Horst Mehl

**Methoden
verteilter Simulation**

Programm Angewandte Informatik

hrsg. von Paul Schmitz und Norbert Szyperski

Die Reihe hat es sich zum Ziel gesetzt, Studenten, Ingenieure und DV-Praktiker mit zentralen Fragestellungen der Angewandten Informatik vertraut zu machen. Auch wenn in Werken dieser Reihe theoretische Grundlagen vermittelt werden, so stehen sie doch stets in Zusammenhang mit konkreten Anwendungen.

Die Reihe umfaßt sowohl grundlegende Einführungen, die den State-of-the-Art eines aktuellen Fachgebietes zur Darstellung bringen, wie auch speziellere Monographien, sofern sie der o.g. Zielsetzung entsprechen.

Unter anderem sind bisher folgende Titel erschienen:

Agentensysteme

Verteiltes Problemlösen mit Expertensystemen
von M. v. Bechtolsheim

Petri-Netze

Eine anwendungsorientierte Einführung
von B. Rosenstengel und U. Winand

Wissensbasiertes CASE

Theoretische Analyse – Empirische Untersuchung – Prototyp
von G. Herzwurm

Methoden verteilter Simulation

von H. Mehl

Introduction to PEARL

Description with Examples
by W. Werum and H. Windauer

Echtzeitsysteme und Fuzzy Control

Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen
von H. Rzehak (Hrsg.)

Vieweg

Horst Mehl

Methoden verteilter Simulation

Mit einem Geleitwort
von Jürgen Nehmer

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Mehl, Horst:

Methoden verteilter Simulation / Horst Mehl.

Mit einem Geleitw. von Jürgen Nehmer. –

Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1994

(Programm angewandte Informatik)

ISBN 978-3-528-05439-7

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1994

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1994

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Verlagsgruppe Bertelsmann International.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 978-3-528-05439-7 ISBN 978-3-322-90609-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-90609-0

Geleitwort

Diskrete ereignisgesteuerte Simulation ist seit mehreren Jahrzehnten nicht nur im technischen Bereich, sondern auch weit darüber hinaus eine anerkannte und sehr wichtige Analysetechnik, mit der komplexe Abläufe der Realität gezielt untersucht werden können. Eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduzierung des typischerweise hohen Rechenaufwandes von Simulationsexperimenten besteht in einer verteilten, asynchronen Ausführung des Simulationsmodells auf einem Mehrprozessorsystem. Das zentrale Problem bei diesem Ansatz ist die notwendige Synchronisation, mit der die durch die modellierte Realität meist nur implizit vorgegebenen kausalen Abhängigkeiten eingehalten werden.

Dieses Buch gibt eine hervorragende Einführung in das Gebiet verteilter ereignisgesteuerter Simulation. Es vermittelt neben einem umfassenden Überblick über den Stand der Technik auch viele neue Ideen. Bemerkenswert ist insbesondere, daß neben Lösungen für das zentrale Synchronisationsproblem auch andere Probleme betrachtet werden, die durch die Verteilung neu hinzukommen und beim Einsatz verteilter Simulation in der Praxis eine wichtige Rolle spielen. So tritt durch die nichtdeterministische, asynchrone Ausführung von Simulationsmodellen die Schwierigkeit der Reproduzierbarkeit von Simulationsläufen auf, zu dem erstmalig eine Lösung angegeben wird. Auch auf das Problem der Modellierung inhärent globaler Daten wird ausführlich eingegangen.

Prof. Dr. J. Nehmer

04.02.1994

Vorwort

Simulation ist eines der ältesten Einsatzgebiete für Rechner. Die Gründe dafür sind vielfältig. So läßt sich beispielsweise durch Simulation das Verhalten eines geplanten oder auch vorhandenen Systems in einer auf das Wesentliche vereinfachten Nachbildung der Realität — dem *Simulationsmodell* — oft weniger kostspielig, zeitaufwendig oder für den Menschen weniger gefährlich analysieren. Die dabei benötigte Rechenleistung wird traditionell von einem einzigen leistungsstarken Rechner erbracht. Dennoch dauern viele realistische Simulationen sehr lange, so daß sich spätestens seit dem Aufkommen von Mehrrechnersystemen die Frage stellt, ob und wie sich ein Simulationsexperiment durch den Einsatz mehrerer Rechner beschleunigen läßt. Im ersten Teil dieses Buches (Kapitel 1–4) steht die Untersuchung dieser Frage für die sogenannte *ereignisgesteuerte Simulation* im Vordergrund. Dabei wird nach Einführung der zugrundegelegten Terminologie und der grundsätzlichen Funktionsweise ereignisgesteuerter Simulation zunächst ein Abriß prinzipieller Techniken zur Beschleunigung derartiger Simulationsexperimente skizziert (Kapitel 1). Eine dieser Techniken, mit der sich eine große Teilklasse aller Simulationsexperimente vielversprechend beschleunigen läßt, wird *verteilte Simulation* genannt.

In Kapitel 2 wird ein Überblick über verteilte Simulationsverfahren vermittelt. Mittels einer Klassifikation, die sich von der in der Literatur üblichen unterscheidet, werden die wesentlichen Probleme und Lösungskonzepte charakterisiert. Dabei werden die Grundprinzipien, Chancen, aber auch die Defizite bisher entwickelter Methoden aufgezeigt. Um diese, aber auch die in diesem Buch vorgestellten neuen Methoden (siehe Kapitel 2, 4, 5, 7) empirisch untersuchen und fair vergleichen zu können, wurde an der Universität Kaiserslautern die *verteilte Simulationssprache DSL (Distributed Simulation Language)* entwickelt, welche in Kapitel 3 vorgestellt wird. In DSL spezifizierte Simulationsmodelle lassen sich mit unterschiedlichen Simulationsverfahren ausführen, ohne Änderungen am Modell vornehmen zu müssen. Im Anschluß an die Beschreibung des DSL-Systems werden einige Meßergebnisse mit Verfahren aus Kapitel 2 präsentiert. Auf Ergebnisse und vergleichende Bewertungen aus anderen mit dem DSL-System durchgeführten Messungen wird bei der Diskussion der jeweilig verwendeten Simulationsverfahren eingegangen. Da keine der in Kapitel 2 behandelten Methoden

für *alle* Simulationsmodelle optimal ist, wird in Kapitel 4 nach neuen Verfahren gesucht, die unter Beibehaltung der Vorteile die Defizite bisheriger Methoden zu kompensieren versuchen. Exemplarisch für ein solches Verfahren wird eine adaptiv-hybride Methode — die sogenannte *spekulative Simulation* — ausführlich diskutiert.

Im zweiten Teil dieses Buches wird ausführlich auf zwei Probleme eingegangen, die beim Einsatz verteilter Simulation in der Praxis von großer Bedeutung sind. Zunächst wird die *Reproduzierbarkeit* verteilter Simulation trotz nichtdeterministischer Ausführung untersucht. Ihre Sicherstellung ist insbesondere für das Debuggen von Simulationsmodellen und das Auswerten von Simulationsexperimenten von großer Bedeutung. In Kapitel 5 wird ein Algorithmus angegeben, der erstmalig die Reproduzierbarkeit verteilter Simulation gewährleistet.

In den folgenden beiden Kapiteln 6 und 7 wird ein für die verteilte Simulation typisches Modellierungsproblem erörtert, welches aus der Notwendigkeit einer automatischen oder manuellen Partitionierung des Gesamtmodells resultiert. Obwohl eine solche Partitionierung im Prinzip immer möglich ist, stellt sie bei inhärent globalen Daten ein Problem dar, das vom Modellierer oft nur durch Replikation der Daten und aufwendigen Maßnahmen zur Sicherstellung der Konsistenz effizient gelöst werden kann. Dies ist nicht nur fehleranfällig, sondern führt auch aus Software-Engineering-Gesichtspunkten zu schwer wartbaren Simulationsanwendungen. Zur Unterstützung der Modellierung wird daher nach einer für den Benutzer transparenten Realisierung konsistenter gemeinsamer Variablen gesucht. Im Anschluß an einen Überblick über Standardtechniken zur Realisierung eines logisch gemeinsamen Speichers in verteilten Systemen (*Distributed-shared-memory*) wird aufgezeigt, wie sich diese Techniken zur Lösung des obigen Problems auf verteilte Simulation übertragen lassen. Ein Ausblick faßt die wesentlichen Ergebnisse aus diesem Buch zusammen und deutet auf mögliche Weiterentwicklungen des Forschungsgebietes „verteilte Simulation“ hin (Kapitel 8).

Das vorliegende Buch basiert auf meiner am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern vorgelegten Dissertation. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die die Durchführung meiner Promotion gefördert haben. Zuallererst ist hier Prof. Dr. J. Nehmer zu nennen, der durch seine vertrauensvolle Unterstützung und die Schaffung einer angenehmen Atmosphäre in seiner Gruppe das Vorankommen dieses Buches

wesentlich beeinflusste. Sein wissenschaftlicher Rat und seine reiche Erfahrung waren mir sehr wertvoll. Auch möchte ich mich dafür bedanken, daß er mir die Teilnahme an wichtigen Tagungen ermöglichte, die es mir erlaubten, meine Ergebnisse auch mit führenden ausländischen Wissenschaftlern zu diskutieren. Besonderer Dank gebührt auch Professor Dr. F. Mattern, der meine wissenschaftliche Arbeitsweise durch seine konstruktive Kritik maßgeblich geprägt hat. Meinen Kollegen sei gedankt für viele Diskussionen auch über andere Teilgebiete verteilter Systeme. Ferner gilt mein Dank Ralf Reske, Georg Molter und Steffen Reithermann für ihre engagierte Betreuung der Rechenanlage. Schließlich sei auch „meinen“ Studenten für die Implementierung bestimmter Konzepte und die Durchführung einiger Meßreihen gedankt.

Kaiserslautern, Februar 1994

Horst Mehl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Was ist Simulation?	1
1.2	Konventionelle Simulationsmethoden	2
1.2.1	Verschiedene Paradigmen und Weltsichten	2
1.2.2	Sequentielle ereignisgesteuerte Simulation	5
1.3	Parallelisierungsansätze	7
1.3.1	Unabhängige Läufe	7
1.3.2	Parallelisierung von Hilfsfunktionen des Simulators . .	7
1.3.3	Verteilung des Modells	8
2	Verteilte Simulation	15
2.1	Überblick	15
2.2	Konservative Simulationsverfahren	16
2.2.1	Garantie-Arten	20
2.2.2	Garantie-Austauschschemata	29
2.2.3	Kritik an konservativen Verfahren	39
2.2.4	Performanz konservativer Verfahren	40
2.3	Optimistische Simulationsverfahren	45
2.3.1	Grundidee	45
2.3.2	Time-warp	45

2.3.3	Probleme und Lösungsansätze	50
2.3.4	Performanz optimistischer Verfahren	72
3	Realisierung verteilter Simulationsexperimente	75
3.1	Überblick	75
3.2	Die verteilte Simulationssprache DSL	77
3.2.1	Präambel	77
3.2.2	Modelltypbeschreibung	80
3.3	Messungen mit dem DSL-System	88
3.3.1	Die Meßumgebung	88
3.3.2	Verfahrens- und Modellbibliothek für DSL	88
3.4	Simulationsexperimente	91
4	Hybride Methoden	97
4.1	Überblick	97
4.2	Allgemeine Betrachtungen	98
4.2.1	Horizontal-hybride Verfahren	98
4.2.2	Vertikal-hybride Verfahren	102
4.3	Spekulative Simulation	106
4.3.1	Das Grundprinzip	106
4.3.2	Diskussion des Grundprinzips	110
4.3.3	Performanz	129
4.3.4	Das Paradigma spekulativer Berechnungen	138
4.4	Beschleunigung ereignisgesteuerter Simulation — Chancen und Perspektiven	142
5	Reproduzierbarkeit verteilter Simulation	145
5.1	Überblick	145

5.2	Das Determinismus-Problem	147
5.2.1	Typische Probleme	147
5.2.2	Wünschenswerte Eigenschaften von Tie-breaking-Schemata	156
5.3	Deterministische Tie-breaking-Verfahren	158
5.4	Weitere Ideen	164
6	Gemeinsame Variablen in verteilten Systemen	167
6.1	Überblick	167
6.2	Distributed-shared-memory	168
6.2.1	Das Grundproblem	168
6.2.2	Entwurfsentscheidungen	169
6.2.3	DSM-Basisalgorithmen	179
6.2.4	Existierende Implementierungen	189
6.3	Verwandte Konzepte	192
6.3.1	Multi-Cache-Konsistenz	192
6.3.2	Concurrency-control-Algorithmen	193
6.4	Resümee	194
7	Gemeinsame Variablen in verteilter Simulation	197
7.1	Überblick	197
7.2	Das Modell und Definitionen	198
7.2.1	Einige Annahmen	198
7.2.2	Verteilte Simulationsmodelle	198
7.3	Realisierungsmöglichkeiten für gemeinsame Variablen	201
7.3.1	Nicht auf Rollbacks basierende Algorithmen	203
7.3.2	Auf Rollbacks basierende Algorithmen	209
7.3.3	Empirischer Vergleich der Algorithmen	215

7.3.4	Diskussion verwandter Arbeiten	221
8	Ausblick	225
	Literaturverzeichnis	231
	Sachwortverzeichnis	253
	Summary	259