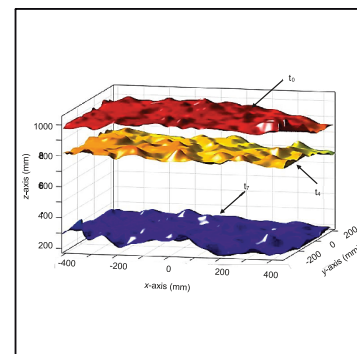
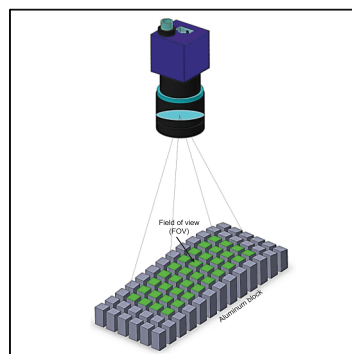
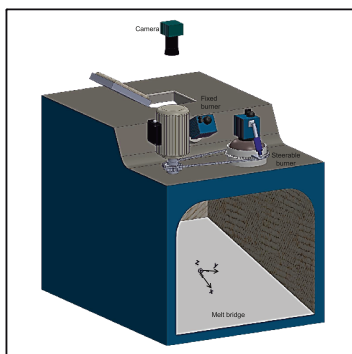


Sara Mohammadifard

Developing an innovative optical system for
automatically monitoring the melting process
in an aluminum melting furnace





Institut für
Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Berichte aus dem IPH

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2019
An der Universität 2 ♦ 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-18037
www.tewiss-verlag.de ♦ mail: info@tewiss-verlag.de

ISBN 978-3-95900-396-4
ISSN 1865-5513

Verlag: TEWISS Verlag,
Wissenschaftlicher Verlag der TEWISS – Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Herstellung: DruckTeam Druckgesellschaft mbH, Hannover

Printed in Germany

Developing an innovative optical system for automatically monitoring the melting process in an aluminum melting furnace

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin

genehmigte Dissertation

von
M. Sc.

Sara Mohammadifard

2019

Referent:

Professor Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Korreferent:

Professor Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR)

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Roland Scharf
Institut für Kraftwerkstechnik und Wärmeübertragung (IKW)

Tag der Promotion: 19.11.2019

Preface

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am IPH – Institut für integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH. Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziell unterstützt.

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, dem geschäftsführenden Gesellschafter des IPH und Leiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover (LUH), danke ich für die wohlwollende und persönliche Unterstützung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut erfahren habe.

Weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier für die Übernahme des Korreferenten und Prof. Dr.-Ing. Roland Scharf für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus richtet sich mein Dank an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am IPH, insbesondere an die Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Prozesstechnik, die mich bei der Erstellung der Arbeit durch ihr Engagement und ihren Rat unterstützt haben.

Den Kollegen Dr. Jan Langner und Jens Kruse vom IPH, Dr. Jan Jocker von TEWISS – Technik und Wissen GmbH sowie Masood Jalanesh vom IFUM möchte ich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die hilfreichen Anmerkungen danken. Die vielen hilfreichen Diskussionen haben einen äußerst wertvollen Beitrag geleistet. Außerdem möchte ich Christopher Tidy und Zoë Vercelli vom Fachsprachenzentrum der LUH für die zahlreichen und kompetenten Korrekturen meiner Dissertation sehr danken. Weiterhin möchte ich mich herzlich bei meiner Studentin Farzaneh Khosravianarab, die mich bei der Versuchsdurchführung sowie bei der Analyse stark unterstützt hat, bedanken. Des Weiteren möchte ich Tanja Hoffmann vom IFUM für die zahlreichen und kompetenten Korrekturen meiner Veröffentlichungen sehr herzlich danken.

Mein herzlicher Dank gilt Frau Dr. Sigrun Schroth-Wiechert vom Fachsprachenzentrum für ihr liebevolles Engagement.

Gar nicht genug Dank zukommen lassen kann ich meiner Familie. Meinem Vater Mohammadreza Mohammadifard danke ich sehr für seine jahrelange Unterstützung auf meinem Bildungsweg. Meinem Ehemann Hossein Larki Harchegani danke ich dafür, dass er mit seiner moralischen Unterstützung, mit seiner Liebe und seinem Verständnis zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ohne Euch wäre die Ausarbeitung dieser Dissertation für mich nicht möglich gewesen. Ich danke Euch sehr!

Hannover, im August 2019

Sara Mohammadifard

Abstract

Deutsch

Steigende Qualitätsanforderungen und zunehmend strenge Rahmenbedingungen stellen die Industrie, insbesondere Automobilindustrie, vor große Herausforderungen. Automobilhersteller sowie die Vielzahl der Zulieferer müssen hochwertige und zuverlässige Komponenten unter hohem Kostendruck produzieren, um am Markt erfolgreich zu sein. Moderne Technologien und innovative Methoden helfen, diese Herausforderung zu meistern. Die Prozessüberwachung ist zu einer Schlüsseltechnologie geworden und ermöglicht die Verbesserung von Sicherheit, Qualität und Effizienz in verschiedenen Bereichen. Bis vor kurzem war die urformende Aluminiumverarbeitung von der Konstruktion des Schmelzofens bis zum täglichen Prozess weitgehend von traditionellen Methoden und Erfahrungen abhängig. Diese Arbeit untersucht erstmalig ein neues Verfahren zur Überwachung eines Schmelzprozesses und der Formänderung im Ofen mittels optischer Sensoren. Ein Aluminiumschmelzprozess wird mit Hilfe eines optischen Messsystems beobachtet, das den Schmelzblock trotz der glühenden Ofenwände überwachen kann. Zu diesem Zweck wird eine 3D-Lichtfeldkamera auf einem Aluminiumschmelzofen installiert, mit der die Höhe des Aluminiumblocks während des Schmelzvorgangs bestimmt wird. Zusätzlich wird ein innovativer Analysealgorithmus entwickelt, um das Volumen des Aluminiumblocks und damit die Schmelzrate zu berechnen. Der Zweck dieser Arbeit besteht darin, die Schmelzeffizienz durch Überwachung zu erhöhen. Die Aluminiumschmelzrate ist von entscheidender Bedeutung für die Bewertung der Ofeneffizienz und ist direkt proportional zum Wärmeeintrag eines Festbrenners. Um den Wärmeeintrag zu erhöhen, kann verlorene Wärme zurückgewonnen werden. Um dies zu erreichen, wurde ein steuerbarer Brenner installiert, der mit rückgewonnener Wärme arbeitet. Ein Vergleich der volumenbezogenen Schmelzraten mit und ohne gezielte Wärmeerbringung in der Schmelzzone zeigt eine Verbesserung der Ofenleistung. Daher führt die Verwendung eines steuerbaren Brenners mit Wärmerückgewinnung zu einer erhöhten Schmelzrate und einer verringerten Gesamtschmelzzeit.

Schmelzprozess, Analysealgorithmus, Lichtfeldkamera, Prozessüberwachung

Englisch

Ever-stricter requirements for the quality of the finished product and the energy consumption pose difficult challenges for industry, especially the automotive industry. The market demands high-quality components at a reasonable cost. Modern technologies and innovative methods help to meet this challenge. Process monitoring has become a key technology and enables the improvement of safety, quality, and efficiency in various fields. Until recently, production – from the design of the aluminum melting furnace to the daily process – relied largely on traditional methods and experience. This thesis investigates a new method for monitoring a melting process and shape changes in the furnace by means of optical sensors for the first time. To this end, this thesis deals with an innovative analysis algorithm for using an optical measuring system that is able to monitor the melting block despite the red-hot furnace walls. For this purpose, a 3D light-field camera is installed on top of an aluminum melting furnace. The 3D camera is used to determine the height of the aluminum block during the melting process. The analysis algorithm is developed to calculate the volume of the aluminum block and so calculate the melting rate. The purpose of this work is to increase the melting efficiency through

monitoring. The aluminum melting rate is of vital importance for the evaluation of the furnace efficiency. The melting rate is directly proportional to the heat input generated by a fixed burner. In order to increase heat input, the lost heat can be recovered. To achieve this, a steerable burner working with recovered heat was installed for the first time in this work. A comparison of the volumetric difference in the melting rate with and without adjusting the steerable burner shows an improvement in the furnace performance. Specifically, the use of a steerable burner with heat recovery yields an increased melting rate and decreased total melting time.

Melting process, Analysis algorithm, Light-field camera, Process monitoring

Contents

	Symbols	VIII
1	Introduction	1
2	State of the art	3
2.1	Properties and uses of aluminum	3
2.2	Process classification of aluminum die casting.....	4
2.3	Types of aluminum melting furnaces used in die casting.....	5
2.3.1	Crucible furnace	6
2.3.2	Reverberatory furnace	7
2.3.3	Gas stack furnace.....	8
2.4	Development of the modern melting furnace.....	9
2.5	Measurement methods for spatial shape detection	11
2.5.1	Time-of-flight (TOF) principle	12
2.5.2	Interferometry principle	13
2.5.3	Triangulation principle.....	14
2.6	3D light-field camera	17
2.6.1	Development of light-field function	17
2.6.2	Concept of light-field camera	18
2.6.3	Image reconstruction with light-field camera	22
2.7	Statistical method for outlier detection.....	25
2.8	Mathematical foundations of geometric modeling.....	26
2.8.1	Surface modeling.....	27
2.8.2	Uncertainty analysis.....	29
3	Problem statement, research hypothesis, and objectives	34
4	Test setup	36
4.1	Melting furnace	38
4.2	Selection of optical systems for monitoring melting process.....	40
4.3	3D light-field camera	41
4.4	3D light-field camera calibration	42
4.4.1	Micro lens array (MLA) calibration	43
4.4.2	Metric calibration	44
4.4.3	Checking camera calibration.....	46

4.4.4	Eliminating outlier data	47
4.5	Developing programmable logic controller (PLC') interface for automatic image acquisition.....	48
5	Methods, techniques, and results.....	53
5.1	Developing analysis software for continuous real-time monitoring of aluminum state in furnace	53
5.1.1	Initial checking of captured data	58
5.1.2	Height analysis results.....	60
5.1.3	Volume analysis results.....	60
6	Modeling and prediction of an aluminum melting process*	64
6.1	Different methods of approximation and interpolation	66
6.2	Curve modeling and error calculation across aluminum surface with cubic spline interpolation	67
6.3	Surface modeling of aluminum with cubic spline interpolation	68
6.4	Curve modeling across aluminum surface with Newton polynomial interpolation .	70
6.5	Curve modeling across aluminum surface with least squares approximation	72
6.6	Error calculation for Newton interpolation and least squares approximation.....	73
6.7	Surface modeling of aluminum with least squares approximation	77
6.8	Analyzing and assessing model.....	79
6.8.1	Results of distribution fitting.....	81
6.8.2	Results of Monte Carlo method	85
6.8.3	Results of model validation.....	86
7	Conclusion and outlook.....	90
8	References	94
9	Appendix.....	104
	Lebenslauf.....	107

Symbols

Symbol	Unit	Description
a	mm	MLA distance to virtual plane
a_i	–	Coefficient of polynomial function ($i = 0, \dots, n-1$)
AlSi ₇ Mg	–	An aluminum-silicon alloy
a_L	mm	Object distance to main lens
B	mm	MLA distance to image plane
b_L	mm	Main lens distance to virtual plane (focused light-field camera)
b_L	mm	Image plane distance to main lens (conventional camera)
b_{L0}	mm	MLA distance to main lens
C	mm	Image plane distance to main lens
C	m/s	Speed of light
C	kJ/kg°C	Specific heat capacity
c_i	–	Microlens center
D	mm	Object distance to sensor
D	pixel	MLA diameter
D_L	pixel	Main lens diameter
d_{xi}	mm	Disparity
E	m	Least squares error
e_i	m	Model error ($i = 1, \dots, n$)
F	mm	Focal length
f_{MLA}	mm	Focal length of microlens
f_L	mm	Focal length of main lens
f_r	Hz	Modulation frequency
$f(x)$	–	Main curve function
$f(x,y)$	–	Main surface function
$F(x):$	–	Empirical cumulative distribution function of data
$G(x):$	–	Fitted cumulative distribution function
H_0	–	Null hypothesis
I_1	W/m ²	Beam intensity from the reference mirror
I_2	W/m ²	Beam intensity from the object

$l(s)$	m^2	Total area under curve
J	–	Non-porous layer
LF	–	7D light-field function
L_x	m	Aluminum block length in X direction
L_y	m	Aluminum block length in Y direction
M	–	Mixed layer
M	m	Mean
M	kg	Mass of aluminum
M	kg	Mass of remaining aluminum
N	–	Number of experimental data points
NO _x	–	Nitrogen oxide
P_{ij} ,	–	Test point (i: region number. j: test point number, i,j: 1,...,9)
P	–	Porous
$p(x)$	–	Polynomial curve function
$p(x,y)$	–	Polynomial surface function
p_{xi}	mm	Parallax
Q_1	m	Lower quartile
Q_3	m	Upper quartile
R	mm	Triangle side
$S_i(x)$	–	Cubic spline interpolation function (i = 1,..., 20)
T	s	Time
T	–	Porous layer
t_i	minute	Melting time (i = 0,...,6)
U	–	Image position
V	–	Virtual depth
Var	m^2	Variance
V_{ij}	m^3	Volume in each sampling interval
V_R	m^3	Volume in each region
V_t	m^3	Total volume of unmelted aluminum
X	mm	Reference mirror distance to beam splitter
x_i	–	Point in sub-image
(X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij})	m	Coordinate of the highest point in the sampling interval

X_M, Y_M, Z_M	m	Camera at each location (x, y, z)
x_v	–	Point in virtual image
y_i^c		y-coordinates of central points in three regions (i = 1,2,3)
$Z_{R,max}$	m	Maximum value in each region
Z_{max}	m	Maximum height of entire aluminum block
\mathbb{R}^2	–	2D space
A	Radian	Angle between the base line and light beam
B	Radian	Angle between the base line and reflected beam
Θ	Radian	Angle of light direction
\emptyset	Radian	Angle of light direction
ε_i	–	Approximation error
M	–	Arithmetic mean
$\Delta X, \Delta Y$	m	Distance between two test points
$\Delta X, \Delta Y; \Delta Z$	m	Calibration errors
Θ	m	Fitting parameters
Φ	Radian	Phase difference
(x, y, z)	–	Three-dimensional data
A	–	Shape parameter
B	m	Scale parameter
A	–	Significance level
Σ	–	Standard deviation
ΔT	°C	Temperature change
Δt_{i+1}	min	Time interval (i = 0, ..., 6)
(u, v)	–	Virtual plane
(s, t).	–	Virtual plane
Λ	nm	Wavelength
$\Psi(x)$:	–	Weighting function

Abbreviations

Abbreviation	Abbreviated Term
2D	Two dimensions
3D	Three dimensions
4D	Four dimensions

5D	Five dimensions
7D	Seven dimensions
AI	Artificial intelligence
CSV	Comma-separated value
CvM	Cramer-von Mises test
CW	Continuous wave
DOF	Depth of field
FOV	Field of view
GOF	Goodness of fit
IQR	Interquartile range
KS	Kolmogorov-Smirnov test
LAN	Local area network
LED	Light-emitting diode
LF	Light-field function
MAD	Median absolute deviation
MLA	Microlens array
MLE	Maximum likelihood estimation
OPA	Operational amplifier
PDF	Probability density functions
PLC	Programmable logic controller
PM	Pulse modulation
<i>RMSE</i>	Root-mean-square error
<i>RMSE_M</i>	Camera root-mean-square error at ambient temperature
TOF	Time of flight
USB	Universal serial bus
VP	Virtual plane