

iprom

Jan Erik Nitsche

**Statische und dynamische
Untersuchung von
Mehrkomponentensensoren
für Kräfte und Momente**

Band 16



Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik

TU BRAUNSCHWEIG

Statische und dynamische Untersuchung von Mehrkomponentensensoren für Kräfte und Momente

**Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu
Braunschweig**

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jan Erik Nitsche
aus: Limburg a. d. Lahn

eingereicht am: 26.03.2019
mündliche Prüfung am: 15.08.2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich
Dr.-Ing. Rolf Kumme

2019

Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik

Band 16

Jan Erik Nitsche

**Statische und dynamische Untersuchung von
Mehrkomponentensensoren für Kräfte und Momente**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6963-1

ISSN 1862-4456

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Use the Force, Luke.

Obi-Wan Kenobi, Star Wars - A New Hope.

Abstract

The measurement of forces and moments is a typical task in the measurement of mechanical quantities. Most sensors used in force and moment measurement are designed to measure only the amplitude of the force or moment vector in a given direction. This implies a reduction of the information included in the original force or moment vector.

Multi-component sensors that are able to measure force and moment components in different directions simultaneously are available and used in different fields. The calibration of such sensors however is not yet fully analyzed.

The aim of this work is to improve an existing setup for the static calibration of multi-component sensors and to extend a dynamic uniaxial calibration method for the use with multi-component sensors. In order to achieve this aim, photogrammetric measurement systems are implemented in the existing measurement setups. The photogrammetric measurement data is used to improve the uncertainty of the static reference system and to analyze the deformation of the sensor to be calibrated. In the dynamic setup, photogrammetry provides information about the force and moment vectors with six degrees of freedom.

Kurzfassung

Die Messung von Kräften und Momenten ist in der mechanischen Messtechnik weit verbreitet. Allerdings wird hierbei typischerweise lediglich der Betrag eines Kraft- oder Momentvektors in einer vorgegebenen Richtung ermittelt. Da Kräfte und Momente jedoch vektorielle Größen sind, stellt eine solche Messung eine starke Reduzierung der zu messenden Größe dar.

Mehrkomponentensensoren, die Kräfte oder Momente räumlich erfassen können, sind in verschiedenen Bereichen verbreitet, jedoch stehen bei der Kalibrierung dieser Sensoren viele Fragen, speziell bei der Umsetzung der Kalibrierung, offen.

In dieser Arbeit soll für die statische Kalibrierung von Mehrkomponentensensoren ein aktuell vorhandenes Verfahren optimiert sowie ein für die dynamische Kalibrierung vorhandenes Verfahren weiterentwickelt werden. Dazu werden erstmals klassische mechanische Kalibrierabläufe um optische Messsysteme nach dem Prinzip der Nahbereichsphotogrammetrie erweitert. Mit diesem zusätzlichen Messprinzip sollen weitere Informationen über den Messablauf gesammelt werden, welche die Ergebnisse der Kalibrierung verbessern. Die Verbesserung zielt im statischen Fall auf die Reduzierung der Messunsicherheit in der Kalibriereinrichtung sowie die Bestimmung der Verformung des Sensors ab. Im dynamischen Fall soll die Bestimmung der Referenzvektoren mit sechs Freiheitsgraden durch das photogrammetrische System erstmals ermöglicht werden.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	v
Kurzfassung	vii
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Ziel der Arbeit	2
2. Stand der Technik	5
2.1. Kraft und Moment	5
2.1.1. Definition von Kraft und Moment	5
2.1.2. Sensoren für Kraft und Moment	7
2.2. Kalibrierung von Sensoren für Kraft und Moment	8
2.2.1. Statische, uniaxiale Kalibrierung	8
2.2.2. Statische Mehrkomponentenkalibrierung	9
2.2.3. Dynamische, uniaxiale Kalibrierung	10
2.2.4. Dynamische Mehrkomponentenkalibrierung	10
2.3. Messunsicherheit nach GUM	12
2.3.1. Definition der Messunsicherheit	12
2.3.2. Bestimmung von Typ A und Typ B Unsicherheiten	13
2.3.3. Messunsicherheiten mit der Monte-Carlo-Methode	14
2.3.4. Kombinierte Standardunsicherheit	15
2.4. Mathematische Grundlagen	16
2.4.1. Satz der impliziten Funktionen	16
2.4.2. Koordinatentransformation	16
2.4.3. Starrkörpertransformation	18
2.4.4. Fourier-Transformation	19

2.5.	Parallelkinematiken	20
2.5.1.	Inverses kinematisches Problem	22
2.5.2.	Direktes kinematisches Problem	22
2.6.	Nahbereichsphotogrammetrie	23
2.6.1.	Punktförmig messende Systeme	24
2.6.2.	Flächenhaft messende Systeme	25
2.6.3.	Bündelblockausgleich	26
3.	Statische Referenzmesseinrichtung - Hexapod	29
3.1.	Physikalisches Modell der Hexapod-Anlage	31
3.2.	Geometriebestimmung des Hexapod	35
3.2.1.	Definition der Gelenkposition	35
3.2.2.	Optisches Messsystem zur Bestimmung der Gelenk- positionen	36
3.2.3.	Bestimmung der Gelenkpositionen	39
3.2.4.	Definition des globalen Koordinatensystems	41
3.2.5.	Unsicherheit der globalen Gelenkposition	42
3.3.	Messunsicherheit des Hexapods	43
3.3.1.	Einflussparameter	44
3.3.2.	Sensitivitätskoeffizienten	46
3.3.3.	Unsicherheit der Gelenkkoordinaten	48
3.3.4.	Messunsicherheitsbilanz	50
3.3.5.	Bewertung der Messunsicherheitsanalyse	53
3.4.	Analyse der Hexapod-Anlage	57
3.4.1.	Aufwärmverhalten	57
3.4.2.	Deformation unter Last	60
3.4.3.	Steuerung der Anlage	62
3.5.	Deformation des zu kalibrierenden Sensors	65
3.5.1.	Photogrammetrisches System zur Bestimmung der relativen Verschiebung der Plattformen	65
3.5.2.	Experimentelle Bestimmung der Deformation eines Sensors	66
3.6.	Ausrichtung der Koordinatensysteme	69
3.6.1.	Ausrichtung über iterative Optimierung	70
3.6.2.	Messunsicherheit des transformierten Koordinaten- systems	71
3.6.3.	Verschiebung des Sensorkoordinatensystems	72
3.7.	Statische Kalibrierung im Hexapod	73

3.8. Empfehlungen zur Optimierung der Hexapod-Anlage . . .	76
4. Dynamische Referenzmesseinrichtung - Schwingerreger . . .	79
4.1. Analyse und Optimierung optischer Messtechnik für dynamische Messungen	80
4.1.1. Reproduktion stark unterabgetasteter Signale . . .	80
4.1.2. Untersuchung zum Einfluss der Bewegungsunschärfe auf digitale Bildkorrelation	84
4.1.3. Einfluss der Belichtungsdauer auf die Abtastung sinusförmiger Schwingungen	85
4.2. Photogrammetrisches Messsystem zur Bestimmung der Beschleunigungen im dynamischen Aufbau	87
4.2.1. Anforderungen an das photogrammetrische System	88
4.2.2. Aufbau des photogrammetrischen Systems	91
4.2.3. Ansteuerung und Synchronisation mit Laservibrometer und Kraft-/Momentsignalen	93
4.2.4. Auswertung der Messdaten	94
4.2.5. Verifizierung des photogrammetrischen Messsystems	96
4.3. Entwurf von Belastungskörpern für dynamische Einleitung variabler Lastrichtungen	98
4.3.1. Anforderungen an die Belastungskörper	99
4.3.2. Entwürfe der Belastungskörper	100
4.3.3. FEM-Simulation des dynamischen Aufbaus	101
4.3.4. Analyse der gefertigten Belastungskörper	103
4.4. Physikalisches Modell des dynamischen Mehrkomponentensensors	107
4.5. Parameteridentifikation	108
4.5.1. Bestimmung der internen Masse	108
4.5.2. Bestimmung von Federkonstante und Dämpfungskoeffizient	110
4.5.3. Bestimmung der dynamischen Sensitivität	113
4.5.4. Passive Kanäle bei axialer Kraftanregung	118
4.6. Empfehlungen zur Optimierung der dynamischen Mehrkomponentenkalibrierung	119
4.6.1. Mögliche Verbesserungen des Versuchsaufbaus . .	120
4.6.2. Weiterer Forschungsbedarf zur dynamischen Kalibrierung	121

5. Zusammenfassung und Ausblick	123
5.1. Statische Referenzmessung	123
5.2. Dynamische Referenzmessung	124
5.3. Ausblick	125
Nomenklatur	127
Literatur	133
A. Anhang	145
A.1. Messwerte	145
A.2. Gleichungen und Vektoren zur Berechnung im Satz der impliziten Funktion	146
A.3. Unsicherheitswerte	148
A.4. Signifikante Einflussfaktoren und Messunsicherheit für F_x , F_y , M_x , M_y und M_z bei $F_z = 5 \text{ kN}$	148
A.5. Photogrammetrie Hexapod	154
Danksagung	155