Scope of Work

Title of the Master's Thesis:

*Methodical Approach for Analyzing Process Parameters and Optimizing Boundary Conditions in Mutli-Axis Robot Programs*

**Author:** Jan Nalivaika **Supervisor:** Ludwig Siebert

**Issued:** 01.10.2023 **Submitted:** 31.03.2024

Motivation:

Computer-aided manufacturing (CAM) is used to automatically generate tool paths for computer numerically controlled (CNC) machines. The CAM software considers the models of the raw and finished part as well as the constraints of the machine, the tools, and the manufacturing technology. Together with user-configurable parameters, tool paths for 3-axis, 5-axis, and robot-based machine tools are generated. The growing demand for flexibility in machine tools, such as the use of multiple manufacturing technologies in one machine or automated loading and unloading, has led to many machine tools being equipped with additional mechanical axes. Examples include robots mounted on linear axes and rotary-tilt tables.

The tool paths created in CAM programs are usually defined by five degrees of freedom. The first three are the translational axes X, Y, and Z. The tilting and inclining of the tool are defined by the A- and B-axes. Occasionally, an additional rotation of the tool (C-axis) around the Z-axis (e.g., for dragging a swivel knife) is defined. Machines with more degrees of freedom than those limited by the toolpath often need user-defined constraints. These constraints are necessary to fully specify the movements of the machine axes. An example is the alignment of a part using the rotary-tilt table so that the Z-axis of the tool always points in the direction of gravity. This is helpful in processes like fused deposition modeling (FDM) and wire arc additive manufacturing (WAAM). It is common practice to set the user-defined constraints based on experience. A preliminary literature review indicated that the configuration of these degrees of freedom has an impact on the energy demand and stability of the process.

The definition of these constraints does not affect the tool path generated by the CAM software. As such, elaborating a methodical approach to optimize these constraints in terms of efficiency, speed, and energy demand of the machine is targeted. Currently, no literature provides a comprehensive analysis or methodology regarding this optimization problem.

Objective:

This work aims to elaborate a methodical approach that analyzes a set of constraints and evaluates the influence of those constraints on a set of defined process variables.

The work will focus on a 6-axis robot with a rotary-tilt table, whereby the results should also be transferable to other machines. Furthermore, the experiments and validations will be limited to the manufacturing processes of WAAM and milling.

First, the influence of the constraints on relevant process variables (energy demand, joint turnover, speed and acceleration peaks, total joint movements) in a manufacturing process such as WAAM will be assessed. Subsequently, a process evaluation will be elaborated in the CAM software, by means of which the process quality can be determined. Depending on the respective process variables, approximation methods or machine learning methods will be investigated for the process evaluation. The process quality as a one-dimensional variable will be determined by weighting the process variables. Subsequently, a method for the optimization of the constraints will be elaborated. This task corresponds to an optimization problem in which the process quality will be maximized by selecting suitable constraints.

Procedure and working method:

The following work packages are conducted within this thesis:

* Literature research
* Familiarization with WAAM, milling machines, and CAM software
* Selection of suitable process parameters
* Elaboration of the proposed method in a suitable programming language
* Verification and validation of the elaborated method
* Documentation of the work

Agreement:

Through the supervision of B.Sc. Jan Nalivaika intellectual property of the *iwb* is incorporated in this work. Publication of the work or transfer to third parties requires the permission of the chair holder. I agree to the archiving of the work in the library of the *iwb*, which is only accessible to *iwb* staff, as inventory and in the digital student research project database of the *iwb* as a PDF document.

Garching, 05.10.2023

|  |  |
| --- | --- |
| Prof. Dr.-Ing. | B.Sc. |
| Michael F. Zäh | Jan Nalivaika |

Abstract

While facing the highly dynamic and complex market with a changeable manufacturing concept ….

Table of Contents

I List of Abbreviations iii

II List of Symbols iii

1 Introduction 3

2 Basic Principles 3

2.1 Metall- und laserbasierte additive Fertigung (MLAF) 3

3 Summary and Outlook 3

4 References 3

5 Attachments 3

6 Glossary 3

III Data-CD Content iii

IV Sworn Declaration iii

1. List of Abbreviations

|  |  |
| --- | --- |
| PEP | Produktentstehungsprozess |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

1. List of Symbols

Formelzeichen – Physikalische Einheit – Beschreibung inkl. Indizes und Abkürzungen

**Lateinische Zeichen**

- Anzahl benötigter Versuchsläufe

Referenzfläche

**Griechische Zeichen**

Biegewinkel

Wärmeausdehnungskoeffizient des Materials

# Introduction

Produzierende Unternehmen sehen sich derzeit einem turbulenten Umfeld ausgesetzt. Daraus resultiert eine Erhöhung von Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Produktionssysteme.

…

# Basic Principles

Der Grundlagenteil dient der Schaffung einer zu dieser Arbeit passenden Wissensbasis …

## Metall- und laserbasierte additive Fertigung (MLAF)

Zäh (2006, S. 11) fasst zusammen, dass die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der MLAF im Vergleich zur konventionellen Fertigung in erster Linie von der Bauteilkomplexität abhängt, vgl. Abbildung 2‑1.



Abbildung 2‑1: Vergleich der Fertigungszeit und -kosten in Abhängigkeit der Bauteilkomplexität (Zäh 2006, S. 11)

Tabelle 2‑1: Versuchsplan vollfaktoriell; drei Faktoren mit je zwei Ausprägungen



Allgemein lässt sich die Anzahl der benötigten Versuchsläufe aus

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |
| berechnen, wobei für die Anzahl der betrachteten Ausprägungen und für die Anzahl der Faktoren steht.  -Abbildungsbezeichnungen unterhalb  -Tabellenbezeichnungen oberhalb  -Formeln in separate Zeile  -Formelzeichen erläutern und in Abkürzungsverzeichnis aufnehmen  -keine Abbildung/Tabelle ohne Verweis  -Literatur stets in Kapitälchen |  |

# Summary and Outlook

Additive Fertigungsverfahren sind in der Lage, einen entscheidenden Beitrag zur Erfüllung der steigenden Anforderungen die an produzierende Unternehmen im derzeit turbulenten Umfeld gestellt werden, zu leisten.

…

-Bogen zur Einleitung schließen

-Weitere Handlungsfelder aufzeigen

-1 bis 2 Seiten

# References

Alexander & Dutta 2000

Alexander, P.; Dutta, D.: Layered manufacturing of surfaces with open contours using localized wall thickening. In: Computer-Aided Design 32 (2000) 3, S. 175-189.

Alexander et al. 1998

Alexander, P.; Allen, S.; Dutta, D.: Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. In: Computer-Aided Design 30 (1998) 5, S. 343-356.

EOS 2007a

EOS GmbH: Materialdatenblatt DirectMetal 20 für EOSINT M 270. <http://www.protoparts.de/datasheets/SLM/EOS%20DirectMetal%2020.pdf> (01.08.2011).

EOS 2007b

EOS GmbH: Materialdatenblatt EOS MaragingSteel MS1 für EOSINT M 270 Systeme. <http://www.protoparts.de/datasheets/SLM/EOS%20MaragingSteel %20MS1.pdf> (01.08.2011).

EOS 2008a

EOS GmbH: Materialdatenblatt (vorläufige Version) EOS NickelAlloy IN718 für EOSINT M 270 Systems. <http://www.protoparts.de/datasheets/SLM/EOS%20 NickelAlloy%20IN718.pdf> (01.08.2011).

Betreuer 20XX

Während der inhaltlichen Bearbeitung der Arbeit erfolgten zahlreiche Expertengespräche sowie inhaltliche Abstimmungen durch den Betreuer des *iwb* Anwenderzentrums Ausgburg (Name BetreuerIn).

# Attachments

Tabelle 5‑1: Vergleich von Materialdatenblättern



# Glossary

|  |  |
| --- | --- |
| Stichwort | Erklärung |
| MC | Manufacturing Change (oder Technische Änderung in der Produktion): Änderungen, die mit der (produzierenden) Fabrik im Zusammenhang stehen. Darunter fallen auch organisatorische Änderungen (Koch et al. 2015a). |
| MCM | Organisation und Kontrolle des Änderungsprozesses an der Produktion („organization and controlling of the process making changes to Manufacturing. Including all measure to avoid, frontload and efficiently plan, select, implement and control Manufacturing changes“) (Koch et al. 2015a). |
| EC | Engineering Change (oder Technische Änderung am Produkt): Änderung von Teilen, Zeichnungen oder Software, die Produkte betreffen, welche im Entwicklungsprozess bereits freigegeben wurden. Diese Änderungen dürfen ein beliebiges Ausmaß und Erscheinungsbild aufweisen (Koch et al. 2015a). |
| ECM | Organisation und Kontrolle des Änderungsprozesses am Produkt (Koch et al. 2015a). |
| DSM | Designstrukturmatritzen sind eine strukturierte Darstellungs- und Modellierungsmethode komplexer Systeme (Eppinger / Browning 2012). |
| IR/FAD | „Input Rows, Feedback Above Diagonal“ - Konvention zur Deutung von DSM’s (Eppinger / Browning 2012). |
| IC/FBD | „Input Column, Feedback Below Diagonal“ - Konvention zur Deutung von DSM’s (Eppinger / Browning 2012). |
|  |  |
|  |  |

1. Data-CD Content

0 - Digitale Version der Arbeit

1 - Prozessdesign

2 - Experteninterviews

3 - Abbildungen

4 - Literatur

1. Sworn Declaration

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

[English translation:

I hereby declare on oath that I have independently produced the present work. The thoughts taken directly or indirectly from external sources are marked as such.

The work has not been submitted to any other examination board.]\*

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Garching, den tt.mm.jjjj

(Vorname Name)

*\* Please note that in case of doubt the German translation is legally binding.*