

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Jan-Philipp Kaiser

**Autonomous View Planning using
Reinforcement Learning**
Modeling and Application for Visual
Inspection in Remanufacturing

Band 294

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning
Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 294

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Jan-Philipp Kaiser, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 18.09.2024

Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2025

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9794-8
PDF-ISBN 978-3-8440-9888-4
ISSN 2944-6430
eISSN 2944-6449
<https://doi.org/10.2370/9783844098884>

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

Vorwort der Herausgeber

Aktuelle Version des Vorworts der Herausgeber Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als “Wertschöpfungspartner” einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des von der Carl-Zeiss-Stiftung geförderten Forschungsprojekts 'AgiProBot - Agiles Produktionssystem mittels mobiler, lernender Roboter mit Multisensorik bei ungewissen Produktspezifikationen'.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza als Hauptreferentin für ihr Vertrauen und ihre fachliche und persönliche Unterstützung während der gesamten Zeit. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) des KIT danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der KU Leuven in Leuven, Belgien. Ebenso gilt mein Dank Prof. Jef Peeters der KU Leuven für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Für die gute Atmosphäre am und außerhalb des Instituts danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des wbk, insbesondere im Bereich Produktionssysteme. Für die Zusammenarbeit und entstandenen Freundschaften bedanke ich mich bei Patrizia, Julia, Marco, Felix, Magnus, Finn und Edwin. Darüber hinaus gilt mein Dank besonders Dominik, Ali und Jork für das Korrekturlesen dieser Arbeit und Jonas Gäbele, Jonas Schmid sowie Verena Hollinger, die mit ihren Abschlussarbeiten und großem Engagement zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Letztlich möchte ich besonders meinen Eltern Elke und Martin sowie Stiefeltern Birgit und Klaus für ihre kontinuierliche Unterstützung und ihren steten Rückhalt danken. Abschließend gilt mein Dank Jana für ihr Vertrauen, ihre Energie und ihr Verständnis in den letzten Zügen meiner Arbeit.

Karlsruhe, 18.09.2024

Jan-Philipp Kaiser

Abstract

Companies will have to establish circular production patterns in the future. Remanufacturing is currently a niche process in which used products are remanufactured by first dismantling them, reworking or replacing components and reassembling them into a finished product. Visual inspection is one of the first steps in the entire remanufacturing process, in which a used product is assessed based on its external defects to determine whether it is suitable for remanufacturing. In most cases, visual inspection is manual and therefore expensive due to the flexibility and adaptability required when assessing used products, which hinders establishing remanufacturing in high-wage countries.

The adaptivity of artificial intelligence methods in combination with the flexibility of robotic production resources can be used to automate the visual inspection process in remanufacturing. To date, most authors in the field of remanufacturing, and more specifically visual inspection, have only dealt with product identification, defect localization and defect classification and not with how visual acquisition systems can acquire the data to be evaluated in a goal-oriented manner. The view planning problem is the problem of selecting viewpoints of a visual acquisition system in such a way that a given inspection target is met with the minimum number of acquisitions required. Particularly in remanufacturing, prior knowledge of the product variant to be inspected or its geometry model is oftentimes not available. Analytical approaches to solving the visual planning problem are, therefore, only applicable to a limited extent. The present work closes this research gap by using reinforcement learning (RL) methods to learn an inspection strategy by an RL agent independently of an existing geometry model.

The presented solution approach and methodological procedure provide a simulation framework with which differently modeled RL agents can be trained to solve different visual planning problems specific to the derived requirements of remanufacturing. The results show that the trained RL agents have comparable performance compared to a benchmark heuristic, but poorer performance compared to a near-optimal view plan obtained with an analytical solution method.

The present work represents a significant contribution towards autonomous visual inspection systems using RL algorithms to solve the view planning problem when prior knowledge necessary for selecting or computing the analytical solution is not available.

Kurzfassung

Unternehmen müssen zukünftig zirkuläre Produktionsmuster etablieren. Das Remanufacturing stellt derzeit einen Nischenprozess dar, bei dem Gebrauchtsprodukte aufgearbeitet werden, indem diese zunächst demontiert werden, Komponenten aufgearbeitet oder ausgetauscht werden und diese zu einem Gesamtprodukt reassembliert werden. Die visuelle Inspektion stellt einen der ersten Schritte im gesamten Prozess des Remanufacturing dar, bei dem für ein Gebrauchtprodukt basierend auf dessen äußerlichen Mängeln beurteilt wird, ob es sich für das Remanufacturing eignet. Zumeist ist die visuelle Inspektion aufgrund der erforderlichen Flexibilität und Adaptivität bei der Bewertung der Gebrauchtprodukte manuell und somit teuer, was die Etablierung des Remanufacturing in Hochlohnländern behindert.

Die Adaptivität von Verfahren der künstlichen Intelligenz im Zusammenspiel mit der Flexibilität robotischer Produktionsressourcen kann genutzt werden, um den visuellen Inspektionsprozess im Remanufacturing zu automatisieren. Bislang haben sich im Umfeld des Remanufacturing und spezieller der visuellen Inspektion die meisten Autoren lediglich mit der Produktidentifikation, Defektlokalisierung und Defektklassifizierung befasst und nicht damit, wie visuelle Erfassungssysteme die auszuwertenden Daten zielgerichtet erfassen können. Das Sichtplanungsproblem stellt das Problem dar, Ansichtspunkte eines visuellen Erfassungssystems so auszuwählen, dass ein vorgegebenes Inspektionsziel mit minimaler Anzahl der hierfür erforderlichen Erfassungen erfüllt wird. Insbesondere im Remanufacturing sind Vorwissen hinsichtlich der zu inspizierenden Produktvariante oder deren Geometriemodell nicht vorhanden. Analytische Lösungsansätze zur Lösung des Sichtplanungsproblems sind daher nur begrenzt anwendbar. Die vorliegende Arbeit schließt diese Forschungslücke, indem Verfahren des Reinforcement Learning (RL) genutzt werden, um eine Inspektionsstrategie durch einen RL Agenten unabhängig von einem vorliegenden Geometriemodell zu lernen.

Die vorgestellte Lösungsansatz und das methodische Vorgehen liefert ein Simulationsframework, mit dem verschieden modellierte RL Agenten zur Lösung verschiedener Sichtplanungsprobleme, spezifisch für die abgeleiteten Anforderungen des Remanufacturing, trainiert werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass die trainierten RL Agenten vergleichbare Performanz im Vergleich zu einer Benchmarkheuristik aufweisen, jedoch eine schlechtere Performanz im Vergleich zu einem mit einem analytischen Lösungsverfahren berechneten nahezu optimalen Sichtplan aufweisen.

Die vorliegende Arbeit stellt insbesondere dann einen wesentlichen Beitrag in Richtung autonomer visueller Inspektionssysteme unter Zuhilfenahme von RL Algorithmen zur Lösung des Sichtplanungsproblems dar, wenn Vorwissen, das für eine Auswahl oder Berechnung der analytische Lösung notwendig ist, nicht vorliegt.

Contents

Contents	I
Abbreviations	IV
Symbols	VII
1 Introduction	1
1.1 Problem statement	1
1.2 Research objective	2
1.3 Structuring questions	3
1.4 Structure of the thesis	3
2 Fundamentals	4
2.1 Visual inspection in remanufacturing	4
2.1.1 The remanufacturing process	4
2.1.2 Challenges for initial visual inspection	7
2.1.3 Automated visual inspection	9
2.1.4 Summary and conclusion: View planning tasks for the initial visual inspection	10
2.2 View planning for visual inspection systems	11
2.2.1 Robot active vision and the view planning problem (VPP)	12
2.2.2 Object representation alternatives for the solution of the VPP	15
2.2.3 Analytical solution methods for VPP	18
2.2.4 Algorithmic requirements, acquisition goal, and evaluation metrics	20
2.2.5 Fundamentals of coordinate systems and pose transformations	22
2.2.6 Summary and conclusion: View planning in Remanufacturing	23
2.3 Machine learning and deep learning	24
2.3.1 Overview of machine learning categories	24
2.3.2 Neural networks (NNs) as universal function approximators	26
2.3.3 Advanced machine learning using deep learning	29
2.3.4 Summary and conclusion: View planning enabled by machine learning	34
3 State-of-the-art literature review	36
3.1 Approaches for visual inspection in remanufacturing	36
3.1.1 Works using image-based defect detection in remanufacturing	36

3.1.2	Interim conclusion to existing works on image-based defect detection in remanufacturing	38
3.2	Derivation of delimitation criteria	39
3.3	Approaches using analytical methods	41
3.4	Approaches using machine learning	43
3.4.1	Approaches using supervised learning	44
3.4.2	Approaches using reinforcement learning	46
3.5	Derivation of the research deficit	50
4	Overview of the solution approach	54
5	Autonomous view planning for visual inspection in Remanufacturing	58
5.1	Setup, modeling, and control of the inspection station and 3D reconstruction of the inspection object	58
5.1.1	Hardware setup of the inspection station and acquisition process	58
5.1.2	Virtual model and control approach of the inspection station	61
5.1.3	Kinematic modeling and calibration of the inspection station	63
5.1.4	3D reconstruction of the inspection object	65
5.2	Approach for semantic 3D reconstruction of the inspection object	67
5.2.1	Dataset generation and data preprocessing	68
5.2.2	Semantic and instance segmentation with deep learning	71
5.2.3	Uncertainty estimation for segmentation results	78
5.2.4	Semantic 3D reconstruction of the inspection object	80
5.3	View planning using reinforcement learning	81
5.3.1	Formalization of view planning goals	82
5.3.2	Overview of the simulation framework using a reinforcement learning agent $A_{Plan,RL}$	83
5.3.3	Modelling of the scan simulation environment S_{Sim}	84
5.3.4	Modelling of the agent interface I_{Agent}	89
5.3.5	Modeling of the reinforcement learning agent $A_{Plan,RL}$	106
6	Evaluation and computational results	109
6.1	Results for the approaches of 3D reconstruction and semantic 3D reconstruction	109
6.1.1	Validation of the 3D Reconstruction approach	109
6.1.2	Results of the semantic segmentation and instance segmentation approaches	111
6.1.3	Evaluation of the semantic 3D reconstruction approach	118

6.2	RL for the solution of VPPs in remanufacturing	121
6.2.1	Dataset description	121
6.2.2	Evaluation approach	123
6.2.3	Results of the RL agent training using the proposed simulation frame- work for the NBV problem	128
6.2.4	Results of the RL agent training using the proposed simulation frame- work for the RPP problem	131
6.2.5	Results of the RL agent training using the proposed simulation frame- work for the IPP problem	152
7	Discussion and outlook	158
7.1	Critical appraisal	158
7.2	Outlook	160
8	Conclusion	162
	Bibliography	165
	List of Figures	186
	List of Tables	191
	Own Publications	194
Anhang		XII
A1	General solution approach for SCP, CM and NBV approaches	XII
A2	In-depth basics of coordinate transformations	XV
A3	Basics of the perceptron, multi-layer perceptron and backpropagation algorithm	XVII
A4	Details on point cloud transformation using $\mathbf{T}^{A/RT'}$ and determination of $\mathbf{T}^{E/A}$ and $\mathbf{T}^{R/RT}$	XX
A5	In-depth details and foundations on the segmentation model architectures and training procedure	XXIII
A6	T-Scan system product information	XXX
A7	Evaluation metrics for the 3D reconstruction approach	XXXI
A8	Result tables for training the U-Net, UD-Net, M-Net and MD-Net configurations	XXXII
A9	Evaluation metrics for the semantic segmentation approach using uncertainty- based filtering	XXXVIII
A10	Details on the SCP benchmark algorithms used in this work	XL