TECHNOLOGIE DER FERTIGUNGSVERFAHREN

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Simon Rekers

Correction of Systematic Errors in Piezoelectric Cutting Force Measurement

Edition Wissenschaft Apprimus

Correction of Systematic Errors in Piezoelectric Cutting Force Measurement

Korrektur systematischer Messabweichungen piezoelektrischer Zerspankraftmessung

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
D o k t o r s d e r I n g e n i e u r w i s s e n s c h a f t e n
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Simon Georg Rekers

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2018

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Simon Rekers

Correction of Systematic Errors in Piezoelectric Cutting Force Measurement

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 29/2019

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

Simon Rekers:

Correction of Systematic Errors in Piezoelectric Cutting Force Measurement

1. Auflage, 2019

Apprimus Verlag, Aachen, 2019
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-768-9

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Vorwort

Foreword

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich für die Ermöglichung und Betreuung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, danke ich für die Übernahme des Korreferats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, Inhaber des Lehrstuhls für Regelungstechnik, bedanken. Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Inhaberin des Lehrstuhls für Oberflächentechnik, für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes bedanken.

Mein Besonderer Dank gilt allen ehemaligen Kollegen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Dr.-Ing. Thomas Auerbach, Dr.-Ing. Benjamin Döbbeler und Dr.-Ing. Guido Wirtz danke ich für die kritische Durchsicht der Arbeit. Sascha Kamps und Robert Seidner danke ich für die Unterstützung bei der technischen Implementierung. Max Schwenzer, Sebastian Stemmler und Dr.-Ing. Oliver Adams danke ich für die wertvollen technischen Diskussionen. Meinen ehemaligen studentischen Mitarbeitern Maximilian Brochhaus, Christopher Brockmeier, Hans Buchmann, Julian Geitmann, Timm Petersen und Sebastian Spelz danke ich für die generelle Unterstützung.

Darüber hinaus möchte ich allen ehemaligen Kollegen am Werkzeugmaschinenlabor und des Fraunhofer IPT bedanken, die für ein angenehmes Arbeitsumfeld gesorgt haben. Insbesondere danke ich den Mitgliedern der Gruppe Produkt- und Prozessüberwachung und den Mitgliedern des Kegelclubs „Funke-Span-Gefüge“. Besonders hervorheben möchte ich Dr.-Ing. Matthias Brockmann, Dr.-Ing. Sascha Gierlings, Michael Königs, Dr.-Ing. Stephan Kratz, Alexander Schäfer, Thomas Pullen, Dr.-Ing. David Welling, Frederik Wellmann und Dr.-Ing. Dr. rer nat. Markus Zeis.

Meinen zu früh verstorbenen, ehemaligen Oberingenieur Dr.-Ing. Dražen Veselovac für die wohlwollende Unterstützung meines beruflichen Werdegangs danken.

Der größte Dank jedoch gilt meiner Familie und meiner Frau Julia für den nötigen Rückhalt zur Erstellung dieser Arbeit.

Aachen im Juni 2019

Simon Rekers

meinen Eltern

„Die Zeit, die sich ausbreitet, ist die Zeit der Geschichte.
Die Zeit, die hinzufügt, ist die Zeit des Lebens.
Und die beiden haben nichts gemeinsam,
aber man muss die eine nutzen können wie die andere.“

Antoine de Saint-Exupéry

Content

Inhaltsverzeichnis

1 Introduction ... 1

2 State of the Art ... 5

2.1 Significance of Sensors in Metal Cutting ... 5
2.2 Mechanics of Metal Cutting ... 8
2.2.1 Fundamentals of Metal Cutting ... 9
2.2.2 Cutting Force Modeling ... 11
2.3 Cutting Force Measurement Technology ... 14
2.3.1 Fundamentals of Piezoelectric Measuring Systems ... 16
2.3.2 Piezoelectric Cutting Force Measurement Systems ... 23
2.3.3 Other Cutting Force Measuring Systems ... 24
2.4 Correction of Cutting Force Measurement Errors ... 26
2.4.1 Fundamentals of Errors in Measurements ... 26
2.4.2 Correction of Errors in Piezoelectric Force Measurements ... 28
2.5 Conclusion from State of the Art ... 32

3 Objective and Scientific Approach ... 35

4 Requirement and Measuring System Analysis ... 37

4.1 Constructive Requirements ... 37
4.1.1 Requirements Derived From Environmental Conditions ... 37
4.1.2 Constructive Requirements and Considerations ... 39
4.2 A Priori Estimation of the Required Bandwidth ... 44
4.2.1 Simulation of Cutting Force in Milling Operations ... 44
4.2.2 Estimation of the Required Bandwidth ... 46
4.2.3 Parameter Study ... 48
4.3 Requirements Regarding the Data Acquisition ... 51
4.4 Conclusion from the Requirement Analysis ... 53

5 Modeling of Systematic Measuring Errors ... 55

5.1 System Boundary Definition and Abstraction ... 57
5.2 Modeling of the Transmission Behavior of the Measuring System ... 58
5.2.1 Model Structure ... 59
5.2.2 System Identification ... 62
5.3 Modeling of Inertial and Gravitational Force Components ... 69
5.3.1 Model Structure ... 69
5.3.2 Considerations Towards Required Input Parameters ... 72
5.4 Conclusion from the Modeling of Systematic Measurement Errors ... 74

6 Correction of Systematic Measurement Errors ... 77

6.1 Correction of the Transmission Behavior ... 77
6.1.1 Kalman Filter Fundamentals ... 77

6.1.2 Kalman Filter Design 82
6.1.3 Kalman Filter Analysis 85
6.2 Correction of the Inertial and Gravitational Force 107
6.2.1 Smoothing and Numerical Differentiation of Position Data 108
6.2.2 Kinematic Transformations 110
6.2.3 Calculation of the Gravitational and Inertial Correction 113
6.3 Conclusion from the Correction of Systematic Errors 114

7 Correction System Implementation and System Validation 117

7.1 System Architecture 117
7.2 System Validation 119
7.3 Conclusion from the Correction System Implementation 125

8 Summary 127

9 Appendix 131

10 References 133

Formula Symbols and Abbreviations

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Capital Letters

A	-	Amplification Factor
A_e	-	Expanded Continuous State Transition Matrix
A_α	-	Flank Face
A_γ	-	Rake Face
C	-	Continuous Measurement Matrix
C_c	pF	Cable Capacitance
C_e	-	Expanded Continuous Measurement Matrix
C_r	pF	Range Capacitance
C_t	pF	Transducer Capacitance
D	m	Diameter
D	-	Lehr's Damping Measure
F_a	N	Active Force, Axial Force
F_b	N	Bolt Force
F_c	N	Cutting Force
F_{cen}	N	Centrifugal Force
F_{cor}	N	Coriolis Force
F_D	N	Thrust Force
F_{eul}	N	Euler Force
F_f	N	Feed Force
F_G	N	Gravitational Force
$-F_G$	N	Gravitational Force Correction
F_I	N	Inertial Force
$-F_I$	N	Inertial Force Correction
F_i	N	Input Force
F_i	N	Process Force Component i
F_k	-	Discrete State Transition Matrix
F_{lin}	N	Force due to Linear Acceleration

F_m	N	Measured Force
$F_{o,e}$	N	Offset Force in Excitation Signal
$F_{o,r}$	N	Offset Force in Response Signal
$F_{P,max}$	N	Maximum Peak Force
$F_{P,min}$	N	Minimum Peak Force
F_P	N	Peak Force
F_p	N	Passive Force
F_r	N	Radial Force
F_S	N	Shear Force
F_s	N	Shunt Force
F_t	N	Tangential Force
F_x	N	Force in X-Direction
F_y	N	Force in Y-Direction
F_Z	N	Resultant Force
F_z	N	Force in Z-Direction
G	-	Continuous Transfer Function
G_0	-	Static Gain
G_{MS}	-	Transmission Behavior of Measuring System
H	-	Discrete Transfer Function
H_1	-	Frequency Response Function Estimator
H_2	-	Frequency Response Function Estimator
H_k	-	Discrete Measurement Matrix
I	-	Characteristic Amplitude in Curve Fitting
K	-	Kalman Gain
K_{c0}	N/mm^2	Dynamic Cutting Force Coefficient
$K_{c,i}$	N/mm^2	Dynamic Cutting Force Coefficient
K_{d0}	N/mm^2	Dynamic Cutting Force Coefficient
$K_{d,i}$	N/mm^2	Dynamic Cutting Force Coefficient
K_i	N/mm^2	Cutting Force Component i
$K_{c,i}$	N/mm^2	Cutting Force Coefficient
$K_{e,i}$	N/mm	Cutting Force Coefficient

M_x	Nm	Torque in X-Direction
M_y	Nm	Torque in Y-Direction
M_z	Nm	Torque in Z-Direction
N_o	-	Number of Overlapping Teeth
N_s	-	Number of Slices
N_t	-	Number of Teeth
P	-	State Estimate Covariance Matrix
P_c	W	Cutting Power
P_f	-	Working Plane
P_r	-	Tool Reference Plane
Q	C	Electrical Charge
Q^-	C	Negative Electrical Charge
Q^+	C	Positive Electrical Charge
Q_k	-	Process Noise Covariance Matrix
R_i	Ω	Insulation Resistance
R_k	-	Measurement Noise Covariance Matrix
R_t	Ω	Feedback Resistance
S	mm	Cutting Edge Length
S	-	Innovation Covariance Matrix
S_{XX}	-	Auto Spectrum of X
S_{XY}	-	Cross Spectrum of X and Y
T	-	Transducer, Transformation Matrix
T_{pas}	s	Time After Peak
T_{pre}	s	Time Before Peak
T_S	s	Measuring Time
T_w	s	Force Window Width
T_x	Nm	Torque in X-Direction
T_y	Nm	Torque in Y-Direction
T_z	Nm	Torque in Z-Direction
U	V	Voltage
U_i	V	Input Voltage

U_o	V	Output Voltage
Y_I	mm	Outer Chip Thickness Modulation
Y_0	mm	Inner Chip Thickness Modulation

Small Letters

a	m/s^2	Acceleration of Object in ICS
a_A	m/s^2	Acceleration of ACS in ICS
a_e	mm	Width of Cut
a_O	m/s^2	Relative Acceleration of Object in ACS
a_p	mm	Depth of Cut
b	mm	Chip Width
c	N/ms^{-1}	Damping
c_T	N	Correction due to Transmission Behavior
d_{xx}	pC/N	Piezoelectric Coefficient
d_{xy}	pC/N	Piezoelectric Coefficient
e_A	-	Amplitude Error
e_b	-	Allowable Bandwidth Error
e_r	-	Random Error
$e_{s,b}$	.	Known Systematic Error
$e_{s,u}$	-	Unknown Systematic Error
e_s	-	Systematic Error
f	Hz	Frequency
Δf	Hz	Frequency Resolution
f_b	Hz	Bandwidth
f_c	Hz	Cutoff Frequency
f_{max}	Hz	Maximum Frequency
f_{max}	Hz	Maximum Frequency
f_n	Hz	Natural Frequency
f_s	Hz	Sampling Rate
f_{tp}	Hz	Tooth Passing Frequency
g	m/s^2	Gravitational Acceleration
h_c	mm	Chip Thickness

h_{cu}	mm	Undeformed Chip Thickness
h_w	mm	Boundary Undeformed Chip Width
k	-	Discrete Time
k	N/m	Stiffness
$k_{c1,1}$	N/mm^2	Specific Cutting Force Coefficient
k_s	V/με	Strain Sensitivity
m	-	Number of Measured Variables
m	kg	Mass
m_b	kg	Preload Bolt Mass
m_{bp}	kg	Base Plate Mass
m_c	-	Specific Cutting Force Gradient
m_{cp}	kg	Cover Plate Mass
m_f	kg	Fixture Mass
m_s	kg	Seismic Mass
m_t	kg	Transducer Mass
m_w	Kg	Workpiece Mass
n	-	Number of States
n_s	-	Number of Piezoelectric Slices
p	Ns	Impulse
p	°	Pitch Angle
r	m	Position of Object in ICS, Radius
r_A	m	Position of ACS in ICS
r_m	-	Range of a Output Quantity
r_O	m	Relative Position of Object in ACS
r_o	%	Overshoot
r_t	s	Time Resolution
r_V	-	Value Resolution
$s_{T,0}$	pC/N	Transducer Sensitivity
s_T	pC/N	Pretensioned Transducer Sensitivity
t	s	Time
t_D	με	Discrimination Threshold