

Diss ETH Nr. 12316

Modulare Werkstattsteuerung einer Fluidzellpresse

Lösung eines sequentiellen 2D Bin Packing-Problems

Abhandlung zur Erlangung des Titels

Doktor der Technischen Wissenschaften

der

Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

vorgelegt von

Beat Friedrich Steiner

Dipl. Betr.- und Prod.-Ing. ETH

geboren am 28. 4. 1966

von Schlossrued (AG)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. J. Reissner, Referent

Prof. Dr. H.-J. Lüthi, Korreferent

1997

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Werkstattsteuerung einer Fertigungsstrasse, in welcher Blechteile für die Flugzeugindustrie hergestellt werden. Die am Anfang ebenen Blechteile durchlaufen dabei mindestens einmal die Operationen Wärmebehandlung, Umformung und Handbearbeitung, bis sie im umgeformten Endzustand sind. Zu Beginn wird dieser Fertigungsbereich - unser System - sorgfältig beschrieben, wobei insbesondere eine Analyse der Abhängigkeiten für die zur Umformung dienende Fluidzellpresse erfolgt.

Darauf aufbauend wird ein mehrstufiges Konzept für die Werkstattsteuerung des Systems entwickelt. Es werden dafür Ziele definiert und derart aufgliedert, dass sich die gesamte Aufgabe in übersichtliche Teilaufgaben segmentieren lässt. Diese sind teilweise so komplex, dass es zum heutigen Zeitpunkt kaum denkbar ist, alle zusammen in einem einzigen Schritt rechnerisch zu lösen. Die Gliederung in Teilaufgaben liefert deshalb die notwendige Basis für einen modularen Aufbau des Werkstattsteuerungssystems. Dabei wird pro Teilbereich der Fertigung, in dem eine der obengenannten Operationen durchgeführt wird, ein Modul zur Lösung der dabei auftretenden Teilaufgabe konzipiert.

Ein weiterer, übergeordneter Modul gibt zu Beginn einer Reihenfolgeplanung für alle Operationen eines Auftrages Zeitintervalle vor, in welchen sie durchgeführt werden sollen. Diese zur Koordination der einzelnen Module dienenden Intervalle werden nicht als Restriktionen aufgefasst, sondern fließen nur in die Zielfunktion ein, da die Bearbeitungsdauern an den Handarbeitsstationen eher stochastischer als deterministischer Natur sind. Dadurch kann eine deterministische Reihenfolgeplanung selten eingehalten werden. Überdies gelangen in kurzen Abständen ständig neue Aufträge ins System, die abhängig von ihrer terminlichen Priorität sobald wie möglich eingeplant werden müssen. Die Reihenfolgeplanung muss also im Sinne einer rollenden Planung stets der neu vorliegenden Auftragsstruktur angepasst werden. Im ersten Teil der Arbeit wird ein mehrstufiges, modulares Konzept dieser Werkstattsteuerung vorgestellt.

Die erste Stufe des Konzepts wurde implementiert: Sie umfasst den komplexesten Modul, welcher unter Zuhilfenahme neuer, innovativer Ansätze den Einsatz einer Fluidzellpresse plant. Pro umzuformender Artikel existiert ein Werkzeug mit spezifischem, rechteckigem Grundriss, welches ohne Fixation auf einen Metalltisch gelegt wird, der in die Presse hinein und wieder herausgefahren werden kann. In der Fluidzellpresse wird eine Gummimembrane einem derart hohen Druck ausgesetzt, dass die Blechzuschnitte an die Werkzeuge gepresst und dadurch zu Blechteilen umgeformt werden.

Der Tisch kann pro Pressung mit verschiedenen Werkzeugen bestückt werden. Da die Fertigungsaufträge im Allgemeinen unterschiedliche Losgrößen haben, resultieren auf dem Tisch ständig wechselnde Werkzeugkombinationen für die einzelnen Pressungen. Im implementierten Modul wurden Methoden entwickelt, die bestimmen, welche Aufträge miteinander gefertigt werden. Hauptziel dieser Aufgabe ist eine möglichst hohe Pressenauslastung, unter Berücksichtigung von terminlichen Prioritäten. Für das Layout der Werkzeuge auf dem Tisch werden ausserdem Anordnungen vorgeschlagen, die verschiedene Faktoren berücksichtigen. Insbesondere soll der Aufwand zur Realisierung dieser Anordnungen zwischen zwei Pressungen minimal sein. Die Methoden und Algorithmen dieses Moduls werden im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

In der Einleitung zum zweiten Teil wird für die oben beschriebene spezielle Problematik, welche an einer Fluidzellpresse besteht, eine adäquate formale Beschreibung vorgestellt, die „sequentielles 2D Bin Packing“-Problem genannt wird. Beim klassischen 2D Bin Packing geht

es darum, eine gegebene Anzahl kleiner Rechtecke derart grossen Rechtecken zuzuweisen, dass sie darin überschneidungsfrei angeordnet werden können und dass die benötigte Anzahl grosser Rechtecke minimal ist. Beim sequentiellen 2D Bin Packing kann einem grossen Rechteck (einer Pressung) pro Auftrag maximal ein kleines Rechteck (ein Blechteil) zugewiesen werden, da pro Auftrag nur ein Werkzeug vorhanden ist. Überdies müssen sämtliche Pressungen, in welchen ein Auftrag jeweils vorkommt, in einer aneinanderhängenden Sequenz abgearbeitet werden, da das entsprechende Werkzeug nur einmal auf den Pressentisch und wieder herausgehoben werden soll. In der Praxis auftretende, mit dem Bin Packing verwandte Probleme werden oft als Packing- oder Nestingprobleme klassifiziert.

Das Finden von interessanten Auftragskombinationen, die miteinander an der Presse gefertigt werden sollen, ist der kombinatorische Teil des Problems. Er wird durch eine geschickte Teilenumeration aller möglichen Auftragskombinationen effizient gelöst, da schnell interessante Kombinationen gefunden werden. Deren Anzahl wird zudem durch dynamische Schranken, die sich an der besten bisher gefundenen Lösung orientieren, ständig reduziert.

Der geometrische Teil des Problems behandelt das Plazieren der entsprechenden Werkzeuge einer Auftragskombination. Die relativen Positionen der Matrizen zueinander bzw. zum Rand des Pressentisches werden mit Hilfe eines Ungleichungssystems festgehalten, welches durch ein Paar von gerichteten und gewichteten Graphen formalisiert wird. Diese auf den ersten Blick umständliche Methode zum Festhalten einer geometrischen Anordnung von Rechtecken hat zwei wichtige Vorteile: Erstens werden den Werkzeugen beim Lösen des Ungleichungssystems nicht feste Koordinaten, sondern Koordinatenintervalle zugewiesen; durch Berechnen der Grösse dieser Intervalle ist bekannt, an welcher Stelle wieviel Platz vorhanden ist, um weitere Werkzeuge zu plazieren. Zweitens bleiben von Pressung zu Pressung die relativen Positionen derjenigen Werkzeuge erhalten, welche nicht ausgewechselt werden. Damit kann der Aufwand zur Neupositionierung der Werkzeuge zwischen zwei Pressungen tief gehalten werden. Einige der Methoden zum Auffinden freier Plätze werden in dieser Arbeit erstmals vorgestellt, ebenso sämtliche Methoden, die benutzt werden, um das Paar gerichteter Graphen nach dem Einfügen bzw. Entfernen von Werkzeugen entsprechend nachzuführen.

Im Weiteren wird eine Strategie für die Erzeugung einer Folge von Pressungen präsentiert, bei der Werkzeuge mit grosser Grundfläche bevorzugt behandelt werden. Auslöser dafür sind Tests einer Strategie ohne derartige Präferenzen, bei denen festgestellt wurde, dass die meisten Lücken sofort von kleinen Werkzeugen gefüllt werden und grosse nicht oder nur sehr spät zum Zuge kommen. Die Resultate mit der neuen Strategie sind sehr gut.

Abschliessend sei erwähnt, dass das aus dieser Arbeit entstandene Softwareprodukt seit Mai 1996 erfolgreich in der Praxis eingesetzt wird.

Abstract

The present work provides a contribution to the workshop control of a manufacturing process in which sheet components are produced for the aero industry. In this process the initially flat sheet parts pass at least once through the operations heat treatment, forming and manual working, until they reach the final formed condition. To begin with this manufacturing process - our system - is described in detail, whereby in particular an analysis is made of the factors affecting the fluid cell press used for the forming process.

On this basis a multistage concept is developed for the workshop control of the system. For this purpose targets are defined and arranged in such a way that the overall task can be subdivided into manageable subtasks. In part these are so complex that at present it is practically inconceivable that they should all be mathematically solved in a single step. For this reason the division into subtasks provides the required basis for a modular set-up of the workshop control system. In this way, for each step in the manufacturing process, in which one of the above-mentioned operations is performed, a module is conceived for the solution of the corresponding subtask.

A further superimposed module provides at the beginning a sequence plan, for all operations of an order, time intervals in which they should be performed. These intervals serve to provide a co-ordination of the individual modules. They are not to be understood as a restriction, but provide only an input to the target function, since the durations of the processing steps at the manual working stations are more of a stochastic than a deterministic nature. In this way it is seldom possible to maintain a deterministic sequence plan. In addition there is the frequent arrival of new tasks in the system. Depending on their schedule priority, they must be included in the planning as soon as possible. Hence within the framework of a rolling planning system the system must be continuously matched to the current task order structure. In the first part of the work a multistage, modular concept of this workshop structure will be introduced.

The first stage of the concept has been implemented: It constitutes the most complex module, which plans, with the help of new innovative solutions, the application of a fluid cell press. For each object to be formed there exists a tool with a specific rectangular layout form. This is laid, without fixation, on a metal table, which can be moved into the press and out again. In the fluid cell press a rubber membrane is exposed to a sufficiently high pressure to press the sheet blanks against the tool and hence result in forming of the sheet parts.

For each pressing operation the press table can be equipped with various tools. Since the manufacturing orders generally have different numbers of parts, this results in a continuous change in tool combinations on the press table for the individual pressing operations. In the implemented module methods have been developed which determine which orders should be manufactured together. The main aim of this optimisation is to achieve the highest possible usage factor for the press, while taking account of the schedule priorities. In addition arrangements are proposed for the layout of the tools on the press table, whereby attention is paid to various factors. In particular the effort to achieve these arrangements between two pressing operations should be minimised. The methods and algorithms of this module will be presented in the second part of the work.

In the introduction to the second part a sufficient formal description is presented for the special situation for a fluid press, as described above. This is referred to as the "sequential 2D bin packing problem". For classical 2D bin packing the requirement is to allocate a given number of small rectangles to larger rectangles in such a way that there are no intersections and the required number of large rectangles is as small as possible. For sequential 2D bin packing for each

task a small rectangle (one sheet component) can not be allocated to more than one large rectangle (one pressing operation), since only one tool is present for each pressing operation. In addition all pressing operations in which a specific order appears, should be dealt with in sequence, since the corresponding tool should only be lifted onto and removed from the press table once. Problems which arise in practice, in connection with bin packing, are often classified as packing or nesting problems.

The identification of interesting order combinations, which should be manufactured together on the press, constitutes the combinatorial part of the problem. It is efficiently solved through clever numbering of the parts for all possible order combinations, since in this way it is quickly possible to find interesting combinations. In addition the number of combinations is continuously reduced through the use of dynamic limits based on the best solutions currently identified.

The geometrical part of the problem deals with the placing of the appropriate tool for an order combination. The relative positions of the dies to one another and to the edge of the press table are determined with the help of a set of inequalities. This is formalised by a pair of directed and weighted graphs. At first sight this might seem to be a complicated method for the determination of a geometrical arrangement of rectangles. However it has two important advantages: Firstly, when the set of inequalities is solved, the tools are not allocated to fixed co-ordinates, but rather to co-ordinate intervals; by calculating the size of these intervals, it is known at which points space is available, in order to position further tools. Secondly, from one pressing operation to the next the relative positions of tools which will not be exchanged remains the same. In this way it is possible to minimise the effort for repositioning tools between pressing operations. Some of the methods for finding free space are presented for the first time in this work. The same applies for all methods used to update the positions of the pair of directed graphs after the inclusion or removal of tools.

In addition a strategy is presented for the generation of a sequence of pressing operations, with which tools with a large surface area can be preferentially treated. The need for this was seen in tests without such a preference, in which it was noted that most spaces were immediately filled by small tools and that large tools were accommodated either very late or not at all. The results with the new strategy are very satisfactory.

Finally it should be mentioned that the software product produced during the course of this work has been successfully applied in practice since May 1996.