Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske

12

Robert Kuschmierz

Interferometrische Lasersensoren zur dreidimensionalen, in-situ-Formvermessung rotierender Körper

SHAKER VERLAG

MST
Professur für
Mess- und Sensorsystemtechnik

Technische Universität Dresden

Interferometrische Lasersensoren zur dreidimensionalen, in-situ-Formvermessung rotierender Körper

Robert Kuschmierz

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades
eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Czarske

Prof. Dr.-Ing. habil. W. Jüptner

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Weise

Tag der Einreichung: 12.06.2017

Tag der Verteidigung: 16.10.2017

Dresdner Berichte zur Messsystemtechnik

Band 12

Robert Kuschmierz

Interferometrische Lasersensoren zur dreidimensionalen, in-situ-Formvermessung rotierender Körper

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5758-4
ISSN 1866-5519

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Abstract

The measurement of the velocity, the absolute distance, the three dimensional shape, the deformation, the vibration and the location of fast rotating bodies is an important task in manufacturing and process technology. Examples are the determination of load and damage dependent deformation of fibre reinforced rotors as well as the measurement of the eccentricity and shape of workpieces inside of a lathe. Novel interferometric laser Doppler distance sensors with frequency evaluation (F-LDD Sensor) or with phase evaluation (P-LDD Sensor) appear well equipped for these tasks, since they allow for the simultaneous measurement of lateral velocity and axial distance of fast moving and rough surfaces with micron uncertainty.

In this thesis, the applicability of these measurement principles for in-situ shape and deformation measurement with submicron uncertainty was investigated. For this purpose, the achievable measurement uncertainty of the P-LDD Sensor was investigated analytically, numerically and experimentally. It is shown that existing signal processing algorithms allow for measurement uncertainties close to the theoretical minimum by means of the derived Cramér-Rao-Bound for speckled surface signals. A numerical simulation is proposed to calculate the influence of the speckle effect and the properties of the measurement volume with regards to the achievable measurement uncertainty. The existence of an optimal numerical aperture with a minimal measurement uncertainty is shown experimentally.

Employing the findings regarding the measurement uncertainty a compact, all passive and fibre-coupled measurement head was designed. It employs three interference fringe systems for a non-incremental distance measurement with a measurement range of $500\,\mu\mathrm{m}$ and a minimal uncertainty of approximately $200\,\mathrm{nm}$ independent of the surface roughness. The P-LDD Sensor is employed in a CNC lathe for a model based, in-situ and absolute shape measurement with keyhole access. A submicron uncertainty for the mean diameter and the surface topography is achieved. Thus, the P-LDD sensor can be employed for in-situ quality control allowing for a zero defects production.

Furthermore a system of three F-LDD Sensors was applied to measure the load dependent deformation of a fibre reinforced, translucent rotor at surface speed above $300\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. A submicron uncertainty for the deformation was achieved. This allowed to detect a damage induced reduction of the structural integrity of the rotor in-situ during operation. The results have been employed, in order to verify and calibrate novel FE models and they demonstrate that the proposed measurement systems allows for an in-process structural health monitoring.

Finally a novel camera based approach was found, which enables a reduction of the speckle related measurement uncertainty by up to two orders of magnitude as well as an in-situ calibration of interferometric sensors. In the future this will enable absolute shape and deformation measurements at rotating object with nanometre measurement uncertainties as well as lateral resolution of a few micron.

Kurzfassung

In der Fertigungs- und Prozesstechnik kommt der Messung der Geschwindigkeit, des Abstands, der dreidimensionalen Form und Deformation, der Schwingung und der Lage schnell rotierender Bauteile eine wachsende Bedeutung zu. Beispiele sind die Erfassung der last- und schädigungsbedingten Deformation von Rotoren oder der Exzentrizität und Form von Werkstücken in Bearbeitungsmaschinen. Neuartige interferometrische Laser-Doppler-Distanzsensoren mit Phasenauswertung (P-LDD Sensor) oder mit Frequenzauswertung (F-LDD Sensor) erscheinen für diese Aufgaben prädestiniert. Sie erlauben eine Messung der lateralen Geschwindigkeit und eine gleichzeitige Messung der axialen Position mit Mikrometer-Unsicherheit auch an schnell bewegten rauen Oberflächen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Eignung beider Messverfahren zur In-situ-Form- und -Deformationsmessung mit Sub-Mikrometer-Messunsicherheit untersucht. Dazu wurde die erreichbare Messunsicherheit des P-LDD Sensors analytisch, numerisch und experimentell betrachtet. Unter anderem wurde anhand der Cramér-Rao-Schranke gezeigt, dass bestehende Signalverarbeitungsalgorithmen Messunsicherheiten nahe des theoretisch erreichbaren Minimums erlauben. Es wurde eine numerische Simulation entwickelt, anhand derer die Messunsicherheit in Abhängigkeit der Messvolumeneigenschaften und des Speckle-Effekts bestimmt werden kann. Weiter wurde gezeigt, dass eine optimale Numerische Apertur existiert, die eine minimale Messunsicherheit ermöglicht.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde ein kompakter, passiver, fasergekoppelter Messkopf entwickelt. Durch die Nutzung von drei Interferenzstreifensystemen ermöglicht er eine absolute Positionsmessung mit einer minimalen Messunsicherheit von etwa $200\,\mathrm{nm}$ bei einem Messbereich von $500\,\mu\mathrm{m}$. Mit dem Messkopf wurden Messungen in einer CNC-Drehmaschine durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass ein modellbasierter Ansatz die Bestimmung des Werkstückdurchmessers mit nur einem Sensor und Sub-Mikrometer-Messunsicherheit sowie eine gleichzeitige Messung der Oberflächentopographie ermöglicht. Damit bietet der P-LDD Sensor die Möglichkeit der In-situ-Qualitätskontrolle in Drehmaschinen für eine Null-Fehler-Produktion.

Des Weiteren wurde ein Messsystem bestehend aus drei miniaturisierten F-LDD Sensoren aufgebaut und zur Messung der lastabhängigen Aufweitung faserverstärkter, transluzenter Kunststoffrotoren bei Oberflächengeschwindigkeiten über $300\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ eingesetzt. Aufgrund der Sub-Mikrometer-Messunsicherheit konnte eine schädigungsbedingte Reduktion der Strukturintegrität während des Betriebs nachgewiesen werden. Die Ergebnisse können zur Validierung und Kalibrierung neuartiger FE-Modelle beitragen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass das Messsystem zur In-Prozess-Strukturüberwachung schnell rotierender Maschinen eingesetzt werden kann.

Abschließend wurde demonstriert, wie mit Hilfe einer kamera-basierten Streulichtdetektion die Speckle-bedingte Messunsicherheit interferometrischer Sensoren um bis zu zwei Größenordnungen reduziert und gleichzeitig eine In-situ-Kalibrierung durchgeführt werden kann. Dadurch können zukünftig absolute Form und Deformationen in-situ mit Messunsicherheiten von etwa $10\,\mathrm{nm}$ und mit lateralen Auflösungen von wenigen Mikrometern realisiert werden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik der Technischen Universität Dresden entstanden. Mein besonderer Dank gilt daher dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske für die Möglichkeit, diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu dürfen sowie für viele wertvolle Hinweise und Ratschläge. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Weise und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Jüptner für die freundliche Übernahme meines Koreferats bedanken.

Für die Vielzahl an Anregungen, Hinweisen, Ideen und Diskussionen möchte ich mich bei allen Kollegen der MST bedanken. Insbesondere seien hierbei Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer, Herr Dr. rer. nat. Lars Büttner, Herr Dr.-Ing. Philipp Günther, Herr Dr.-Ing. Thorsten Pfister, Herr Dr.-Ing. Nektarios Koukourakis, Herr M. Eng. Hao Zhang und Frau M. Sc. Katrin Philipp genannt.

Die vorliegende Arbeit ist in wesentlichen Teilen während der Bearbeitung zweier verschiedener Projekte in Kooperation mit Partnern aus Forschung und Industrie entstanden. Daher möchte ich mich herzlich bei den Mitarbeitern der Firma DMT Drehmaschinen GmbH & Co.KG für die freundliche Zusammenarbeit und insbesondere bei Herrn Bruno Klausmann für die Möglichkeit der Messung in einer seiner Maschinen bedanken. Weiter bedanke ich mich für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei Herrn Stephan Metschke von der PTB Braunschweig und für die Unterstützung des Vorhabens durch Herrn Prof. Dr. Harald Bosse sowie Dr.-Ing. Frank Löffler. Für die taktilen Referenzmessungen möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Andreas Davids von der Professur für Fertigungsmesstechnik bedanken. Weiterhin danke ich den Mitarbeitern des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik, vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Werner A. Hufenbach, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude und Herrn Dr.-Ing. Albert Langkamp für die Erfolgreiche gemeinsame Antragsstellung. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Angelos Filippatos für die interessante und intensive Zusammenarbeit.

Meine große Dankbarkeit möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft aussprechen. Zum einen, da sie mir mit der Förderung des DGF Projekts Cz55/23-1 den Einstieg in die wissenschaftliche Forschung ermöglichte und zum zweiten dafür, dass ich diese durch die Bewilligung der Projekte Cz55/29-1, Cz55/29-2 und Cz55/38-1 fortsetzen kann.

Auch möchte ich mich bei den vielen Studenten bedanken, die mich im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten unterstützt haben. Einen besonderen Dank möchte ich hierbei Herrn Dipl-Ing. Yongle Huang für die großartige Unterstützung bei Messreisen sowie bei Herrn Micha Sebastian Schuster und Herrn Dipl.-Ing. Dirk Schubert aussprechen, die es schon während ihres Studiums geschafft haben, Teile Ihrer Ergebnisse zu veröffentlichen. Eure Arbeit war vorbildlich.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern und meiner Schwester für die erhaltene Unterstützung abseits des Arbeitsplatzes bedanken. Meiner Lebensgefährtin Daniela danke ich für ihr Verständnis für meine Begeisterung an der Forschungsarbeit, welche oft viel Zeit in Anspruch genommen hat. Ohne eure Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract iii

Kurzfassung v

Danksagung vii

Abbildungsverzeichnis xi

Tabellenverzeichnis xiii

Abkürzungsverzeichnis xv

Symbolverzeichnis xvii

1 Einleitung 1
- 1.1 Motivation . . . 1
- 1.2 Stand der Technik . . . 2
  - In-situ Formmessung in Werkzeugmaschinen . . . 2
  - In-Prozess Strukturüberwachung faserverstärkter Rotoren . . . 4
  - Interferometrische Methoden zur gleichzeitigen Positions- und Geschwindigkeitsmessung . . . 5
- 1.3 Ziel und Struktur der Arbeit . . . 6

2 Der phasenauswertende Laser-Doppler-Distanzsensor (P-LDD Sensor) 9
- 2.1 Optischer Doppler-Effekt und Interferenzstreifenmodell . . . 9
- 2.2 Dopplerbasierte Lasermesssysteme . . . 12
  - 2.2.1 Laser-Doppler-Velozimeter . . . 12
  - 2.2.2 Frequenzauswertender Laser-Doppler-Distanzsensor . . . 14
  - 2.2.3 Phasenauswertender Laser-Doppler-Distanzsensor . . . 15

3 Messunsicherheitsbetrachtungen zum P-LDD Sensor 17
- 3.1 Vorbetrachtung zur erreichbaren Messunsicherheit . . . 17
- 3.2 Numerische Modellierung von Streulichtsignalen rauer Oberflächen . . . 20
  - 3.2.1 Speckle-Effekt . . . 20
  - 3.2.2 Numerische Modellierung des Speckle-Effekts . . . 22
  - 3.2.3 Signalverarbeitung . . . 24
- 3.3 Zufällige Messunsicherheit auf Grund von Rauschprozessen . . . 26
  - 3.3.1 Rauschprozesse . . . 26
  - 3.3.2 Cramér-Rao-Schranke . . . 27
  - 3.3.3 Bewertung der Signalverarbeitung . . . 29
- 3.4 Zufällige Messunsicherheit auf Grund des Speckle-Effekts . . . 32
- 3.5 Einfluss der Messvolumeneigenschaften auf die Messunsicherheit . . . 33
- 3.6 Positionsabhängigkeit der Messunsicherheit . . . 37
- 3.7 Einfluss der Kalibrierung auf die Messunsicherheit . . . 38

3.7.1 Kalibrierung an rotierender Schlitzblende 38
3.7.2 Kalibrierung am Zylinder 40
3.8 Zusammenfassung 41

4 Aufbau und Charakterisierung 43
4.1 Bestimmung des Eindeutigkeitsbereiches 43
4.2 Aufbau eines P-LDD Sensors zur nicht-inkrementellen Positionsmessung 47
4.3 Echtzeit-Signalverarbeitung 52
4.4 Einfluss der Streulichtdetektion auf die Messunsicherheit 57
4.5 Charakterisierung des Temperatureinflusses auf die Messunsicherheit . 59
4.6 Einfluss des Messobjekts auf die Messunsicherheit 65
4.7 Zusammenfassung 70

5 In-situ-Messung der absoluten Form und Deformation 73
5.1 Absolute In-situ-Formmessung für Drehmaschinen 73
5.1.1 Prinzip der Formmessung 73
5.1.2 Messunsicherheit 74
5.1.3 Absolute Formmessung in einer Werkzeugmaschine 78
5.2 Deformationsmessung faserverstärkter Rotoren 83
5.2.1 Aufbau des F-LDD Sensors 83
5.2.2 Beschreibung des experimentellen Aufbaus 85
5.2.3 Ergebnisse 88

6 Kamerabasierte Reduktion der Messunsicherheit des P-LDD Sensors 93
6.1 Modellierung von Streulichtsignalen 93
6.2 Simulation von Streulichtsignalen für die kamerabasierte Detektion . . . 96
6.3 Experimentelle Validierung der kamerabasierten Streulichtdetektion . . 99

7 Zusammenfassung und Ausblick 103

Literaturverzeichnis 109

A Publikationsliste 119

B Betreute Studien- und Diplomarbeiten 123