

Diskussionen, Statistiken und Autorenprofile für diese Veröffentlichung finden Sie unter: <https://www.researchgate.net/publication/216813774>

Arch-Explore: Eine natürliche Benutzeroberfläche für umfassende Architektur-exemplarische Vorgehensweisen

Artikel · März 2009

DOI: 10.1109 / 3DUI.2009.4811208 · Quelle: DBLP

ZITATE

79

LESEN

455

3 Autoren , einschließlich:



[Gerd Bruder](#)

Universität von Zentralflorida

173 VERÖFFENTLICHUNGEN 2.605 ZITATE

SIEHE PROFIL



[Frank Steinicke](#)

Universität Hamburg

260 VERÖFFENTLICHUNGEN 3.033 ZITATE

SIEHE PROFIL

Einige der Autoren dieser Veröffentlichung arbeiten auch an diesen verwandten Projekten:



Project

Interaktive Fortbewegungs-Benutzeroberflächen (ILUI) [Projekt ansehen](#)



Project

Zusammenarbeit mit mehreren Benutzern in virtuellen Umgebungen [Projekt ansehen](#)

Arch-Explore:

Eine natürliche Benutzeroberfläche für umfassende architektonische exemplarische Vorgehensweisen

Gerd Bruder *

Frank Steinicke †

Klaus H. Hinrichs ‡

Forschungsgruppe Visualisierung und Computergrafik (VisCG)

Abteilung für Computerwissenschaften

Universität Münster

Einsteinstr. 62, 48149 Münster, Deutschland

EIN BSTRACT

In diesem Papier schlagen wir die *Arch-Explore* Benutzeroberfläche, die die natürliche Erkundung von 3D-Architekturmodellen in verschiedenen Maßstäben in einer VR-Umgebung (Real Walking Virtual Reality) unterstützt, z. B. HMD- (Head-Mounted Display) oder CAVE-Setups. Wir diskutieren ausführlich, wie Benutzerbewegungen auf die virtuelle Welt übertragen werden können, um das Gehen durch virtuelle Innenumgebungen zu ermöglichen. Um den begrenzten Interaktionsraum in kleinen VR-Laboraebenen zu überwinden, haben wir umgeleitete Geotechniken implementiert, um die natürliche Erforschung vergleichsweise großer virtueller Modelle zu unterstützen. Darüber hinaus bietet das Konzept der virtuellen Portale die Möglichkeit, große Entfernungen innerhalb von Architekturmodellen intuitiv zurückzulegen. Wir beschreiben das Software- und Hardware-Setup und diskutieren die Vorteile von Arch-Explore.

Schlüsselwörter: 3D-Benutzeroberflächen, virtuelle Umgebungen, Fortbewegung, exemplarische Vorgehensweisen für die Architektur, umgeleitetes Gehen, passives haptisches Feedback.

Indexbegriffe: H.5.1 [Informationsschnittstellen und Präsentationen]: Multimedia-Informationssysteme - Künstliche, erweiterte und virtuelle Realität I.3.7 [Computergrafik]: Dreidimensionale Grafik und Realismus - Virtuelle Realität

1 I. EINLEITUNG

Dreidimensionale Modelle spielen eine wichtige Rolle bei der architektonischen Gestaltung, da sie es Architekten, Entscheidungsträgern und Kunden ermöglichen, Entwurfsvorschläge zu überprüfen, zu kommunizieren und zu präsentieren [3]. Diese Modelle vermitteln einen hervorragenden Eindruck von Raum und Geometrie und ermöglichen die visuelle Überprüfung der Einhaltung von Konstruktionsbeschränkungen und -vorschriften. Es gibt verschiedene analoge und digitale Ansätze für Architekten, um ihre Designideen zu präsentieren. Beispielsweise verwenden Planer und Architekten üblicherweise physische 3D-Blockmodelle, die miniaturisierte städtische Einheiten wie Gebäude und Straßen darstellen. Die physischen Blockmodelle werden durch digitale Modelle ergänzt, die zur Erzeugung von Bildern und Durchflughanimationen verwendet werden. Das Erstellen analoger Modelle ist eine zeitaufwändige Aufgabe, und in Bezug auf die Veränderlichkeit sind diese Modelle weniger flexibel als ihre digitalen Gegenstücke. In diesem Zusammenhang versprechen VR-Systeme ein großes Potenzial zur Verbesserung der Erforschung von Architekturmodellen. Wahrnehmungs- und Erkenntnisforschung legen nahe, dass interaktive Erkundungen, wie sie beispielsweise durch immersive virtuelle Umgebungen (IVEs) unterstützt werden, die Wahrnehmung von Raum und Geometrie verbessern [11]. Die stereoskopische Visualisierung dreidimensionaler Daten in Kombination mit Verfolgungssystemen ermöglicht häufig ein besseres Verständnis komplexer Datensätze. Durch die Verfolgung von Kopfbewegungen können Benutzer die Ansicht in der virtuellen steuern Verbesserung der Wahrnehmung von Raum und Geometrie [11]. Die stereoskopische Visualisierung dreidimensionaler Daten in Kombination mit Verfolgungssystemen ermöglicht häufig ein besseres Verständnis komplexer Datensätze. Durch die Verfolgung von Kopfbewegungen können Benutzer die Ansicht in der virtuellen steuern Verbesserung der Wahrnehmung von Raum und Geometrie [11]. Die stereoskopische Visualisierung dreidimensionaler Daten in Kombination mit Verfolgungssystemen ermöglicht häufig ein besseres Verständnis komplexer Datensätze. Durch die Verfolgung von Kopfbewegungen können Benutzer die Ansicht in der virtuellen steuern

* E-Mail: g_brud01@math.uni-muenster.de

† E-Mail: fstein@math.uni-muenster.de

‡ E-Mail: kh@math.uni-muenster.de

Welt auf natürliche Weise. Im Gegensatz dazu verringern passive Animationen und feste Blickrichtungen die Fähigkeit des menschlichen Geistes, ein mentales Modell der betrachteten architektonischen Einheiten aufzubauen. In HMD- oder CAVE-Setups mit Positions- und Orientierungssensoren können sich Benutzer mit der einfachsten und intuitivsten Erkundungstechnik, dh realem Gehen, im Maßstab eins zu eins durch virtuelle Welten bewegen. Anscheinend hat diese Technik den Nachteil, dass die Bewegungen der Benutzer durch die begrenzte Reichweite der Tracking-Sensoren und einen eher kleinen Arbeitsbereich in der Laborumgebung eingeschränkt werden. Trotz dieser Einschränkungen ist reales Gehen anderen Fortbewegungstechniken in Bezug auf das Gefühl der Benutzer, sich in der virtuellen Umgebung (VE) „präsent zu fühlen“, überlegen [29]. Einige Setups bieten sogar passives haptisches Feedback.

Interaktion kann in IVEs fast natürlich implementiert werden [22], jedoch unterscheidet sich die Wahrnehmung in der virtuellen Welt von der Wahrnehmung in der realen Welt. Beispielsweise neigen Probanden dazu, egozentrische Entfernungen [8, 10, 17], Sehgeschwindigkeiten [1] und zurückgelegte Entfernungen [5] beim Gehen in IVEs zu unterschätzen. Das eingeschränkte Sichtfeld (FoV) und verschiedene Nebenwirkungen von unbequemen VR-Geräten können sich auf dieses Wahrnehmungsphänomen auswirken. Es wurden umgeleitete Geotechniken vorgeschlagen, die das Gehen über große Entfernungen in der VE ermöglichen, während eine große Verschiebung des Benutzers in der realen Welt vermieden werden kann. Ohne die Notwendigkeit einer umfassenden Hardwaretechnologie bleiben die Benutzer daher in einem begrenzten Laborbereich, während sie beliebig große virtuelle Welten erkunden können [21, 25]. Umgeleitete Geotechniken basieren auf psychologischen Experimenten, welche besagen, dass normalerweise das Sehen die Propriozeption und das vestibuläre Empfinden dominiert, wenn diese Sinne nicht übereinstimmen [2]. Daher kann man in realen Laufkonfigurationen, in denen Benutzer die VE visuell wahrnehmen, zusätzliche Manipulationen an den verfolgten Bewegungen vornehmen, die auf Bewegungen der virtuellen Kamera angewendet werden. Wenn diese Manipulationen unterhalb der Wahrnehmungsschwellen liegen, kompensieren Benutzer diese Änderungen auf ihrem realen Reiseweg unwissentlich. Wenn Benutzer beispielsweise in der virtuellen Welt eine lange Strecke geradeaus gehen, werden sie durch kleine Drehungen der virtuellen Kamera so umgeleitet, dass sie in der realen Welt unbewusst einen Kreisbogen in die entgegengesetzte Richtung laufen. Auf diese Weise können Benutzer auf Pfaden durch die reale Welt geführt werden, die sich von den in der VE wahrgenommenen Pfaden unterscheiden. Wenn die induzierten Rotationen klein genug sind,

In diesem Artikel stellen wir die *Arch-Explore* Benutzeroberfläche, die architektonische Miniatur- und maßstabsgetreue Erkundung in einem einzigen Setup enthält. Die Unterstützung beider Anforderungen ist für die Kommunikation von Vorschlägen für architektonische Entwürfe von wesentlicher Bedeutung. Der Arch-Explore ist eine echte Benutzeroberfläche für das Gehen, die das umgeleitete Gehen für architektonische Szenen anpasst. Wir beschreiben eine virtuelle Miniaturmodellumgebung, die Architekten Vorteile bietet, die mit physischen Blockmodellen vergleichbar sind, und diese mit der Möglichkeit kombiniert, die Modelle auch von innen zu betrachten. Daher nutzen wir Funktionen in Innenräumen und ermöglichen die Erkundung von Groß-

Skalieren Sie virtuelle Modelle in einem raumgroßen VR-Labor. Wir beschreiben, wie Subjekte durch Architekturmodelle gehen können, während passive Haptik bestimmte Einschränkungen des Modells anzeigt, wie sie beispielsweise durch physische Wände eingeführt werden.

Der Rest dieses Papiers ist wie folgt strukturiert. Abschnitt 2 fasst verwandte Arbeiten zusammen. In Abschnitt 3 wird die Arch-Explore-Benutzeroberfläche vorgestellt und die umgeleitete Walking-Implementierung für maßstabsgetreue Modelle ausführlich beschrieben. Abschnitt 4 beschreibt das verwendete Hardware- und Software-Setup. Abschnitt 5 schließt das Papier mit einem vorläufigen selbstberichteten Feedback zur vorgestellten ArchExplore-Benutzeroberfläche ab und gibt einen Überblick über zukünftige Arbeiten.

2 R. BEGEISTERT W. ORK

Um Entwurfsvorschläge zu kommunizieren, verwenden Architekten und Stadtplaner üblicherweise physikalische Blockmodelle, die aus Pappe, Holz oder Kunststoff bestehen. Ihre Maßnahmen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anwendung. Beispielsweise werden städtebauliche Modelle im Maßstab 1: 2000 bis 1: 500, einzelne Gebäude im Maßstab 1: 200 bis 1:50 erstellt und Details im Bereich von 1:20 angezeigt bis 1: 1 [12]. Es wurden verschiedene Desktop- und VR-basierte Benutzeroberflächen vorgeschlagen, um die Erforschung digitaler 3D-Modelle in solchen Maßstäben zu unterstützen. In IVE-Setups werden verkleinerte Modelle häufig als 3D-Karten des angezeigten VE verwendet, z. B. als Einschübe [4], während Benutzer das Modell aus einer egozentrischen Perspektive in echtem Maßstab untersuchen. Handmodelle wie das *Welten in Miniatur* (Die WIM) -Metapher [28, 33] wurde verwendet, um eine immersive HMD-Ansicht mit einer handgehaltenen Miniaturkopie des VE zu erweitern. Andere Schnittstellen ermöglichen es Benutzern, durch virtuelle Modelle verschachtelter Skalen zu navigieren, z. B. durch Vergrößern eines menschlichen Körpers, bis Benutzer sehen können, wie Blutzellen durch die Venen strömen [14].

Miniaturmodelle werden auch in Freisprecheinrichtungen verwendet, z. *Schritt WIM* [15], mit dem Benutzer durch Gesten mit den Füßen durch virtuelle Umgebungen in verschiedenen Maßstäben gehen können. Es wurde gezeigt, dass Walking-Setups der handbasierten Navigation in Architekturszenen überlegen sind [29, 34]. Obwohl Interrante et al. haben gezeigt, dass Entfernungsschätzung und Raumerkennung eine virtuelle Umgebung von realer Größe erfordern [10]. Viele IVE-Setups ermöglichen es Benutzern, durch beliebig skalierte virtuelle Modelle zu gehen. *Echtes Gehen* durch VEs kann einfach unterstützt werden, indem die verfolgten Kopfbewegungen des Benutzers auf identische Kamerapositionen und -ausrichtungen in der virtuellen Welt übertragen werden [30]. Wie oben erwähnt, besteht der Nachteil darin, dass die Bewegungen durch die Verfolgungssensorenbereiche und Platzbeschränkungen der physischen Umgebung des Benutzers begrenzt sind.

Umgeleitete Geh- [21] und Neuorientierungstechniken [20] verwenden nicht wahrnehmbare Manipulationen - im Grunde Rotationen und Übersetzungen -, die auf die verfolgte Kopfbewegung angewendet werden und die Benutzer unbewusst kompensieren, indem sie sich in der realen Welt neu orientieren oder neu positionieren. Das Hauptziel besteht darin, Benutzer unmerklich so umzuleiten, dass sie sich in einem begrenzten Verfolgungsraum befinden, während eine viel größere virtuelle Welt durch reales Gehen erkundet werden kann. Daher wurden verschiedene Techniken vorgeschlagen. Der grundlegendste Ansatz besteht darin, Translationsbewegungen so zu skalieren, dass zurückgelegte physische Entfernungen auf größere oder kürzere zurückgelegte Entfernungen in der virtuellen Welt übertragen werden können [31, 32]. Mit dieser Technik können unbeabsichtigte seitliche Verschiebungen verhindert werden, indem nur Bewegungen in der Hauptaufrichtung skaliert werden [9]. Neuorientierungstechniken drehen die angezeigte Szene unmerklich um die Position des Benutzers in der virtuellen Welt. Die meisten Ansätze erfordern, dass Benutzer stillstehen oder sich in der realen Welt drehen. Wenn in einer solchen Situation kleine Rotationen angewendet werden, kann der Benutzer neu ausgerichtet werden, beispielsweise weg von physischen Hindernissen in Gehrichtung, bevor er weitergehen kann [13, 20, 21]. Andere Ansätze wenden Rotationen an, während Benutzer gehen [6, 21, 26]. Wie oben erwähnt, führen kleine Drehungen der virtuellen Kamera dazu, dass Benutzer diese Manipulation unmerklich kompensieren, wenn sie in der realen Welt gerade laufen möchten, indem sie in der realen Welt einen Kreisbogen in die entgegengesetzte Richtung bewegen (siehe Abbildung 1). Wenn in einer solchen Situation kleine Rotationen angewendet werden, kann der Benutzer neu ausgerichtet werden, beispielsweise weg von physischen Hindernissen in Gehrichtung, bevor er weitergehen kann [13, 20, 21]. Andere Ansätze wenden Rotationen an, während Benutzer gehen [6, 21, 26]. Wie oben erwähnt, führen kleine Drehungen der virtuellen Kamera dazu, dass Benutzer diese Manipulation unmerklich kompensieren, wenn sie in der realen Welt gerade laufen möchten, indem sie in der realen Welt einen Kreisbogen in die entgegengesetzte Richtung bewegen (siehe Abbildung 1). Wenn in einer solchen Situation kleine Rotationen angewendet werden, kann der Benutzer neu ausgerichtet werden, beispielsweise weg von physischen Hindernissen in Gehrichtung, bevor er weitergehen kann [13, 20, 21]. Andere Ansätze wenden Rotationen an,

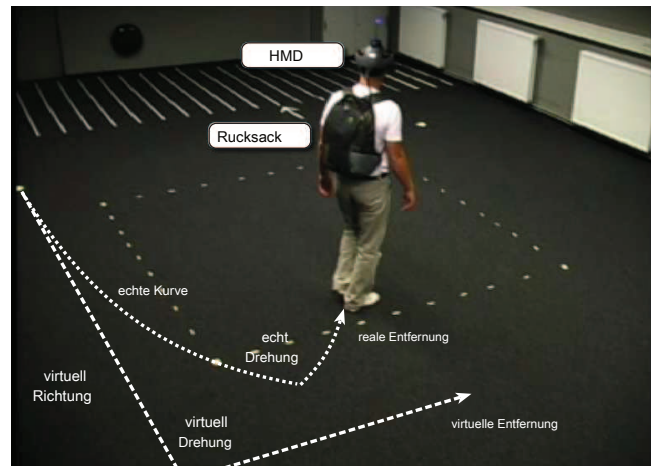


Abbildung 1: Darstellung umgeleiteter Gehtechniken (angepasst aus [24]): Der Benutzer geht in der realen Welt einen Pfad, der sich vom visuell wahrgenommenen Pfad in der VE unterscheidet.

Steinicke et al. haben eine praktische Taxonomie von Umleitungsfunktionen [25], Analysen der menschlichen Empfindlichkeit gegenüber diesen Manipulationen [24, 26] sowie einen Pfadvorhersage- und Zuordnungsalgorithmus vorgestellt, mit dem Benutzer auf Pfaden in der realen Welt geführt werden können, die von diesen abweichen können die Gehwege in der VE [25]. Andere Arbeiten konzentrierten sich auf die Kombination von passiver Haptik [7] mit umgeleitetem Gehen, sodass Benutzer zu Proxy-Requisiten in der realen Welt umgeleitet werden, die sie berühren können, wenn sie sich virtuellen Objekten nähern [13, 25]. Das Hauptproblem bei diesen Ansätzen besteht darin, dass ein großer VR-Labora Aufbau von mindestens 50 vorhanden ist $m \times 50 m$ Bodenfläche ist erforderlich, um unmerkliche Manipulationen zu ermöglichen [21, 24]. Peck et al. haben vorgeschlagen, visuelle Ablenker zu verwenden [20], die Benutzer ablenken und somit stärkere Manipulationen der virtuellen Welt ermöglichen, ohne dass sie es bemerken. Dieser Ansatz injiziert jedoch kleine sich bewegende Objekte in die virtuelle Welt, die Benutzer absichtlich ablenken. Aus diesem Grund sind virtuelle Ablenker für eine professionelle architektonische Erkundung nicht durchführbar.

3 A. RCH- E. XPLORE U. SER ich NTERFACE

Die Arch-Explore-Benutzeroberfläche kombiniert zwei Hauptansätze für die Architekturerkundung in IVE-Setups:

1. Architektonische 3D-Modelle werden als Miniaturen in einem realen Walking-Setup angezeigt, sodass Architekten und Stadtplaner sie wie physische Blockmodelle in der realen Welt untersuchen können. Wir zeigen das virtuelle Modell in einem virtuellen Replikationsraum an, der der physischen Laborumgebung ähnelt. Da Benutzer mit dieser Umgebung vertraut sind - sie sehen das Labor, bevor die VR-Erfahrung beginnt -, können Benutzer Messungen der angezeigten Modelle mit realen Merkmalen vergleichen, und die Entfernungsschätzung sowie die Raumerkennung werden verbessert.
2. Echtes Gehen ermöglicht die natürliche Erkundung des Innenraums architektonischer Entwürfe in echtem Maßstab. Wir überwinden die meisten der oben genannten Probleme realer Benutzeroberflächen beim Gehen, indem wir Umleitungstechniken für Fernreisen integrieren.

Beide Strategien werden mithilfe virtueller Portale kombiniert, um intuitiv vom virtuellen Replikationsraum mit dem 3D-Architekturmodell in bestimmten Räumen des Modells in echtem Maßstab zu gelangen. Benutzer können jederzeit vom Inneren des Architekturmodells in den virtuellen Replikationsraum zurückkehren. In den folgenden Unterabschnitten werden zunächst der virtuelle Replikationsraum sowie die virtuellen Portale beschrieben. Anschließend beschreiben wir die reale Benutzeroberfläche für die Erkundung des Innenraums von 3D-Modellen.

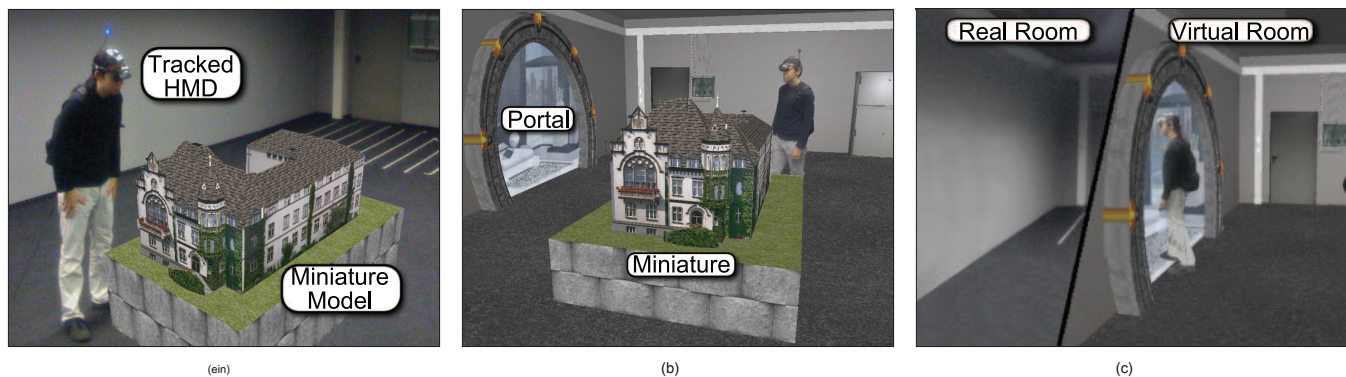


Abbildung 2: Darstellung der immersiven architektonischen Erkundungsumgebung: (a) Ein Benutzer betrachtet ein digitales Miniaturgebäudemodell in einem HMD-Setup. (b) Ein Portal öffnet sich zu einem Raum im Architekturmodell. Bild (c) zeigt die Komprimierung der Gehstrecke, bei der ein Benutzer eine Wand in der angezeigten VE früher als in der realen Welt erreicht.

3.1 Der virtuelle Replikationsraum

Wir verwenden einen virtuellen Replikationsraum, um Benutzer in der Arch-Explore-Arbeitsumgebung aus zwei Gründen zu unterstützen. Erstens bietet der virtuelle Replikationsraum eine bekannte Umgebung für die Erforschung verkleinerter Architekturmodelle, wie oben erwähnt. Zweitens wurde gezeigt, dass das Präsenzgefühl des Benutzers zunimmt, wenn die VR-Erfahrung in einer virtuellen Nachbildung der realen Umgebung des Benutzers beginnt [27].

Ein solcher virtueller Replikationsraum wird modelliert und strukturiert, um die physische VR-Umgebung, dh den Laborraum, widerzuspiegeln. Benutzer befinden sich im VR-Labor, wenn sie in das IVE-System eingetaucht sind. B. durch Tragen eines HMD mit Markern oder Sensoren zur Positions- und Orientierungsverfolgung. Tracking-Systeme ermöglichen es Benutzern, eine Ansicht des virtuellen Replikat-Raummodells von derselben Position und mit derselben Ausrichtung wie in der realen Welt aus zu erhalten, was zu minimalen Desorientierungs- und Übergangseffekten führt, wenn Benutzer in das IVE-System eintauchen [23, 27]. Darüber hinaus können Benutzer im virtuellen Replikationsraum die VR-Geräte kalibrieren, indem sie beispielsweise das HMD und den Orientierungssensor anpassen, bis der virtuelle Replikationsraum korrekt an der physischen Umgebung ausgerichtet ist. Erstbenutzer können sich mit den angezeigten VE- und VR-Geräten vertraut machen, indem sie beispielsweise zu virtuellen Wänden gehen und ihre realen Gegenstände berühren.

Sobald die Benutzer mit dem virtuellen Replikationsraum vertraut sind, werden verkleinerte 3D-Architekturmodelle in der Mitte des Raums angezeigt. Miniaturmodelle vermitteln einen verbesserten Eindruck von Größe und Abmessungen architektonischer Konstruktionen, insbesondere im Kontext ihrer Umgebung. Die Miniaturmodelle können mit verfügbaren Nachbarschaftsinformationen auf Sockeln im virtuellen Raum angezeigt werden. Daher können Benutzer um sie herumgehen und sie von allen Seiten untersuchen, wie dies bei physischen Blockmodellen der Fall wäre. Neben der Möglichkeit, das visuelle Erscheinungsbild virtueller Blockmodelle einfach zu ändern, können Benutzer ihren Kopf sogar in das angezeigte 3D-Modell bewegen und es von innen betrachten, wenn VR-basierte Modelle anstelle von physischen Blockmodellen verwendet werden. Abbildung 2 (a) zeigt, wie virtuelle Miniaturmodelle in einem verfolgten HMD-Setup untersucht werden können.

Interrante et al. haben gezeigt, dass die Entfernungsschätzung in virtuellen Umgebungen, die aus der realen Welt bekannt sind, besser ist als die Entfernungsschätzung in unbekannten Umgebungen [10]. Wir gehen davon aus, dass dieser Effekt transitiv ist, dh die Vertrautheit der Benutzer mit den Maßen des virtuellen Replikat-Raummodells kann zu einem besseren Verständnis der Maße der darin angezeigten Architektur-Miniaturmodelle führen.

3.2 Virtuelle Portale

Virtuelle Portale sind dreidimensionale Türen, die einen virtuellen Ort mit einem anderen verbinden und von Benutzern betreten werden können, um an diesen Ort und zurück zu gelangen. Neben der Verbindung verschiedener Standorte in derselben VE können Portale auch Türen zwischen verschiedenen VEs bereitstellen. Solche Portale werden in Verbindung mit dem virtuellen Replikationsraum verwendet, damit Benutzer vom virtuellen Replikationsraum, der das verkleinerte 3D-Modell zeigt, zu einem Ort reisen können *innerhalb* dieses spezifische Modell (siehe Abbildung 2 (b)). Wenn Benutzer durch ein solches virtuelles Portal oder eine solche Tür gehen, können sie den virtuellen Replikatraum verlassen und einen zuvor ausgewählten Raum aus dem Miniaturmodell betreten, das in der Mitte des virtuellen Replikatmodells angezeigt wurde. Anschließend kann der Raum im realen Maßstab des Architekturmodells erkundet werden. Der Übergang zwischen zwei Räumen ist intuitiv, da Benutzer nur von einem Raum durch eine Tür in einen anderen Raum gehen. Die Implementierung virtueller Portale basiert auf der Absicht, den Benutzern den virtuellen Arbeitsbereich von Arch-Explore als beständige und kontinuierliche Welt zu präsentieren, um Brüche im subjektiven Gefühl der Benutzer, sich präsent zu fühlen, zu minimieren [23]. Darüber hinaus erfordern virtuelle Portale echtes Gehen, was die natürlichste Art des Reisens in der realen Welt ist.

Wir statten Benutzer der Arch-Explore-Benutzeroberfläche mit a aus *Nintendo Wiimote* Controller, mit dem sie einen Ort im angezeigten Miniaturmodell auswählen können. Nach Auswahl eines Raums wird an einer Wand des virtuellen Replikationsraums ein virtuelles Portal angezeigt. Durch das virtuelle Portal können Benutzer den ausgewählten Raum betreten und ihn in echtem Maßstab anzeigen. Abbildung 2 (b) zeigt einen Benutzer, der ein Portal an einer Wand des virtuellen Replikationsraums geöffnet hat, das einen Blick auf einen Raum im angezeigten Miniaturmodell zeigt. Wie oben erwähnt, kann der Benutzer durch das Betreten dieses Portals den ausgewählten Raum betreten.

Sobald Benutzer den Rahmen des Portals durchlaufen haben, befinden sie sich in einem Raum im architektonischen 3D-Modell. Um eine realistische Erkundung dieser Räume zu ermöglichen, blenden wir das gerade gekreuzte Portal hinter den Benutzern nach einigen Sekunden aus. Wenn Benutzer zum virtuellen Replikatraum zurückkehren möchten, können sie den Wiimote-Controller erneut verwenden, z. B. durch Drücken der Schaltfläche "Home", und ein virtuelles Portal wird angezeigt. Wenn Sie durch das Portal gehen, können Benutzer zum virtuellen Replikationsraum zurückkehren.

Bewegungskomprimierung

Die Visualisierung von Portalen an Wänden des virtuellen Replikationsraums wirft ein praktisches Problem auf: Da die Wände im virtuellen Raummodell mit den Wänden im realen Labor ausgerichtet sind, können Benutzer nicht einfach durch eine visualisierte Tür an einer der Wände gehen, weil sie würde mit der physischen Wand kollidieren. Um dies zu überwinden

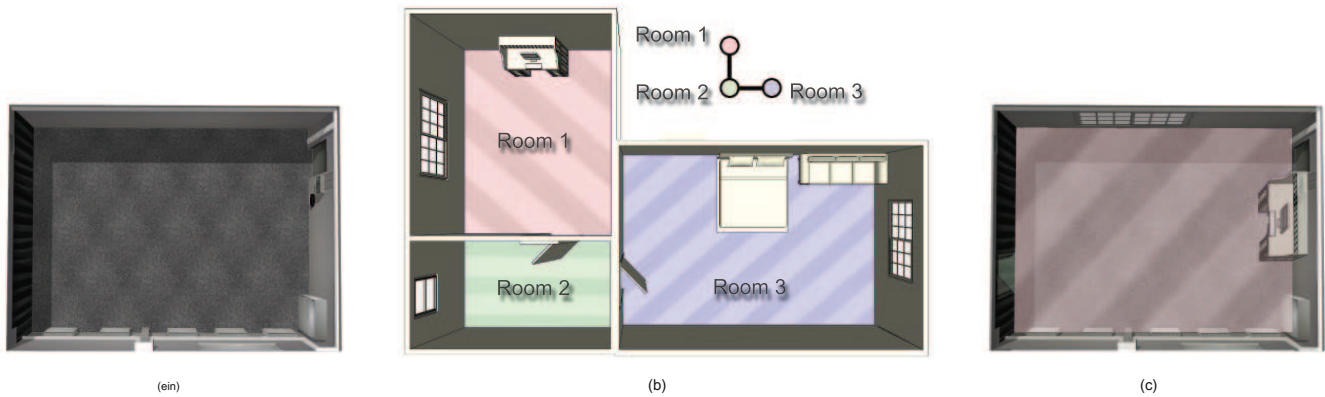


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Segmentierungs- und Anpassungsprozesses: (a) Ansicht des verfolgten VR-Laborraums von oben nach unten, (b) Segmentierung eines einfachen virtuellen Gebäudemodells in drei Räume und (c) Anpassung der Koordinaten von Raum 1 durch eine 90-Grad-Drehung zum VR-Laborkoordinatensystem.

Einschränkung verwenden wir die Komprimierung der Gehstrecke [26]. Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass Benutzer nicht in der Lage sind, Unterschiede zwischen zurückgelegten physischen und virtuellen Entfernungen zu erkennen, wenn die virtuellen Übersetzungen im Vergleich zur realen Welt um bis zu 22% verringert oder erhöht werden [24]. Wir haben diese Ergebnisse angepasst, um Benutzerbewegungen zu skalieren, die auf ein Portal an einer der Wände des virtuellen Replikationsraums gerichtet sind.

Wenn Portale geöffnet werden, stellen wir sicher, dass sie an der Wand des virtuellen Roodels geöffnet sind, die am weitesten von der aktuellen Position des Benutzers entfernt ist. Wenn wir also die Gehstrecke der Benutzer im virtuellen Replikationsraum zur Wand mit dem Portal skalieren, z. B. nach dem Faktor

1.22 erreichen sie die virtuelle Wand früher als die entsprechende reale Weltwand. Durch das Einbringen derart geringfügiger Abweichungen zwischen zurückgelegten physischen und virtuellen Entfernungen können Benutzer unmerklich manipuliert werden, sodass sie durch ein Portal in einer der virtuellen Wände gehen können, ohne mit einer Wand in der realen Welt zu kollidieren. Fig. 2 (c) zeigt den Effekt dieser Kompression der Gehstrecke. In der virtuellen Welt erreicht der Benutzer das Portal, in der physischen Welt befindet sich der Benutzer fast in der Mitte des Raums.

3.3 Real Walking Indoor Exploration

Mit IVE-Setups für echtes Gehen können Benutzer architektonische Innenszenen wie in der realen Welt erkunden. Durch die Abbildung von verfolgten Positionen und Ausrichtungen des Benutzers in Echtzeit erhalten Benutzer den Eindruck, durch eine virtuelle Welt zu gehen. Bei einer Eins-zu-Eins-Zuordnung können Benutzer eine raumgroße VE erkunden (siehe Abschnitt 3.1). Aber auch bei Skalierungen von eins zu eins n , dh ein Meter in der realen Welt führt zu einer Übersetzung von n Meter in der VE (siehe Abschnitt 3.2) ist der erforschbare virtuelle Raum begrenzt, da die Topologie des virtuellen und des realen Raums normalerweise unterschiedlich ist. Theoretisch bietet das umgeleitete Gehen die Möglichkeit, diese Einschränkung zu überwinden und die Erforschung groß angelegter VEs zu ermöglichen. Das Hauptproblem bei dieser Technik besteht jedoch darin, dass die physische Gehfläche größer sein muss als bei typischen raumgroßen VR-Konfigurationen (ca. $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ [21, 24]). Die ArchExplore-Benutzeroberfläche ermöglicht die Erkundung großer 3D-Modelle auch in typischen VR-Laborumgebungen, indem globales Wissen über Architekturmodelle und die Integration angepasster umgeleiteter Gehtechniken genutzt werden.

In den folgenden Unterabschnitten beschreiben wir den Segmentierungs- und Anpassungsprozess, mit dem Benutzer beliebige virtuelle Räume oder volumengroße Volumes in 3D-Gebäudemodellen auf natürliche Weise untersuchen können. Wir beschreiben die umgeleiteten Gehtechniken, mit denen Benutzer von einem virtuellen Raum in einen anderen gehen können.

3.3.1 Segmentierung virtueller Räume

In den meisten praktischen Fällen überschreiten die Maße von 3D-Gebäudemodellen die verfügbare Größe des verfolgten Arbeitsvolumens im VR-Labor. Um diese virtuellen Modelle untersuchen zu können, teilen wir sie in kleinere zusammenhängende Raumvolumina auf. In diesem Artikel beschreiben wir detailliert virtuelle Räume, die über virtuelle Türen verbunden sind. Die vorgeschlagenen Techniken sind jedoch nicht auf diesen Fall beschränkt.

Derzeit identifizieren wir Räume und Türen in Architekturmodellen manuell. Obwohl dies in angemessener Zeit möglich ist, kann dieser Prozess automatisiert werden. Die Segmentierung architektonischer Innenräume ist in der Computergrafik Standard, um das Rendern durch Okklusionsbäume zu beschleunigen. Das *Zellen und Portale* Partitionierungsschema ist ein Beispiel für Raumpartitionierungsansätze [18]. Mit dieser Technik werden 3D-Modelle in kohärente polyedrische Volumina unterteilt, die als "Zellen" bezeichnet werden und von benachbarten Zellen nur durch Öffnungen in Zellgrenzen, die als "Portale" bezeichnet werden, "gesehen" oder von diesen aus zugänglich sind. Es gibt verschiedene Zellen-und-Portale-Algorithmen, mit denen virtuelle Gebäudemodelle automatisch in raumgroße Zellen unterteilt werden können (vgl. [16, 19]). Abbildung 3 (b) zeigt die Segmentierung eines einfachen Dreiraumgebäudes.

3.3.2 Virtuelle Raumausstattung

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, kann der virtuelle Replikationsraum durch reales Gehen im VR-Labor intuitiv erkundet werden. Die physischen Verfolgungspositionen der Benutzer werden den entsprechenden identischen Positionen im virtuellen Modell zugeordnet, sodass Benutzer zu Wänden im virtuellen Replikationsraum gehen und ihre physischen Gegenstände berühren können. Dies ist bei Räumen in beliebigen Gebäudemodellen nicht immer möglich (Abbildung 4 (a) und (b)). Ihre Form sowie ihre Größe können vom (normalerweise rechteckigen) VR-Laborraum abweichen. Der Prozess, den wir als „Anpassen“ bezeichnen, leitet Zuordnungen von der Form und Größe des physischen Verfolgungsraums und des Koordinatensystems zu denen virtueller Räume ab. Da es wünschenswert ist, dass Benutzer beim Berühren einer virtuellen Wand passives haptisches Feedback erhalten, Diese Anpassung ermöglicht es uns, zumindest einige virtuelle und physische Wände so auszurichten, dass die Benutzer, wenn sie auf eine virtuelle Wand zugehen, diese auf eine reale Wand umleiten. Dies ermöglicht auch die Erkundung virtueller Räume, die größer als das physische Labor sind, mithilfe kleiner oder nicht wahrnehmbarer Manipulationen.

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, können Benutzer kleine Abweichungen zwischen zurückgelegten physischen und virtuellen Entfernungen nicht erkennen.

Übersetzungsgewinne werden verwendet, um diese Manipulationen von Viren zu beschreiben tatsächliche Kameraübersetzungen [25]. Annehmen, dass $T_{real} = P_{cur} - P_{vor}$ Definiert die Übersetzung zwischen der aktuellen Benutzerposition P_{cur} und das

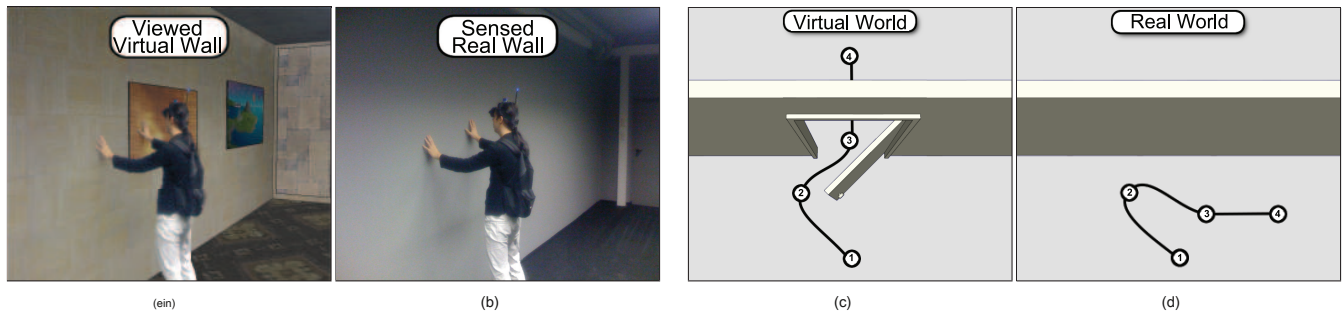


Abbildung 4: In (a) und (b) erhält der Benutzer passives haptisches Feedback zu einer virtuellen Wand, indem er eine reale Wand berührt. In (c) wird ein typischer Pfad gezeigt, dem Benutzer folgen, wenn sie durch eine Schwingtür von einem Raum in einen anderen in der virtuellen Welt gehen. Das Beispiel in (d) zeigt, wie stark der zurückgelegte Pfad in der realen Welt vom virtuellen Pfad (c) abweichen kann, wenn Umleitungstechniken angewendet werden.

vorherige Benutzerposition P . Vor wie vom Tracking-System erkannt. Übersetzungsgewinne G sind definiert als das Verhältnis zwischen virtuell und physische Übersetzungen, dh $g = \frac{T_{virtuell}}{T_{real}}$, mit $T_{virtuell}$ das virtuelle und T_{real} die physische Übersetzung. Experimentell validierte Schwellenwerte zeigen, dass virtuelle Übersetzungen unbemerkt skaliert werden können bis zu +/- 22% im Vergleich zur realen Welt [24]. Dies bedeutet, dass eine physische Positionsänderung von einem Meter auf eine virtuelle Übersetzung im Intervall abgebildet werden sollte $ich_{T=1} = 0,78\text{ m}, 1,22\text{ m}$.

Lassen $(x_r, y_r, z_r) \in \mathbb{R}^3$ R^+ bezeichnen die VR-Laborraumgröße in Metern und $(x_v, y_v, z_v) \in \mathbb{R}^3$ R^+ die Größe des Minimums nicht achsenorientiert Begrenzungsrahmen eines beliebigen virtuellen Raums. Für unsere Zwecke die y - Die Höhe des virtuellen und physischen Raums kann vernachlässigt werden, was bedeutet, dass Verstärkungsfaktoren nur für die benötigt werden xz - Grundebene. Wenn der virtuelle Raum größer als das physische Labor ist, werden die Bewegungen der Benutzer hochskaliert, um den gesamten virtuellen Raum abzudecken. Wenn der virtuelle Raum kleiner ist, werden reale Bewegungen komprimiert, wenn sie dem VE zugeordnet werden. Unterschiede zwischen physischen und virtuellen Gehentfernungen können nicht wahrgenommen werden, wenn das Verhältnis zwischen den virtuellen

und echte Raumgröße entspricht $v = \frac{x}{x_f}$ ich und $v = \frac{z}{z_f}$ ICH , r beziehungsweise mit $v = \frac{x}{z_f}$ ich und $v = \frac{z}{x_f}$ ich wenn der virtuelle Raum von a 90° Drehung zum VR-Laborkoordinatensystem.

Diese einfache Anpassungsstrategie ermöglicht die Erkundung der meisten virtuellen Räume in einem typischen raumgroßen VR-Labor mit passivem haptischem Feedback für mindestens einige virtuelle Wände. In einigen Fällen sind virtuelle Räume jedoch zu klein oder zu groß, um in dem begrenzten VR-Laborraum angemessen erforscht zu werden. Falls die virtuellen Räume zu klein sind, um mit dem gesamten physischen Laborraum erkundet zu werden, kombinieren wir sie mit benachbarten virtuellen Räumen, um größere Zellen zu bilden. Wenn die virtuellen Räume viel größer als das VR-Labor sind, unterteilen wir die virtuellen Räume entweder in kleinere Zellen oder wenden höhere Übersetzungsgewinne an. Obwohl dies zu spürbaren Manipulationen führt, können Benutzer Räume auf natürliche Weise erkunden. Nach bisherigen Erkenntnissen gewinnt die Übersetzung bis zu $g = 2.0$ werden von den Nutzern immer noch nicht als übermäßig ablenkend angesehen [26].

Der beschriebene Montagevorgang kann zur Laufzeit automatisch durchgeführt werden. Die 3 (c), 4 (a) und 4 (b) veranschaulichen, wie ein virtueller Raum einer anderen Größe aus einem VR-Laborraum heraus untersucht werden kann.

3.3.3 Virtuelle Türen

Wie oben beschrieben, können 3D-Gebäudemodelle in separate Räume unterteilt werden, und Benutzer können sie durch echtes Gehen erkunden. Virtuelle Türen und Öffnungen ermöglichen es Benutzern, von einem virtuellen Raum in einen anderen zu gehen. Wiederum zeigt das praktische Problem, dass sich virtuelle Türen in virtuellen Wänden befinden, von denen einige mit Wänden in der realen Welt ausgerichtet sind, um passives haptisches Feedback zu geben. Daher müssen Benutzer neu ausgerichtet werden, wenn sie sich einer virtuellen Tür nähern. Um Benutzer von einer physischen Wand weg zu orientieren, verwenden wir *curva*-

ture Gewinne [25]. Diese Gewinne nutzen die Tatsache aus, dass Benutzer, die in der virtuellen Welt geradeaus gehen, durch iterative Injektionen von relativ kleinen Kameradrehungen zur Seite gezwungen werden, in der realen Welt entlang einer Kurve in die entgegengesetzte Richtung zu gehen, um auf einem geraden Weg zu bleiben die VE (vgl. Abschnitt 2). Krümmungsgewinne $G \in \mathbb{R}$.

Definieren Sie das Verhältnis zwischen Übersetzungen und angewendeten Rotationen virtueller Szenen, dh sie beschreiben die Biegung des Gehwegs der Benutzer in der realen Welt. Die Biegung wird durch ein Kreissegment mit Radius bestimmt r , wie in Abbildung 5 dargestellt. Krümmungsverstärkungen sind definiert als $g_c = 1 / r$, mit $g = 0$ wenn $r = \infty$.

Wenn die injizierten Manipulationen relativ klein sind, kompensieren Benutzer unwissentlich die virtuellen Rotationen und gehen einen gekrümmten Pfad entlang. Krümmungsgewinne $G \in [0, 0.045]$ gelten für Benutzer als nicht wahrnehmbar [24]; Krümmungsgewinne bis zu $g = 0,64$ sind spürbar, aber immer noch nicht übermäßig ablenkend [26].

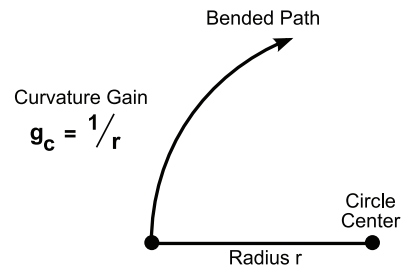


Abbildung 5: Krümmungsverstärkungen und Pfadbiegung.

Falls Benutzer in der VE eher einen gekrümmten als einen geraden Weg gehen, Rotationsgewinne angewendet werden [25]. Diese Gewinne beschreiben das Verhältnis zwischen physischen und virtuellen Rotationen. Wenn das Verfolgungssystem eine Änderung der Ausrichtung des Benutzers in der realen Welt feststellt, können die entsprechenden Drehwinkel (Gieren, Neigen, Rollen) skaliert werden, wenn sie auf das VE übertragen werden. Rotationsgewinne $G \in \mathbb{R}$. Definieren Sie diese Zuordnungen, dh

die Skalierung aus einem physikalischen Drehwinkel R_{echt} zu einem virtuellen Winkel $R_{virtuell}$ durch den Quotienten $g = \frac{R_{virtuell}}{R_{echt}}$ mit $R_{echt} \in \{\text{Gieren, Pech, Rollen}\}$.

Rotationsverstärkungen werden verwendet, um Rotationen zu skalieren, während Benutzer stehen oder gehen. Wenn Rotationsgewinne angewendet werden, während ein Benutzer geht, unterscheidet sich die Biegung des Pfades in der virtuellen Welt von der des entsprechenden Pfades in der realen Welt. Wenn die angewendeten Verstärkungen für Gierrotationen sind $G \in [0, 59, 1, 1]$ werden sie von den Nutzern als natürlich angesehen [24]. Zum Beispiel, wenn Benutzer um 45° drehen - In der VE können sie unmerklich manipuliert werden, um 69% oder 31° zu erreichen - mehr in der realen Welt.

Pfadvorhersage

Um von einem virtuellen Raum in einen anderen zu gelangen, müssen Benutzer eine virtuelle Tür passieren. Diese sind in verschiedenen Formen erhältlich und lassen normalerweise nur eine enge Öffnung für den Benutzer frei. Da Benutzer wissen, dass einige virtuelle Wände physische Gegenstände haben, werden sie wahrscheinlich vorsichtig durch diese Türen manövrieren. Dies ermöglicht eine ausreichend genaue Vorhersage der Wege, die Benutzer zum Betreten benachbarter Räume einschlagen.

Pfadführungstechniken für umgeleitetes Gehen ermöglichen es uns, einen solchen vorhergesagten virtuellen Pfad einem anderen Pfad zuzuordnen, auf dem sich Benutzer in der realen Welt bewegen [25]. Wenn die virtuelle Kamera leicht gedreht wird, während Benutzer wie oben beschrieben gehen und / oder sich drehen, kompensieren sie diese Szenenrotationen durch Gegenrotationen ihres Körpers, wodurch es möglich wird, physisch gegangene Pfade zu biegen. Fig. 4 (c) zeigt einen Weg durch eine virtuelle Schwingtür und 4 (d) zeigt den gebogenen Weg in der realen Welt, wodurch eine Kollision mit einer physischen Wand vermieden wird. Die Pfadführung ermöglicht die Berechnung von Pfaden mit minimalen wahrnehmbaren Manipulationen.

Nahtlose Übergänge

Die zuvor beschriebenen Pfadmanipulationen ermöglichen es Benutzern, von einem virtuellen Raum in einen anderen zu gehen, während sie neu ausgerichtet werden, damit sie nicht mit Hindernissen kollidieren oder den physischen Verfolgersraum verlassen. Beim Betreten virtueller Türen müssen Benutzer normalerweise um etwa 90° neu ausgerichtet werden - oder 180° - in der realen Welt, so dass ihre Ausrichtung zum in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Anpassungsprozess des virtuellen Raums passt. Sobald Benutzer durch eine virtuelle Tür gegangen sind, wird das Koordinatensystem des vorherigen virtuellen Raums in Bezug auf die aktuelle Position des Benutzers in das angepasste Koordinatensystem des neuen Raums geändert. So können die Benutzer den neuen virtuellen Raum ohne weitere Neuausrichtung erkunden, bis sie den Raum durch eine andere Tür wieder verlassen.

3.3.4 Verknüpfungen für virtuelle Portale

In Abschnitt 3.2 wurden virtuelle Portale eingeführt, mit denen Benutzer in 3D-Gebäudemodellen zwischen dem virtuellen Replikationsraum und Räumen wechseln können. Virtuelle Portale können auch verwendet werden, um von einem Modellraum eines virtuellen Gebäudes zu einem anderen zu gelangen. Solche „Verknüpfungen“ sind nützlich, da diese virtuellen Räume nicht nebeneinander liegen müssen, sodass Benutzer große Entfernungen in der VE zurücklegen können. Virtuelle Portale zwischen zwei virtuellen Räumen werden wie oben beschrieben wie Portale zum virtuellen Replikationsraum implementiert. Derzeit können Benutzer mit dem Wiimote-Controller virtuelle Portale zu allen Räumen des Gebäudemodells öffnen. Da Benutzer durch offene Portale in den Raum auf der anderen Seite schauen können, können sie durch die Räume des Gebäudemodells wechseln, bis sie ihr beabsichtigtes Ziel gefunden haben.

3.4 Architektonische Merkmale

In den vorherigen Abschnitten wurden virtuelle Gebäudemodelle in virtuelle Räume unterteilt, die über virtuelle Türen verbunden sind. Diese Türen dienen als Übergangsbereiche, in denen Benutzer erheblich neu ausgerichtet werden können. Im Allgemeinen müssen Architekturmodelle nicht aus virtuellen Räumen und Türen bestehen, um mithilfe der ArchExplore-Benutzeroberfläche untersucht zu werden. Die vorgestellten Konzepte können auch für andere architektonische Einheiten mit unterschiedlichen Merkmalen angepasst werden. In diesen Fällen werden 3D-Modelle in beliebige Raumvolumina unterteilt, die durch Regionen unterteilt sind, die dem in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Neuorientierungsprozess entsprechen. Alle Regionen in Architekturmodellen, die eine ausreichende Vorhersage der Pfade ermöglichen, die Benutzer nehmen, um von einem Teil des 3D-Modells zu einem anderen zu gelangen, können verwendet werden, um Benutzer umzuleiten. Diese Regionen können auf ihre Qualität analysiert werden.

Manipulationen. Dies ermöglicht eine Segmentierung von Architekturmodellen, die auf einem Kompromiss zwischen der Größe getrennter virtueller Volumina und der Wahrnehmbarkeit von Neuorientierungen in den Übergangsregionen basiert. Daher können die virtuellen Volumina durch reales Gehen in dem begrenzten VR-Laborraum erkundet werden, genau wie in den oben beschriebenen virtuellen Räumen. Die Übergangsbereiche werden verwendet, um Benutzer neu auszurichten, wenn sie den verfolgten Laborraum verlassen möchten.

Der Anpassungsprozess in Abschnitt 3.3.2 ermöglicht die virtuelle Registrierung bei realen Wänden, und Benutzer erhalten passives haptisches Feedback, wenn sie angezeigte Wände berühren. Dies ist weit verbreitet, da Trennwände in VR-Labors eingerichtet werden können, falls der Verfolgersraum nicht den gesamten Laborraum abdeckt. Kohli et al. haben gezeigt, dass visuelles und haptisches Feedback zu Oberflächen unterschiedlich sein können, ohne dass Benutzer Inkonsistenzen wahrnehmen [13]. Dies ist nicht auf reale Wände beschränkt. Wenn der physische Laborraum Proxy-Requisiten enthält [25],

dh typische architektonische Innenobjekte wie Türrahmen und Tische, virtuelle 3D-Modelle können in angepasste virtuelle Volumina segmentiert und in den Laborraum eingebaut werden, um diese realen mit virtuellen Objekten mit ähnlichen haptischen Eigenschaften zu registrieren.

Daher können architektonische Merkmale verwendet werden, um die oben beschriebenen Konzepte für verschiedene 3D-Modellstrukturen anzupassen und um die VR-Erfahrung des Benutzers durch Einbeziehung eines überzeugenden passiven haptischen Feedbacks zu verbessern. Diese Implementierungen hängen jedoch stark von der Antizipation oder Kenntnis typischer Strukturen im spezifischen Anwendungsbereich ab.

4 I. MPLEMENTATION

Die aktuelle Implementierung der Arch-Explore-Benutzeroberfläche basiert auf einem kostengünstigen Real-Walking-HMD-Setup und einer Stadtvisualisierungs- und Stadtplanungsanwendung, die am Institut für Informatik der Universität Münster entwickelt wurde.

4.1 Hardware-Setup

Benutzer sind mit einem leichten eMagin 3DVisor Z800 HMD ausgestattet, das eine Auflösung von 800 × 600 hat und ein diagonales Sichtfeld von 40° bei einer Bildwiederholfrequenz von 60 Hz. Wir bringen eine Infrarot-LED am HMD an, die vom optischen WorldViz Precision Position Tracker mit Sub-Millimeter-Genauigkeit und Subzentimeter-Genauigkeit bei 60 Hz verfolgt wird. Das Positionsverfolgungsvolumen deckt das gesamte VR-Labor mit einer Größe von 9 ab $m \times 7 m \times 2.5 m$. Um die Kopforientierung des Benutzers zu verfolgen, befestigen wir einen InterSense InertiaCube2-Tracker am HMD, der volle 360° Verfolgungsbereich entlang jeder Achse im Raum bei 180 Hz. Wir verwenden einen Nintendo Wiimote-Controller für die handbasierte Eingabe, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben. Um die Wahrnehmung der realen Welt durch den Benutzer zu verringern, können wir ein undurchsichtiges Tuch als Sichtblocker am HMD anbringen und Audiodateien von aufgezeichnetem Stadtlärm über drahtlose AKG Hearo-Surround-Sound-Kopfhörer streamen.

Ein Intel-Computer (Host) mit Dual-Core-Prozessor, 4 GB Hauptspeicher und einer nVidia GeForce 8800 GTX-Grafikkarte wird zur Systemsteuerung und Protokollierung verwendet. Unsere Software behält normalerweise eine Bildrate zwischen 30 und 60 Bildern pro Sekunde bei. Das Rendern erfolgt entweder auf dem Intel-Host-Computer, der dann direkt über Kabel mit dem HMD und Intersense verbunden wird, oder auf einem Laptop-PC, der in den Rucksack eines Benutzers gesteckt wird. Im letzteren Fall ist der Laptop über WLAN mit dem Host-Computer verbunden. Die Szene wird mit einer GeForce 7700 Go-Grafikkarte auf dem Laptop und Akku etwa eine Stunde lang gerendert. Das Gewicht des Rucksacks beträgt ca. 8 kg, was ziemlich schwer ist, aber durch die Tatsache kompensiert wird, dass Benutzer die Kabel nicht spüren und kein Assistent neben ihnen gehen muss.

4.2 Virtuelle Umgebung

Wir haben die Arch-Explore-Benutzeroberfläche mithilfe der implementiert *Münster in 3D* Stadtvisualisierungs- und Stadtplanungssoftware, die in Zusammenarbeit mit dem Amt für Stadtentwicklung, Stadt-



Abbildung 6: Innenansicht des Rathauses von Münster.

planung, Verkehrsplanung "der Stadt Münster. Abbildung 6 zeigt eine typische Innenansicht. Die OpenGL-basierte Anwendung ermöglicht das Rendern von mehr als 120.000 Gebäuden, die aus realen Kataster-Basisdaten generiert werden. Auf diese Weise können wir virtuelle Gebäudemodelle im Kontext ihrer Umgebung im virtuellen Replikationsraum anzeigen, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Darüber hinaus können Benutzer beim Betreten eines Gebäudemodells in echtem Maßstab einen Blick aus den Fenstern werfen und die Straßen und Gebäude in der Nachbarschaft sehen.

5 C. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND F. UTURE W. ORK

In diesem Artikel haben wir die Konzepte und die Implementierung der Arch-Explore-Benutzeroberfläche zur Erforschung architektonischer 3D-Modelle vorgestellt. Mit Arch-Explore können Benutzer virtuelle Gebäudemodelle als verkleinerte Miniaturen und in echtem Maßstab durch reales Gehen erkunden, was nicht nur Fachleuten wie Stadtplanern und Architekten, sondern auch potenziellen Hauskäufern zusagt. Wir überwinden bestimmte Probleme realer Benutzeroberflächen beim Gehen, indem wir umgeleitetes Gehen implementieren, das von Razzaque et al. [21] und virtuelle Portale für Fernreisen. Benutzer können große virtuelle Gebäudemodelle erkunden, indem sie in einem typischen VR-Laboraufbau in „Raumgröße“ zu Fuß gehen. Dies wird durch die Anpassung der Umleitungstechniken an architektonische Innenräume ermöglicht. Darüber hinaus registriert die Arch-Explore-Benutzeroberfläche physische mit virtuellen Wänden. Dadurch können Benutzer passives haptisches Feedback erhalten, wenn sie einige Wände in der virtuellen Welt „berühren“. Virtuelle Türen und Portale ermöglichen eine intuitive Navigation und nahtlose Übergänge zwischen Räumen in großen virtuellen Gebäudemodellen, während sie auf einem vergleichsweise kleinen physischen Raum verbleiben. Wir schlagen ein virtuelles Replikatmodell des VR-Laborraums vor, um das Eintauchen der Benutzer in die virtuelle Arbeitsumgebung von Arch-Explore und als vertraute Umgebung für die Erkundung verkleinerter virtueller Gebäudemodelle zu erleichtern.

Obwohl wir noch keine umfassende Benutzerstudie durchgeführt haben, um die Arch-Explore-Benutzeroberfläche mit anderen Architekturerkundungssystemen zu vergleichen, haben wir subjektive Kommentare von Testbenutzern im Entwicklungszyklus protokolliert. Ein typischer Benutzerkommentar war:

"Als ich von [...] nach [...] ging, wurde ich umgeleitet, oder?"

Alle Benutzer waren sich der Mittel bewusst, mit denen Arch-Explore funktioniert. Wir haben jedoch nicht viele Details angegeben, sodass die meisten Benutzer zu einem bestimmten Zeitpunkt im Test das Gefühl hatten, manipuliert zu werden, dies jedoch nicht bestätigen oder wiederholen konnten. Weniger Probanden bemerkten Manipulationen, wenn sie mit einer Aufgabe beschäftigt waren, und niemand bewertete diese als übermäßig ablenkend.

Einige Benutzer erkannten die Fähigkeit, virtuelle Wände zu berühren, als eine großartige Funktion an, andere waren überrascht, als sie eine reale Wand vor sich fühlten, als sie absichtlich versuchten, durch eine Wand hineinzugehen

die VE. Wir glauben, dass die Fähigkeit, virtuelle Wände zu berühren, das Gefühl der Benutzer im angezeigten Gebäudemodell erhöht. Andere sehen es jedoch möglicherweise als Einschränkung an, nicht durch virtuelle Wände gehen zu können.

In Zukunft werden wir eine Anwenderstudie mit Architekten und Stadtplanern durchführen, in der wir die Arch-Explore-Benutzeroberfläche mit verschiedenen IVE- und Desktop-basierten Systemen vergleichen. Wir werden die Ergebnisse verwenden, um die nächste Stufe im inkrementellen Entwurfsprozess dieser Benutzeroberfläche zu entwerfen.

R. EFERENZEN

- [1] T. Banton, J. Stefanucci, F. Durgin, A. Fass und D. Prof it ft. Die Per-
Wahrnehmung der Gehgeschwindigkeit in einer virtuellen Umgebung. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 14 (4): 394–406, 2005.
- [2] A. Berthoz. *Das Bewegungsgefühl des Gehirns*. Cambridge, USA: Harvard University Press, 2000.
- [3] D. Bertol. *Gestaltung des digitalen Raums: Ein Leitfaden für Architekten zur virtuellen Realität*. Wiley, 1997.
- [4] L. Chittaro und S. Venkataraman. Navigationshilfen für mehrstöckige virtuelle Gebäude: eine vergleichende Bewertung zweier Ansätze. Im *ACM-Symposium zu Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST)*, Seiten 227–235. ACM Press, 2006.
- [5] H. Frenz, M. Lappe, M. Kolesnik und T. Bührmann. Schätzung der Reichweite von visuellen Bewegungen in virtuellen Umgebungen. *Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)*, 4 (1): 3: 1–3: 18, 2007.
- [6] H. Groenda, F. Nowak, P. Rößler und UD Hanebeck. Telepräsenz-Techniken zur Steuerung der Avatar-Bewegung in Ego-Spielen. Im *Intelligente Technologien für interaktive Unterhaltung (INTETAIN 2005)*, Seiten 44–53, 2005.
- [7] B. Insko. *Passive Haptik verbessert virtuelle Umgebungen erheblich*. Doktorarbeit, Universität von North Carolina in Chapel Hill, 2001.
- [8] V. Interrante, L. Anderson und B. Ries. Entfernungswahrnehmung in immersiven virtuellen Umgebungen, überarbeitet. Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, Seiten 3–10. IEEE, 2006.
- [9] V. Interrante, B. Ries und L. Anderson. Seven League Boots: Eine neue Metapher für erweiterte Fortbewegung durch mittelgroße immersive virtuelle Umgebungen. Im *Vorträge des Symposiums über 3D-Benutzeroberflächen*, Seiten 167–170. IEEE, 2007.
- [10] V. Interrante, B. Ries, J. Lindquist und L. Anderson. Aufklärung von Faktoren, die die räumliche Wahrnehmung in immersiven virtuellen Umgebungen erleichtern können. Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, Seiten 11–18. IEEE, 2007.
- [11] KH James, GK Humphrey und MA Goodale. Bearbeiten und Erkennen virtueller Objekte: Wo sich die Aktion befindet. *Kanadisches Journal für Experimentelle Psychologie*, 55 (2): 111–120, 2001.
- [12] W. Knoll und M. Hechinger. *Architektur-Modelle*. DVA, 2006.
- [13] L. Kohli, E. Burns, D. Miller und H. Fuchs. Passive Haptik mit umgeleitetem Gehen kombinieren. Im *Tagungsband zur erweiterten Teleexistenz*, Band 157, Seiten 253 - 254. ACM, 2005.
- [14] R. Kopper, T. Ni, DA Bowman und M. Pinho. Entwurf und Bewertung von Navigationstechniken für virtuelle Umgebungen mit mehreren Maßstäben. Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, Seiten 175–182. IEEE, 2006.
- [15] JJ LaViola, DA Feliz, DF Keefe und RC Zeleznik. Freisprech-Navigation mit mehreren Maßstäben in virtuellen Umgebungen. Im *Symposium über interaktive 3D-Grafik*, Seiten 9–15. ACM Press, 2001.
- [16] A. Lerner, Y. Chrysanthou und D. Cohen-Or. Brechen der Wände: Partitionierung von Szenen und Erstellung von Portalen. Im *Pazifische Konferenz über Computergrafik und -anwendungen (PG)*, Seiten 303–312. IEEE, 2003.
- [17] JM Loomis und JM Knapp. Visuelle Wahrnehmung egozentrischer Distanz in realen und virtuellen Umgebungen. In LJ Hettinger und MW Haas, Herausgeber, *Virtuelle und adaptive Umgebungen*, Seiten 21–46. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ., 2003.
- [18] D. Lübke und C. Georges. Portale und Spiegel: einfache, schnelle Bewertung potenziell sichtbarer Mengen. Im *Symposium über interaktive 3D-Grafik*, Seiten 105–106. ACM Press, 1995.

- [19] D. Meneveaux, K. Bouatouch, E. Maisel und R. Delmont. Eine neue Partitionierungsmethode für Architekturumgebungen. *Zeitschrift für Visualisierung und Computeranimation*, 9 (4): 195–213, 1998.
- [20] TC Peck, MC Whitton und H. Fuchs. Evaluierung von Neuorientierungstechniken für das Gehen in großen virtuellen Umgebungen. Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, Seiten 121–127. IEEE, 2008.
- [21] S. Razzaque. *Umgeleitetes Gehen*. Doktorarbeit, Universität von North Carolina in Chapel Hill, 2005.
- [22] M. Slater. Ein Hinweis zur Anwesenheitsterminologie. *PRESENCE-Connect*, 3, 2003.
- [23] M. Slater, A. Steed, J. McCarthy und F. Marinelli. Der virtuelle Vorraum: Beurteilung der Präsenz durch Erwartung und Überraschung. Im *Eurographics Workshop zu virtuellen Umgebungen*, Seiten 41–48, 1998.
- [24] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz und M. Lappe. Analysen der menschlichen Empfindlichkeit gegenüber umgeleitetem Gehen. Im *ACM-Symposium zu Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST)*, Seiten 149–156. ACM Press, 2008.
- [25] F. Steinicke, G. Bruder, L. Kohli, J. Jerald und KH Hinrichs. Taxonomie und Implementierung von Umleitungstechniken für allgegenwärtiges passives haptisches Feedback. Im *Internationale Konferenz über Cyberwelten (CW2008)*, Seiten 217–223. IEEE Press, 2008.
- [26] F. Steinicke, G. Bruder, T. Ropinski und KH Hinrichs. Übergang zum allgemein gültigen umgeleiteten Gehen. Im *Tagungsband der Virtual Reality International Conference (VRIC)*, Seiten 15–24. IEEE Press, 2008.
- [27] F. Steinicke, G. Bruder, A. Steed, K. Hinrichs und A. Gerlach. Steigert ein schrittweiser Übergang in die virtuelle Welt die Präsenz? Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, 2009.
- [28] R. Stoakley, MJ Conway und Y. Pausch. Virtuelle Realität auf einem WIM: interaktive Welten in Miniatur. Im *ACM-Konferenz über Human Factors in Computersystemen (CHI)*, Seiten 265–272. ACM Press, 1995.
- [29] M. Usoh, K. Arthur, M. Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater und F. Brooks. Gehen> Gehen an Ort und Stelle> Fliegen in virtuellen Umgebungen. Im *Internationale Konferenz über Computergrafik und interaktive Techniken (SIGGRAPH)*, Seiten 359 – 364. ACM, 1999.
- [30] M. Whitton, J. Cohn, P. Feasel, S. Zimmons, S. Razzaque, B. Poulton und BM und F. Brooks. Vergleichen von VE-Fortbewegungsschnittstellen. Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, Seiten 123–130. IEEE, 2005.
- [31] B. Williams, G. Narasimham, TP McNamara, TH Carr, JJ Rieser und B. Bodenheimer. Aktualisieren der Ausrichtung in großen virtuellen Umgebungen mithilfe des skalierten Translationsgewinns. Im *Vorträge des 3. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung (APGV)*, Seiten 21–28. ACM Press, 2006.
- [32] B. Williams, G. Narasimham, B. Rump, TP McNamara, TH Carr, J. Rieser und B. Bodenheimer. Erkunden Sie große virtuelle Umgebungen mit einem hmd zu Fuß. Im *Vorträge des 3. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung (APGV)*, Seiten 148–148. ACM Press, 2006.
- [33] CA Wingrave, Y. Haciahetoglu und DA Bowman. Überwindung der Welt in Miniaturbeschränkungen durch einen skalierten und scrollenden Wim. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, Seiten 11–16. IEEE, 2006.
- [34] C. Zambaka, B. Lok, S. Babu, D. Xiao, A. Ulinski und LF Hodges. Auswirkungen der Reisetchnik auf die Wahrnehmung in virtuellen Umgebungen. Im *Tagungsband der IEEE International Virtual Reality (VR) -Konferenz*, Seiten 149–156. IEEE, 2004.