

ChainTube: Modellierung und Manipulation von deformierbaren schlauchähnlichen Objekten in einer Virtual Reality-Trainingsumgebung

*Wolfram Schoor, Hanna von Tenspolde, Rüdiger Mecke
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)
{wolfram.schoor, hanna.tenspolde, ruediger.mecke}@iff.fraunhofer.de

†Bernhard Preim
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
preim@isg.cs.uni-magdeburg.de

Zusammenfassung

Die Modellierung und Simulation von deformierbaren, insbesondere von schlauchähnlichen Objekten innerhalb von Virtual Reality (VR)-Umgebungen spielt in vielen industriellen Bereichen eine immer größer werdende Rolle. Der Einsatz effizienter Deformationsmodelle speziell auf dem Sektor Training ist jedoch zur Zeit nur bedingt gegeben. In diesem Paper wird deshalb die Umsetzung eines interaktiven und echtzeitfähigen Deformationsmodells für flexible schlauchähnliche Objekte vorgestellt, welches auf der Grundlage des geometrisch basierten Chainmail-Algorithmus[´] von Gibson entwickelt wurde. Das Ziel ist hierbei nicht die physikalische Korrektheit des Modells, sondern die Realisierung visuell plausibler und somit glaubwürdiger Simulationsergebnisse für Szenarien mit maximal 50 schlauchähnlichen Objekten. Das entwickelte Konzept wurde exemplarisch in eine etablierte VR-Trainingsplattform integriert und getestet, ist jedoch universell auch auf andere VR-Systeme übertragbar.

Schlüsselwörter: Simulation und Modellierung flexibler 3D-Objekte, Chainmail, geometrische Deformation, VR-Trainingsumgebung

1 Motivation

Die Modellierung und Simulation von realitätsnahen VR-Trainingszenarien in Anwendungsbereichen wie der Automobilbranche ([GS06], [HD00], [Rab02]), der Medizintechnik ([CK00], [CMS⁺02], [SMR06]) oder im Multimedia-/Marketingbereich [Bar97] umfasst oftmals auch die Integration von biegsamen Kabeln oder weiteren schlauchähnlichen

*Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, D-39106 Magdeburg, Germany

†Fakultät für Informatik, Otto-von-Guericke Universität, D-39106 Magdeburg, Germany

Objekten. Speziell in Einbau-, Wartungs- und Instandhaltungsszenarien ist eine Simulation dieser Objekte für den Trainingserfolg und die „visuelle Akzeptanz“ unerlässlich (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Schlauchobjekte in Trainingsszenarien zur Qualifizierung von Servicetechnikern am Airbus 320; Tankschlauch an der Unterseite des Flugzeugrumpfes (links) und Kabel (schwarz) mit Steckverbinder innerhalb der Tragfläche (rechts) [Sch05]

Zur effizienten Modellgenerierung und anschließenden Simulation des Objektverhaltens deformierbarer Geometrien in virtuellen Umgebungen wurde ein entsprechendes Verfahren entwickelt [vT06], das die Basis für die vorliegende Veröffentlichung bildet. Als Verfahren, welches eine echtzeitfähige und interaktive Manipulation schlauchähnlicher Objekte erlaubt, wird in diesem Paper eine Abwandlung des 3D-Chainmail-Modells nach Gibson [Gib97] vorgestellt und im nachfolgenden Abschnitt die Auswahl begründet.

2 Verwandte Arbeiten

Um die Auswahl des 3D-Chainmail-Modells nachvollziehen zu können, müssen zunächst die Anforderungen an das Verfahren zur Deformation schlauchähnlicher Objekte klar herausgestellt werden. Diese umfassen:

- eine einfache Modellgenerierung und Manipulation der Schlauchobjekte
- ein nachvollziehbares Deformationsverhalten anhand verständlicher Deformationsparameter
- keine Einschränkung der Schlauchsteifigkeiten
- mit visuell plausiblen Resultaten auch bei starken Deformationen
- in angestrebter Echtzeit.

Neben dem 3D-Chainmail-Modell existieren zweifelsohne eine Vielzahl weiterer Ansätze zur Simulation deformierbarer Objekte, die auf den Grundlagen von Terzopolous et al. [TPBF87], [TF87] aufbauen. Ein genereller Überblick zu Deformationsmodellen ist in [NMK⁺06], [GM97] und [MT96] nachzulesen. Die Modelle unterscheiden sich im Wesentlichen in Hinblick auf ihre Funktionsweise (physikalisch oder geometrisch basiert) und in ihrer zugehörigen Struktur (Oberflächenmodelle, Volumenmodelle, etc.). Einer der bekanntesten Vertreter ist das Feder-Masse-Modell als Generalisierung der Partikelsysteme [GMT03] und [LS01]. Die Objekte setzen sich hier aus einer Anzahl von Massepunkten zusammen, die mittels Federelementen verbunden werden. Die jeweilige Deformation ergibt sich aus der Kraft, die auf das Objekt einwirkt. Die Methode ist physikalisch basiert, liefert demzufolge visuell plausible Ergebnisse und läßt sich einfach implementieren. Echtzeitdeformationen sind im Allgemeinen möglich, hängen jedoch von der Anzahl der Massepunkte, dem verwendeten Verfahren zum Lösen der Differenzialgleichungen und der verwendeten Hardware ab. Die Wahl der Parameter zum Einstellen des Deformationsverhaltens sind jedoch nicht trivial und erschweren somit eine intuitive Steuerung des Deformationsverhaltens. Starke Deformationen oder die Simulation steifer Objekte können zudem zu unrealistischen Verformungen führen [VBB⁺06]. Ein weiterer bekannter Vertreter ist die Finite-Elemente-Methode (FEM), die auf der Kontinuums Theorie beruht [ZGHD00] und aufgrund ihrer hohen Komplexität (für ein höheres Maß an Genauigkeit) in der Regel langsamer in ihrer Berechnung als die Feder-Masse-Modelle sind. Diesem Nachteil wird z.B. durch die Verwendung von Multiresolutions-Approximationen versucht entgegenzuwirken [CGC⁺02]. Das generelle Funktionsprinzip der FEM besteht darin, das Objekt in ein Netz einfacher Elemente zu unterteilen z.B. Tetraeder und den Elementen die Deformationsparameter zuzuweisen (z.B. der Elastizitätsmodul). Diese Parameter können durch Referenzversuche an realen Materialien gewonnen werden und liegen dann in speziellen Materialtabellen vor. Das Verhalten der unterteilten Elemente wird über eine Ansatzfunktion (z.B. kubisch) berechnet, die die Verschiebungsfunktion approximiert. Nach der Diskretisierung erfolgt die Berechnung über alle Teilelemente mittels numerischer Verfahren durch Energieminimierung [VBB⁺06]. Sowohl der Rechenaufwand als auch die Genauigkeit sind abhängig von der Qualität und Feinheit der Diskretisierung, der Wahl der Ansatzfunktionen, der Stärke der Deformationen, eventuell auftretenden Topologieänderungen und den verwendeten numerischen Methoden zum Lösen des Gleichungssystems, so dass keine generelle Aussage über die Effizienz des Verfahrens möglich ist [Del98].

Speziell im Bereich der schlauchähnlichen deformierbaren Objekte sind die Arbeiten von [GMT03], die ein zweischichtiges Feder-Masse-System benutzen, besonders relevant. In diesem Ansatz wird eine Schicht als Basisnetz zur globalen Bewegungsbestimmung und ein Oberflächennetz zur elastischen Deformation der schlauchähnlichen Objekthülle eingesetzt (vgl. Abb. 2 links). Auch [GS06] (siehe Abb. 2 rechts unten) mit einem Cosserat Modell (auf einem Feder-Masse-System basierend) und [CGC⁺02] mit einem FEM-Ansatz in Kombination mit Multiresolutions-Approximationen (vgl. Abb. 2 rechts oben) setzten demzufolge mit ihren aktuellen Arbeiten im Bereich schlauchähnlicher Objekte Impulse, insbesondere in Hinblick auf die erreichte Echtzeitfähigkeit und die visuell plausiblen Ergebnisse.

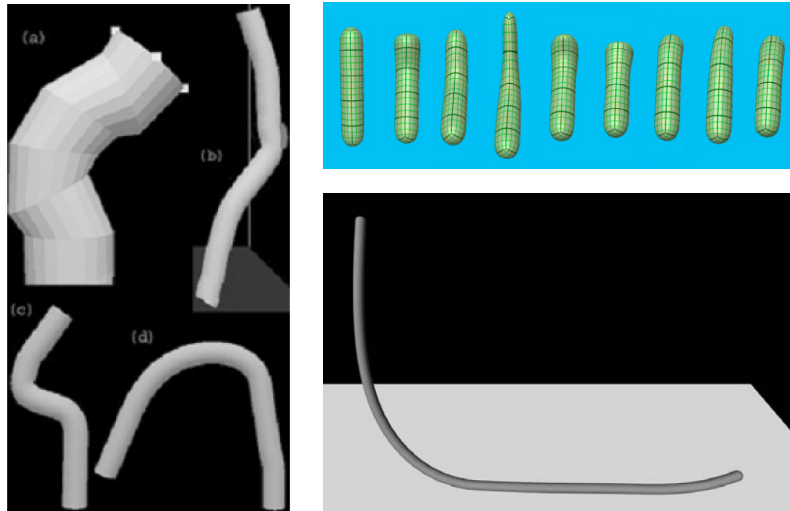


Abbildung 2: Vergleichsarbeiten: links [GMT03] Veranschaulichung des Polygonnetzes (a), Schlauchdeformation bei Kollision (b), Auswirkungen unterschiedlicher Parameter (c) und (d); rechts oben [CGC⁺02] Deformation eines zylinderähnlichen Objektes zu verschiedenen Simulationszeitpunkten und rechts unten [GS06] Deformation eines Kabels bei Bodenberührung

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass 3D-Chainmail-Modell und Feder-Masse-Systeme aufgrund ihrer Echtzeitfähigkeit und der Manipulations- und Adaptionmöglichkeiten für die Aufgabenstellung besser geeignet sind als FEM-Ansätze. Die FEM-Ansätze zeichnen sich jedoch durch sehr realistische Deformationsergebnisse und ein nachvollziehbares Deformationsverhalten angesichts einfacher Deformationsparameter aus. Das 3D-Chainmail-Modell läßt sich im Vergleich zum Feder-Masse-System sehr effizient berechnen in $O(n)$ [Wag03]. Ein weiterer Nachteil der Feder-Masse-System ist, dass die Parameter der Federkonstanten und das topologische Design mitunter nicht trivial bestimmbar sind und numerische Effekte, insbesondere bei starken Deformationen, visuelle Artefakte hervorrufen können. Die Beschränkung des 3D-Chainmail-Modells auf Rechtecksnetze ist in Hinblick auf den Anwendungskontext ein Nachteil, die Einstellung der Deformationsparameter im Vergleich zu anderen geometrischen Deformationsmodellen jedoch ein wesentlicher Vorteil.

3 Adaption des 3D-Chainmail-Algorithmus

Wie bereits beschrieben, sind im vorliegenden Anwendungskontext echtzeitfähige Modelle erforderlich. Deshalb wurde wie oben beschrieben auf Ansätze des 3D-Chainmail-Algorithmus zurückgegriffen. Diese erlauben eine Effizienzsteigerung bei der Simulation von deformierbaren Objekten gegenüber herkömmlichen Verfahren (z.B. FEM). Für

schlauchförmige Objekte wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Adaptionen vorgenommen. Der ursprüngliche 3D-Chainmail-Algorithmus von Gibson [Gib97] geht von einer Anordnung der Punkte in einem Rechtecknetz (Kettengliedern) aus und prüft nach jedem Manipulationsschritt eines Punktes die Abstände zu sämtlichen Nachbarn. Werden die Freiheitsgrade, d.h. die zulässigen Abstände pro Koordinatenrichtung über- bzw. unterschritten, kommt es zu einer Anpassung dieser Nachbarpunkte und einer Fortpflanzung der Deformation. Es ist aus der Funktionsweise ersichtlich, dass das Verfahren auf der reinen Geometrie arbeitet und keinen physikalisch korrekten Ansatz darstellt. Visuell plausible Ergebnisse können hiermit jedoch in Echtzeit berechnet werden. Die zwei Translationsfreiheitsgrade, die sich für den 2D-Fall ergeben, sind in der Abbildung 3 durch blaue Pfeile dargestellt.

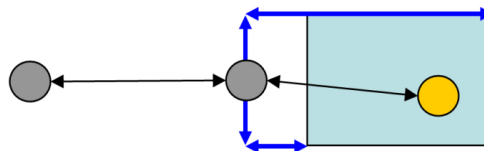


Abbildung 3: 2D-Chainmail; hellblaue Fläche kennzeichnet Freiheitsgrade eines Punktes

Dieser Ansatz ist für die hier betrachteten schlauchähnlichen Objekte nicht optimal, da aufgrund der frei wählbaren Lage und Rotation des Schlauchobjektes im dreidimensionalen Raum eine Überprüfung auf Abstände bzgl. der kartesischen Koordinatenrichtungen nicht ausreichend ist. Um die Beschränkung auf Rechtecknetze aufzuheben, wurden die Abstandsüberprüfungen pro Koordinatenrichtungen durch euklidische Abstände ersetzt. Der erste Deformationsparameter ist demzufolge der *Ausdehnungskoeffizient* (Translationsfreiheitsgrad), der den maximalen gültigen Ausdehnungsbereich eines Punktes in Relation zu einem Nachbarpunkt prozentual zu deren initialen Abstand in Längsrichtung beschreibt. War beispielsweise der initiale Abstand zweier Nachbarpunkte 10 mm und der angegebene Ausdehnungskoeffizient beträgt 20% , so entspricht der minimale Abstand während der Deformation 8 mm und der maximale 12 mm . Zudem erfolgt eine Überprüfung auf Winkel zwischen den Achsstrecken, um die Biegsamkeit des Objekts in Querrichtung nachzubilden. Der *Auslenkwinkel* (Rotationsfreiheitsgrad) beschreibt analog zum Ausdehnungskoeffizienten die Differenz zwischen initialem 180 Grad -Winkel und dem minimal zulässigen Winkel benachbarter Achsstrecken (holonome Zwangsbedingung). Somit ergeben sich die in Abbildung 4 dargestellten Freiheitsgrade für Nachbarpunkte anhand der jeweiligen materialspezifischen Deformationsparameter (Ausdehnungskoeffizient und Auslenkwinkel). Ein typischer Bereich für den Auslenkwinkel liegt bei den in diesem Paper betrachteten Objekten bei ca. $20\text{--}60\text{ Grad}$. Der Ausdehnungskoeffizient entspricht zwischen 0% und 40% .

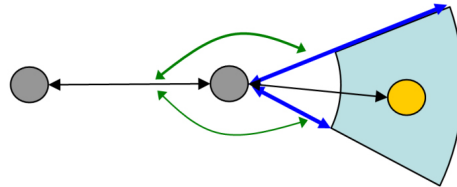


Abbildung 4: Freiheitsgrade des Punktes (hellblauer Bereich), eingeschränkt durch Ausdehnungskoeffizienten (blaue Vektoren) und Auslenkwinkel (grüne Pfeile)

4 Entwicklung des Deformationsalgorithmus

Auf Grundlage der im vorangegangenen Absatz getroffenen Annahmen soll nachfolgend die Funktionsweise des entwickelten Algorithmus grafisch verdeutlicht werden. Der Algorithmus betrachtet dabei zwei verschiedene Modellstrukturen (Hauptachse und Oberfläche) getrennt voneinander, ähnlich des Ansatzes nach di Giacomo et al. [GMT03]. Dabei wird immer mit der Anpassung der Hauptachsenpunkte begonnen und im Anschluss daran die Oberfläche um den Achsenabschnitt gespannt.

4.1 Hauptachsendeformation

Ausgangspunkt ist die generierte Geometrie in initialer Ausgangsposition und deren schematische Betrachtungsweise in Abbildung 5.

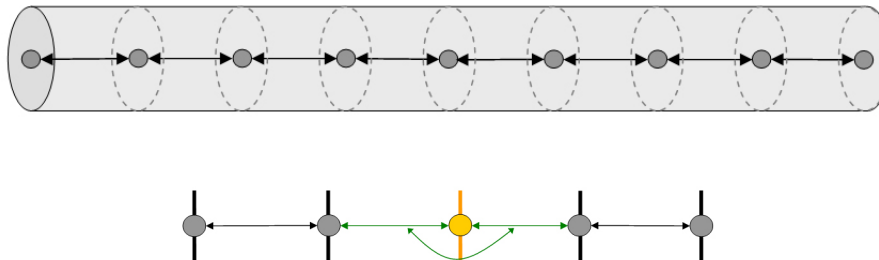


Abbildung 5: Initiale Ausgangsposition des zu deformierenden Schlauchobjekts (oben) und Schematische Darstellung der Hauptachse in Ausgangslage (unten)

Sobald ein Achsenpunkt (*orange* dargestellt) des Objektes durch externe Einwirkungen wie z.B. Nutzerinteraktion verschoben wird, vgl. Abbildung 6, werden Ausdehnungskoeffizient und Auslenkwinkel überprüft und der Punkt gegebenenfalls so angepasst, dass er innerhalb des gültigen Bereichs liegt.

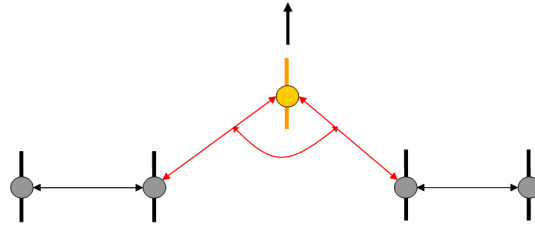


Abbildung 6: Einwirkung von Nutzerinteraktionen auf einen Achspunkt

Die Anpassung der Länge der Strecken zwischen Achsenpunkten geschieht durch Verschieben des linken Nachbarpunktes entlang des grünen Vektors, maximal jedoch bis die maximale/minimale Ausdehnung erreicht ist. Der Vorgang für den rechten Nachbarpunkt erfolgt analog (siehe Abbildung 7).

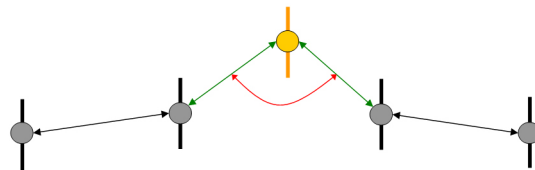


Abbildung 7: Verschiebung der benachbarten Punkte entlang der grünen Vektoren

Zur Anpassung des Winkels der benachbarten Strecken (Ringscheiben in 3D) erfolgt eine Rotation beider Nachbarpunkte um den orange markierten Ausgangspunkt, bis ein Winkel erreicht ist, der innerhalb des Freiheitsgrades liegt (Abbildung 8).

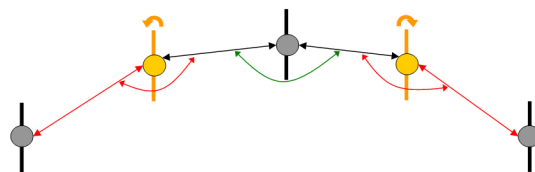


Abbildung 8: Rotation bis zur Winkellage innerhalb des Freiheitsgrades

Nachdem eine Anpassung erfolgte, wird von dem bewegten linken bzw. rechten Nachbarpunkt aus in die entsprechenden Richtungen, der noch nicht berechneten Punkte iterativ fortgefahren. Dazu werden die Längen- und Winkelbedingungen der jeweiligen Nachbarn überprüft und angepasst, bis alle Bedingungen erfüllt sind oder das Ende der Achse erreicht ist (vgl. Abbildung 9).

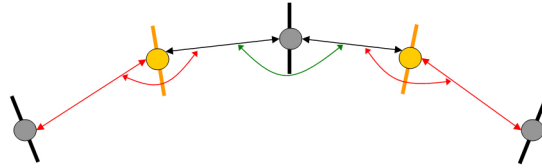


Abbildung 9: Endposition des Objekts nach Deformation der Hauptachse

4.2 Oberflächendeformation

Im Anschluss an jede Anpassung eines Achsenpunktes werden die zugehörigen Oberflächenpunkte verschoben, wobei der Achsenpunkt den Mittelpunkt bildet.

Die Stellung jedes Ringquerschnitts wird dahin gehend bestimmt, dass er senkrecht auf der Ebene der umgebenden Achsstrecken und winkelhalbierend zu den selben Strecken positioniert wird. Der Anpassungsschritt der Ringquerschnitte und seiner Oberflächenpunkte berechnet zunächst die Normale n_p der Ebene, die sich aus zwei benachbarten Achsstrecken ergibt (Kreuzprodukt). Die Rotation um n_p erfolgt um den Winkel α , der die Winkelhalbierende aus der Differenz von 180 Grad Winkel und dem eingeschlossenem Achswinkel darstellt (vgl. Abbildung 4.2 und Formel 1).

$$\alpha = \frac{180^\circ - \angle p_{n-1}p_n, p_n p_{n+1}}{2} \quad (1)$$

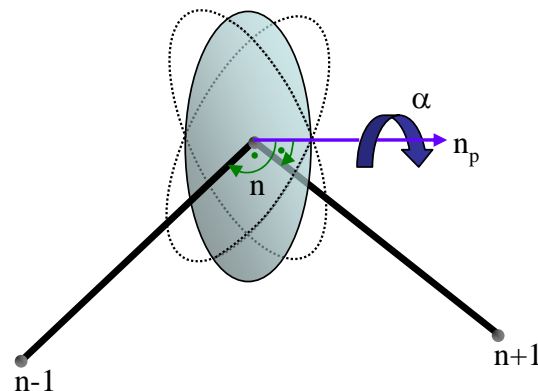


Abbildung 10: Anpassung der Ringquerschnitte (gestrichelte Linie) zum gemittelten Ringquerschnitt (hellblau) durch Rotation um n_p mit dem Winkel α

Um möglichen Eigenverdrehungen (Torsionen) entgegenzuwirken, erfolgt zusätzlich eine Rotation um die Normale des Querschnittes n_q mit dem Winkel β (vgl. Abbildung 11),

so dass die Projektionen der beiden Ausrichtungsvektoren auf der Ebene des konstruierten Ringquerschnitts aufeinander abgebildet werden. Die Ausrichtungsvektoren kennzeichnen den relativen Oberflächenursprung eines Schlauchsegmentes, an dem die Oberflächengeometrie ausgerichtet wird.

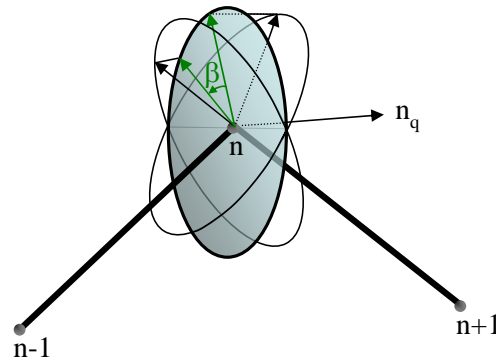


Abbildung 11: Behandlung der Eigenverdrehungen durch aufeinander Abbilden der Ausrichtungsvektoren

5 Evaluierung und Ergebnisse

Das entwickelte Deformationsmodell wurde unter verschiedenen Bedingungen mit variierenden Deformationsparametern (Ausdehnungskoeffizient und Auslenkwinkel) in unterschiedlichen Szenarien getestet. In nachfolgender Abbildung 12 ist der Einsatz des Deformationsmodells in einem VR-basierten Ausbildungsszenario im medizinisch-technischen Kontext dargestellt. Das entwickelte Deformationsverfahren zeichnet sich durch eine gute Performance aus. Entsprechende Ergebnisse von Testläufen sind als durchschnittliche Werte während der Interaktion mit den Modellen in Tabelle 1 aufgelistet, die native Bildwiederholrate des Trainingssystems betrug 28 fps auf der getesteten Hardware¹.

Schlauchpolygone	Radius (cm)	Länge (cm)	Leeres Szenario ² (fps)	Test Szenario ³ (fps)
ca. 2000	0,1	5	42	17
ca. 4000	0,05	7	25	15
ca. 8000	0,04	13	14	11

Tabelle 1: Performance der implementierten Lösung

¹Testkonfiguration: Intel Xeon 1, 5GHz mit 1GB Ram und einer GeForce 3 Ti 500 unter Windows XP

²nur Schlauchobjekt im Szenario vorhanden

³TestszENARIO mit ca. 340000 Polygonen und nativer Bildwiederholrate von 24 fps

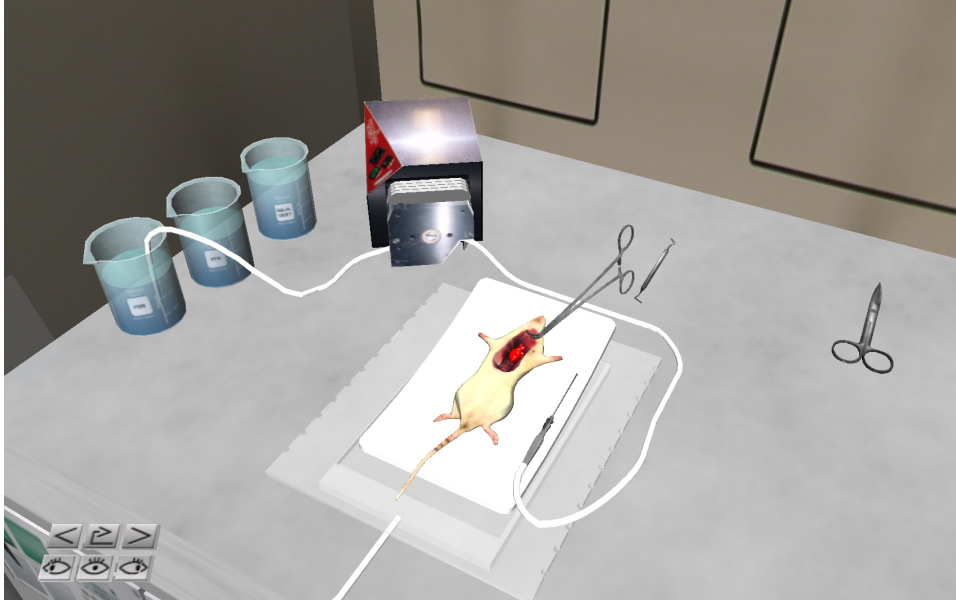


Abbildung 12: Einsatz des ChainTube-Modells innerhalb eines medizinisch-technischen Ausbildungsszenarios

Mit der entwickelten Lösung sind sowohl steife als auch flexible Objekte visuell plausibel simulierbar. Die Modellgenerierung von Schläuchen ist anhand weniger Parameter (Durchmesser, Länge und Materialeigenschaften) mit sehr geringem Zeitaufwand durch Nutzung einer Bedienoberfläche möglich, auch die initiale Positionierung ist durch eine intuitive Interaktion mit dem Schlauchobjekt in der 3D-Umgebung leicht handhabbar. Die Zeitdauer zur Modellierung schlauchähnlicher Objekte sowie der Aufwand zur Deformation dieser Objekte während der Laufzeit wurde gegenüber herkömmlichen Methoden (z.B. Zeitkurvenanimation) der IVS.VDT-Plattform um ein Vielfaches verringert (vgl. Tabelle 2)⁴.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurde ein neues Verfahren zur effektiven Modellierung und realitätsnahen Simulation von schlauchähnlichen Objekten vorgestellt. Die effektive Modellierung ergibt sich durch eine einfache parametrische Beschreibung zur Geometrierstellung. Eine Erweiterung um zusätzliche parametrierbare Regelquerschnittsformen (N-Eck, Ellipse, Profile, etc.) wäre perspektivisch sinnvoll, um eine vielfältig einsetzbare Nutzung der Lösung zu gewährleisten.

⁴als Ausgangsbasis zum Vergleich diente das Trainingsszenario aus Abbildung 12

Geometrieerstellung	<i>Zeitkurvenanimation</i> 3D-Programm öffnen (CAD oder Grafik) a) Zylinderteilstück modellieren b) in geeignetes Format exportieren	Dauer (<i>min</i>) 10
	<i>ChainTube</i> IVS_VDT System: GUI aufrufen a) Parameter eingeben	Dauer (<i>min</i>) 1
Positionierung	<i>Zeitkurvenanimation</i> Im IVS_VDT System: Neues Szenarioobjekt je Segmentzahl anlegen a) Startposition zuweisen b) Geometriedatei zuweisen c) Freiheitsgrade angeben d) Hierarchie aufbauen	Dauer (<i>min</i>) 1,5 (pro Segment)
	<i>ChainTube</i> Objekt in gewünschte Lage bringen Schlauchsegment an Szenenobjekt fixieren	Dauer (<i>min</i>) 1 (gesamtes Objekt)
Deformation	<i>Zeitkurvenanimation</i> Neue Zeitkurve pro Segmentzahl anlegen a) Mindestens zwei Keyframes für lineare Interpolation b) Jedem Segment Animationsreferenz, d.h. Zeitkurve zuordnen	Dauer (<i>min</i>) 1 (pro Segment)
	<i>ChainTube</i> Schlauch folgt Bewegung des Szenenobjekts	Dauer (<i>min</i>) ohne Verzögerung
Gesamtzeitaufwand bei 12 Segmenten	<i>Zeitkurvenanimation</i>	Dauer (<i>min</i>) ca. 240
	<i>ChainTube</i>	Dauer (<i>min</i>) ca. 2

Tabelle 2: Vergleichszeiten zur Modellierung (Geometrieerstellung und Positionierung) und Deformation schlauchähnlicher Objekte anhand der herkömmlichen und der neuen Lösung innerhalb der IVS_VDT-Plattform

Die zeitaufwändige Erstellung von Deformationsanimationen durch Zeitkurven wurde durch eine durchgehende Simulation schlauchähnlicher Objekte ersetzt, die sowohl bei der Positionierung der Objekte (Modellierung) als auch beim eigentlichen Training aktiviert ist (Nutzer interagiert mit dem deformierbaren Objekt). Die Integration von Elastizitätseigenschaften der Schlauchaußenhülle und der Einfluss von Gravitation oder Kollisionen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Diese Aspekte sind Teil zukünftiger Arbeiten, um das Deformationsverhalten der Objekte noch realistischer zu gestalten. Das bislang auf linear verkettete Objekte beschränkte Verfahren ist perspektivisch mit relativ geringem Aufwand auf andere Oberflächenmodelle erweiterbar. Weiterhin ist eine Erweiterung des bestehenden Verfahrens auf einen dritten Freiheitsgrad (Torsionswinkel) denkbar. Eigenverdrehungen der schlauchähnlichen Objekte wären so möglich, falls Anwendungen dies erfordern.

Literatur

- [Bar97] BARZEL, R.: *Faking Dynamics of Ropes and Springs*. IEEE Comput. Graph. Appl., 17(3):31–39, 1997.
- [CGC⁺02] CAPELL, S., S. GREEN, B. CURLESS, T. DUCHAMP und Z. POPOVIC: *A Multiresolution Framework for Dynamic Deformations*. In: *ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, Seiten 41–48, Juli 2002.
- [CK00] CAKMAK, H. und U. KÜHNAPFEL: *Animation and simulation techniques for vr training systems in endoscopic surgery*. In: *Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, Seiten 173–185, 2000.
- [CMS⁺02] CAKMAK, H., H. MAASS, G. STRAUSS, C. TRANTAKIS, E. NOWATIUS und U. KÜHNAPFEL: *Modellierung chirurgischer Simulationsszenarien für das Virtuelle Endoskopie Trainingssystem (VEST)*. In: *1. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboter-Assistierte Chirurgie CURAC 2002*, 2002.
- [Del98] DELINGETTE, H.: *Towards Realistic Soft Tissue Modeling in Medical Simulation*. In: *Proceedings of the IEEE*, Band 98, Seiten 512–523, 1998.
- [Gib97] GIBSON, S. F.: *3D chainmail: a fast algorithm for deforming volumetric objects*. In: *SI3D '97: Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, Seiten 149–ff., New York, NY, USA, 1997. ACM Press.
- [GM97] GIBSON, S. F. und B. MIRTICH: *A Survey of Deformable Modeling in Computer Graphics*. Technischer Bericht, Mitsubishi Electric Research Laboratory, 1997.
- [GMT03] GIACOMO, T. DI und N. MAGNENAT-THALMANN: *Bi-Layered Mass-Spring Model for Fast Deformations of Flexible Linear Bodies*. In: *16th International Conference on Computer Animation and Social Agents, CASA'03*, Seiten 48–54, 2003.
- [GS06] GRÉGOIRE, M. und E. SCHÖMER: *Interactive simulation of one-dimensional flexible parts*. In: *SPM '06: Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling*, Seiten 95–103, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.
- [HD00] HERGENRÖTHER, E. und P. DÄHNE: *Real-Time Virtual Cables Based on Kinematic Simulation*. In: *The 8-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2000*, 2000.
- [LS01] LOOCK, A. und E. SCHÖMER: *A Virtual Environment for Interactive Assembly Simulation: From Rigid Bodies to Deformable Cables*. In: *Proceedings*

of the 5th World Multiconference on Systematics, Cybernetics and Informatics (SCI01): Emergent computing and virtual engineering, Seiten 325–332, 2001.

- [MT96] MCINERNEY, T. und D. TERZOPOULOS: *Deformable models in medical image analysis: a survey*. Med Image Anal, 1(2):91–108, June 1996.
- [NMK⁺06] NEALEN, A., M. MÜLLER, R. KEISER, E. BOXERMAN und M. CARLSON: *Physically Based Deformable Models in Computer Graphics*. Computer Graphics Forum, 25(4):809–836, December 2006.
- [Rab02] RABÄTJE, R.: *Integration flexibler Bauteile in eine Umgebung der virtuellen Realität für den Einsatz in einer Monatgesimulation*. Doktorarbeit, Universität Hannover, 2002.
- [Sch05] SCHULZ, T.: *VR-basiertes Lernmodul zur Qualifizierung*. In: *Leistungen und Ergebnisse 2004/2005 Jahresbericht Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung*, Seiten 16–17, 2005.
- [SMR06] SCHOOR, W., R. MECKE und M. REHFELD: *VR Based Knowledge Transfer in Medical Technology and Techniques*. In: *ICCSA, LNCS 3980, ICCSA-VRSAL Workshop 2006*, Seiten 268–277, 2006.
- [TF87] TERZOPOULOS, D. und K. FLEISCHER: *Deformable Models*. In: *The Visual Computer*, Band 4, Seiten 306–331, New York, NY, USA, 1987. ACM Press.
- [TPBF87] TERZOPOULOS, D., J. PLATT, A. BARR und K. FLEISCHER: *Elastically deformable models*. In: *SIGGRAPH '87: Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 205–214, New York, NY, USA, 1987. ACM Press.
- [VBB⁺06] VIDAL, F.P., F. BELLO, K.W. BRODLIE, N.W. JOHN, D. GOULD, R. PHILLIPS und N.J. AVIS: *Principles and Applications of Computer Graphics in Medicine*. Computer Graphics Forum, 25(1):113–137, 2006.
- [vT06] TENSPOUDE, H. VON: *Erzeugung und Modifikation von deformierbaren, schlauchähnlichen Objekten zur Integration in eine virtuelle Trainingsumgebung*. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2006.
- [Wag03] WAGNER, C.: *Virtuelle Realitäten für die chirurgische Ausbildung: Strukturen, Algorithmen und ihre Anwendung*. Doktorarbeit, Universität Mannheim, 2003.
- [ZGHD00] ZACHOW, S., E. GLADILIN, H.-C. HEGE und P. DEUFLHARD: *Finite-Element Simulation of Soft Tissue Deformation*. In: AL., H.U. LEMKE ET (Herausgeber): *Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS)*, Seiten 23–28. Elsevier Science B.V., 2000.