

Exploiting model structure for efficient hybrid dynamical systems simulation

Doctoral Thesis

Author(s):

Floros, Xenofon

Publication date:

2014

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010182314>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 21871

**EXPLOITING MODEL STRUCTURE FOR
EFFICIENT HYBRID DYNAMICAL SYSTEMS
SIMULATION**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
XENOFON FLOROS

Diploma of Electrical Engineering and Computer Science
(National Technical University of Athens)

born on June 9, 1983
citizen of the Hellenic Republic

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Joachim M. Buhmann, examiner
Prof. Dr. François E. Cellier, co-examiner
Prof. Dr. Peter Fritzson, co-examiner

2014

ABSTRACT

We experience an increasing and undisputed need for efficient and reliable simulation of large-scale hybrid dynamical models. This need is, only partially, served by the increase of the computational power and resources. The reason being that widely used, general-purpose Differential Algebraic Equation (DAE) hybrid system solvers, for example DASSL, are quite inefficient when simulating hard model instances. Problems are classified as *hard*, with respect to simulation, when they are of large size, consisting of hundreds or thousands of equations, they are stiff, meaning that they describe phenomena evolving at drastically different paces, and exhibit a large number of discontinuous behaviors. There are several classes of models that are hard to simulate, ranging from power electronic circuits to stochastic hybrid biological systems.

We argue that the attention should be drawn again to the *basics* and *question the underlying assumptions of traditional numerical solvers that are responsible for their inefficient behavior over certain model classes*. Indeed in the last decade, a promising family of numerical solvers has been introduced that, instead of discretizing the time-space, operates on the principle of state-discretization. The new solvers are named Quantized State Space (QSS) methods and have proven to be substantially more efficient than classical solvers in dealing with large, sparse, stiff and discontinuous models, without falling behind in simulation accuracy.

Throughout this work, the use of the QSS methods, as the simulation algorithm of choice, is being advocated and illustrated over a number of different problem settings. We are especially interested in hard simulation problem instances that comprise of large, sparse, potentially stiff, models with heavy discontinuities.

The core problems that we address in this thesis comprise of *optimal ways to exploit the structure of hybrid dynamical models*, in order to enable efficient and error-free numerical simulation. More specifically, the main thesis contributions are twofold.

First, *algorithmic approaches are analyzed, that bridge the gap between standard modeling languages of hybrid systems, such as Modelica, and the QSS sequential solvers.* The proposed algorithms tackle both current implementations of QSS methods, the newest and more efficient stand-alone QSS solver and the Discrete Event System Specification (DEVS)-based implementation. The correctness of the algorithms is established through experimental simulation results, and significant evidence is presented that justifies the use of QSS methods, as the solvers of choice, for the subclass of hard problem instances that we are interested in.

Then, the focus is shifted to the *enhancement of parallel QSS simulation.* A *novel load-balancing approach*, based on appropriate graph representation of the underlying QSS simulation, has been proposed and coupled with a parallel implementation of the stand-alone QSS solvers for multicore platforms. Extensive experimental evidence suggests that the algorithm manages to partition optimally the QSS computational subtasks into the available set of processors, minimizing the required inter-processor synchronization and communication, while keeping the workload balanced between them, thus maximizing the achieved parallel speedup.

ZUSAMMENFASSUNG

Wir erleben eine ständig ansteigende Nachfrage nach effizienter und zuverlässiger Simulation grosser hybrider dynamischer Modelle. Dieses Bedürfnis wird nur zum Teil durch steigende Rechnerleistung und verbesserte Rechnerarchitekturen befriedigt. Der Grund dafür liegt darin, dass die standardmässig verwendeten differentialalgebraischen Gleichungslöser, wie zum Beispiel DASSL, recht ineffizient in der Simulation harter Modelle sind. Modelle werden betreffend deren Simulation als *hart* eingestuft, wenn sie gross sind, d.h. wenn sie Hunderte oder sogar Tausende von Zustandsvariablen beinhalten; wenn sie gleichzeitig steif sind, d.h. wenn Phänomene mit stark unterschiedlichen Zeitkonstanten durch sie abgebildet werden; und wenn sie häufige Unstetigkeiten aufweisen. Unterschiedlichste Klassen von Systemen führen zu harten Modellen, so zum Beispiel komplexe elektronische Schaltungen aus dem Bereich der Leistungselektronik wie auch stochastische hybride biologische Systeme.

Wir argumentieren, dass eine erneute Betrachtung der *Grundlagen* von Nöten ist und dass *die den klassischen differential algebraischen Gleichungslösern zu Grunde liegenden Prinzipien neu in Frage gestellt werden müssen, die für deren Ineffizienz bei der Simulation gewisser Klassen von Modellen verantwortlich sind*. Tatsächlich wurde in den letzten zehn Jahren eine vielversprechende neue Klasse von differentialalgebraischen Gleichungslösern entwickelt, die auf dem Prinzip der Zustandsdiskretisierung statt dem der Zeitachsendiskretisierung aufbauen. Diese neuartigen Löser sind in die Literatur unter dem Namen "Quantized State Space (QSS) Verfahren" eingegangen, und es konnte gezeigt werden, dass diese Verfahren wesentlich effizienter in der Simulation grosser, steifer, spärlich verknüpfter und stark diskontinuierlicher Modelle sind als klassische Verfahren, ohne dass die Simulationsgenauigkeit darunter leiden würde.

In dieser Forschungsarbeit wurden die QSS Verfahren auf ihre Tauglichkeit bei der Simulation harter Modelle hin untersucht, und deren Charakteristiken wurden an Hand unterschiedlicher Problemklassen aufgezeigt. Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Entwicklung *optimaler Ansätze zur Ausnützung der Modellstruktur hybrider dynamischer Modelle*

mit dem Ziel, möglichst effiziente und dennoch fehlerfreie numerische Simulationsresultate zu erhalten. In diesem Zusammenhang wurden zwei primäre Resultate erreicht.

Zunächst wurden *Modellübersetzungsalgorithmen analysiert, welche, für den Anwender transparent, eine Brücke schlagen zwischen einer modernen objektorientierten Modellierungsumgebung, nämlich Modelica, auf der einen Seite und sequentiellen QSS Lösern auf der anderen*. Die entwickelten Algorithmen decken beide heute zur Verfügung stehenden QSS Simulationsumgebungen ab, nämlich die (etwas ältere) Implementation von QSS Verfahren, die unter Anwendung der "Discrete Event System (DEVS)" Spezifikation entwickelt wurde, sowie die (erst kürzlich entstandene) komplexere aber effizientere Implementation, die ohne DEVS auskommt. Die Korrektheit der Algorithmen wurde experimentell ermittelt, und es konnte gezeigt werden, dass QSS Verfahren für die Simulation harter Modelle tatsächlich wesentlich effizienter als klassische verfahren sind.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird die *parallele QSS Simulation* angepeilt. Ein *neuartiges Lastverteilungsverfahren* wird vorgestellt, welches auf einer für QSS Simulationen optimalen graph-theoretischen Darstellung der Modellstruktur beruht, und welches die Simulationslast optimal auf eine Multicoreumgebung verteilt. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass der Algorithmus in der Lage ist, den Simulationscode optimal auf die zur verfügung stehenden Prozessoren zu verteilen, so dass die benötigte Synchronisation und Kommunikation zwischen den Prozessoren bei optimaler Lastaufteilung minimiert wird. Dadurch wird eine maximale Simulationsbeschleunigung erzielt.