

Implementierungsoptionen und Leistungspotentiale von parallelen Feuerleitalgorithmien auf konventionellen und innovativen Rechnerarchitekturen

Von der Fakultät für Maschinenbau der Helmut-Schmidt-Universität,
Universität der Bundeswehr Hamburg,
zur Erlangung des akademischen Titels eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Inf. André Brahmam
aus Perleberg

Hamburg 2013

Tag der mündlichen Prüfung : 20. Dezember 2013

Hauptreferent : Prof. Dr. -Ing. habil. H. Rothe,
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg

Korreferent : Prof. Dr. -Ing. K. Nixdorff,
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg

Dieses Dokument wurde mit dem Textsatzsystem L^AT_EX 2_ε unter Verwendung von TeX Live erstellt und mit freundlicher Unterstützung der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg gedruckt.

Schriftenreihe Laboratorium Mess- und Informationstechnik

Band 7/2014

André Brahmman

**Implementierungsoptionen und Leistungspotentiale
von parallelen Feuerleitalgorithmen auf konventionellen
und innovativen Rechnerarchitekturen**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2597-2

ISSN 1613-4427

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Eine Investition in Wissen bringt immer noch die besten Zinsen.

Benjamin Franklin
1706 - 1790

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein Dank gilt dem Leiter der Professur für Mess- und Informationstechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Rothe, für die Anregung und Förderung der Arbeit, den steten wissenschaftlichen Gedankenaustausch und die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Nixdorff danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates, das der Arbeit entgegengebrachte Interesse, die geführten Gespräche und die gegebenen Hinweise.

Mein Dank gilt – in alphabetischer Reihenfolge – Lothar Butsch, Nadine Cinar, Dietrich Friemel, Nicole Hennings, Jens Kallweit, Wolfgang Kletz, Kathleen Lamprecht, Reiner Muchow, Kristóf Nagy und Wolfgang Schmidt für die herausragende Unterstützung in Labor und Sekretariat. Ferner möchte ich mich bei Uwe Chalupka, Maria Epp, Martin Gruhlke, Cornelius Hahlweg, Alexander Kuhrt, Matthias Knapp, Peter Kosebaw, Arash Ramezani und Ilya Shaydurov für die vielen interessanten Diskussionen bedanken. Für die gute Zusammenarbeit und angenehme Arbeitsatmosphäre möchte ich mich bei all meinen Kollegen bedanken, dies hat zum Gelingen der Arbeit entscheidend beigetragen.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden bedanken, die stets für mich da waren und mir auch in schweren Phasen die notwendige Unterstützung gaben.

André Brahmman, Hamburg im November 2013

Kurzfassung

Implementierungsoptionen und Leistungspotentiale von parallelen Feuerleitalgorithmien auf konventionellen und innovativen Rechnerarchitekturen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Berechnung von ballistischen Flugbahnen¹. In Folge dessen werden die Differentialgleichungssysteme unterschiedlicher ballistischer Modelle ausführlich vorgestellt. Die Lösung der Differentialgleichungen erfolgt ausschließlich numerisch und unter Verwendung klassischer sowie moderner Integrationsmethoden. Dabei wird jedes Integrationsverfahren hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Implementierbarkeit untersucht und bewertet.

Um eine Kompilierbarkeit auf einer möglichst großen Anzahl verschiedener Rechnerarchitekturen zu gewährleisten, wurden die Implementierungen aller vorgestellten Algorithmen in ANSI-C vorgenommen. Dies ermöglichte eine Laufzeituntersuchung der Feuerleitung auf einem breiten Hardwarespektrum. Darunter befinden sich konventionelle und innovative Architekturen, welche erst seit kurzer Zeit in wissenschaftlichen Berechnungen Verwendung finden. Darüber hinaus werden verschiedene Parallelisierungsmöglichkeiten ausführlich vorgestellt und bewertet.

Ferner erfolgt auch ein Assessment von verschiedenen eingebetteten Systemen und es konnte der Nachweis erbracht werden, dass moderne Mikrocontroller in der Lage sind, eine Feuerleitung auf Basis eines aufwendigen ballistischen Modells zu berechnen. Dabei werden vor allem die notwendigen Echtzeitbedingungen definiert und untersucht.

¹Die berechneten Flugbahnen werden im Folgenden auch als Trajektorien bezeichnet

Abstract

Options of implementation and performance potential of parallel fire control algorithms on conventional and innovative computer architectures

This thesis deals with the calculation of ballistic trajectories. As a consequence, an in detail presentation of differential equations from several ballistic models is given. The solution of the differential equations is exclusively done using classic and modern methods of numerical integration. In the course of that, every shown method is examined with regard to efficiency and ease of implementation.

To ensure a compilability to the largest possible number of different computer architectures, all algorithms are written in plain ANSI-C. This enables a runtime investigation of a fire control software on a wide variety of hardware. Among that hardware are conventional and innovative hardware architectures, which are relatively new in scientific computing. In addition, a detailed discussion of various parallelization options is given. This includes an evaluation of every shown parallelization option.

Furthermore, an assessment of various embedded systems was done and it was possible to provide evidence that modern micro-controllers are able to calculate a fire control solution based on a complex ballistic model. As a result of that, the required real-time conditions were defined and analyzed.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Einführung	1
1.2 Motivation	3
1.2.1 Feuerleitung für den operativen Einsatz	3
1.2.2 Feuerleitung in der Simulation	4
1.3 Bestehende Lösungen	6
1.4 Zieldefinition	7
1.5 Vorgehen	8
2 Technisch-militärische Problematik	10
2.1 Das parabolische Bahnmodell	10
2.2 Das klassische Bahnmodell	13
2.3 6 Freiheitsgrade und das modifizierte Massepunktmodell	18
2.4 Weitere Einflüsse	24
2.4.1 Atmosphäre	24
2.4.2 Luftfeuchtigkeit	28
2.4.3 Wind	31
2.4.4 Modellierung der Erde	32
2.4.5 Abweichung der Mündungsgeschwindigkeit	39

3	Mathematisch-numerische Modellbildung	40
3.1	Berechnung einer Trajektorie	40
3.2	Numerische Integration	42
3.2.1	Einführende Bemerkungen	42
3.2.2	Klassische Integrationsverfahren	43
3.2.3	Extrapolierendes Integrationsverfahren	47
3.2.4	Schrittweitensteuerung	52
3.2.5	Mehrschritt-Integrationsverfahren	57
3.2.6	Abschließende Bemerkungen zu den Integrationsverfahren	61
3.3	Stiftheit der Differentialgleichungen	62
4	Umsetzung auf konventionellen Rechnerarchitekturen	69
4.1	Hardware	69
4.2	Software	70
4.3	Umsetzung der Feuerleitung	72
4.3.1	Modularisierung	72
4.3.2	Speicherverwaltung	73
4.3.3	Sequentielles Konzept eines Feuerleitalgorithmus	74
4.3.4	Paralleles Konzept eines Feuerleitalgorithmus	76
4.3.5	Vektorrechner	83
4.4	Verifikation	84
4.4.1	Geschlossen lösbare Differentialgleichungen	84
4.4.2	Vergleich mit NATO Armaments Ballistic Kernel	88
4.5	Laufzeituntersuchungen sequentielle Trajektorien	91
4.5.1	Hardwareunabhängige Untersuchung	91
4.5.2	Laufzeituntersuchung auf dem Referenzsystem	93
4.5.3	Einfluss der Vektorerweiterungen	95
4.5.4	Bewertung der Integrationsverfahren	96

4.6	Laufzeituntersuchungen Feuerleitung	98
5	Umsetzung auf innovativen Rechnerarchitekturen	101
5.1	Hardware	101
5.1.1	General Purpose Graphics Processing Unit	101
5.1.2	Intel Many Integrated Core Architecture	104
5.1.3	Intel Sandy-Bridge	105
5.1.4	Low Energy Server	106
5.1.5	Field Programmable Gate Arrays	107
5.2	Software	108
5.2.1	Compute Unify Device Architektur	108
5.2.2	Open Computing Language	110
5.2.3	Abschließende Bemerkungen zur Entwicklungssoftware	112
5.2.4	Umsetzung der Feuerleitung	112
5.3	Laufzeituntersuchungen	113
5.3.1	Vergleich aller Plattformen mit dem Referenzsystem	114
5.3.2	Vergleich der Energieeffizienz der Systeme	117
5.3.3	Abschließende Bemerkungen	119
5.4	Sonderabschnitt Brute Force Algorithmen	120
6	Spezielle Randbedingungen auf eingebetteten Systemen	124
6.1	Grundsätzliche Randbemerkungen	124
6.2	Plattformunabhängige Festkommazahlen	126
6.3	Eigene Umsetzung einer mathematischen Bibliothek	127
6.4	Plattformen	129
6.4.1	Parallax Propeller	130
6.4.2	Silabs C8051F020	131
6.4.3	Texas Instruments TMS 320 C6713	132
6.4.4	ARM Cortex A9	133

6.5	Laufzeituntersuchungen	134
6.5.1	Test der Festkommaarithmetik	134
6.5.2	Test der Feuerleitung	136
6.6	Verifikation	139
6.7	Zusammenfassung eingebettete Systeme	140
7	Zusammenfassung und Ausblick	141
8	Anhang	144
8.1	Referenzprojekte	144
8.2	Tableaus zur numerischen Integration	146
8.2.1	Tableau des <i>Fehlberg</i> -Verfahrens:	146
8.2.2	Tableau des <i>Dormand-Prince</i> -Verfahrens :	146
8.2.3	Tableau des <i>Cash-Karp</i> -Verfahrens :	146
8.2.4	<i>Nordsieck</i> -Schema der Konsistenzordnung 5	147
8.2.5	<i>Nordsieck</i> -Schema der Konsistenzordnung 6	147
8.3	Eigenwerte	148
8.3.1	Koeffizientenmatrix 6 Freiheitsgrade	152
	Literaturverzeichnis	158