



Model-based Symbolic Design Space Exploration at the Electronic System Level

– A Systematic Approach –

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

VORGELEGT VON:
M.Sc. Kai Neubauer,
geboren am 10.05.1991 in Demmin

EINGEREICHT AM:
17.08.2021

Abstract

Today, computer systems are ubiquitously integrated in nearly all areas of everyday life. Well ahead of conventional general purpose computers, embedded systems are dominating the global market. They are present in telecommunication equipment, in current and future automotive and aviation technology, household appliances, and infrastructure. The design of those embedded computer systems is continuously becoming more complex as the requirements with respect to their functional and extra-functional properties grow steadily. Simultaneously, the adaption to technological progress demands for shorter development cycles. Hence, an efficient design process is imperative to fulfill these requirements. A bottom-up design strategy, where every detail of the system can be explored and evaluated, has not been viable for a long time now. Thus, the design process has been raised to higher abstraction levels, where large-scaled decisions can be explored more effectively. Decisions are first explored at the electronic system level (ESL), before the results are refined at lower abstractions. However, even at the ESL, the exploration of design alternatives is not a trivial task. It has to be decided, which resources are allocated, where the functionality is implemented, and how the communication infrastructure is realized. Depending on these decisions, the properties of the design have to be determined and evaluated. Typically, an embedded computer system must fulfill several constraints and shall be optimal with respect to multiple objectives. These objectives are often conflicting with other such that no single optimal solution but a set of compromise, i.e., Pareto-optimal, solutions exists. Therefore, the design of embedded computer systems is considered a multi-objective optimization problem. Automatic approaches are mandatory to obtain Pareto-optimal designs, as the manual exploration of the whole design space is not feasible. To this end, the problem is typically encoded through mathematical models that allow for the evaluation of desired properties. For the exploration, many approaches rely on population-based heuristics that traverse the design space on the basis of random decisions. While this methodology has been shown to work well for many scenarios, it holds significant disadvantages. First, as the search is generally not executed systematically, the approaches cannot guarantee to explore the entire design space and, therefore, may miss optimal solutions. Furthermore, the approaches usually cannot identify already explored solutions. That is, the same design candidates are re-visited again even if they already have been evaluated and found to be non-optimal before. Second, as most population-based approaches are based on the recombination of previously found solutions, they tend to run in saturation, exploring the same regions of design space over and over. Finally, the search is decoupled from the exploration. This prevents to exchange information between the individual steps that could allow to steer the search into more promising regions.

In this thesis, a novel, fully systematic approach is proposed that aims to address the outlined problems. The multi-objective optimization problem is encoded symbolically through a concise answer set programming (ASP) formulation. The programming paradigm ASP stems from the area of knowledge representation and reasoning and permits the systematic explo-

ration of the search space. While linear feasibility constraints can be directly verified in ASP, non-linear objectives are hard to formulate in standard ASP. Therefore, in the thesis at hand, several specialized solver are tightly coupled as background theories with the foreground ASP solver under the ASP modulo theories (ASPmT) paradigm. The tight coupling of foreground and background theories allows the exchange of information between the previously isolated problems. That is, reasons for invalid design points found in one of the background theories are used to steer the search in foreground theory and prune the search more effectively. Furthermore, the coupling of disparate solver allows for the evaluation of partial assignments where only a subset of decisions has been made. This leads to an earlier detection of invalid regions in the search space. The conducted experiments show a significant advantage of using partial assignment checking when compared to an approach where only complete design can be evaluated. The ability to work on partial assignments not only benefits the evaluation of acquired solutions but also the Pareto-filtering as non-optimal solutions can be identified early.

However, the utilization of partial assignments imposes disadvantages as evaluations and Pareto checks have to be executed more regularly. As a remedy, the thesis at hand proposes specialized archive management and evaluation methodologies, that aim at reducing this overhead. It is shown, only when a complete solution is checked for optimality, the entire Pareto filtering process has to be executed. This leads to a significant reduction in required operations for partial solutions while still maintaining correct results. Similarly, a specialized approximation technique is proposed that reduces the number of unnecessary expensive evaluations. With this approach, up to 98 % of all evaluations can be skipped and the overall performance of the design space exploration can be increased by up to six times for the considered use cases.

To summarize, the thesis at hand provides a holistic framework for designing embedded computer systems at the ESL. By utilizing the ASPmT paradigm, the search is executed entirely systematically and the disparate synthesis steps can be coupled to explore the search space effectively.

Kurzfassung

Computersysteme sind heute allgegenwärtig und in fast allen Bereichen des täglichen Lebens integriert. Weit vor den herkömmlichen Allzweckcomputern dominieren eingebettete Systeme den Weltmarkt. Sie sind in Telekommunikationsgeräten, in der Automobil- und Luftfahrttechnik, in Haushaltsgeräten und in der Infrastruktur zu finden. Das Design dieser eingebetteten Computersysteme wird immer komplexer, da die Anforderungen an ihre funktionalen und extrafunktionalen Eigenschaften stetig wachsen. Gleichzeitig verlangt die Anpassung an den technologischen Fortschritt nach kürzeren Entwicklungszyklen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist ein effizienter Entwurfsprozess unabdingbar. Eine Bottom-up-Entwurfsstrategie, bei der jedes Detail des Systems erforscht und bewertet werden kann, ist schon seit langem nicht mehr praktikabel. Daher wurde der Entwurfsprozess auf höhere Abstraktionsebenen angehoben, auf denen Entscheidungen von großer Tragweite effektiver untersucht werden können. Entscheidungen werden zunächst auf der Systemebene untersucht, bevor die Ergebnisse auf niedrigeren Abstraktionsebenen verfeinert werden. Doch selbst auf der Systemebene ist die Exploration von Entwurfsalternativen keine triviale Aufgabe. Es muss entschieden werden, welche Ressourcen alloziert werden, wo die Funktionalität implementiert wird und wie die Kommunikationsinfrastruktur realisiert wird. Abhängig von diesen Entscheidungen müssen die Eigenschaften des Entwurfs bestimmt und bewertet werden. Typischerweise muss ein eingebettetes Computersystem mehrere Randbedingungen erfüllen und soll in Bezug auf mehrere Ziele optimal sein. Diese Ziele stehen oft in einem Konflikt zueinander, sodass keine einzelne optimale Lösung, sondern eine Menge von Kompromisslösungen, d.h. Pareto-optimale Lösungen, existieren. Daher wird der Entwurf von eingebetteten Computersystemen als ein mehrzieliges Optimierungsproblem betrachtet. Automatische Ansätze sind zwingend erforderlich, um alle Pareto-optimale Designs zu erhalten, da die manuelle Exploration des gesamten Entwurfsraums nicht durchführbar ist. Zu diesem Zweck wird das Problem typischerweise durch mathematische Modelle modelliert, die die Auswertung der gewünschten Eigenschaften ermöglichen. Für die Exploration verlassen sich viele Ansätze auf populationsbasierte heuristische Verfahren, die den Entwurfsraum auf der Basis von Zufallsentscheidungen durchlaufen. Obwohl sich diese Methodik für viele Szenarien als gut geeignet erwiesen hat, birgt sie erhebliche Nachteile. Erstens können die Ansätze, da die Suche im Allgemeinen nicht systematisch ausgeführt wird, nicht garantieren, dass der gesamte Entwurfsraum erkundet wird, und verpassen daher möglicherweise optimale Lösungen. Außerdem können die Ansätze oftmals keine bereits gefundenen Lösungen identifizieren. Das heißt, dieselben Design-Kandidaten werden erneut untersucht, auch wenn sie bereits zuvor bewertet und als nicht optimal befunden wurden. Zweitens, da die meisten populationsbasierten Ansätze auf der Rekombination von zuvor gefundenen Lösungen basieren, neigen sie dazu, in die Sättigung zu laufen und dieselben Regionen des Designraums immer wieder zu untersuchen. Schließlich ist die Suche von der Erkundung entkoppelt. Dies verhindert den Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Schritten, die es erlauben könnten, die Suche in vielversprechendere Regionen zu lenken.

In dieser Arbeit wird ein neuartiger, vollständig systematischer Ansatz vorgeschlagen, der darauf abzielt, die skizzierten Probleme zu lösen. Das Mehrzieloptimierungsproblem wird symbolisch durch eine prägnante ASP-Formulierung kodiert. Das Programmierparadigma ASP stammt aus dem Bereich der Wissensrepräsentation und Logik und erlaubt die systematische Erkundung des Suchraums. Während lineare Randbedingungen in ASP direkt verifiziert werden können, sind nicht-lineare Ziele in Standard-ASP schwer zu formulieren. Daher werden in der vorliegenden Arbeit mehrere spezialisierte Solver als Hintergrundtheorien eng mit dem Vordergrund-ASP-Solver unter dem ASPmT-Paradigma gekoppelt. Die enge Kopplung von Vordergrund- und Hintergrundtheorien ermöglicht den Austausch von Informationen zwischen den zuvor isolierten Problemen. Das heißt, Gründe für ungültige Designpunkte, die in einer der Hintergrundtheorien gefunden werden, werden verwendet, um die Suche in der Vordergrundtheorie zu steuern und die Suche effektiver zu beschneiden. Darüber hinaus ermöglicht die Kopplung von disparaten Solvern die Auswertung von Teillösungen, bei denen nur eine Teilmenge von Entscheidungen getroffen wurde. Dies führt zu einer früheren Erkennung von ungültigen Regionen im Suchraum. Die durchgeführten Experimente zeigen einen signifikanten Vorteil der Prüfung von Teillösungen im Vergleich zu einem Ansatz, bei dem nur der komplette Entwurf ausgewertet werden kann. Die Möglichkeit, mit Teillösungen zu arbeiten, kommt nicht nur der Bewertung der gefundenen Lösungen zugute, sondern auch der Pareto-Filterung, da nicht-optimale Lösungen frühzeitig erkannt werden können.

Allerdings bringt die Verwendung von Teillösungen auch Nachteile mit sich, da Auswertungen und Optimalitätsprüfungen regelmäßiger durchgeführt werden müssen. Als Abhilfe schlägt die vorliegende Arbeit spezielle Archivverwaltungs- und Auswertungsmethoden vor, die darauf abzielen, diesen Overhead zu reduzieren. Es wird gezeigt, dass nur dann, wenn eine vollständige Lösung auf Optimalität geprüft wird, der gesamte Prozess der Pareto-Filterung ausgeführt werden muss. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der erforderlichen Operationen für Teillösungen bei gleichzeitiger Beibehaltung korrekter Ergebnisse. In ähnlicher Weise wird eine spezialisierte Approximationstechnik vorgeschlagen, die die Anzahl der unnötigen, teuren Auswertungen reduziert. Mit diesem Ansatz können bis zu 98 % aller Evaluationen übersprungen werden und die Gesamtleistung der Entwurfsraumexploration kann für die betrachteten Anwendungsfälle um das bis zu Sechsfache gesteigert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorliegende Arbeit einen ganzheitlichen Rahmen für den Entwurf von eingebetteten Computern auf der Systemebene bereitstellt. Durch die Verwendung des ASPmT-Paradigmas wird die Suche vollständig systematisch ausgeführt und die unterschiedlichen Syntheseschritte können gekoppelt werden, um den Suchraum effektiv zu durchsuchen.