

Entwicklung eines starr-endoskopischen 3D-Streifenprojektionssensors zur automatisierten Flugtriebwerksinspektion

Theresa Thiel, Markus Kästner, Eduard Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover
mailto:theresa.thiel@imr.uni-hannover.de

Bei der Triebwerksinspektion werden Verdichterschaufeln auf Defekte hin untersucht. Dazu wird im Folgenden ein 3D-Messsystem vorgestellt, mit dem die Erfassung der Geometrie einer Schaufel automatisiert erfolgen soll. Zur Abschätzung von Rekonstruktionsgenauigkeiten des Messsystems werden Messungen eines Mikrokonturnormals bei unterschiedlichen Abständen durchgeführt.

1 Einleitung

Die Inspektion stellt ein regelmäßiges Standardprozedere zwecks Schadensprävention und Instandhaltung von Triebwerken dar. Im Zuge der Inspektion werden hierfür bestimmte Bauteile auf diverse Schäden untersucht. Die Demontage des Triebwerks stellt einen großen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand dar, weshalb für möglichst viele Komponenten die Inspektion über Wartungsbohrungen im zusammengebauten Zustand erfolgt. Zu diesen Komponenten zählen unter anderem die Verdichterschaufeln im Hochdruckverdichter. In der Regel erfolgt die Inspektion dieses Bereichs mithilfe eines manuell geführten flexiblen Videoendoskops, welches von hochspezialisiertem Personal bedient wird. Die Klassifizierung der inspizierten Verdichterschaufeln wird anschließend auf Grundlage der Bilddaten ebenfalls manuell durch das Personal durchgeführt. Die Detektion der Schäden ist daher mit hohem Zeit- und Personalaufwand verbunden und die Auswertung erfolgt ausschließlich subjektiv. Mithilfe des in diesem Beitrag vorgestellten neuartigen endoskopischen Streifenprojektionssystems soll der Inspektionsprozess für Verdichterschaufeln automatisiert und objektiviert werden. Die Klassifizierung der Schäden erfolgt auf Grundlage geometrischer Merkmale.

2 Messsystem

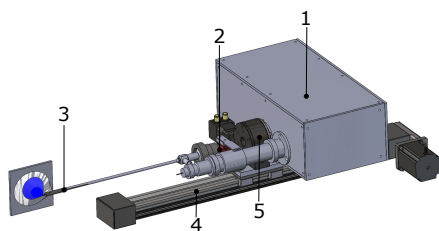


Abbildung 1 Projektionseinheit (1), Industriekamera (2), Messkopf (3), Linearachse (4), Rotationsachse (5)

Abbildung 1 und 2 zeigen den Aufbau des endoskopischen Streifenprojektionssystems. Bei der Streifenprojektion handelt es sich um ein optisch-flächenhaftes antastendes 3D-Messverfahren bei dem ein zeitlich modulierte, strukturiertes Licht auf ein Messobjekt projiziert und von einer Kamera observiert wird. Über die messobjektbedingte Manipulation des Projektionsmuster kann eine 3D-Punktwolke rekonstruiert werden. Die Mustersequenz wird über ein Glasfaserbündel (Abb. 2 (2)) auf die zu inspizierende Oberfläche projiziert und über ein starres Endoskop (Abb. 2 (1)) von einer Industriekamera (Abb. 1 (2)) aufgezeichnet. Die Projektionseinheit basiert auf dem Aufbau eines Faserbündelendoskops gemäß [1]. In der Projektionseinheit wird das Licht einer High-Power-LED über eine Köhlerbeleuchtung auf ein Spiegelarray gelenkt. Mit dem Spiegelarray werden die Streifensequenzen erzeugt, welche über eine Tubuslinse und ein nachfolgendes Mikroskopobjektiv in ein Glasfaserbündel eingekoppelt werden.

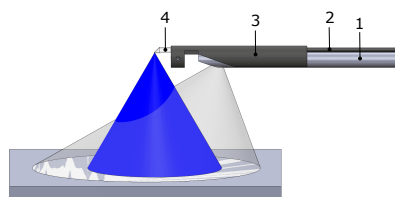


Abbildung 2 Starres Endoskop (1), Glasfaserbündel (2), Hülse (3), GRIN-Linse (4)

Am Messkopf (Abb. 2) wird die eingekoppelte Mustersequenz mit einer GRIN-Linse (Grintech GmbH, Jena) und einem Spiegelprisma in einem 90° Winkel auf das Messobjekt projiziert. Die automatisierte Positionierung des Messkopfs im Triebwerk wird, gemäß Abbildung 1, mit zwei Achsen realisiert. Mit der Linearachse wird der Messkopf ins Triebwerk hineingefahren und kann mit der Rotationsachse um die

eigene Achse rotiert werden. Für eine vollumfängliche Inspektion ist die vollständige Erfassung einer Verdichterschaufel nötig. Aufgrund des begrenzten Messbereichs werden hierfür mehrere Einzelmessungen zu einer Gesamtrekonstruktion fusioniert, wobei die starrkörperkinematische Registrierung auf dem Positioniersystem basiert.

Im Triebwerk sind mehrere Verdichterstufen vorhanden, die unterschiedliche Abstände zueinander aufweisen. Dadurch ergeben sich je nach Stufe unterschiedliche Arbeitsabstände. Im Folgenden wird die Genauigkeit der Messung in Abhängigkeit des jeweiligen Arbeitsabstand untersucht.

3 Untersuchung unterschiedlicher Arbeitsabstände

Um aus den aufgezeichneten Mustersequenzen 3D-Punktwolken zu rekonstruieren, muss das Streifenprojektionssystem kalibriert werden. Dazu wird eine Kamerakalibrierung nach Zhang [2] durchgeführt und der Projektor als eine inverse Kamera modelliert. Für die Untersuchung des Sensors bei verschiedenen Arbeitsabständen wird ein Mikrokonturnormal mit mehreren Radien (Tab. 1) vermessen. Das Mikrokonturnormal wird dazu für jede Messung in einem unterschiedlichen Abstand zum Messkopf positioniert.

Parameter	konvex	konkav
r_{1000}	$1001.5 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$	$998.7 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$
r_{500}	$501.2 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$	$498.7 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$
r_{250}	$251.1 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$	$249.1 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$
r_{100}	$100.9 \mu\text{m} \pm 0.7 \mu\text{m}$	

Tabelle 1 Nominelle Radien des Mikrokonturnormals

Die Auswertung der Einzelmessungen erfolgt mithilfe von GOM Inspect (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig). Hierbei werden Zylinder entsprechend der nominellen Radien des Mikrokonturnormals in die rekonstruierte Punktwolke mit einem 3σ -Vertrauensintervall eingepasst. Die Abweichung ergibt sich aus der Differenz zwischen den Punktwolken und den eingepassten Zylindern.

4 Ergebnisse

In Abbildung 3 werden die Messergebnisse bei den Arbeitsabständen 15 mm, 25 mm, 40 mm und 60 mm gezeigt. Die Abweichungen sind entsprechend der Farbskala hervorgehoben. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Abweichungen mit zunehmendem Arbeitsabstand vergrößern. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich die Punktwolkendichte mit Vergrößerung des Arbeitsabstandes reduziert, da hierbei durch die entozentrischen Eigenschaften des Systems ein größerer Bereich erfasst wird.

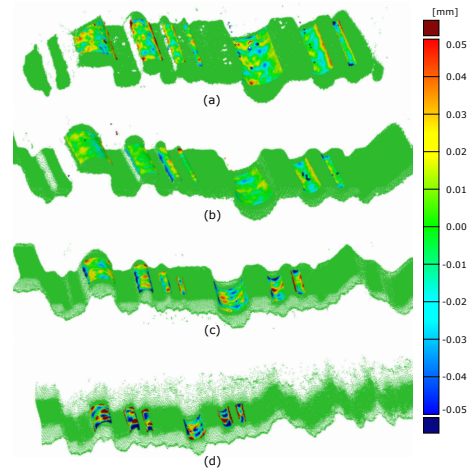


Abbildung 3 (a) 15 mm, (b) 25 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm

Trotzdem kann die Zylindergeometrie auch in den Messungen mit größerem Arbeitsabstand detektiert werden. Weiterhin sind größere lokale Abweichungen in der Punktwolke bei 15 mm zu erkennen. Das ist damit zu begründen, dass der Überlappungsbereich zwischen der Projektion und dem Sichtfeld des Endoskops bei diesem Abstand sehr gering sind. Das führt dazu, dass nur der Randbereich des Kamerasensors zur Aufnahme verwendet wird, in dem Vignettierung auftritt und demnach die Signalintensität der zeitlich modulierten Projektion abnimmt.

5 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Messsystem ist geeignet, um Messungen in schwer zugänglichen Bereichen, wie bei einem Triebwerk, durchzuführen. Weiterhin ist die Erfassung von Geometrien bei unterschiedlichen Arbeitsabständen möglich. Für eine Verbesserung der Messung bei einem sehr geringem Arbeitsabstand wäre, neben einer Arbeitsabstand-spezifischen Parameteroptimierung, das Messkopfdesign anzupassen, um den Messbereich zu vergrößern.

Das hier vorgestellte System wird im Rahmen des Sonderforschungsbereich 871 entwickelt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Projekte im Rahmen des SFB 871.

Literatur

- [1] L. Hinz, M. Kästner, and E. Reithmeier, "Metal forming tool monitoring based on a 3d measuring endoscope using cad assisted registration," *Sensors* **19**(9), 2084 (2019).
- [2] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **22**(11), 1330–1334 (2000).