Ein neues Verfahren für die mechanische Simulation in VR-Systemen und in der Robotik

Jan Bender, Matthias Baas, Alfred Schmitt
E-mail: {jbender, baas, aschmitt}@ira.uka.de
Universität Karlsruhe, Institut für Betriebs- und Dialogsysteme
Am Fasanengarten 5, 76128 Karlsruhe

Kurzfassung

Für die mechanische Simulation von Robotern wurde ein neues Verfahren entwickelt.[1] Dieses verwendet zur Lösung der Bewegungsgleichungen für gelenkgekoppelte Starrkörpersysteme kein Numerik-Verfahren wie z. B. Runge-Kutta, sondern basiert auf einer neuartigen Impulstechnik. Bei entsprechender Wahl der Parameter erlaubt das Verfahren hohe Genauigkeit und insbesondere sehr gute Energieerhaltung. Andererseits kann der Rechenzeitbedarf in kritischen Realzeitsituationen extrem reduziert werden, wenn die Parameter entsprechend angepasst werden. Dabei erweist sich das Verfahren als außerordentlich stabil und führt praktisch nie zur Desintegration der mechanischen Modelle. Deswegen ist dieses neue Simulationsverfahren speziell für Implementierungen in VR-Systemen und für die Simulation komplexer, mechatronischer Systeme wie z. B. humanoider Roboter geeignet.

1 Einleitung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB588 „Humanoide Roboter" besteht eine zu lösende Teilaufgabe darin, ein offenes VR-System zu entwickeln, in dem intelligente, mobile Roboter realistisch simuliert, getestet und weiterentwickelt werden können – ohne Vorhandensein von Roboterhardware. Die gestellte Aufgabe ist deshalb sehr anspruchsvoll, weil bei der Simulation u. a. folgende Funktionalitäten abzudecken sind:

(a) Komplexe, dynamische Simulation für starre Körper, Umwelt, Roboterarme, Greifbewegungen und Objektmanipulation durch Roboterhände, Kollisions- und Stoßauflösung
(b) Simulierte Sensorik und Aktuatorik, Servo-Antriebe
(c) „Software in the loop", d. h. die gesamte Software, die das Bewegungsverhalten und die Intelligenz des humanoiden Roboters ausmacht und steuert, muss mit der Simulation zeitsynchron mitlaufen.

Das VR-System wird dadurch „offen", dass Umwelt, Mechanik-Elemente, mobile Roboter usw. durch Skriptsprachen spezifiziert und dann vom VR-System in entsprechende

[1] Gefördert von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft).

Simulationen mit Interaktionsmöglichkeiten umgesetzt werden. Beim Einbinden der Robotersoftware müssen Schnittstellenstandards eingeführt werden, damit bei der Integration neuer Robotersoftware keine Änderungen am VR-System erforderlich werden.

Das VR-System muss insbesondere alle beweglichen Objekte der dynamischen Simulation unterwerfen, wobei (evtl. angetriebene) gelenkgekoppelte Mehrkörpersysteme (z. B. mobile Roboter), Kollisionserkennung und Kollisionsauflösung sowie Reibungseffekte abgedeckt sein müssen. Gesucht ist ein Simulationsverfahren, das sehr anpassungsfähig ist, sich für schnelle Modellabänderungen eignet und das eine einfache Anbindung an Algorithmen für Kollisionserkennung und Kollisionsauflösung ermöglicht.

2 Verwandte Arbeiten

Die dynamisch-kinematische Simulation von gelenkgekoppelten Starrkörpersystemen ist ein wohletabliertes Gebiet mit reichhaltigen Forschungsergebnissen und Anwendungserfahrungen. Daher hier nur wenige Anmerkungen, die mit dem hier vorgestellten Verfahren in Zusammenhang stehen: In [3] werden starre Körper durch eine Ansammlung von Punktmassen beschrieben, wodurch die Bewegungsgleichungen nicht mehr durch die Eulersche Gleichungen gegeben sind, sondern durch die einfachere Gleichung $F(t) = m \cdot \dot{v}(t)$ und zusätzliche Abstandsbeschränkungen. Die Motivation ist hierbei, die analytische Komplexität durch numerische Komplexität zu ersetzen. Zur Lösung der Gleichungen wird ein iteratives Verfahren eingesetzt.

Baraff präsentiert in [4] eine Methode, um Körper mit Zwangsbedingungen in linearer Zeit zu simulieren. Die Methode basiert auf Lagrange-Multiplikatoren und simuliert auf nicht-iterative Weise ein System von Körpern mit azyklischen Zwangsbedingungen in $O(n)$, wobei *n* die Anzahl der Zwangsbedingungen zwischen je zwei Körpern ist. Es können auch Zyklen eingeführt werden, wobei sich die Laufzeit aber auf $O(k \cdot n)$ erhöht (*k* = Anzahl zusätzlicher Zwangsbedingungen, die Zyklen erzeugen dürfen).

Mirtich und Canny schlagen in [1] eine impulsbasierte Methode vor, bei der sämtliche Kontakttypen (kollidierend, rollend, gleitend, ruhend) über Kollisionsimpulse modelliert werden. Allerdings werden dabei nur einzelne Starrkörper, also keine gelenkgekoppelten Systeme behandelt. In den vergangenen Jahren sind viele Arbeiten erschienen über komplexe Kollisions- und Kontaktsituationen zwischen einer Anzahl von Starrkörpern, die auch als beschränkungsbasierte Methoden bezeichnet werden, siehe z. B. [5].

3 Die impulsbasierte, dynamische Simulation

In diesem Abschnitt wird ein neu entwickelter Algorithmus zur dynamischen Simulation von Mehrkörpersystemen vorgestellt. Ein Vorläufer dieses Verfahrens wurde für die Simulation von Massenpunkten entwickelt, bei denen Starrkörper durch Punktmassen mit festen Abstandsbedingungen realisiert wurden [6]. Inzwischen gelang es, das Verfahren wesentlich zu verallgemeinern und auf gelenkgekoppelte Starrkörper zu erweitern. Im Unterschied zu praktisch allen bisher verwendeten Algorithmen wird vermieden, Systeme von Differentialgleichungen numerisch zu lösen, weil dies insbesondere bei größeren, gelenkgekoppelten Systemen mit erheblicher Vorverarbeitung und Aufbereitung der Gleichungssysteme verbunden ist. Der neue Algorithmus arbeitet ausschließlich mit Impulsen.

In dem vorgestellten Algorithmus werden alle an Gelenken einwirkenden kontinuierlichen Kräfte durch Impulseinwirkungen simuliert. Eine im Zeitraum $t \in [t_0, t_1]$ auf eine Masse *m* einwirkende Kraft *F(t)* bewirkt eine Impulsänderung, die durch die Integration des zweiten Newtonschen Gesetzes $F(t) = m \cdot \dot{v}(t)$ beschrieben werden kann:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} F(t)dt = m \cdot \int_{t_0}^{t_1} \dot{v}(t)dt = m \cdot (v(t_1) - v(t_0)) = m \cdot \Delta v$$

Die Einwirkung eines Impulses *I* auf einen Massenpunkt mit der Masse *m* bewirkt also eine sofortige Geschwindigkeitsänderung des Punktes um $\Delta v = I/m$. Analog bedeutet die Einwirkung eines Drehimpulses $D = r \times I$ auf einen Punkt P_k mit dem Ortsvektor *r* (im lokalen Koordinatensystem) eines Körpers *k* mit dem Trägheitstensor J_k eine sofortige Änderung der Winkelgeschwindigkeit um $\Delta w = J_k^{-1} \cdot D$.

Definition: *In einem gelenkgekoppelten Mehrkörpersystem (MKS) von K starren Körpern ist der Körper mit Index $k \in \{1,...,K\}$ zum Zeitpunkt t definiert durch:*

(1) *eine Liste von Punkten $P_{ki}(t) \in \mathbb{R}^3$,*
(2) *seine Gesamtmasse $m_k \in \mathbb{R}$,*
(3) *seinen Schwerpunkt $S_k(t) \in \mathbb{R}^3$,*
(4) *die Geschwindigkeit des Schwerpunktes $\dot{S}_k(t) = \frac{dS_k(t)}{dt} \in \mathbb{R}^3$,*
(5) *die Winkelgeschwindigkeit $w_k(t) \in \mathbb{R}^3$,*
(6) *seinen Trägheitstensor $J_k \in \mathbb{R}^{3\times3}$ (im körpereigenen Koordinatensystem) und*
(7) *seine Rotationsmatrix $R_k(t) \in \mathbb{R}^{3\times3}$, die beschreibt, wie Vektoren aus dem körpereigenen Koordinatensystem in Weltkoordinaten transformiert werden.*

Außerdem ist für das gesamte MKS eine Liste $L := \{..., (P_{k_1 i_1}, P_{k_2 i_2}), ...\}$ von Gelenkpunktpaaren definiert, wobei gefordert ist, dass der Punkt $P_{k_1 i_1}$ und der Punkt $P_{k_2 i_2}$ sich stets am gleichen Ort befinden müssen.

Für die kurze Vorstellung des Verfahrens werden nur Kugelgelenke betrachtet. Das Kugelgelenk $(P_{k_1 i_1}, P_{k_2 i_2})$ verbindet den Punkt i_1 des Körpers k_1 mit dem Punkt i_2 des Körpers k_2 und hat drei Freiheitsgrade. Das Verfahren kann leicht um weitere, in der dynamischen Simulation verwendeten, Gelenktypen erweitert werden.

Definition: *Das MKS befindet sich zum Zeitpunkt t in einem <u>konsistenten</u> Zustand, wenn gilt:*

$$\forall (P_{k_1 i_1}, P_{k_2 i_2}) \in L : \left| P_{k_1 i_1}(t) - P_{k_2 i_2}(t) \right| \leq D_{\max} \ ,$$

wobei $D_{\max}$ *eine kleine Konstante ist (z. B.* $D_{\max} = 10^{-6}$*), die den maximal zwischen zwei Gelenkpunkten tolerierten Abstand festlegt.*

Grob umschrieben verläuft das Simulationsverfahren wie folgt: Zum Zeitpunkt t unterstellen wir, dass sich das MKS in einem konsistenten Zustand befindet und dass alle oben genannten Positions- und Bewegungsdaten bekannt sind. Die einzelnen Körper werden nun ohne Gelenkkräfte, aber mit evtl. vorhandener Schwerkraft auf ballistischen Bahnen vorwärts bewegt bis zum Zeitpunkt $t+h$. Bei dieser Vorausschau wird erkannt, welche Gelenkpunkte zu große Abstände haben werden und nicht mehr konsistent wären. Solche Gelenkpunktepaare werden nun iterativ korrigiert, indem zum Zeitpunkt t die beteiligten Körper durch Korrekturimpulse so in ihrem Bewegungszustand verändert werden, dass die Gelenkbedingungen zum Zeitpunkt $t+h$ erfüllt sind. Ist dies für alle Gelenke gelungen, so kann die Zeitfortschaltung von t nach $t+h$ erfolgen. Dabei bewegen sich die einzelnen Starrkörper auf ballistischen Bahnen, also ohne Gelenkkräfte vorwärts. Die bei Lösung von Differentialgleichungen implizit mitgerechneten kontinuierlichen Gelenkkräfte werden also hier durch Korrekturimpulse zu Beginn des Integrationsintervalles ersetzt.
Im Einzelnen wird wie folgt verfahren:
1. Bestimmung der Korrekturimpulse: Solange (während der Iteration) noch ein Gelenk $(P_{k_1 i_1}, P_{k_2 i_2}) \in L$ existiert, für das die Gelenkbedingung

$$\left| P_{k_1 i_1}(t+h) - P_{k_2 i_2}(t+h) \right| \leq D_{\max}$$

nicht erfüllt ist, bestimme einen geeigneten Impuls I, der dafür sorgt, dass die Differenz $P_{k_2 i_2}(t+h) - P_{k_1 i_1}(t+h)$ sehr klein wird.
Aktualisierung der Bewegungsdaten:

- $w_{k_1}(t) := w_{k_1}(t) + \tilde{J}_{k_1}^{-1} \cdot ((P_{k_1 i_1}(t) - S_{k_1}(t)) \times I)$, $\dot{S}_{k_1}(t) := \dot{S}_{k_1}(t) + I/m_{k_1}$
- $w_{k_2}(t) := w_{k_2}(t) + \tilde{J}_{k_2}^{-1} \cdot ((P_{k_2 i_2}(t) - S_{k_2}(t)) \times (-I))$, $\dot{S}_{k_2}(t) := \dot{S}_{k_2}(t) - I/m_{k_2}$

Die Matrix $\tilde{J}_k^{-1} = (R_k \cdot J_k \cdot R_k^T)^{-1}$ ist dabei die Inverse des Trägheitstensors in Weltkoordinaten. Die Bestimmung der Korrekturimpulse wird iterativ fortgesetzt bis alle Gelenkbedingungen erfüllt sind.
2. Fortschaltung nach *t+h*: Die Bewegung eines starren Körpers ohne das Einwirken von externen Kräften kann mit Hilfe der Euler-Gleichung (im körpereigenen Koordinatensystem)

$$\dot{w}(t) = -J^{-1} \cdot (w(t) \times (J \cdot w(t)))$$

für die Rotation und Newtons zweitem Gesetz für die Bewegung des Schwerpunktes beschrieben werden. Die Differentialgleichungen von Euler können mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung mit beliebiger Genauigkeit gelöst werden.

Das bei der Impulskorrektur angewandte, iterative Verfahren hat sich sehr bewährt. Korrekturimpulse greifen stets nur an einem (konsistenten) Gelenkpunktepaar an, und zwar entgegengesetzt. Solche Impulspaare verändern die Gesamtenergie des MKS nicht, sie haben auch keinerlei rotatorische oder translatorische Einflüsse. Bei gutartigen Mechanikmodellen ohne Kraftasymptoten konvergiert die iterative Lösung gegen die exakte Lösung, sofern man die Schrittweite h und den maximalen Abstand D_{max} entsprechend verkleinert.

Insbesondere besteht bei diesem Verfahren ein nahtloser Anschluss an die in der Literatur bekannt gewordenen kollisionsauflösenden Verfahren, weil diese praktisch ausnahmslos mit Impulseinwirkungen operieren, wie z. B. das weithin bekannt gewordene Verfahren von Mirtich und Canny [1]. Außerdem ist es von großem Vorteil, dass man die Mechanikmodelle nur strukturell definieren muss, also ohne jede Aufbereitung für die Kinematik und Dynamik.

4 Ergebnisse

Das Simulationsverfahren wurde in einer Vorläuferversion (Massenpunkttechnik) schon an einer größeren Zahl von Mechanik-Modellen bis hin zu Roboterarmen (siehe Abbildung 2) getestet.

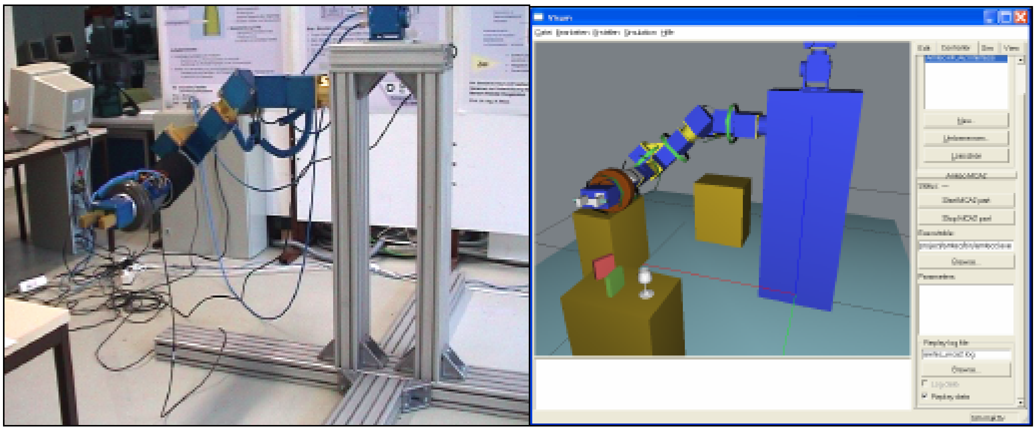

Abbildung 2: Amtec Roboterarm [2], Realität und Simulation

Die aktuelle mit Starrkörpern als Elementarobjekten arbeitende Version hat sich verglichen mit Standardverfahren auf der Basis von Differentialgleichungen als sehr stabil erwiesen: Die iterative, auf ständige Erfüllung der Gelenkbedingungen ausgerichtete Vorgehensweise ist sogar in der Lage, ein völlig desintegriertes, gelenkgekoppeltes Mechanik-Modell wieder automatisch zusammenzusetzen, bei stets gleich bleibendem Grundalgorithmus. Speziell für Realzeitanwendungen ist ein solches Verhalten sehr erwünscht, denn so können Rechenzeitengpässe ohne schwerwiegende Folgen überwunden werden. Bei einer Realzeitsimulation kann bei extremem Zeitstress auf einen einzigen Durchgang durch die iterative Korrekturschleife zurückgeschaltet werden. Versuche haben gezeigt, dass gelenkgekoppelte Körper trotz Reduktion der Korrekturschritte nicht auseinanderdriften, allerdings werden sie ein wenig gedämpft.

Messungen haben ergeben, dass auf einem aktuellen PC mit 1,7 GHz 200.000 Korrekturschritte pro Sekunde ausgeführt werden können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neues, impulsbasiertes Verfahren zur dynamischen Simulation von gelenkgekoppelten Mehrkörpersystemen vorgestellt. Durch die iterative Vorgehensweise des Verfahrens wird vermieden, Differentialgleichungssysteme aufzustellen. Der beschriebene Algorithmus wurde bisher ausschließlich für Studienzwecke implementiert und ersten Leistungstests unterzogen.

Danksagung
Wir möchten uns ganz besonders bei Jens Wittenburg bedanken für sein Interesse und seinen wertvollen Rat in Fragen der Mechanik. Ebenso geht unser Dank an D. Finkenzeller, S. Thüring, St. Preuß und G. Stelzner für manche interessante Diskussion.

6 Literatur

[1] *Brian Mirtich and John Canny*: Impulse-based Simulation of Rigid Bodies. Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey, Cal., April 1995.

[2] *Amtec robotics GmbH*: http://www.amtec-robotics.com (Juli 2003)

[3] *C. van Overveld, B. Barenbrug*: All you need is force: a constraint-based approach for rigid body dynamics in computer animation. In D.Terzopoulos and D.Thalmann, editors, Proceedings of Computer Animation and Simulation '95, Springer Computer Science, pages 80-94. Springer, 1995.

[4] *David Baraff*: Linear-time dynamics using lagrange multipliers. In Computer Graphics (SIGGRAPH 96 Proceedings), pages 137–146, 1996.

[5] *J. Sauer, E. Schömer*: A constraint-based approach to rigid body dynamics for virtual reality applications, ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST'98, S. 153-161.

[6] *A. Schmitt, S. Thüring:* Ein vereinfachtes numerisches Verfahren für die mechanische Simulation in Virtual-Reality-Systemen, Interner Bericht 2000-26, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe.
http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/ira/2000/26/26.pdf (Juli 2003)