

Abschlussbericht von Jochen Noll und Florian Renk für das Projekt:

*3D-Visualisierung und 3D-Darstellung von allgemeinen
Raumflugtrajektorien und speziellen Flugbahnen für Librationspunkts-
Orbits*

des Karl-Steinbuch Stipendiums

Einleitung

Am Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) der Universität Stuttgart konnte mit Hilfe eines privaten Sponsors eine 3D-Projektionsanlage angeschafft werden, auf der vorgefertigte 3D-Filme in den Lehrveranstaltungen gezeigt werden können. Des Weiteren kam die Anlage in der Öffentlichkeitsarbeit zum Einsatz, um Besuchern eindrucksvolles Bild- und Filmmaterial über die bemannte Raumfahrt zu zeigen. Ein Beispiel hierfür ist ein Film, der vom deutschen Astronauten Thomas Reiter auf der ISS mit einer Stereo-Kamera aufgenommen wurde und einen dreidimensionalen Flug durch die Raumstation zeigt.

Ein wichtiges Thema in der Forschung und der Lehre am IRS ist die Orbit- und Bahnmechanik. Dieses Themengebiet behandelt unter anderem die Bahnen von Himmelskörpern und Satelliten im Weltraum. Wird nur ein Himmelskörper betrachtet, so ergeben sich noch relative einfache Bahnen, die so genannten Kegelschnitte. Dabei entstehen einfache geometrische Grundfiguren wie Kreise, Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln, die in einer Ebene liegen, so lange man keine Manöver ausführt. Betrachtet man allerdings ein System von zwei oder mehr Körpern, wie z.B. die Erde und den Mond oder unser Sonnensystem, so können sich für die Raumfahrzeuge sehr komplexe Bewegungen ergeben, bei denen auch starke Änderungen der Bahnebene auftreten können. Für eine Darstellung dieser Bahnen mit bisherigen Präsentationsmedien wie Folien oder Tafelanschriften muss aber meistens in eine Dimension reduziert werden, was sowohl für die Studierenden als auch für Experten das Verständnis schwierig macht.

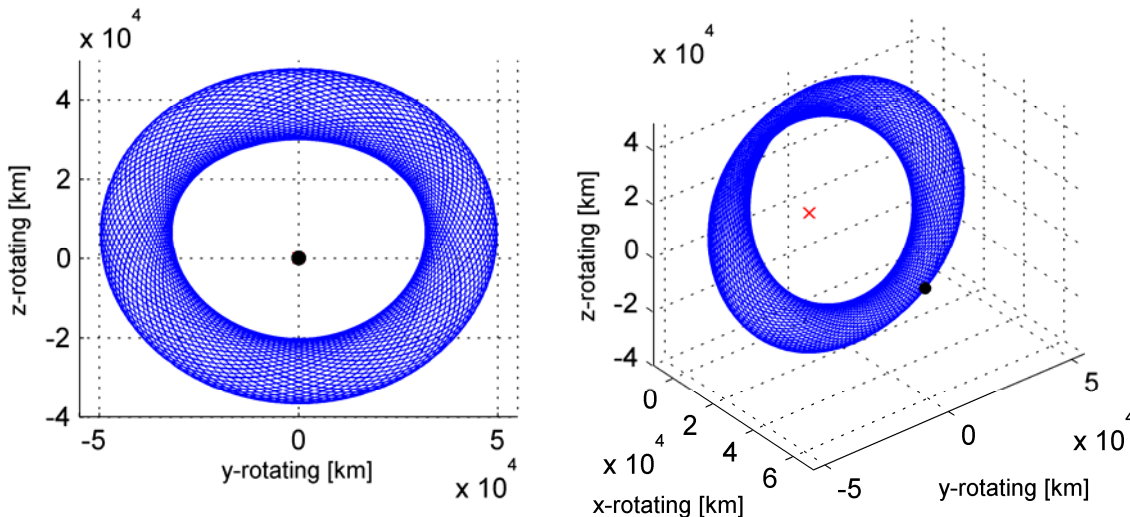


Abbildung 1: Quasi-Halo Orbit um den Erde-Mond Librationspunkt 2. Die tatsächliche Form des Orbits ist selbst in der 2D-ISO Ansicht nicht zu erkennen.

Dieses gilt insbesondere für Orbits um die so genannten Librationspunkte, da sich diese nicht mehr um einen Himmelskörper, sondern nur noch um einen virtuellen Punkt im Raum befinden und damit jegliche Referenz fehlt. Ein Beispiel für einen solchen Orbit zeigt Abbildung 1. In der Projektion und selbst in der isometrischen Ansicht ist die tatsächliche Form des Orbits nicht zu erkennen. Es kann nicht unterschieden werden, ob es sich bei dem Orbit um einen Torus oder ein Band handelt.

Die Darstellung der Bahnen im dreidimensionalen Raum kann daher einen großen Beitrag zum besseren Verständnis leisten und ermöglicht die bessere Diskussion der Verwendbarkeit bestimmter Orbits für eine Raumfahrtmission.

Für die 3D-Modellierung von Raumstationen wurde am IRS bisher die kommerzielle Software Cinema 4D eingesetzt. Da diese ursprünglich für die Erstellung von Animationsfilmen entwickelt wurde, bietet es sich an die Visualisierung der Transferbahnen und Orbits in Cinema 4D vorzunehmen.

3D-Wahrnehmung und Projektionsmöglichkeiten

Die 3D Wahrnehmung des Menschen beruht auf dem Prinzip, dass die Augen des Menschen unterschiedliche Bilder sehen, da die beiden Augen einen gewissen Abstand voneinander haben. Durch diese unterschiedlichen Bilder kann das Gehirn des Menschen die Tiefeninformation „berechnen“. Will man nun eine virtuelle 3D Welt für den Menschen schaffen, so müssen zwei unterschiedliche Bilder für die Augen erzeugt werden. Hierfür gibt es verschiedene Techniken.

Zum einen können in einer elektronischen 3D-Brille zwei unterschiedliche Bilder über zwei kleine Bildschirme erzeugt werden, die sich in unmittelbarem Abstand vor den Augen befinden. Dieses führt aber zu sehr teuren und zurzeit auch noch sehr schweren Gestellen, weswegen das Verfahren für den Alltagsgebrauch und für ein großes Publikum ungeeignet erscheint. Die unterschiedlichen Bilder für die beiden Augen können auch durch Filter erzeugt werden. Eine einfache Version stellen dabei rot-grün Brillen da, bei denen über die Filterung der Farben unterschiedliche Bilder

auf der Netzhaut der Augen erzeugt werden. Das Problem bei diesen Brillen ist, dass durch die Filterung der Farben die natürlichen Farbwerte des Filmmaterials verloren gehen und eine 3D Darstellung in echten Farben nicht erzeugt werden kann.

Dieses Problem kann durch die Verwendung von so genannten Polarisationsbrillen gelöst werden, bei denen die Polarisation des Lichtes verwendet wird. Hierfür müssen auf dieselbe Leinwand zwei Bilder gleichzeitig projiziert werden. Damit diese beiden Bilder später durch die Polarisationsbrillen wieder getrennt werden können, müssen die Projektoren, mit denen die Bilder erzeugt werden, ebenfalls mit Polarisationsfiltern ausgestattet sein. Zusätzlich muss die Leinwand mit Silber beschichtet sein, damit bei der Reflektion des Lichtes von der Leinwand keine Änderung der Polarisationssebene auftreten kann. Ist dieses nicht der Fall ändert sich bei der Reflektion die Polarisationssebene und die Polarisationsbrillen können die beiden Bilder nicht mehr sauber voneinander trennen.

Dieses Verfahren ist zur Zeit die am besten geeignete Variante, da die Brillen einfach und billig herzustellen sind und auch Standardprojektoren günstig durch Polarisationsfilter nachgerüstet werden können. Einzig die Silberleinwand ist nachteilig, da diese nicht überall verfügbar ist.

Technische Umsetzung

Um nun wie angestrebt die Planeten und Satellitenbahnen im 3D-Raum darzustellen müssen die beiden unterschiedlichen Bilder für das Auge erzeugt werden. Hierfür wird eine 3D-Szenerie in Cinema 4D erstellt. Während diese im Normalfall später mit einer virtuellen Kamera für einen 2D –Film gerendert wird, wird nun die gleiche Szenerie mit zwei Kameras gerendert. Die Kameras haben dabei einen festen Abstand voneinander, der den Augenabstand simuliert. Dadurch können virtuell die leicht unterschiedlichen Bilder für die Augen generiert werden, die benötigt werden um den Tiefeneffekt zu erzeugen. Im Verlauf der Untersuchungen wurden auch Szenen erstellt, bei denen eine automatische Kamera-Nachführung und -Ausrichtung auf den Fokuspunkt eingesetzt wurde. Diese Methode erwies sich allerdings als nicht optimal, da bei sehr kurzen Brennweiten der Kamera die beiden Stereobilder zu starke Verzerrungen im Hintergrund erzeugen. Damit geht die Illusion der dritten Dimension verloren.

Die zu visualisierenden Bahndaten stammen aus wissenschaftlichen Programmen für die Bahnsimulation und Bahnoptimierung. Diese Ergebnisse dieser Programme können in den meisten Fällen als Text-Dokumente abgelegt werden. Dabei ergibt sich das Problem, dass die Formatierung dieser Dateien von Programm zu Programm unterschiedlich gestaltet ist und die Ausgabe meistens dadurch erfolgt, dass die Position eines Raumfahrzeuges oder eines Himmelskörpers an diskreten Zeitpunkten angegeben wird, d.h. der Zustand zwischen diesen Zeitschritten unbekannt ist. Eine Approximation der Bahn zwischen diesen diskreten Punkten ist durch Interpolation oder eine Spline möglich. Besonders die Spline bietet sich hierfür an, da diese als Objekt in vielen 3D Programmen bereits standardmäßig vorhanden ist und sich damit der Import der Daten einfach gestaltet. Ein weiterer Vorteil einer Spline ist, dass sie, je nach Ordnung, die Nachbarpunkte bei der Berechnung des Krümmungsradius berücksichtigt und sich damit eine sehr gute Näherung an die eigentliche Bahn ergibt. Allerdings muss nicht nur die Bahn des Raumfahrzeuges

korrekt dargestellt werden, sondern in einer Animation wird auch die korrekte Geschwindigkeit der Raumfahrzeuge benötigt. Dieses ist insbesondere wichtig um die Kopplung zwischen kinetischer und potentieller Energie in den Gravitationsstrichtern der Himmelskörper zu demonstrieren. Durch die Verwendung von Cinema 4D als Animationsprogramm ergibt sich dabei ein weiteres Problem. Die Geschwindigkeit der Körper auf einer Bahn während einer Animation kann nicht durch einen Import festgelegt werden, sondern muss durch die Definition der Splinepunkte erfolgen. Während eines Zeitschrittes in Cinema 4D wird immer die Bahn zwischen zwei Splinepunkten durchlaufen. Warum stellt dieses ein Problem dar?

Bei der Berechnung der Satellitenbahnen werden numerische Integratoren mit einer automatischen Schrittweitensteuerung verwendet, um eine hohe Genauigkeit der Bahnvorhersage zu garantieren. Bewegt sich z.B. ein Satellit nun auf einer exzentrischen Bahn um die Erde, so variiert seine Geschwindigkeit sehr stark. Ist der Satellit weit von der Erde entfernt, so hat er eine relativ geringe Geschwindigkeit, kommt er aber näher zur Erde, so nimmt seine Geschwindigkeit mit abnehmendem Abstand zu. Eine hohe Geschwindigkeit sorgt aber dafür, dass die Integrationsroutinen die Schrittweite der Integration reduzieren und damit mehr Punkte der Trajektorie ausgegeben werden. Würde man diese Punkte nun in Cinema 4D unverändert importieren, würde dieses dazu führen, dass die dargestellte Geschwindigkeit genau dann langsam ist, wenn viele Punkte vorhanden sind. Dieses ist aber bei den generierten Punkten genau dann der Fall, wenn die Satelliten am schnellsten sind. Ein Importfilter für die Bahndaten muss also nun dafür sorgen, dass auch die Geschwindigkeiten der Satelliten korrekt dargestellt werden. Um dieses zu erreichen werden die Positionspunkte der Integration vor dem Import so vorbereitet, dass die resultierenden Splinepunkte in Cinema 4D die korrekte Geschwindigkeit widerspiegeln.

Die Implementierung dieser Vorfilter erfolgt in Matlab, da dieses Programm im wissenschaftlichen Bereich oft verwendet wird. Ein weiterer großer Vorteil von Matlab ist die einfach zu verstehende Programmiersprache, die eine schnelle Anpassung der Vorfilter an die Ausgabedaten von anderen Programmen erlaubt. Um die Daten für den Import in Cinema 4D vorzubereiten werden die Positionsdaten und die dazugehörigen Zeitangaben entweder direkt von den Simulationsprogrammen in den Arbeitsspeicher von Matlab geladen oder von Matlab aus entsprechenden Textdateien in den Arbeitsspeicher importiert. Mit einem gewählten Zeitschritt, der die Gesamtanzahl der Splinepunkte bestimmt, wird nun eine Interpolation über die eingelesenen Daten durchgeführt. Um auch bei dieser Interpolation so nahe wie möglich an der tatsächlichen Trajektorie zu sein wird diese nicht linear sondern kubisch ausgeführt. Die so erstellten Daten werden nun in einer vorgegebenen Formatierung ausgegeben, die durch das COMET Plug-In für Cinema 4D gelesen werden kann.

Bei der Darstellung der Bahn in Cinema 4D kann es nun zu Problemen kommen, da sich die Bahnen, insbesondere bei Orbits, wiederholen. Stellt man die Bahn durch einen Volumenkörper dar, so überschneidet sich dieser selber. Dieses führt bei der Berechnung des tatsächlichen Bildes zu Artefakten. Um dieses Problem zu vermeiden werden für die Visualisierung eines Orbits tatsächlich zwei Bahnen eingelesen. Einmal die Spline, die die tatsächliche Bewegung des Flugkörpers beschreibt und in Cinema 4D aber nicht dargestellt wird und zum anderen ein

einzelner, geschlossener Orbit, der rein zur Visualisierung der Bahn dient. Auf diese Weise kann die Bahnbewegung von der Darstellung entkoppelt werden und die Darstellung der Bahn nach dem Rendering erfolgt ohne Artefakte.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist nun das Abspielen der Daten auf zwei unterschiedlichen Projektoren. Dieses kann generell durch die Verfahren erfolgen, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben. Zum einen können auf beiden Projektoren eine Serie von Einzelbildern gezeigt werden, die vorher mit dem entsprechenden Rendering-Programm erstellt wurden. Dieses ist meistens recht unhandlich, da viele tausend Bild-Dateien benötigt werden. Ein Vorteil diese Methode ist die einfache Synchronisation der beiden Projektionen für das linke und rechte Auge. Verwendet man eine echte Videodatei, so kann diese entweder das Bildmaterial für beide Augen gleichzeitig enthalten, wodurch eine Synchronisation überflüssig wird, oder aber zwei getrennte Videos, einen für das linke und einen für das rechte Auge.

Die letzte Version benötigt einen rechenstarken Computer, so dass die Filme während der Vorführung nicht auseinander laufen. Diese Methode hat den weiteren Vorteil, dass sich ein 3D Film bei Bedarf auch leicht in 2D darstellen lassen kann, indem nur der Video für ein Auge projiziert wird. Auch die Produktion zweier getrennter Filme gestaltet sich einfacher, da die Filme getrennt produziert werden können und auch weniger Post-Processing der Filme notwendig ist. Da heutige Rechner auch in der Regel mit Mehrkern-CPU's ausgestattet sind, treten auch beim getrennten Abspielen der Filme keine Probleme mit der Synchronisation auf, da hierdurch die Möglichkeit besteht, dass beide Videos gleichzeitig auf unterschiedlichen Prozessorkernen dekodiert werden. Die letzte Methode wurde daher auch für die Implementierung der Bahndarstellungen mit Erfolg verwendet. Für andere Anwendungsfälle kann auf die Methode mit Einzelbildern zurückgegriffen werden. Aufgrund der beschriebenen Unhandlichkeit sollte dieses allerdings vermieden werden.

Anwendungsbeispiele

Neben den in Abbildung 1 dargestellten Librationspunkt Orbit wird das beschriebene Verfahren auch dazu verwendet reguläre Orbits darzustellen. Dieses wird in der Vorlesung „Grundlagen der Raumfahrtsysteme“ dazu verwendet, um die dreidimensionale Ausrichtung eines Orbits im Raum zu verdeutlichen. Die grundlegendste Bahnbewegung im Bereich der Raumfahrt ist der so genannte Kepler-Orbit. Dieser wird durch sechs Elemente beschrieben, die sich hervorragend

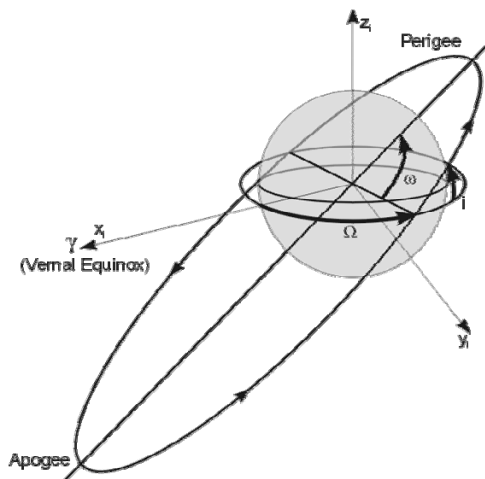


Abbildung 2: Beschreibung der sechs Keplerelemente

durch eine 3D-Animation darstellen lassen. Da eine solche Animation auch in der Vorlesung „Grundlagen der Raumfahrtsysteme“ zum Einsatz kommen kann ist die Visualisierung der Keplerelemente das erste Anwendungsbeispiel. Eine planare Darstellung ist Abbildung 2 gegeben.

Während die Keplerbahn immer eine Ebene darstellt und daher auch leicht in 2D dargestellt werden kann, ist die Orientierung dieser Ebene relativ zu einem festen Koordinatensystem, z.B. einem inertialen System im Erdmittelpunkt, nicht leicht zu verstehen. Noch komplizierter zu verstehen sind die Bahnelemente, wenn sie sich nicht mehr auf ein festes

Koordinatensystem beziehen, sondern auf ein rotierendes, wie es oft am Mond oder bei Raketenstarts verwendet wird. Die Darstellung der möglichen Rotationen der Bahnebene um die verschiedenen Winkel der Keplerelemente ist nun eine ideale Anwendung für eine 3D Animation, da man sofort begreift, auf welche Weise Änderungen an den Keplerelementen die Bahn tatsächlich im dreidimensionalen beeinflussen.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit konnten alle genannten Projektziele erreicht werden. An der Universität Stuttgart steht nun eine leistungsfähige Entwicklungsumgebung für die 3D-Visualisierung von Raumflugtrajektorien zur Verfügung. Mit diesem Computerprogramm wurde eine Bibliothek mit kurzen 3D-Filmen erstellt, die als Einzelclips in die Vorlesungen integriert werden können. Diese Sequenzen wurden ebenfalls in einem kurzen Film zusammengeführt der in der Lehre, in der Forschung und in der Öffentlichkeitsarbeit gezeigt werden kann. Neben der erfolgreichen Implementierung ist die durch das Projekt gesammelte Erfahrung von besonderem Wert, da in Zukunft vergleichbare Projekte und Aufgabenstellungen aufgrund der erlangten Qualifikation in kurzer Zeit erfolgreich bearbeitet werden können. Für die Unterstützung des Projektes durch das Karl-Steinbuch-Stipendium der MFG Stiftung möchten sich die beiden Autoren noch einmal ausdrücklich bedanken.