

DISS. ETH NO. 15486

EVOLUTIONARY DESIGN
OPTIMIZATION:
TOOLS AND APPLICATIONS

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
OLIVER KÖNIG
Dipl. Masch. Ing. ETH
born on October 12, 1974
citizen of Iffwil (BE)

accepted on recommendation of
Prof. Dr. P. Ermanni, examiner
Prof. Dr. G. Fadel, co-examiner
Dr. G. Kress, co-examiner

2004

Abstract

The present thesis responds to the worldwide attention given to numerical Structural Optimization, resulting from the need for powerful tools for generating better design solutions at lower development costs and the increasing availability of the necessary computational resources to support automated optimization processes.

The thesis focuses on the optimization of real-world structures, highly constrained by functional, manufacturing, or esthetic demands. Such optimization problems, where the search space may include both discrete and continuous search domains, often result in non-convex and noisy solution spaces. This makes the use of Evolutionary Algorithms (EAs) favorable, whereby their main drawback, i.e. high computational costs, can be mitigated by efficiently adapting EAs for the problems at hand. Thus, this thesis establishes evolutionary design optimization for highly-constrained mechanical structures in modern product development processes. Concepts, tools, and applications are presented, highlighting the potential of a smart integration of Evolutionary Algorithms into modern CAD/FEM software systems, and thereby overcoming some of the limits of traditional optimization approaches.

The basis is laid by the implementation of a generic Evolutionary Algorithm, based on the open-source framework Evolving Objects. For the parameter optimization, an universal genotype is introduced together with adequate evolutionary operators. It allows to efficiently address optimization problems consisting of an arbitrary list of heterogeneous parameters such as reals, integers, booleans, etc. The proprietary developed software DynOPS is implemented to rate the mechanical properties of the evolved structures with adequate fitness values, allowing for a parallel evaluation of individuals in an EA using arbitrary simulation software controllable through input files. Furthermore, a generally applicable formulation of fitness functions is proposed that simplifies the computation of scalar fitness values based on objectives and multiple constraints. Finally, based on the representation of mechanical structures in CAD systems, i.e. hierarchical feature trees, new genotypes consisting of lists of CAD-features are implemented and adequate evolutionary operators are developed. The resulting Evolutionary Algorithm is directly implemented into the optimization workbench of the CAD system CATIA V5.

Four applications demonstrate and verify the presented concepts: The weight of a well-established motorbike frame is reduced by 20.8% while preserving the originally desired mechanical properties. Minimizing the weight of a piston pin of a racing engine yields a new design, saving 11% of the

weight of the original pin. For the optimization of a racing car rim, a parallel DynOPS EA-loop is successfully applied to a complex mechanical structure highly constrained through regulatory, functional, and manufacturing demands. Finally, the performance of CAD-driven EAs is highlighted by the weight minimization of an end plate of a fuel cell stack under strength constraints, yielding intuitively not expected but highly efficient design solutions.

Zusammenfassung

Das Thema numerische Strukturoptimierung zieht weltweit viel Aufmerksamkeit auf sich. Dies ist begründet durch den fortwährenden Bedarf nach Simulationswerkzeugen um bessere Produkte schneller und günstiger entwickeln zu können. Zusätzlich unterstützen die immer schnelleren Computer die Möglichkeiten automatisierter Optimierungsprozesse.

Diese Dissertation konzentriert sich auf die Optimierung von Strukturen, deren Ausgestaltung durch eine Vielzahl von funktionellen, herstellungsbedingten, und ästhetischen Anforderungen bestimmt wird. Solche stark eingeschränkten Optimierungsprobleme, oftmals definiert durch eine Kombination aus diskreten und kontinuierlichen Optimierungsvariablen, führen häufig zu nicht-konvexen, verrauschten Lösungsräumen. Dies macht den Einsatz von Evolutionären Algorithmen (EAs) attraktiv. Deren Hauptnachteil liegt in den hohen benötigten Computerressourcen, was aber durch eine effiziente Anpassung der Algorithmen für die behandelten Probleme entschärft werden kann. Deshalb liegt der Kern dieser Dissertation in der Etablierung von Evolutionären Algorithmen für die Optimierung von stark restringierten, mechanischen Strukturen. Konzepte, Werkzeuge und Anwendungen werden präsentiert, die das Potential einer geschickten Integration von Evolutionären Algorithmen in moderne CAD und FEM Software Systeme aufzeigen. Damit können verschiedene Limiten von traditionellen Optimierungsalgorithmen überwunden werden.

Die Grundlage wird mit der Implementation eines generischen Evolutionären Algorithmus gelegt, basierend auf der frei erhältlichen Evolving Objects Bibliothek. Für Parameteroptimierungen wird ein universeller Genotyp eingeführt, flankiert von entsprechenden evolutionären Operatoren. Damit können Optimierungsprobleme, definiert durch eine beliebige Liste von heterogenen Parametern mit reellen, ganzzahligen oder binären Werten, effizient behandelt werden. Um die mechanischen Eigenschaften der generierten neuen Strukturen mit skalaren Fitnesswerten bewerten zu können, wurde das Software Paket DynOPS entwickelt. Es erlaubt die parallele Evaluierung von Individuen einer Generation im evolutionären Prozess unter Einbezug von beliebiger Simulationssoftware. Zusätzlich wird eine generell anwendbare Formulierung von Fitnessfunktionen eingeführt, mit der die Berechnung von skalaren Fitnesswerten aus entsprechenden Optimierungszielen und Restriktionen vereinfacht wird. Basierend auf der Repräsentation von mechanischen Strukturen in modernen CAD Systemen, das heisst basierend auf hierarchisch organisierten Feature Bäumen, werden schliesslich neue Genotypen eingeführt und mit entsprechenden evolutionären Operatoren ausgestattet. Der resultierende Evolutionäre Algorithmus wurde direkt in die Optimierungsumgebung des CAD Systems CATIA V5 implementiert.

Die vorgeschlagenen Konzepte werden mit vier Anwendungen verifiziert: Das Gewicht eines Motorradrahmens wird um 20.8% reduziert bei gleichzeitiger Beibehaltung seiner mechanischen Eigenschaften. Die Gewichtsminimierung eines Kolbenbolzens aus einem Rennmotor resultiert in einem neuen Design das 11% leichter ist als der ursprüngliche Bolzen. Ein paralleler DynOPS-EA Prozess wird erfolgreich für die Optimierung einer Rennfelge angewandt, wobei das Design dieser Felge durch eine Vielzahl von reglementstechnischen, funktionalen und herstellungsbedingten Restriktionen bestimmt wird. Die Leistungsfähigkeit von CAD-basierten EAs wird schliesslich durch die Gewichtsminimierung einer Brennstoffzellenendplatte mit Spannungsrestriktionen aufgezeigt. Aus dieser Optimierung resultiert ein effizientes neues Design für die Platte, wie man es intuitiv nicht erwarten würde.