

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Gebiet Desktop-VR – vor allem mit interaktiven Grafikanwendungen für das World Wide Web – wurde in dieser Arbeit näher betrachtet. Es ist deutlich geworden, daß sowohl technologische als auch konzeptionell-gestalterische Probleme den erfolgreichen Einsatz dreidimensionaler Anwendungen behindern. Deshalb wurden für 3D-GUIs Gestaltungsrichtlinien vorgestellt, ein Konzept zur metaphorbasierten Gliederung virtueller Räume entwickelt und zahlreiche 3D-Widgets klassifiziert und spezifiziert. Damit steht ein systematisiertes Repertoire an wiederverwendbaren Bausteinen zur Verfügung, die sich anpassen, zusammenfügen und zu interaktiven Anwendungen verknüpfen lassen. Zu diesem Zweck wurde eine dokumentenzentrierte, mehrschichtige Komponentenarchitektur mit einem deklarativen, auf XML-Grammatiken basierenden Dokumentenmodell entwickelt. Für die Erstellung von 3D-Anwendungen auf dessen Basis wurde schließlich ein Autorenprozeß konzipiert und ein visuelles 3D-Autorenwerkzeug prototypisch implementiert.

7.1 Zusammenfassung der Kapitel und ihrer Beiträge

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Kapitel zusammengefaßt und dabei die wichtigsten Beiträge und das wissenschaftlich Neue stichpunktartig aufgeführt. In der Diskussion unter 7.2.1 erfolgt dann noch einmal eine Darstellung der Hauptbeiträge dieser Arbeit.

Kapitel 1 – Einleitung

In der Einleitung wurden Hintergrund und Motivation dieser Arbeit vorgestellt, wobei 3D-Benutzungsoberflächen eine wichtige Rolle bei künftigen Non-WIMP-Interfaces attestiert wird, da sie menschliche Handlungsweisen und Erfahrungen mit 3D-Räumen aufgreifen. Es ist deutlich geworden, daß Desktop-VR in Verbindung mit Web3D-Grafik ein Entwicklungspotential besitzt, jedoch zahlreiche Probleme die Erstellung, Verbreitung und Benutzung dreidimensionaler Anwendungen erschweren. Die Vision dieser Arbeit, Thesen und Ziele wurden dargestellt, und es erfolgte eine Abgrenzung zu verschiedenen Fachgebieten sowie eine Einführung in die Struktur der Arbeit.

Kapitel 2 – 3D-Echtzeitgrafik im World Wide Web

Das Kapitel führte in die Thematik dieser Arbeit ein, indem eine Abgrenzung von Desktop-VR und Web3D-Grafik gegenüber anderen 3D-Echtzeitgrafiktechnologien erfolgte. Web3D-Grafik wurde mit ihren Besonderheiten, Problemen und typischen Anwendungsklassen näher charakterisiert. Zunehmende Einsatzmöglichkeiten für interaktive 3D-Grafik bei Web-Anwendungen konnten als Motivation für weitere Forschungsarbeiten identifiziert werden. Anschließend erfolgte die Vorstellung wichtiger Web3D-Formate, wobei der Fokus auf dem künftigen Standard X3D lag. Eine Betrachtung zum Entwicklungsstand und zu aktuellen Trends bei Web3D-Grafik rundeten dieses Kapitel ab. Es ist deutlich geworden, daß der Autorenprozeß bisher nur ungenügend unterstützt wird, viele Formate konkurrieren und die Integration und Unterstützung von Standards nötig ist.

Basis dieses Kapitels war eine ausführliche Recherche und Analyse existierender 3D-Anwendungsklassen und Web3D-Technologien. Sein primärer Beitrag besteht in Form einer kompakten Darstellung des aktuellen Standes der Technik im Web3D-Bereich.

Kapitel 3 – Metaphern und Widgets für interaktive 3D-Anwendungen

Zur Lösung der konzeptionell-gestalterischen Probleme von Desktop-VR-Anwendungen wurden 3D-Benutzungsschnittstellen einer detaillierten Betrachtung unterzogen. Dazu erfolgte ihre Charakterisierung, wurde ein historischer Abriss gegeben, und es wurden Beispiele vorgestellt. Eine vergleichende Analyse von 2D- und 3D-GUIs beantwortete die Frage „3D or not 3D?“ nicht abschließend, machte aber deutlich, daß für 3D-Anwendungen Fortschritte auf konzeptioneller wie auch auf Spezifikations- und Implementierungsseite nötig sind. Ein Beitrag dazu wurde zunächst in Form von Designrichtlinien geleistet. Weiterhin wurde das für die räumliche Gliederung von 3D-Applikationen entwickelte Konzept der *Action Spaces* mit verschiedenen Metaphern vorgestellt. Schließlich standen *3D-Widgets* im Mittelpunkt des Kapitels, da sie zentraler Bestandteil von Desktop-VR 3D-GUIs sind. Es wurde eine gründliche Systematik existierender Widgets anhand der Literatur und eigener Entwicklungen vorgenommen und beispielhaft gezeigt, wie sich Widgets einheitlich spezifizieren lassen.

Basis dieses Kapitels war die Analyse von etwa 240 wissenschaftlichen Arbeiten zu 3D-Benutzungsoberflächen und -Interaktionstechniken, womit es demzufolge auch den theoretischen Überbau dieser Arbeit darstellt. Beiträge dieses Kapitels sind:

- kompakter Überblick zur Thematik dreidimensionaler Benutzungsschnittstellen;
- Vorstellung von wichtigen Gestaltungsrichtlinien für dreidimensionale Anwendungen;
- Neuartige Konzeption zur Gliederung virtueller Räume in Form der *Action Spaces*;
- Vorstellung und Systematisierung von Raum-, Struktur- und Navigationsmetaphern;
- Systematisierung zahlreicher *3D-Widgets* in Form einer hierarchischen Klassifikation;
- Beitrag zur Standardisierung von 3D-Benutzungsoberflächen.

Kapitel 4 – CONTIGRA: Konzeption einer 3D-Komponentenarchitektur

Nach dem konzeptionell-theoretischen Kapitel 3 wurde in den folgenden Kapiteln 4-6 dafür die komponentenbasierte Architektur und technische Realisierung detailliert vorgestellt. Zunächst wurden in diesem Kapitel Anforderungen an eine geeignete Architektur, ihre modularen Bausteine und den Autorenprozeß aufgeführt. Aus der Analyse ergab sich die Schlußfolgerung, daß etablierte Software-Komponententechnologien einen möglichen Lösungsansatz darstellen. So wurden bekannte Komponentenmodelle auf ihre Eignung für die Entwicklung interaktiver 3D-Anwendungen untersucht, jedoch keine geeignete Technologie gefunden. Als vielversprechender erwiesen sich spezialisierte 3D-Komponentenansätze. Diese verwandten Arbeiten wurden im Detail vorgestellt und nach verschiedenen Kriterien klassifiziert. Resultat der Analyse war die Entwicklung eines eigenen, konsequent deklarativen Komponentenmodells für 3D-Grafik. Der dokumentenzentrierte CONTIGRA-Lösungsansatz und zugrundeliegende Komponentenbegriff wurden eingeführt und im Überblick dargestellt.

Basis dieses Kapitels waren Recherchen zu Komponententechnologien, vor allem ausführliche zu spezialisierten 3D-Lösungen. Beiträge dieses Kapitels sind:

- Überblicksdarstellung und Klassifikation des Standes der Forschung bei komponentenorientierten Technologien zur Erstellung von 3D-Grafik;
- Konzeption einer neuartigen, deklarativen 3D-Komponentenarchitektur auf Basis von XML-Dokumenten;
- Kompakte Überblicksdarstellung der CONTIGRA-Komponentenarchitektur.

Kapitel 5 – CONTIGRA: Das deklarative Dokumentenmodell

Dieses Kapitel enthält eine Beschreibung des Dokumentenmodells mit den auf Basis von XML-Schema entwickelten Grammatiken *CoApplication*, *CoComponent* und *CoComponentImplementation*. *CoApplication* wurde zunächst als Beschreibungssprache für interaktive 3D-Applikationen und ihre Szenenparameter erläutert, gefolgt von *CoComponent* für Komponentenschnittstellen mit ihrem Parameterkonzept. Schließlich wurde dargestellt, wie Komponentenimplementierungen (*CoComponentImplementation*) aus Komponenten- und Szenengraph aufgebaut sind. Letzterer ist in Geometrie-, Audio- und Verhaltensgraph geteilt, wofür X3D und respektive die neu entwickelten XML-Grammatiken *Audio3D* und *Behavior3D* zum Einsatz kommen. Mit *Audio3D* können komplexe akustische Szenen getrennt von der Geometrie beschrieben werden, wobei die Deklaration spezialisierter Soundquellen und verbundener Räume wichtige Innovationen darstellen. Mit *Behavior3D* wurde ein flexibles Konzept zur deklarativen Modellierung des Verhaltens von 3D-Objekten vorgestellt. Die Darstellung eines typisierten Verknüpfungskonzeptes für Subkomponenten- und Szenengraphbestandteile rundete dieses Kapitel ab. Folgende Beiträge wurden geleistet:

- Kompakte Darstellung der mehrschichtigen CONTIGRA-XML-Schemata;
- Komponentenanpassung über High-Level-Parameter, die verbesserte Ausdrucksmächtigkeit gegenüber X3D-Szenengraphfeldern besitzen (Kategorien, Sichtbarkeit, Zugriff);
- Schaffung verschiedener Abstraktionsebenen in einer Komponentenimplementierung durch Szenengraphbestandteile und einen Komponentengraph;
- Innovative Trennung des Szenengraphteils in Geometrie-, Audio- und Verhaltensgraph;
- Neuentwicklung von *Audio3D* für die deklarative Beschreibung komplexer akustischer Szenen und als unabhängige Abstraktionsschicht zu 3D-Sound-APIs;
- Neuentwicklung von *Behavior3D* als flexibles, objektorientiertes Konzept zur deklarativen Modellierung des Verhaltens von 3D-Objekten; Automatisierung der Erstellung und Verwendung neuer Verhaltensknoten; Implementation zahlreicher neuartiger Knoten;
- Neuartiges deklaratives Verknüpfungskonzept.

Kapitel 6 – CONTIGRA: Der Autorenprozeß und seine Werkzeuge

Da Instanzdokumente der CONTIGRA-XML-Schemata natürlich nicht manuell editiert werden sollen, wurde in diesem Kapitel der werkzeuggestützte Autorenprozeß beschrieben. Zunächst erfolgte die Analyse existierender 3D-Autorenwerkzeuge, dann die Vorstellung des CONTIGRA-Autorenprozesses mit seinen Phasen und beteiligten Autoren und anschließend die Aufstellung konkreter Werkzeuganforderungen. Das visuelle 3D-Autorenwerkzeug CONTIGRABUILDER wurde aus Nutzersicht mit seinen Editoren vorgestellt. Abschließend wurden verschiedene Aspekte der prototypischen Realisierung, darunter die Transformation von CONTIGRA-Dateien in spezifische 3D-Grafikformate bzw. Webpräsentationen, erläutert sowie Beispielanwendungen vorgestellt. Beiträge des Kapitels sind:

- Überblicksdarstellung und Klassifikation des Standes der Forschung und Technik bei Web3D-Autorenwerkzeugen;
- Darstellung des CONTIGRA-Autorenprozesses mit seinen Phasen und Autorengruppen sowie des 3D-Autorenwerkzeuges CONTIGRABUILDER;
- Vorstellung des High-Level-Werkzeuges CONTIGRABUILDER, mit dem interdisziplinäre 3D-Komponenten- und -Anwendungserstellung möglich sind;
- Übersetzung praktischer Beispiele in die Zielformate VRML97 & X3D;
- Prototypische Realisierung eines 3D-Komponentenportals für das WWW.

7.2 Diskussion

Die in der Einleitung aufgestellten Thesen dienen primär als Leitlinien und Motivation für diese Arbeit. Sie lassen sich nicht direkt beweisen und sind erst durch umfassende und teils langfristige Studien zu bewerten. Dazu legt diese Arbeit jedoch einige Grundlagen. Konkreter lassen sich jedoch die unter 1.2 gestellten Forschungsziele mit den Resultaten der Arbeit vergleichen. Anhand der Kapitelzusammenfassungen wird deutlich, daß diese Ziele erreicht worden sind. Metaphern und Gestaltungsrichtlinien für 3D-Benutzungsschnittstellen wurden erarbeitet und mit der grundlegenden Klassifizierung von 3D-Widgets zur Standardisierung und Vergrößerung des verfügbaren Repertoires beigetragen. Die entwickelte Systematik stellt einen Startpunkt für weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet dar. Nur ein großes Repertoire an Widgets und Komponenten wird die 3D-Anwendungsentwicklung signifikant erleichtern.

Das Ziel der Entwicklung eines komponentenorientierten 3D-Dokumentenmodells auf XML-Basis wurde vollständig erreicht. Die CONTIGRA-XML-Schemata erlauben die Spezifikation von einzelnen 3D-Komponenten inklusive ihres Verhaltens und multimedialer Bestandteile sowie die erfolgreiche Beschreibung der Konfiguration, Assemblierung und des Zusammenwirkens von Komponenten in 3D-Anwendungen. Die wichtige Funktion der CONTIGRA-Beschreibungssprachen als Spezifikationsmöglichkeit für einzelne 3D-Widgets und -Komponenten konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde anhand von Beispielanwendungen überprüft, daß die Abstraktion vom Szenengraphmodell die Entwicklung erleichtert und eine automatische Transformation von CONTIGRA in 3D-Zielformate möglich ist. Die vertiefende Überprüfung des Autorenprozesses und Werkzeuges mit Hilfe komplexer 3D-Beispielanwendungen bietet noch Ansätze für künftige Arbeiten. Auch die Sekundärziele „Internetfähigkeit“ und „Übersetzung der erstellten Anwendungen in 3D-Zielformate“ können in Zukunft noch ausgebaut werden (s. 7.3).

7.2.1 Wissenschaftlicher Beitrag

Bereits in 7.1 wurden die einzelnen Beiträge der Kapitel stichpunktartig hervorgehoben. Die wichtigsten Resultate konnten in mehreren internationalen Veröffentlichungen vorgestellt werden, darunter *Action Spaces* in [Dachs00], der CONTIGRA-Ansatz in [Dachs01b] und [Dachs02], *Behavior3D* in [Dachs03a] und *Audio3D* in [Hoffm03]. Die folgende Aufzählung faßt noch einmal die wissenschaftlichen Hauptbeiträge dieser Arbeit zusammen.

- Klassifikation und realisierungsunabhängige Spezifikation von 3D-Widgets als Beitrag zur Weiterentwicklung und Standardisierung von 3D-Benutzungsoberflächen.
- Dokumentbasierter High-Level-Komponentenansatz oberhalb des Szenengraphniveaus zur vereinfachten Erstellung von interaktiven 3D-Anwendungen und flexiblen 3D-GUIs.
- Durchgängig deklaratives Dokumentenmodell auf XML-Basis zur homogenen Beschreibung von 3D-Anwendungen, Komponentenschnittstellen, -konfigurationen, -kompositionen und -verknüpfungen sowie zur Verhaltensrealisierung und Raumklangdefinition.
- Wiederverwendbarkeit und Anpaßbarkeit auf verschiedenen Ebenen (Komponenten, Sub-szenengraphen, Verhaltensbausteine), auch durch Trennung des internen Szenengraphen in die drei Subgraphen Geometrie, Audio und Verhalten.
- Interdisziplinäre Bearbeitung durch verschiedene Abstraktionsstufen und Autorenrollen möglich, Unterstützung durch das visuelle Autorenwerkzeug CONTIGRABUILDER.
- Abstraktion von 3D-Formaten und Transformation in verschiedene Zielformate möglich.
- Integration eines innovativen Ansatzes zur deklarativen Beschreibung von Raumklang.
- Weitestgehend deklarative Verhaltensmodellierung mit Hilfe von neuen Verhaltensknoten und Verknüpfungskonstrukten sowie dynamische Spracherweiterung.

7.2.2 Einschränkungen

Hier werden stichpunktartig Grenzen aufgeführt, soweit diese bekannt sind. Dies sind zunächst Beschränkungen, die den Ansatz selbst betreffen, aber auch andere, die den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätten und künftigen Arbeiten vorbehalten sind.

- Der Vorteil einer zusätzlichen Abstraktionsstufe von CONTIGRA-Beschreibungen gegenüber Szenengraphformaten macht zugleich Formattransformationen nötig. Der Übersetzungsprozeß in unterschiedlich mächtige Formate ist potentiell komplex und selten 1:1 möglich. Beste Resultate sind mit X3D / VRML97 / MPEG-4 als Zielformat zu erreichen.
- Zahlreiche deklarative Knotenverknüpfungen im Zielformat (als Resultat des Übersetzungsprozesses) können die spätere Ausführung der Anwendung im Player verlangsamen.
- Generell sind XML-Formate wenig kompakt, potentiell groß und ihre Verarbeitung z.Z. noch nicht Performance-optimiert. Binäre Varianten mit Kompressions- und Streaming-Möglichkeiten werden dies jedoch künftig ändern.
- Der Ansatz wurde anhand von Beispielen überprüft. Erst eine kritische Masse von CONTIGRA-3D-Komponenten und weitere 3D-Beispielanwendungen mit realem Projektkontext bilden jedoch die Basis für eine ausführliche Evaluation des Autorenwerkzeuges.
- Der interdisziplinäre Autorenprozeß wird erst im Ansatz unterstützt und muß durch Werkzeugweiterentwicklungen ausgebaut werden.
- Da der Fokus bisher auf Desktop-VR lag, wurde die Unterstützung diverser Eingabegeräte und die Abbildung ihrer Freiheitsgrade auf 3D-Widgets bisher nicht speziell betrachtet.

7.3 Zukünftige Arbeiten

Da in dieser Arbeit mit einer Klassifikation von 3D-Widgets Grundlagen gelegt und mit der Entwicklung eines mehrschichtigen, XML-basierten Komponentenansatzes auch Relationen zu anderen Webstandards etabliert wurden, sind mehrere interessante Weiterentwicklungen denkbar. Diese werden im folgenden zur Abrundung der Arbeit stichpunktartig aufgeführt.

Komponentenportal und Standardisierung

- Spezifikation und Implementierung weiterer 3D-Widgets und 3D-Komponenten unter Einbeziehung der Wissenschaftsgemeinschaft (Ziel: Schaffung einer kritischen Masse).
- Neukonzeption eines Webportals zur gemeinschaftlichen Entwicklung, Suche und Distribution von CONTIGRA-Komponenten.
- Verstärkte Betrachtung von Versionsmanagement, Qualitätssicherung, Herstellerrechten, Lizenzierungsmöglichkeiten; Verbindung der CONTIGRA-XML-Schemata mit dem Metadatenstandard MPEG-7 (Visuelle Deskriptoren, *Multimedia Description Schemes...*).
- Standardisierungsvorschläge für 3D-Benutzungsschnittstellen.

Autorenwerkzeug

- Verbesserung und Erweiterung des Autorenwerkzeuges CONTIGRABUILDER.
- Realisierung visueller Editoren, vor allem für den 3D-Audio-Teil und für Verhaltensverknüpfungen; außerdem Entwicklung alternativer Editoren für verschiedene Autorenrollen.
- Verstärkte Unterstützung eines interdisziplinären und künftig auch kooperativen Arbeitens durch mehrere Autoren, Realisierung von Groupware-Funktionalität.
- Evaluation und Benutzbarkeitsanalyse des CONTIGRABUILDERS unter Einbeziehung von Experten aus anderen Fachgebieten sowie Bewertung des Entwicklungsprozesses.
- Ausbau zu einem MPEG-4-Autorenwerkzeug durch Transformationsmodule u. Editoren.

Zielplattformen und Adaption

- Realisierung von Übersetzungsmodulen auf Objektmodellbasis bzw. als XSLT-Stylesheet für weitere Zielformate, dabei Analyse der unterschiedlichen Mächtigkeiten der Formate (MPEG-4, 3D-APIs für mobile Endgeräte...).
- Performancemessungen bei 3D-Anwendungen in verschiedenen Zielformaten.
- Untersuchung von Adaptionmöglichkeiten für verschiedene Zielplattformen und Hardwarekonfigurationen (PC, Tablet-PC, PDA, Smart Phone, Settop-Box, Spielekonsole...).
- Untersuchung, inwieweit Transformationen auch auf Serverseite bei Abruf von verschiedenen Endgeräten und Zielplattformen (d.h. konkreten 3D-Playern auf dem Client) durchgeführt werden können, evtl. Integration in den AMACONT-Ansatz [Fiala03].
- Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Aspekte von 3D-Komponenten, darunter LOD, *Multi Resolution Meshes* oder ähnliche Qualitätsabstufungen, die erzielbare / benötigte Framerate, die Darstellungsart, Farbtreue, minimale geforderte visuelle Qualität oder aber Qualität, Größe, Kompression und Framerate eingebundener Medien.
- Personalisierung von 3D-Inhalten und 3D-GUIs, z.B. durch Adaption an Interessen und Vorlieben des Nutzers; Betrachtung von Möglichkeiten des 3D-User-Trackings in VE.

Ausbau von Behavior3D und Audio3D

- Harmonisierung der Behavior3D- und Audio3D-Knotenerweiterungen mit dem endgültigen X3D-Standard, Zusammenfassung der Erweiterungen als eigene X3D-Komponenten (z.B. *X3D Behavior Component*) bzw. X3D-Profile.
- Spezifikation und Implementierung weiterer Behavior3D-Knoten, Erweiterung des Repertoires.
- Implementierung sämtlicher Knoten des Audio3D-Formates (neben dem *Core*-Level auch *Common* und *Full*); Integration dieser Player-Funktionalität in den CONTIGRABUILDER.

Evaluation und 3D-Usability

- Nach Evaluation des Autorenwerkzeuges Entwicklung weiterer 3D-Applikationen, um a) ihren Nutzen für konkrete Anwendungsdomänen im Vergleich zu 2D-Applikationen zu evaluieren und b) die allgemeine Effektivität von 3D-GUIs dabei näher zu betrachten.
- Entwicklung und Anwendung neuer Evaluationstechniken / -Methoden für 3D-GUIs, da diese bisher kaum etabliert und selbst noch Gegenstand der Forschung sind [Hernd94a].

Binärformat, Kompression und Streaming

- Untersuchung und Einbeziehung allgemeiner Entwicklungen für binäre XML-Formate (Binary Format MPEG-7, Binärformat für X3D [X3DbinaryRFP@] etc.), XML-Streaming (z.B. [XMLTK@], [XMLStreaming@]) und Sicherheitsfragen bzw. Verschlüsselung von XML-Dokumenten (z.B. W3C Recommendations *XML Encryption* und *XML Signature*).
- Untersuchung, wie Streaming-Eigenschaften von Zielformaten (z.B. Viewpoint oder MPEG-4) speziell im CONTIGRA-Dokumentenmodell unterstützt werden können.