Informatik

Hasan Tercan

Machine Learning-based Predictive Quality in Manufacturing Processes

SHAKER
VERLAG

BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Machine Learning-based Predictive Quality in Manufacturing Processes

Qualitätsprognosen in Fertigungsprozessen mittels maschinellem Lernen

Der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal vorgelegte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

von

Hasan Tercan

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Meisen
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Daniel Schilberg

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Mai 2023

Berichte aus der Informatik

Hasan Tercan

Machine Learning-based Predictive Quality in Manufacturing Processes

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2023

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9200-4
ISSN 0945-0807

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

The digitization of manufacturing processes opens up the possibility of data-driven quality predictions based on machine learning (ML), also known as predictive quality. The predictions can be used by process experts to initiate quality improvement actions in the process. Although the core concepts of predictive quality are based on well-known data processing and ML methods, further research is needed to establish them in manufacturing. On the one hand, there is a lack of transferable approaches for the successful realization of predictive quality. On the other hand, there are significant challenges to overcome, especially since the collection of representative data in manufacturing processes is costly and the processes are characterized by constant change. This thesis addresses these research gaps. First, a generic process model for predictive quality, called MERLIN, is presented that describes the steps necessary to realize a predictive quality application. The process model consists of four iterative phases: formalization (definition of the process and data scope), data preparation (collection and processing of representative manufacturing data), model building (training and validation of an operational learning model), and model usage (monitoring and model updating in case of process changes). In addition, to reduce the amount of data required to train predictive quality models, two approaches are developed to incorporate data from manufacturing simulations into model training. One is a simulation-to-reality transfer learning approach, where an artificial neural network (ANN) is first pre-trained on simulation data before being finetuned on real manufacturing data. The second is a learning-based approach to reduce the simulation-to-reality gap of manufacturing simulations. Finally, a continual training method called MAS-Cloning is developed to efficiently train an ANN across changes in the manufacturing process. The goal of this method is to maintain prediction accuracy during model updates while improving training and data efficiency. This is achieved by combining the regularization method memory-aware synapses (MAS) with a transfer of pre-trained network weights. Overall, the thesis provides important research contributions for the realization of predictive quality in real manufacturing processes. It also provides a foundation for future research to establish predictive quality as a data-driven component of quality assurance processes.

Kurzfassung

Die Digitalisierung von Fertigungsprozessen eröffnet die Möglichkeit datengetriebener Qualitätsvorhersagen auf Basis von Methoden des maschinellen Lernens (ML), auch Predictive Quality genannt. Die Vorhersagen dienen als Entscheidungsgrundlage für Prozessexperten, um frühzeitig qualitätsverbessernde Maßnahmen im Prozess einzuleiten. Obwohl Predictive Quality im Kern auf bekannten Methoden der Datenverarbeitung und des ML basiert, besteht für seine Etablierung weiterer Forschungsbedarf. Zum einen fehlen umsetzungsorientierte und übertragbare Ansätze zur erfolgreichen Umsetzung von Predictive Quality. Zum anderen sind zentrale Herausforderungen zu bewältigen, insbesondere da die Erhebung repräsentativer Daten in Fertigungsprozessen aufwändig ist und die Prozesse durch ständige Veränderungen gekennzeichnet sind. In dieser Arbeit werden diese Forschungslücken adressiert. Zunächst wird ein generisches Prozessmodell für Predictive Quality, genannt MERLIN, vorgestellt, welches die notwendigen Schritte zur Realisierung einer Predictive Quality Anwendung beschreibt. Das Prozessmodell besteht aus vier iterativen Phasen: Formalisierung (Definition des Prozesses und des Datenumfangs), Datenvorbereitung (Sammlung und Aufbereitung repräsentativer Produktionsdaten), Modellbildung (Training und Validierung eines lauffähigen Lernmodells) und Modellnutzung (Überwachung und Aktualisierung des Modells bei Prozessveränderungen). Um den Datenaufwand beim Training von Predictive Quality Modellen zu reduzieren, werden zusätzlich zwei Lernansätze entwickelt, die darin bestehen, kostengünstige Daten aus Fertigungssimulationen für das Modelltraining zu nutzen. Zum einen handelt es sich um einen Transfer-Learning-Ansatz, bei dem ein künstliches neuronales Netz (KNN) zunächst auf Simulationsdaten vortrainiert wird, bevor es auf wenigen realen Daten weiter trainiert wird. Zum anderen handelt es sich um einen lernbasierten Ansatz zur Fehlerreduktion einer Fertigungssimulation. Schließlich wird eine kontinuierliche Trainingsmethode namens MAS-Cloning entwickelt, um ein KNN über Änderungen im Fertigungsprozess hinweg zu trainieren. Ziel dieser Methode ist es, die Vorhersagegenauigkeit bei Modellaktualisierungen beizubehalten und gleichzeitig die Trainings- und Dateneffizienz zu verbessern. Dies wird durch die Kombination der Regularisierungsmethode Memory-Aware Synapses (MAS) mit einem Transfer von vortrainierten Netzgewichten erreicht. Insgesamt leistet die Arbeit wichtige Forschungsbeiträge zur Realisierung von Predictive Quality in Fertigungsprozessen. Darüber hinaus bildet sie die Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten, um Predictive Quality als integralen, datengetriebenen Bestandteil von Qualitätssicherungsprozessen zu etablieren.

Acknowledgments

There are many people who have accompanied and supported me along the way. I would like to thank them very much. I also owe special thanks to two of them.

I would like to sincerely thank Prof. Dr.-Ing. Tobias Meisen for his years of support and guidance. He was not only my supervisor, but also a true leader and mentor who gave me the opportunity to grow beyond myself.

There are no words to express my gratitude to my wife Hatice. Without her tireless patience and devoted support over the years, this thesis would not have been possible. I dedicate this work to her.

Publications

During my time as a scientific researcher at the Institute of Information Management in Mechanical Engineering of the RWTH Aachen University and at the Chair of Technologies and Management of Digital Transformation of the University of Wuppertal, the following peer-reviewed publications have been published.

Conference Publications related to Dissertation

Tercan, H. and Meisen, T. (in press). Online Quality Prediction in Windshield Manufacturing using Data-Efficient Machine Learning. *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.* (2023)

Maack, R., Waubert de Puiseau, C., Sokolova, A., Atsbha, H., Tercan, H. and Meisen, T. Reducing the sim2real-gap in extrusion blow molding using random forest regressors. *Manufacturing Letters.* 33, 843-849 (2022)

Tercan, H., Guajardo, A. and Meisen, T. Industrial transfer learning: boosting machine learning in production. *IEEE International Conference On Industrial Informatics.* 274-279 (2019)

Tercan, H., Guajardo, A., Heinisch, J., Thiele, T., Hopmann, C. and Meisen, T. Transfer-learning: Bridging the gap between real and simulation data for machine learning in injection molding. *Procedia CIRP.* 72, 185-190 (2018)

Meyes, R., Tercan, H., Thiele, T., Krämer, A., Heinisch, J., Liebenberg, M., Hirt, G., Hopmann, C., Lakemeyer, G., Meisen, T. and Jeschke, S. Interdisciplinary data driven production process analysis for the internet of production. *Procedia Manufacturing.* 26, 1065-1076 (2018)

Journal Publications related to Dissertation

Tercan, H. and Meisen, T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review. *Journal Of Intelligent Manufacturing.* 33, 1879-1905 (2022)

Tercan, H., Deibert, P. and Meisen, T. Continual learning of neural networks for quality prediction in production using memory aware synapses and weight transfer. *Journal Of Intelligent Manufacturing.* 33, 283-292 (2022)

Other Publications

Maschler, B., Vietz, H., Tercan, H., Bitter, C., Meisen, T. and Weyrich, M. Insights and example use cases on industrial transfer learning. *Procedia CIRP.* 107, 511-516 (2022)

Maack, R., Tercan, H. and Meisen, T. Deep learning based visual quality inspection for industrial assembly line production using normalizing flows. *IEEE International Conference On Industrial Informatics.* 329-334 (2022)

Tercan, H., Bitter, C., Bodnar, T., Meisen, P. and Meisen, T. Evaluating a session-based recommender system using prod2vec in a commercial application. *International Conference On Enterprise Information Systems.* 610-617 (2021)

Maack, R., Tercan, H., Solvay, A., Mieth, M. and Meisen, T. Fault detection in railway switches using deformable convolutional neural networks. *International Conference On Industrial Informatics.* 1-6 (2021)

Bitter, C., Tercan, H., Meisen, T., Bodnar, T. and Meisen, P. When to message: Investigating user response prediction with machine learning for advertisement emails. *International Conference On Artificial Intelligence For Industries.* 25-29 (2021)

Hopmann, C., Jeschke, S., Meisen, T., Thiele, T., Tercan, H., Liebenberg, M., Heinisch, J. and Theunissen, M. Combined learning processes for injection moulding based on simulation and experimental data. *International Conference Of The Polymer Processing Society.* (2019)

Meyes, R., Tercan, H., Roggendorf, S., Thiele, T., Büscher, C., Obdenbusch, M., Brecher, C., Jeschke, S. and Meisen, T. Motion planning for industrial robots using reinforcement learning. *Procedia CIRP.* 63, 107-112 (2017)

Tercan, H., Khawli, T., Eppelt, U., Büscher, C., Meisen, T. and Jeschke, S. Improving the laser cutting process design by machine learning techniques. *Production Engineering.* 11, 195-203 (2017)

Tercan, H., Khawli, T., Eppelt, U., Büscher, C., Meisen, T. and Jeschke, S. Use of classification techniques to design laser cutting processes. *Procedia CIRP.* 52, 292-297 (2016)

Contents

Abbreviations

ANN artificial neural network

CAD computer aided design
CFD computational fluid dynamics
CNN convolutional neural network
CRISP-DM cross-industry standard process for data mining

DoE design of experiments

EBM extrusion blow molding

FEM finite element method

GNN graph neural network

KDD knowledge discovery in databases

LSTM long short-term memory

MAE mean absolute error
MAS memory-aware synapses
ML machine learning
MLP multilayer perceptron
MSE mean squared error

QA quality assurance

RMSE root mean squared error

sim2real simulation-to-reality
SVM support vector machine

UC use case

List of Figures

List of Tables