

RESEARCH

Martin Schaeper

Mehrdimensionale Ortsfiltertechnik

Mehrdimensionale Ortsfiltertechnik

Martin Schaeper

Mehrdimensionale Ortsfiltertechnik

 Springer Vieweg

Dr.-Ing. Martin Schaeper
Rostock, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Universität Rostock, 2013

ISBN 978-3-658-04943-0
DOI 10.1007/978-3-658-04944-7

ISBN 978-3-658-04944-7 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Während meiner Tätigkeit am Institut für Allgemeine Elektrotechnik der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik der Universität Rostock entstand in Hinblick auf die Weiterentwicklung der Ortsfiltermesstechnik die vorliegende Arbeit.

Ein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Nils Damaschke, dem Institutsdirektor und Leiter des Lehrstuhls für Optoelektronik und Photonische Systeme, der mir die Möglichkeiten gab, mich in die Lehre der Grundlagen der Elektrotechnik einzuarbeiten, die Lasermesstechnik und die Technische Optik zu begleiten, im Bereich der ortsfilerbasierten Messtechnik Weiterentwicklungen vorzunehmen und mich persönlich weiter entwickeln zu dürfen. Dabei sind die Offenheit zu neuen Ideen und die stete Unterstützung meiner Arbeit hervorzuheben.

Der Arbeitsgruppe, vertreten durch Dr.-Ing. Willfried Kröger, Dr. Stefan Borchert, Dipl.-Ing. Stephan Höhne, Dr.-Ing. Andre Kleinwächter, Dipl.-Ing. Eric Ebert und Dipl.-Ing. Robert Kostbade, möchte ich für ihre Hilfsbereitschaft, gewinnbringenden Diskussionen, angenehmen Gespräche und besonders für ihren Zuspruch zum Entstehen der vorliegenden Arbeit danken.

Den vielen Mitarbeitern des Instituts für Allgemeine Elektrotechnik, besonders denjenigen, mit denen ich näher zusammengearbeitet habe, danke ich für die angenehme Atmosphäre und ihre Hilfe. Weiterhin möchte ich den vielen Belegbearbeitern, Diplomanden, Bachelor- und Masterstudenten für die Bearbeitung der mitunter von mir betreuten Arbeiten danken.

Meiner Frau danke ich für ihre liebevolle Art ihrer Unterstützung und die Schaffung von zeitlichen Freiräumen zur Erstellung dieser Arbeit. Unsere kleine Familie mit unserer Tochter Sophie gibt mir sehr viel Kraft.

Rostock

Martin Schaeper

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Signalentstehung mehrdimensionaler Ortsfilterkonzepte	5
2.1 Das Ortsfiltermessprinzip	5
2.2 Realisierungen in der optischen ortsfiterbasierten Velocimetrie.....	6
2.3 Signalentstehung bei Ortsfiltermesssystemen (1C)	10
2.4 Verwendung strukturierter Array-Detektoren zur 2C Messung	20
2.5 Einfluss der Pixelapertur eines Sensorchips	28
3 Verfahren zur Schätzung der Signalfrequenz	33
3.1 Auswerteverfahren.....	33
3.1.1 Nulldurchgangsdetektion (Periodendauermessung)	33
3.1.2 Leistungsdichtespektrum	35
3.1.3 Drehzeigerverfahren	37
3.1.4 Autokorrelation / Autokorrelationsphase.....	39
3.2 Vergleich der Verfahren anhand von Testsignalen	41
3.2.1 Die Cramér-Rao Schranke (Cramér-Rao Lower Bound)	43
3.2.2 Verwendung eines harmonischen Modellsignals.....	45
3.2.3 Überlagerung zweier Modellsignale für gezielte Phasensprünge.....	47
3.2.4 Vergleich der ermittelten Erwartungswerte.....	49
3.2.5 Diskussion zur Erstellung eines verbesserten Modellsignals.....	51
3.2.6 Vergleich anhand realer Signale	56
4 Mehrdimensionale ortsfiterbasierte Konzepte	59
4.1 Betrachtungen zu mehrdimensionalen Aufnahmefethoden.....	59
4.2 Vorverarbeitungen für mögliche echtzeitfähige Messsysteme.....	60
4.3 DSP basiertes Messsystem zur zweikomponentigen Messung	63
4.3.1 Skalierbarkeit des Messsystems	67
4.3.2 Messergebnisse zur Charakterisierung des Messsystems.....	68
4.4 Ortsfilter basierte Offlineauswertung zur Particle Image Velocimetry.....	75
4.4.1 Messung von Blasen eines Ausströmers.....	76
4.4.2 Messung an einem Kavitationskanal	81
4.5 Sensor-Array zur 2D/2C Messung	82
4.5.1 Testmessungen mit dem Sensor-Array	84
4.5.2 Messung der Strömung aufsteigender Blasen	86
4.6 Spiegel-Array zur Signalbildung im optischen Pfad.....	86

5 Zusammenfassung und Ausblick	91
5.1 Ergebnisse der Arbeit	91
5.2 Ausblick zu ortsfiterbasierten Konzepten	93
Literaturverzeichnis	95
Anhang A: Weiterführende mathematische Zusammenhänge	105
A.1 Berechnung des Vergrößerungsmaßstabes	105
A.2 Vergleich der Überlagerung mit der Kreuzkorrelation	106
A.3 Vergleich der Ortsfilterbeschreibung mittels Faltung und Kreuzkorrelation..	106
A.4 Korrektur der Signale aus nicht-Phasen-orthogonalen Gitterfunktionen	108
A.5 Shift-Korrektur bei sequenziell ausgelesenen Array-Sensoren	109
Anhang B: Beschreibung zu entwickelten Analyseprogrammen	111
B.1 Programm zur Signalanalyse.....	111
B.2 Programmmodule der Auswerteverfahren	114
B.3 Programm zur Erstellung von Modellsignalen	119
Anhang C: Daten und Angaben zur Messwertgewinnung mit dem DSP basierten	
2C Messsystem	121
C.1 Daten des Sensors S9132.....	121
C.2 Daten und Angaben zum DSP-Board TMDSDSK6455.....	122
C.3 Abbildungen zur Hardware des DSP basierten 2C Messsystems.....	123
C.4 Benutzeroberfläche zur Kommunikation mit dem DSP basierten 2C-	
Geschwindigkeitsmesssystem	124
C.5 Riemenaufbau zur Erzeugung einer längenreferenzierten	
Strukturbewegung.....	129
C.5.1 Genauigkeit der Referenz anhand des Streifenmusters	129
C.5.2 Erreichbare Genauigkeit des Messsystems anhand der Korrelation der	
beobachteten Oberflächenstruktur	131
C.5.3 Programm zur Untersuchung der erreichbaren Genauigkeit.....	132
C.6 Testsignal für theoretische Betrachtungen.....	133
Anhang D: Daten und Angaben zum Sensor-Array	137
D.1 Daten und Angaben zu FPGA-Board (USB-FPGA Module 1.11c)	137
D.2 Weitere Abbildungen des Sensor-Arrays.....	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Aufbau eines optischen Ortsfiltermesssystems nach Ator (1963)	5
Abbildung 2.2:	Realisierungen in der optischen Ortsfiltermesstechnik, vorrangig zur Geschwindigkeitsbestimmung (Auswahl), angeordnet an einem Zeitpfeil	8
Abbildung 2.3:	Überlagerung einer um Δx verschobenen Intensitätsverteilung i_B mit einer Gitterfunktion $g(x)$	11
Abbildung 2.4:	Beispiel einer rechteckförmigen Gitterfunktion und das dazugehörige Betragsspektrum.....	14
Abbildung 2.5:	Beispiel zur Signalentstehung bei vorgegebener Gitterfunktion $g(x)$ und Verschiebung der Intensitätsverteilung i_B in positive x -Richtung	16
Abbildung 2.6:	Zeitlicher Verlauf ausgewählter $a(k = 2\pi\mu)$ -Koeffizienten der Diskreten-Fourier-Transformation des Beispielsignals.....	17
Abbildung 2.7:	$\Delta\varphi$ -Verläufe ausgewählter Koeffizienten der zeitlich abhängigen Fourier-Transformierten $\underline{I}_B(t)$	18
Abbildung 2.8:	Spektrale Charakteristik unterschiedlicher Intensitätsverteilungen.....	19
Abbildung 2.9:	Realisierung der räumlich orthogonalen Gitterfunktionen in x - und y -Richtung am Beispiel eines Einfach-Differenzgitters.....	21
Abbildung 2.10:	Versatzbestimmung anhand einer Bildfolge, Vergleich von Kreuzkorrelation, Überlagerung und Gittergewichtung der Einzelbilder	22
Abbildung 2.11:	Bildung des Ortsfilter-Gitters mittels Vorgabe des Ortskreisfrequenzvektors \mathbf{k} im Bildbereich.....	26
Abbildung 2.12:	Bildung des Ortsfilter-Gitters durch eine Linie von Koeffizienten .	27
Abbildung 2.13:	Einfluss der Pixelapertur bei der Verwendung der Pixelapertur	29
Abbildung 2.14:	Vergleich des Einflusses der Pixelapertur bei der Verwendung eines Rechteckgitters und eines Kosinuskitters	31
Abbildung 3.1:	Nulldurchgangsdetektion mit „Plausibilitätstest“ anhand des Beispielsignals aus Anhang C.6.....	34
Abbildung 3.2:	Auswertung des Leistungsdichtespektrums des Beispielsignals aus Anhang C.6	36

Abbildung 3.3:	Auswertung des Beispielsignals aus Anhang C.6 mittels des Drehzeigerverfahrens	38
Abbildung 3.4:	Auswertung des Beispielsignals aus Anhang C.6 mittels der Autokorrelationsfunktion	40
Abbildung 3.5:	Strategie zum Vergleich der Auswerteverfahren.....	41
Abbildung 3.6:	Benutzeroberfläche des Programms „Main_Signalanalysis.vi“ zur Frequenzschätzung von Signalen	42
Abbildung 3.7:	Signalbeispiel und Vergleich der Varianzen der betrachteten Auswerteverfahren	47
Abbildung 3.8:	Signalbeispiel und Vergleich der Varianzen der betrachteten Auswerteverfahren mit Phasensprüngen	48
Abbildung 3.9:	Mittelwerte der Ergebnisse und einfache Standardabweichung zur Frequenzschätzung aus den Modellsignalen	50
Abbildung 3.10:	Beispiele für Modellsignale mittels Überlagerung gefensterter Einzelsignale	54
Abbildung 3.11:	Beispiel einer Modellsignalrealisierung und Vergleich der Unsicherheiten der betrachteten Auswerteverfahren mit der Cramér-Rao Schranken der Realisierungen und des Sinussignals...	55
Abbildung 3.12:	Vergleichsergebnisse der Auswerteverfahren anhand des Testsignals aus Anhang C.6.....	56
Abbildung 4.1:	Prinzipzeichnung eines Messaufbaus zur planaren zweidimensionalen Particle-Image-Velocimetry.....	59
Abbildung 4.2:	Funktionsweise des Positionssensors	63
Abbildung 4.3:	DSP-basiertes Messsystem mit einen Smart-Pixel-Sensor zur 2C Geschwindigkeitsmessung	64
Abbildung 4.4:	Benutzeroberfläche zur Kommunikation mit dem DSP-basierten Messsystem	66
Abbildung 4.5:	Skalierbarkeit des Messsystems zur Anpassung an die Geschwindigkeit und die Strukturgröße des vorliegenden Prozesses	68
Abbildung 4.6:	Messaufbau zur Charakterisierung des Messsystems	69
Abbildung 4.7:	Ergebnisse bei der Änderung des Abstandes der Sensoreinheit zur Oberfläche.....	70
Abbildung 4.8:	Ergebnisse bei Verdrehung der Sensoreinheit, Auswerteverfahren: Leistungsdichtespektrum.	72
Abbildung 4.9:	Ergebnisse bei Verdrehung der Sensoreinheit, Vergleich der Auswerteverfahren	73

Abbildung 4.10:	Längenreferenzierte Ergebnisse bei verschiedenen Geschwindigkeiten, Auswerteverfahren: Leistungsdichtespektrum.....	74
Abbildung 4.11:	Auswerteprogramm zur ortsfilterbasierten Analyse von Bildfolgen.....	75
Abbildung 4.12:	Messaufbau zur ortsfilterbasierten 2D/2C Messung.....	76
Abbildung 4.13:	Ortsfilterbasierte Auswertung zur 2D/2C Messung	78
Abbildung 4.14:	Ergebnis der ortsfilterbasierten offline 2D/2C Messung am Blasenausströmer	79
Abbildung 4.15:	Unsicherheiten der Geschwindigkeitsschätzung bei der ortsfilterbasierten 2D/2C offline Messung an einem Blasenausströmer	80
Abbildung 4.16:	Ortsfilterbasierte Auswertung von Bildfolgen zur Partikel Image Velocimetry (PIV) an einem Kavitationskanal	81
Abbildung 4.17:	Sensor-Array zur 2C/2D Geschwindigkeitsmessung.....	83
Abbildung 4.18:	Justage der Einzellinsen des Sensor-Arrays.....	84
Abbildung 4.19:	Messaufbau für Testmessungen an einer strukturierten Oberfläche für das Sensor-Array	85
Abbildung 4.20:	Messaufbau zur Messung der Geschwindigkeit aufsteigender Luftblasen in Wasser.....	86
Abbildung 4.21:	Aufbau des Spiegel-Array-basierten Prototypen zur inhärenten Signalbildung im optischen Pfad.....	87
Abbildung 4.22:	Ausgangssignal einer Photodiode während einer Testmessung am Riemenaufbau	88
Abbildung A.1:	Abbildung bei einer dünnen Linse.....	105
Abbildung A.2:	Vergleich der Faltung und der Kreuzkorrelation.....	107
Abbildung A.3:	Beispiel zur Phasenkorrektur zweier Signale aus nicht-phasen-orthogonalen Gitterfunktionen.....	109
Abbildung A.4:	Beispiel einer sequenziell ausgelesenen Pixelzeile eines Array-Detektors	110
Abbildung B.1:	Karteikarte „Calculation v , s “ des Signalanalyseprogramms.....	111
Abbildung B.2:	Karteikarte „Comparison“ des Signalanalyseprogramms	112
Abbildung B.3:	Karteikarte „Cycle“ des Signalanalyseprogramms	113
Abbildung B.4:	Das Softwaremodul „ZeroCross“.....	114
Abbildung B.5:	Das Softwaremodul „PWR-Spec“	115
Abbildung B.6:	Das Softwaremodul „RotPointer“	117
Abbildung B.7:	Das Softwaremodul „CorrPhase“.....	118

Abbildung B.8:	Programmoberfläche zur Generierung von Modellsignalen.....	119
Abbildung C.1:	Bilder des DSP basierten Messsystems zur 2C Messung von Bewegungsgeschwindigkeiten	123
Abbildung C.2:	Karteikarte „Offline test“ der Benutzeroberfläche zur Ansteuerung des DSP-basierten 2C Messsystems.....	124
Abbildung C.3:	Karteikarte „Offline processing“ der Benutzeroberfläche zur Ansteuerung des DSP-basierten 2C-Messsystems.....	125
Abbildung C.4:	Karteikarte „Online measure“ der Benutzeroberfläche zur Ansteuerung des DSP-basierten 2C Messsystems.....	127
Abbildung C.5:	Karteikarte „Online results DSP“ der Benutzeroberfläche zur Ansteuerung des DSP-basierten 2C Messsystems.....	128
Abbildung C.6:	Riemenaufbau zur Erzeugung einer längenreferenzierten Strukturbewegung	129
Abbildung C.7:	Bestimmung der Längenreferenz anhand der Beobachtung des Streifenmusters	130
Abbildung C.8:	Bestimmung der Zielgenauigkeit des Messsystems anhand der Beobachtung der Oberflächenstruktur	131
Abbildung C.9:	Programm zur Untersuchung der aufgenommenen Full Frames des 2C Messsystem zur Untersuchung der erreichbaren Genauigkeit des Messsystems.....	132
Abbildung C.10:	Verwendeter Datensatz als Intensitätsverteilung i_B für die theoretischen Betrachtungen in Kapitel 2.....	134
Abbildung C.11:	Ausschnitt des errechneten Ortsfiltersignals mittels der Gitter- periode $g_p = x_B / 4$ und der Intensitätsverteilung i_B aus Abbildung C.10.....	135
Abbildung D.1:	Frontansicht und Rückansicht des Sensor-Arrays.....	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle C.1: Überblick zu den Sensordaten.....	121
Tabelle C.2: Überblick zu den Daten des DSP - Boards.....	122
Tabelle D.1: Daten des FPGA - Boards	137

Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung
1C	einkomponentig
2C	zweikomponentig
3C	dreikomponentig
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AKF	Auto-Korrelations-Funktion
CCD	Charge Coupled Device
CCS	Code Composer Studio
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DMD	Digital Mirror Device
DLP	Digital Light Processing
DSP	Digital Signal Processor
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FPGA	Field Programmable Gate Array
FT	Fourier-Transformation
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HVGA	Half Video Graphics Array
LED	Light Emitting Diode
LCD	Liquid Crystal Display
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry
PSF	Punkt-Verwaschungs-Funktion (engl. point spread function)
ROI	Region of Interest
USB	Universal Serial Bus

Symbole

A	Amplitude
$a(k)$	Realteil des k -ten Fourier-Koeffizienten
B	Bildgröße
b	Bildweite
$b(k)$	Imaginärteil des k -ten Fourier-Koeffizienten
c	komplexer Fourier - Koeffizient
f	allg. Frequenz
f_0	Trägerfrequenz eines Signals
f_L	Brennweite einer Linse
G	Gegenstandsgröße
g	Gegenstandsweite
g_p	Gitterperiode eines optischen Gitters bzw. einer Gitterfunktion
$g(x)$	von x abhängige Gitterfunktion
i_B	Intensitätsverteilung in der Bildebene
i_{Bn}	— des n -ten Bildes
$i_B(x)$	— als Funktion von x
\underline{I}_B	komplexes Spektrum der —
$\underline{I}_B(t)$	komplexes zeitabhängiges Spektrum der —
J	Fisher Informationsmatrix
k	Ortskreisfrequenz
k_x	— in x -Richtung
k_y	— in y -Richtung
\mathbf{k}, \vec{k}	—-Vektor
$K_{i_B g}$	Kreuzkorrelation zwischen der Intensitätsverteilung und der Gitterfunktion
M	Vergrößerung (engl. Magnification)
m_i	abgetastetes Modellsignal
N	Gesamtanzahl
n	Zählvariable (des n -ten Bildes)
n_i	Rauschen (engl. noise) welches einem Modell überlagert wird
P_0	Ausgangsleistung

\mathbf{p}	Ortsvektor
$\Delta \mathbf{p}$	Schrittweite des —
$p(s_i, \theta)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
s	Signal (eines Ortsfilters)
s_x	— in x -Richtung
s_y	— in y -Richtung
$s(t)$	zeitabhängiges —
\underline{s}	komplexes —
t	Zeit
t_0	Anfangszeitpunkt
Δt	Zeitdifferenz
v	Geschwindigkeit
v_x	— in x -Richtung
v_y	— in y -Richtung
x	kartesische Koordinate
x_B	Bildausdehnung in Richtung der x -Koordinate
Δx	Verschiebung in x -Richtung
y	kartesische Koordinate
y_B	Bildausdehnung in Richtung der y -Koordinate
Δy	Verschiebung in y -Richtung
z	kartesische Koordinate
φ	allgemeine Phase
φ_{Ort}	örtliche Phase
φ_v	Winkel / Richtung der Geschwindigkeit bezogen auf die x - Richtung (mathematisch positiv)
λ	Wellenlänge
μ	Ortsfrequenz in x -Richtung
ν	Ortsfrequenz in y -Richtung
θ	Parameter eines Modells
σ	einfache Standardabweichung
σ^2	Varianz

Indizes

i	Zählvariable
j	Zählvariable
k	Zählvariable
n	Zählvariable

Operatoren

$ $	Betrag
$E \{ \}$	Erwartungswert (engl. expectation)
$\mathfrak{F} \{ \}$	Fourier-Transformation
$\text{Im} \{ \}$	Imaginärteil
j	Indikator des Imaginärteils
$*$	konjugiert komplex
$-$	Mittelwert aus Einzelwerten
$\text{Re} \{ \}$	Realteil