

Diss ETH No 6483

**COMBINED CONTINUOUS/DISCRETE SYSTEM
SIMULATION BY USE OF DIGITAL COMPUTERS:
TECHNIQUES AND TOOLS**

A DISSERTATION

submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE
of
TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
FRANCOIS EDOUARD CELLIER
Dipl. El.-Ing. ETHZ
born July 30, 1948
citizen of Duebendorf/ZH and La Neuveville/BE

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. M. Mansour, referee
Prof. Dr. P. Henrici, co-referee

ADAG Administration & Druck AG

Zurich 1979

ABSTRACT:

This thesis describes new techniques for simulating systems with complex structures by use of a digital computer, as well as the requirements of tools (simulation languages) to cope with the problem in a user-friendly way. Emphasis is given to a general applicability of the software, that is, the described software is meant to be able to handle broad classes of problems in a sub-optimal way rather than to be able to treat any specific application problem in a truly optimal manner. The increased software robustness and the highly reduced costs in coding any application problem compensate, however, for the sacrifice of efficiency in executing a particular simulation project.

Although many problems of numerical mathematics and information processing which are discussed in this thesis had to be considered and solved, the approach to them has been from the viewpoint of an engineer rather than from that of a mathematician.

Combined system simulation as it is described in this thesis is a relatively new technique for the simulation of a class of systems having properties suitable to both continuous system simulation and discrete event simulation, two techniques well known to the simulation community. This combined technique has first been proposed by Fahrland ("Simulation", vol.14, no.2, February 1970).

Major techniques and methodologies involved in this simulation approach are surveyed. Special aspects considered are numerical behaviour and information processing. It is shown that this technique is applicable to a much larger class of problems than originally suggested by Fahrland.

Simulation techniques are a very broad topic. The subject

dealt with in this thesis covers many facets -- numerical analysis, ordinary and partial differential equations, formal languages, and software design. Since most readers will have the level of familiarity required with only some of these facets, the thesis tries to provide the reader with all the information necessary for understanding the numerical and information processing aspects involved. However, a basic knowledge of continuous system modeling and discrete event modeling are a prerequisite to the understanding of this thesis. Knowledge of simulation languages (like CSMP-III and/or GASP) eases the reading of the sample programs as presented in this thesis, but is not indispensable since one of the highlights of good simulation software is its documentation value.

ZUSAMMENFASSUNG:

Diese Dissertation beschreibt neue Techniken zur digitalen Simulation von Systemen, welche eine komplexe Struktur aufweisen. Ebenfalls beschrieben werden die Werkzeuge (Simulationssprachen), welche zur Verfügung gestellt werden müssen, damit der Benutzer seine Probleme in möglichst bequemer Weise formulieren kann. Der Schwerpunkt der Überlegungen geht dahin, allgemein verwendbare Software zu erstellen. Die beschriebene Software soll daher primär in der Lage sein, breite Klassen von Problemen in suboptimaler Weise zu bearbeiten. Die Lösung jedes beliebigen Problems wird dadurch langsamer und somit teurer, als wenn ein optimaler, dem Problem angepasster Algorithmus zu diesem Zweck entwickelt wurde. Der allgemeinen Verwendbarkeit und Robustheit der Software wird daher ein gewisses Mass an Effizienz bei der Behandlung eines speziellen Problems geopfert. Die dadurch erreichte erhöhte Systemsicherheit und die wesentlich reduzierten Kosten bei der Programmierung eines Anwenderproblems wiegen jedoch diesen Nachteil bei weitem auf.

Obwohl viele Probleme der numerischen Mathematik sowie der Informatik erwaegt und geloest werden mussten, zeugt die verwendete Methodik doch eher von einer ingenieurmaessigen als von einer streng mathematisch exakten Betrachtungsweise.

Der Begriff gemischte Simulationstechnik, wie er in dieser Arbeit verwendet wird, umschreibt eine relativ junge Technik zur Simulation einer Klasse von Systemen, welche Eigenschaften sowohl der kontinuierlichen Simulationstechnik wie auch der ereignisorientierten diskreten Simulationstechnik aufweist, beides Techniken, wie sie seit langem in der digitalen Simulation Verwendung finden. Diese neue gemischte Simulationstechnik wurde erstmals von Fahrland ("Simulation", Bd.14, Nr.2, Februar 1970) beschrieben.

Die in der gemischten Simulation hauptsaechlich verwendeten Techniken und Methoden werden diskutiert. Speziell stehen die Probleme der Numerik und Informatik im Vordergrund. Es wird aufgezeigt, dass die hier beschriebenen Methoden auf wesentlich breitere Problemklassen Anwendung finden koennen, als dies urspruenglich von Fahrland vorgeschlagen worden war.

Die Simulationstechnik ist ein sehr breites Gebiet. Viele Aspekte der numerischen Mathematik, der Behandlung gewoehnlicher sowie partieller Differentialgleichungen, der Theorie formaler Sprachen sowie des Softwareentwurfs finden in dieser Dissertation Beachtung. Da die meisten Leser nur mit einigen dieser Aspekte vertraut sein duerften, will diese Dissertation alle zum Verstaendnis der Numerik sowie der Informatik notwendigen Grundlagen vermitteln. Ein Grundwissen betreffend die Modellierung kontinuierlicher sowie diskreter ereignisorientierter Systeme wird allerdings vorausgesetzt. Kenntnisse in Simulationssprachen (wie CSMP-III und/oder GASP) sind nuetzlich fuer das Verstaendnis der Beispiel Programme, die in dieser Dissertation praesentiert werden. Sie sind jedoch nicht unbedingt erforderlich, liegt doch einer der wesentlichsten Vorzuege von Simulationssprachen in deren dokumentarischem Wert.

RESUME:

La présente thèse décrit de nouvelles techniques pour la simulation digitale de systèmes à structure complexe. Les outils (langages de simulation) qui doivent être à disposition pour permettre à celui qui s'en sert de formuler ses problèmes aussi aisément que possible sont également décrits. Le but poursuivi consiste à produire de la software généralement utilisable, c'est-à-dire que la software décrite doit en premier lieu plutôt permettre de résoudre de manière sous-optimale des classes étendues de problèmes que de résoudre de manière optimale certains problèmes spéciaux. C'est pourquoi on préfère renoncer à un certain degré d'efficacité dans le traitement d'un problème particulier pour augmenter le champ d'application et la solidité de la software. Ce désavantage est cependant largement compensé par l'augmentation de la sécurité du système qui en résulte et le coût fortement réduit de la programmation d'un problème d'application.

Bien que de nombreux problèmes de mathématiques numériques et d'informatique aient dû être posés et résolus, la méthode utilisée considère les choses plus dans l'optique d'un ingénieur que dans celle d'un calcul mathématique strictement exact.

La notion de technique de simulation mixte dont fait usage la présente étude décrit une technique relativement jeune pour la simulation d'une classe de systèmes qui ont des propriétés émanant aussi bien de la technique de simulation continue que de la technique de simulation d'événements discrets, techniques qui sont toutes deux utilisées déjà longtemps dans la simulation digitale. Cette nouvelle technique de simulation mixte a été décrite pour la première fois par Fahrland ("Simulation", tome 14, no 2, Février 1970).

Les techniques et méthodes principalement utilisées en simulation mixte sont décrites. Les problèmes des mathématiques numériques et de l'informatique sont en particulier placés au premier plan. Il est démontré que les méthodes décrites dans cette thèse peuvent être appliquées à des classes de problèmes beaucoup plus étendues que celles proposées à l'origine par Fahrland.

La technique de simulation est un domaine très étendu. De nombreux aspects des mathématiques numériques, de la solution d'équations différentielles ordinaires et partielles, de la théorie des langages formels et du développement de software sont pris en considération dans la présente thèse. La plupart des lecteurs ne connaissant probablement que quelques-uns de ces aspects à fond, cette thèse s'efforce d'exposer les bases nécessaires à la compréhension des mathématiques numériques et de l'informatique. Des connaissances fondamentales au sujet de la dérivation de modèles pour des systèmes continus et d'événements discrets sont toutefois présumées. La connaissance des langages de simulation (tels que CSMP-III et/ou GASP) est utile pour comprendre les exemples de programmes que cette thèse présente. Mais elle n'est pas absolument indispensable, car un des avantages les plus importants des langages de simulation gît dans leur valeur documentaire.