf dem Prüfling eingeblendet.

1.3 Interaktion nach der Messung

Um eine Interaktion mit dem projizierten Ergebnis zu ermöglichen, wird der eingesetzte Zeiger kontinuierlich verfolgt. Im vorliegenden Fall ist es ein Schraubenzieher, dessen Position von der IR-Kamera ermittelt wird. Prinzipiell kann es jedoch ein beliebiger Gegenstand mit klar definierten Konturen sein. Durch den Einsatz des Strahlteilers ist keine 3D-Information über die Position des Schraubenziehers notwendig, vorausgesetzt dieser befindet sich in der Nähe des Prüflings. So kann die Position anhand des Differenzbildes zweier IR-Bilder und einem definierten Schwellwert bestimmt werden. Dabei muss die Bauteiloberfläche keineswegs berührt werden, was bei empfindlichen Bauteilen von Vorteil ist. In Rahmen der Konzeptstudie wurden folgende Interaktionsmethoden entwickelt (siehe Abb. 2).



c) Virtuelles Radiergummi

d) Virtuelles Zeichnen

Abbildung 2. Verschiedene Interaktionsmöglickeiten direkt auf einer Gasturbinenschaufel.

Die Virtuelle Lupe ist vor allem für kleine Indikationen vorteilhaft. Da diese ein Teil der Projektion und nicht des realen Objektes sind, kann eine konventionelle Lupe nicht benutzt werden. Die Vergrößerung des Ergebnisbildes erfolgt auf dem Rechner und wird auf die durch den Zeiger markierte Stelle projiziert.

Virtuelle Taschenlampe: Im Laufe der FPI-Untersuchung (eng. "fluorescent penetrant inspection") wird oft zwischen UV- und Weißlicht umgeschaltet, um die Indikationen zu evaluieren. Während unter UV-Licht die fluoreszierenden Indikationen sichtbar sind, kann das Bauteil selbst nur unter Weißlicht gut betrachtet werden. Da die projizierten Indikationen das Bauteil überdecken, kann die virtuelle Taschenlampe einen gewünschten Bereich des Bauteils sichtbar machen.

Virtueller Radiergummi: Die Entscheidung ob eine Indikation als ein Defekt oder Fehlanzeige (engl. "false call") klassifiziert wird, trifft der Prüfer, dem die virtuelle Lupe und Taschenlampe dabei behilflich sind. Falsche Indikationen können bei der akustischen Thermografie zum Beispiel durch viskoelastische Materialien entstehen, die sich durch die Dämpfung der Ultraschallwelle erwärmen [3, 4]. Diese Anzeigen können dann mit dem virtuellen Radiergummi entfernt und so nicht archiviert werden.

Virtuelles Zeichnen: Es kann durchaus vorkommen, dass auf dem Ergebnisbild eine Markierung gemacht werden muss, um z. B. besonders kritische Stellen hervorzuheben. Diese Möglichkeit bietet die virtuelle Zeichenfunktion, bei der der Zeiger als ein Stift dient.

2. Der dynamische Fall

2.1 Einführung

In diesem Fall kann der Prüfling von der Messvorrichtung entfernt und in eine andere Position, wo z. B. bessere Lichtbedingungen für die Projektion herrschen, bewegt werden. Das Bauteil wird kontinuierlich von einer Tracking-Einheit verfolgt, die mit der Projektionseinheit kalibriert ist. Die Position des Prüflings steht somit zu jeder Zeit zur Verfügung und kann in das Koordinatensystem der Projektionseinheit übertragen werden.

2.2 Tracking

Auf dem Prüfling sind mehrere binär kodierte Marker aufgebracht. Die Tracking-Einheit erfasst die nähere Umgebung des Prüflings in Form von 2D-Bildern, die von einem Algorithmus, der die Marker identifiziert, analysiert werden. Sobald mindestens zwei Marker erkannt werden, kann die Position (Rotation und Translation im Koordinatensystem der Tracking-Einheit) bestimmt werden. Die Projektionseinheit ist während des Tracking-Vorgangs inaktiv (z. B. durch Projektion eines Schwarzbildes), um Fehler bei der Markererkennung zu vermeiden.

Künftig soll ein texturbasiertes markerloses Tracking-Verfahren zum Einsatz kommen. Obwohl dieses auf einem anderen Prinzip der Positionsbestimmung beruht, ändert sich das Projektionsverfahren nicht und wird einheitlich im nächsten Kapitel diskutiert.

2.3 Geometrische Anpassung des Ergebnisbildes

Da die Projektionsfläche beweglich und meistens nicht planar ist, und im Gegensatz zu dem statischen Fall die Kamera und die Projektionseinheit nicht kollinear angeordnet sind, muss eine geometrische Anpassung des zur Projektion vorgesehenen Ergebnisbildes erfolgen. Dazu wird das Ergebnisbild nach der Messung als Textur auf das 3D-Modell gelegt (wie in Abb. 3 dargestellt). Dieser Vorgang wird nur einmal nach der Messung durchgeführt.

Danach wird nur das 3D-Modell mit der Textur, entsprechend der kontinuierlich ermittelten Position, in dem virtuellen Raum bewegt und rotiert. Die Position der virtuellen Kamera in Relation zu dem 3D-Modell im virtuellen Raum ist identisch mit der Position der Projektionseinheit im realen Raum. So kann das Bild, das die virtuelle Kamera liefert, als Projektion verwendet werden. Auf diesem Wege wird sichergestellt, dass die Projektion mit dem Prüfling perfekt übereinstimmt.



Abbildung 3. Schematische Darstellung des Algorithmus der geometrischen Anpassung.

Die beiden Verfahren, das Tracking und die geometrische Anpassung, erfolgen in Echtzeit und erlauben somit flüssiges Arbeiten für den Anwender.

3. RVT-gestützte Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (Probability of detection)

3.1 Einführung

Die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) ist ein fundamentaler Aspekt der zerstörungsfreien Untersuchung. Einer der Einflussfaktoren bei der manuellen Prüfung ist der sog. menschliche Aspekt, der alle Parameter, die durch den Prüfer beeinflusst werden, beinhaltet. Betrachtet man beispielsweise die manuell durchgeführte Induktionsthermografie, dann können hier Parameter wie der Abstand zwischen dem Prüfling und dem Induktor sowie die Orientierung des Induktors einen signifikanten Einfluss auf die POD haben.

Die RVT-Technik kann nun genutzt werden, um dem Prüfer zu jedem Messvorgang ein visuelles Feedback in Form einer Projektion wichtiger Informationen zu geben. Anhand dieser Informationen kann zum Beispiel entschieden werden, ob die Orientierung des Induktors und der Abstand zu dem Prüfling optimal sind und ggf. die Messung zu wiederholen ist.

3.2 Puls-Phasen-Analyse und Sobel-Filterung

Der durch Induktion erzeugte Wärmefluss wird während der Messung von der IR-Kamera als Sequenz erfasst. Mit Hilfe der bekannten Puls-Phasen-Analyse [3] wird der aufgenommene Wärmefluss als Phasen- und Amplitudenbild ausgewertet.

Die Stärke des Induktionseffektes beeinflusst die Detektierbarkeit der Defekte und somit die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD). So kann durch optimale Position und Abstand des Induktors zum Prüfteil die POD maximiert werden.

Zur Beurteilung des aktuellen Induktionsvorganges werden nun das Phasen- und Amplitudenbild herangezogen. Die Richtungen des Stromflusses und des Wärmeflusses sind miteinander korreliert - in einfachen Geometrien stehen die beiden Richtungen senkrecht aufeinander. Des Weiteren hängt die Detektierbarkeit von Defekten von der Stromflussrichtung ab. So sind die Defekte mit senkrechter Orientierung zur Stromflussrichtung besser sichtbar als solche mit paralleler Orientierung. Folglich kann von der Wärmeflussrichtung ausgehend eine Information über die Fehlernachweiswahrscheinlichkeit gewonnen werden. Dazu wird das Phasenbild in der horizontalen (H_x) und vertikalen (H_y) Richtung mit der folgenden Sobelfiltermaske gefiltert:

$$H_{x} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \text{ und } H_{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$
(1)

Die Berechnung der Richtung des Gradienten Θ erfolgt nach:

$$\Theta = 2 \arctan \frac{H_y}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_x}}.$$
 (2)



Abbildung 4. Darstellung der Gradientenrichtung des mit einem Sobel-Filter gefilterten Phasenbildes.

Anschließend wird jedes vierte Pixel des gefilterten Bildes ausgewertet und entsprechend der Gradientenrichtung Θ , eine Linie (Gradientenlinie) gezeichnet, deren Länge und Opazität von dem Amplitudenwert abhängen. Das Ergebnis wird dem ersten Bild der Aufnahme überlagert (siehe Abb. 4). Die Gradientenlinien stellen die Richtung und die Stärke des Wärmeflusses dar, der, wie früher geschildert, mit dem der Stromfluss in Korrelation steht. Es wird erwartet, dass die Defekte parallel zu den Gradientenlinien gut sichtbar sind.

3.3 Ergebnisse

Eine Stahlplatte mit Nuten unterschiedlicher Länge und Tiefe wurde in zwei Stellungen (0 und 90°) untersucht. Die Ergebnisse wurden, wie im letzten Absatz beschrieben, analysiert. Die grünen Gradientenlinien (Abb. 5 a und b) markieren den Bereich, in dem der Induktionseffekt zustande kommt. In Abb. 5 c und d sind die farbig-kodierten Puls-Phasen-Bilder für beide Fälle zu sehen. Nur diese Nuten, die sich in dem durch die Gradientenlinien markierten Bereich befinden, sind sichtbar. Darüber hinaus sind die Nuten mit paralleler Orientierung zu den Gradientenlinien (Abb. 5d) deutlich besser sichtbar als solche mit senkrechter Orientierung (Abb. 5c). Die Nuten entlang der Gradientenlinien sind



a) Zwei Nuten innerhalb des grünen Bereichs





b) Alle Nuten innerhalb des grünen Bereichs



d) Alle Nuten sichtbar

Abbildung 5. Induktionsthermografie an einer Stahlplatte mit Nuten unterschiedlicher Länge, Tiefe und Orientierung.



a) Anregungszeit 100 ms



c) Puls-Phasen-Bild; der Defekt ist schlecht sichtbar



b) Anregungszeit 200 ms



d) Puls-Phasen-Bild; der Defekt ist gut sichtbar

Abbildung 6. Induktionsthermografie an einer Turbinenleitschaufel. Es sind die Gradientenbilder sowie die zugehörigen Puls-Phasen-Bilder dargestellt.

senkrecht zum Stromfluss, verdichten diesen lokal und erzeugen somit in Folge der ohmschen Verluste zusätzliche Wärme.

Das zweite Beispiel behandelt ein Bauteil komplexer Geometrie, eine Turbinenleitschaufel. Die Position des Induktors und der Abstand zum Bauteil werden während der Untersuchung nicht geändert. Die Anregungszeiten betragen 100 ms bzw. 200 ms und sind als Parameter des Prüfsystems nicht von dem menschlichen Aspekt beeinflusst. Trotzdem liefern die Gradientenlinien auch in diesem Fall nützliche Informationen.

Ein Vergleich zwischen den Bildern in Abb. 6 a und b verdeutlicht, dass die Stärke des Induktionseffektes und die Dichte der Gradientenlinien mit der Anregungszeit zunehmen. Wie erwartet ist die Sichtbarkeit der Defekte deutlich besser im Falle von 200 ms Anregungszeit.



Abbildung 7. Projektion der Gradientenlinien auf die Turbinenleitschaufel.

Die Projektion der Gradientenlinien ist in Abb. 7 zu sehen.

Zusammenfassung

Das Real-View-Thermography-Verfahren trägt dazu bei, durch Projektion der Messergebnisse direkt auf den Prüfling die Evaluierung festgestellter Indikationen intuitiver zu gestalten.

Die vorgestellte Analyse der Phasen- und Amplitudenbilder mit Verwendung des Sobel-Filters liefert zusätzliche Information über die Stärke des Induktionseffektes und der Detektierbarkeit von Defekten. Die Projektion dieser Information auf das Bauteil gibt dem Prüfer eine Rückmeldung während der Untersuchung, wie die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit erhöht werden kann.

Es ist angedacht, das Verfahren künftig mit einer statistischen und modellgestützten POD-Studie (MAPOD) zu kombinieren, um eine konkrete Aussage über die Detektierbarkeit der Defekte für spezifische Bauteile liefern zu können.

Referenzen

[1] X. Han and Md. S. Ismal, "Finite element modeling of heating of cracks during sonic infrared imaging". In: J. Appl. Phys. 99, 2006.

[2] Eisler, K.;Goldammer, M.; Rothenfusser, M.; Arnold, W.; Homma, C.: "Combining Spectral Material Properties in the Infrared and the Visible Spectral Range for Qualification and Nondestructive Evaluation of Components". In: Thompson, D. O.; Chimenti, D. E. (Hrsg.): AIP Conference Proceedings–Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2011.

[3] C. Homma, "Investigation of the Mechanism and Technical Implementation of Acoustic Thermography", Dissertation, University of Saarbrücken, 2007.

[4] A. L. Audenino, C. Crupi, E. M. Zanetti, "Correlation between thermography and internal damping in metals". In: Int. Journal of Fatigue 25, 2003, No. 4, pp. 343–51.