

Diss. ETH No. 11894

Theory of Evolutionary Algorithms and Application to System Synthesis

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
doctor of technical sciences



presented by
TOBIAS BLICKLE
Dipl.-Ing., University of Saarbrücken, Germany
born January, 17th, 1967
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr.-Ing. Lothar Thiele, examiner
Prof. Dr.-Ing. Hans-Paul Schwefel, co-examiner

1996



Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem probabilistischen Optimierungsverfahren der *Evolutionären Algorithmen* und deren Anwendung auf Probleme des automatisierten Entwurfs und der Optimierung komplexer digitaler Systeme, die aus Hardware- und Softwarekomponenten bestehen.

Im Teil I der Arbeit stehen Evolutionäre Algorithmen im Vordergrund. Sie sind ein heuristisches Suchverfahren, das auf eine Menge (Population) von zufällig ausgewählten Punkten (Individuen) des Lösungsraums die "Grundprinzipien" der natürlichen Evolution anwendet: Selektion und zufällige Variation. Die Evolutionären Algorithmen werden zunächst in den Kontext der globalen Optimierung mit Nebenbedingungen eingebettet. Dabei werden die wichtigsten Verfahren zur Behandlung von Nebenbedingungen vorgestellt, sowie ein neues Verfahren (IOS - individual objective switching) beschrieben und experimentell verglichen. Kapitel 4 befasst sich mit einer neuen formalen Beschreibung der Selektionsphase auf Basis von Fitnessverteilungen, die es erlaubt, Selektionsmethoden umfassender zu beschreiben, einheitlich zu betrachten und neue Erkenntnisse über den Einfluss der Parameter einer Selektionsmethode zu erlangen. Ein weiteres Kapitel ist der Variation (Rekombination) bei Evolutionären Algorithmen gewidmet. Da hier je nach Repräsentation des Problems (z.B. Vektor, Baum, Graph) völlig unterschiedliche Betrachtungen erforderlich sind, wird sich auf die Rekombination bei Baum-Repräsentation (sog. *Genetischen Programmieren*) beschränkt. Ein

wesentlicher Teil der Darlegungen behandelt das Problem des "Baumwucherns" (Bloating). Dazu wird eine neue Erklärung basierend auf der Redundanz in Bäumen vorgestellt und mit anderen Methoden zur Erklärung und Vermeidung von Wuchern verglichen.

Teil II der Dissertation ist der Anwendung der Evolutionären Algorithmen zur Optimierung komplexer digitaler Systeme gewidmet. Damit sind insbesondere Systeme gemeint, die aus Hardware- und Softwarekomponenten bestehen und die durch eine hohe Komplexität aufgrund der Heterogenität ihrer Komponenten (Hardware/Software, analog/digital, elektrisch/mechanisch) ausgezeichnet sind. Bei diesen sogenannten *anwendungsspezifischen Systemen* (oder auch *eingebetteten Systemen*) ist eine computerunterstützte Synthese auf der relativ hohen Systemebene deshalb von grossem Interesse, weil sie eine Verkürzung der Entwurfszeiten, eine Erhöhung der Zuverlässigkeit und eine Senkung der Entwurfskosten ermöglicht. Die wesentliche Aufgabe eines solchen Synthesystems ist die Umsetzung einer verhaltensorientierten Beschreibung der Aufgabe (z.B. in Form eines Algorithmus) in eine strukturelle Darstellung aus Prozessoren, Spezialbausteinen, Speichern und Bussen unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen (z.B. maximale Kosten, Reaktionsgeschwindigkeit, Datendurchsatz). Bei einem solchen System stellen sich vielfältige Probleme wie zum Beispiel die Schätzung der Performanz, die Optimierung der Architektur und die Exploration möglicher Entwürfe.

Diese Arbeit behandelt die formale Beschreibung eines solchen Synthesevorgangs basierend auf einem neuen Graphenmodell, in dem die gesamte Problemstellung in einen sogenannten Spezifikationsgraph umgesetzt wird. Auf diesem Graphen werden die Aufgaben der Systemsynthese (Allokation, Bindung und Ablaufplanung) definiert, sowie der Synthesevorgang als globales Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen formuliert. Dieses Optimierungsproblem wird dann mittels Evolutionärer Algorithmen gelöst, wobei die im Teil I der Arbeit gewonnen theoretischen Erkenntnisse über Evolutionäre Algorithmen gewinnbringend eingesetzt werden. Schliesslich wird am Beispiel der Synthese eines Videocodec-Chips zur Datenkompression bei Bewegtbildern die Wirksamkeit des Ansatzes demonstriert und gezeigt,

dass es mit Evolutionären Algorithmen möglich ist, die Parteo-Punkte des Entwurfsraumes in einem einzigen Optimierungslauf zu bestimmen.

Abstract

The subject of this thesis are *Evolutionary Algorithms* and their application to the automated synthesis and optimization of complex digital systems composed of hardware and software elements.

In Part I the probabilistic optimization method of Evolutionary Algorithms (EAs) is presented. EAs apply the principles of natural evolution (selection and random variation) to a random set of points (population of individuals) in the search space. Evolutionary Algorithms are first embedded in the context of global optimization and the most important and widely used methods for constraint-handling are introduced, including a new method called IOS (individual objective switching). This is followed by a new formal description of selection schemes based on fitness distributions. This description enables an extensive and uniform examination of various selection schemes leading to new insights about the impact of the selection method parameters on the optimization process. Subsequently the variation (recombination) process of Evolutionary Algorithms is examined. As different analysis techniques are necessary depending on the representation of the problem (e.g. bit string, vector, tree, graph) only the recombination process for tree-representation (Genetic Programming) is considered. A major part of the explanation treats the problem of “bloating”, i.e., the tree-size increase during optimization. Furthermore, a new redundancy based explanation of bloating is given and several methods to avoid bloating are compared.

Part II is dedicated to the application of Evolutionary Algorithms to the optimization of complex digital systems. These systems are composed of hardware and software components and characterized by a high complexity caused by their heterogeneity (hardware/ software, electrical/mechanical, analog/digital). Computer-aided synthesis at the abstract system level is advantageous for *application specific systems* or *embedded systems* as it enables time-to-market to be reduced with a decrease in design errors and costs. The main task of system-synthesis is the transformation of a behavioral specification (for example given by an algorithm) into a structural specification, such as a composition of processors, general or dedicated hardware modules, memories and busses, while regarding various restrictions, e.g. maximum costs, data throughput rate, reaction time. Problems related to system synthesis are for example performance estimation, architecture optimization and design-space exploration.

This thesis introduces a formal description of system-synthesis based on a new graph model where the specification is translated into a *specification graph*. The main tasks of system-synthesis (allocation, binding and scheduling) are defined for this graph and the process of system synthesis is formulated as a constrained global optimization problem. This optimization problem is solved by Evolutionary Algorithms using the results of Part I of the thesis. Finally, an example of synthesizing implementations of a video codec chip is described demonstrating the effectiveness of the proposed methodology and the capability of the EA to obtain the Pareto points of the design space in a single optimization run.