

Kollisionserkennung für echtzeitfähige Starrkörpersimulationen in der Industrie- und Servicerobotik

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) vorgelegte Abhandlung

Vorgelegt von **Dipl.-Inf. Fabian Aichele** aus München

Hauptberichter: *Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi*

Mitberichter: *Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich*

Institut für Parallele und Verteilte Systeme
der Universität Stuttgart

2014

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Bildverstehen am Institut für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS) der Universität Stuttgart.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Levi für die Betreuung dieser Arbeit, das sehr gute Arbeitsklima in der Abteilung und die Gelegenheit bedanken, als Teil dieser Dissertation ein Industrieprojekt in Kooperation mit der Daimler AG durchführen zu können.

Des weiteren möchte ich mich bei meinem ehemaligen Kollegen Dr. Mario Rossdeutscher und bei Dipl.-Ing. Willi Klumpp für die hervorragende Zusammenarbeit im Lauf dieses Industrieprojekts bedanken.

Ebenso gilt mein Dank meinen jetzigen und ehemaligen Kollegen an der Abteilung Bildverstehen für die stets exzellente Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen im Zusammenhang mit der vorgelegten Dissertation. Besonders zu erwähnen sind Dr. Oliver Zweigle, Kai Häussermann, Daniel Di Marco, Bernd Eckstein und Andreas Koch.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie, und besonders meinen Eltern, für die stets gewährte tatkräftige Unterstützung und Motivation während meines Studiums und meiner Promotion.

Stuttgart, 2014

Fabian Aichele

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	1
Summary	3
1. Einleitung	5
1.1. Motivation	6
1.2. Problemstellung	7
1.3. Ziele der Arbeit	9
1.4. Struktur der Arbeit	11
2. Stand der Technik: Starrkörper-Simulationen in der Robotik	13
2.1. Anwendungsbeispiel in der Industrie-Robotik: Projektstudie zur virtuell unterstützten Steuerungsprogramm-Entwicklung	14
2.2. Anwendungsbeispiel in der Schwarm-Robotik	18
2.3. Weitere Anwendungsgebiete für Starrkörpersimulationen	21
3. Grundlagen zu Starrkörpersimulationen	25
3.1. Anforderungen an Starrkörpersimulationen beim Einsatz in der Robotik	25
3.2. Begriffsdefinitionen	27
3.3. Starrkörpersimulationen	29
3.4. Die Vorfilter-Phase (Broadphase)	32
3.5. Die Objektpaar-Phase (Narrow-Phase)	42
3.6. Schnittstelle zwischen Kollisionserkennung und -behandlung: Kontakt-Punkte	43
3.7. Minimale Kontaktpunkt-Konfigurationen	45
4. Analyse existierender Ansätze zur Kollisionserkennung	53
4.1. Überblick	53
4.2. Polygon-basierte Verfahren	54
4.3. GPU-basierte Umsetzungen polygon-basierter Verfahren	61
4.4. Raumpartitionierungs-basierte Verfahren	77
5. Der eigene Ansatz zur Kollisionserkennung	87
5.1. Überblick	87

5.2. Zur Erzeugung von Konglomeraten	91
5.3. Datenstruktur für Punkt-Hüllen	99
5.4. Datenstrukturen für Raumpartitionierungen	104
5.5. Zur Verwendung von Octrees	105
5.6. Zur Verwendung von k-d-Bäumen	108
6. Umsetzung und Resultate	111
6.1. Details zur GPU-basierten Implementierung des Verfahrens	111
6.2. Das Parallelisierungs-Schema des eigenen Ansatzes	115
6.3. Technische Rahmenbedingungen	118
6.4. Vergleichene Szenarien und Beurteilung des Laufzeitverhaltens des eigenen Verfahrens	123
6.5. Diskussion der Ergebnisse	130
7. Mögliche Erweiterungen	135
7.1. Elastische Objekte - verformbare Geometrien	136
7.2. Dynamische Kollisionserkennung	137
8. Zusammenfassung	139
A. Mechaniksimulationen	143
A.1. Simulationstechnologien	143
A.2. Grundlagen der Kollisionsbehandlung	146
A.3. Kontakt-Konfigurationen zwischen polygonalen Objekten	154
B. Geometrische Grundlagen	161
B.1. Geometrie-Repräsentation	161
B.2. Schnittberechnungen in der Objektpaar-Phase	170
B.3. Bildraum-basierte Verfahren	177
C. Leistungsfähigkeit numerischer Berechnungen auf CPU- und GPU-Prozessoren	183
C.1. Architektur von GPU-Prozessoren	183
C.2. Iterative Mehrkörpersimulation auf GPUs	185
Abbildungsverzeichnis	191
Tabellenverzeichnis	195
Algorithmenverzeichnis	197
Literaturverzeichnis	199