

Real-Time Finite Elements: A Parallel Computer Application

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Alexander Clemens Rhomberg
Dipl. El.-Ing. ETH
born 27th March 1971
citizen of Hausen am Albis, ZH

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Gerhard Tröster, examiner
Dr. Hans Eberle, co-examiner

10th January 2001

Abstract

This dissertation shows that it is possible to use the explicit Finite Element Method in real-time for surgery simulation, achieving yet unknown levels of realism in the simulation of the mechanical behaviour of human organs.

Only well trained surgeons can perform minimally invasive operations. Current training methods, i.e. the inexpensive but ethically questionable operations on pigs, are to be replaced by Virtual Reality based simulators. The surgeon moves manipulators that provide force feedback and expects to feel the reaction of the organs and see their movements on the display.

The modelling of the mechanical behaviour of organs has high computational requirements. To obtain a physically correct simulation, the Finite Element Method (FEM) is used. Movements are calculated by frequently determining new positions of the simulated organs. Stability criteria require a new calculation every $100\mu\text{s}$, in order to obtain a simulation in real-time. At this rate, the fastest processors available in mid 2000 are only able to process about 60 Elements. The performance required to simulate models consisting of several hundred or thousand Elements can be achieved with a parallel computer consisting of several fast processors connected over a high speed network.

In this dissertation, methods are presented to adapt a custom-developed FE program and a parallel computer to each other in order to obtain maximum performance. As the calculations are distributed to several processors, communication between, and synchronisation of, different parts is required. These tasks should take the least possible amount of time away from the FE calculation. In the system described, we maximise the time available for computation by

- hiding the communication latency by overlapping computation and communication,
- analysing the flow of data in order to reduce the amount of information that is communicated,
- optimising communication performance by using application-specific protocols,
- integrating synchronisation into the communication, and

VI

- exploiting the abilities of the network to free the main processors almost completely from work related to communication.

By integrating these methods, the problem can be efficiently distributed to several processors, despite the closely coupled parallel calculation and the short time-steps. Each of the processors accelerates the computation optimally. In this way, we obtain a cost effective solution for the calculation of Finite Elements in real-time.

Zusammenfassung

Diese Dissertation zeigt, dass es möglich ist, die explizite Finite Elemente Methode in der Chirurgie-Simulation in Echtzeit einzusetzen und so das mechanische Verhalten von menschlichen Organen mit einem bisher nicht gekannten Realitätsgrad zu simulieren.

Minimal invasive Operationen unter Verwendung von Endoskopen können nur von geübten Chirurgen durchgeführt werden. Die heute üblichen Ausbildungsmethoden, vor allem das ethisch umstrittene Operieren von Schweinen sollen ersetzt werden durch einen Simulator unter Verwendung von Methoden der Virtuellen Realität. Der Chirurg bewegt Manipulatoren mit Kraftrückführung und erwartet, in Echtzeit die Reaktion der Organe zu fühlen und auf dem Bildschirm zu sehen.

Die Modellierung der Bewegungen der Organe erfordert eine hohe Rechenleistung. Um eine physikalisch korrekte Simulation zu erhalten, wird die Methode der Finiten Elemente (FEM) verwendet. Bewegungen können berechnet werden, indem die Positionen der Organe immer wieder neu ermittelt werden. Durch die Physik gegebene Stabilitätsbedingungen erfordern eine neue Berechnung dieser Positionen alle $100\mu\text{s}$, damit die Simulation in Echtzeit durchgeführt werden kann. Bei dieser Wiederholungsrate benötigt die Berechnung eines einzelnen Elementes bereits eine hohe Rechenleistung. Der schnellste Prozessor, der Mitte 2000 erhältlich war, ist in der Lage, ca. 60 Elemente in Echtzeit zu berechnen. Die Leistung, die benötigt wird, um Simulationen mit mehreren hundert oder tausend Elementen zu berechnen, kann mit einem Parallelrechner bestehend aus vernetzten schnellen Computern erreicht werden.

In dieser Arbeit werden Methoden vorgestellt, wie ein Parallelrechner und das für den Simulator entwickelte FE Programm aneinander angepasst werden können, um die maximale Rechenleistung zu erhalten. Die durch die Parallelisierung benötigte Kommunikation und Synchronisation der einzelnen Prozesse soll einen möglichst kleinen Verlust an Rechenleistung bewirken. Im vorgestellten System maximieren wir die zum Rechnen zur Verfügung stehende Zeit, indem wir

- die Kommunikation und die Berechnungen überlappen,
- durch Analyse des Datenflusses die zu kommunizierende Datenmenge reduzieren,

VIII

- durch eigens entwickelte Protokolle die Kommunikationsleistung für die auftretenden kleinen Datenpakete optimieren,
- die Synchronisation in den Datenaustausch integrieren und
- durch optimalen Einsatz des Netzwerks und durch das Nutzen seiner Möglichkeiten den Prozessor praktisch vollständig von der Kommunikation entlasten.

Durch diese Methoden kann die FE Berechnung trotz der engen Koppelung der Rechnung und der kurzen Zeitschritte auf viele Prozessoren verteilt werden, wobei jeder die Rechnung optimal beschleunigt. Dadurch erreichen wir eine kosteneffektive Lösung zur Berechnung von Finiten Elementen in Echtzeit.