

Schätzung der Erkennungsschwellen für umgeleitete Gehtechniken

Frank Steinicke, Mitglied, IEEE, Gerd Bruder, Studentisches Mitglied, IEEE,
Jason Jerald, Studentisches Mitglied, IEEE, Harald Frenz und Markus Lappe

Abstrakt - In immersiven virtuellen Umgebungen (IVEs) können Benutzer ihren virtuellen Blickwinkel steuern, indem sie ihren verfolgten Kopf bewegen und durch die reale Welt gehen. Normalerweise werden Bewegungen in der realen Welt eins zu eins auf Bewegungen der virtuellen Kamera abgebildet. Bei Umleitungstechniken wird die virtuelle Kamera manipuliert, indem Verstärkungen auf die Benutzerbewegung angewendet werden, sodass sich die virtuelle Welt anders bewegt als die reale Welt. Auf diese Weise können Benutzer große IVEs durchlaufen, während sie sich physisch in einem relativ kleinen Arbeitsbereich befinden. In psychophysischen Experimenten mit einer Zwei-Alternativen-Aufgabe mit erzwungener Wahl haben wir quantifiziert, wie viele Menschen unwissentlich auf physische Pfade umgeleitet werden können, die sich von den visuell wahrgenommenen Pfaden unterscheiden. Wir haben 12 Probanden in drei verschiedenen Experimenten getestet: (E1) Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen Rotationen,

(E2) Unterscheidung der Pfadkrümmung. In Experiment E1 führten die Probanden Rotationen mit unterschiedlichen Verstärkungen durch und mussten dann wählen, ob die visuell wahrgenommene Rotation kleiner oder größer als die physische Rotation war. In Experiment E2 wählten die Probanden, ob der physische Gang kürzer oder länger als die visuell wahrgenommene skalierte Fahrstrecke war. In Experiment E3 schätzten die Probanden die Pfadkrümmung, wenn sie einen gekrümmten Pfad in der realen Welt gehen, während die visuelle Anzeige einen geraden Pfad in der virtuellen Welt zeigt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass Benutzer physisch um 49 Prozent mehr oder 20 Prozent weniger als die wahrgenommene virtuelle Drehung gedreht werden können, Entfernungen um 14 Prozent verkleinert und um 26 Prozent vergrößert werden können und Benutzer auf einem Kreisbogen mit einem Radius von mehr als 22 Minuten umgeleitet werden können. Sie glauben, dass sie gerade gehen.

Indexbegriffe - Virtuelle Realität, virtuelle Fortbewegung, umgeleitetes Gehen.



1 I. EINLEITUNG

Ich laufe in der realen Welt ein virtuelles Umfeld.

Eine realistische Simulation dieser Fortbewegungstechniken ist schwer zu erreichen. Während der Bewegung in der realen Welt erzeugen sensorische Informationen wie vestibuläre, propriozeptive und efferente Kopiersignale sowie visuelle Informationen konsistente multisensorische Hinweise, die die eigene Bewegung anzeigen, dh Beschleunigung, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung. In diesem Zusammenhang ist das Gehen die einfachste und intuitivste Art, sich in der realen Welt zu bewegen. Die Beibehaltung einer solchen aktiven und dynamischen Fähigkeit zur Navigation durch große immersive virtuelle Umgebungen ist für viele 3D-Anwendungen von großem Interesse, die Fortbewegung erfordern, z. B. in der Stadtplanung, im Tourismus oder in der 3D-Unterhaltung.

1.1 Fortbewegung in virtuellen Umgebungen

IVEs zeichnen sich häufig durch Head-Mounted Displays (HMDs) und ein Tracking-System zur Messung von Positions- und Orientierungsdaten aus [8]. Immersive virtuelle Umgebungen waren

anfangs auf visuelle Anzeigen beschränkt, kombiniert mit Interaktionsgeräten, z. B. Joystick oder Maus, um (oft unnatürliche) Eingaben zur Erzeugung von Selbstbewegung bereitzustellen. Immer mehr Forschungsgruppen untersuchen natürliche, multimodale Methoden zur Erzeugung von Selbstbewegung. Reisen durch immersive virtuelle Umgebungen mittels echtes Gehen

ist eine wichtige Aktivität zur Steigerung der Natürlichkeit der auf Virtual Reality (VR) basierenden Interaktion.

Viele Bereiche sind von Natur aus dreidimensional und fortgeschrittene visuelle Simulationen bieten oft ein gutes Gefühl für die Fortbewegung, aber exklusive visuelle Reize allein können das vestibulär-propriozeptive System nicht ausreichend ansprechen. Tatsächlich ist echtes Gehen eine stärker die Präsenz verbessernde Fortbewegungstechnik als andere Navigationsmetaphern [35]. Ein echtes Gehen in IVEs ist jedoch oft nicht möglich [39].

In der Tat besteht ein offensichtlicher Ansatz darin, die verfolgten Kopfbewegungen des Benutzers auf Änderungen der Kamera in den virtuellen Welten zu übertragen, um eine Einzelzuordnung vorzunehmen. Dann wird eine Onemeter-Bewegung in der realen Welt auf eine 1-Meter-Bewegung der virtuellen Kamera in der entsprechenden Richtung in der VE abgebildet. Diese Technik hat den Nachteil, dass die Bewegungen der Benutzer durch eine begrenzte Reichweite der Tracking-Sensoren und einen relativ kleinen Arbeitsbereich in der realen Welt eingeschränkt werden. Die Größe der virtuellen Welt unterscheidet sich häufig von der Größe des verfolgten Laborraums, so dass eine einfache Implementierung von omnidirektionalem und unbegrenztem Gehen nicht möglich ist. Daher werden Konzepte für virtuelle Fortbewegungsmethoden benötigt, die es ermöglichen, über große Entfernungen in der virtuellen Welt zu gehen und dabei auf einem relativ kleinen Raum in der realen Welt zu bleiben. Verschiedene Prototypen von Schnittstellengeräten wurden entwickelt, um eine Verschiebung in der realen Welt zu verhindern. Diese Geräte umfassen torusförmige omnidirektionale Laufbänder [5], [6], Bewegungsfußpolster, Roboterkecheln [18], [19] und Bewegung

F. Steinicke und G. Bruder arbeiten am Institut für Informatik der Universität Münster, Einsteinstraße 62, 48149 Münster. E-Mail: fsteini@math.uni-muenster.de, g_brud01@uni-muenster.de.

J. Jerald arbeitet am Institut für Informatik der Universität von North Carolina in Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27599-3175.

E-Mail: jjerald@email.unc.edu.

H. Frenz und M. Lappe sind beim Psychologischen Institut II der Universität Münster, Fliednerstraße 21, 48149 Münster.

E-Mail: {frenzh, mlappe}@uni-muenster.de.

Manuskript erhalten am 15. Februar 2009; überarbeitet am 12. Mai 2009; angenommen am 26. Mai 2009; online veröffentlicht am 4. Juni 2009.

Empfohlen zur Annahme durch M. Hachet und E. Kruijff.

Informationen zum Abrufen von Nachdrucken dieses Artikels erhalten Sie per E-Mail an: tvcg@computer.org und unter Angabe der IEEECS-Protokollnummer

TVCGSI-2009-02-0032.

Digitale Objektkennung Nr. 10.1109 / TVCG.2009.62.

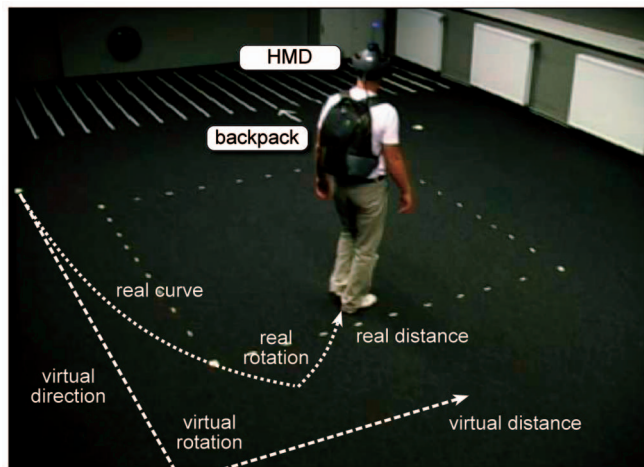


Abb. 1. Umgeleitetes Laufszenario. Ein Benutzer geht in der realen Umgebung auf einem anderen Pfad mit einer anderen Länge als der Wahrnehmungspfad in der virtuellen Welt.

Teppiche [30]. Obwohl diese Hardwaresysteme enorme technologische Errungenschaften darstellen, sind sie immer noch sehr teuer und werden in absehbarer Zukunft nicht allgemein zugänglich sein.

Daher besteht eine enorme Nachfrage nach anwendbareren Ansätzen. Als Lösung für diese Herausforderung wurde das Reisen durch Ausnutzen von gehartigen Gesten in vielen verschiedenen Varianten vorgeschlagen, um dem Benutzer den Eindruck eines Gehens zu vermitteln. Zum Beispiel nutzt der Walk-in-Place-Ansatz wandähnliche Gesten, um durch eine IVE zu reisen, während der Benutzer physisch nahezu an derselben Position bleibt [12] [34] [40]. Es hat sich jedoch gezeigt, dass echtes Gehen eine stärker die Präsenz verbessernde Fortbewegungstechnik darstellt als andere Navigationsmetaphern [35].

1.2 Umgeleitetes Gehen

Kognitions- und Wahrnehmungsforschung legt nahe, dass sowohl kosteneffiziente als auch natürliche Alternativen existieren. Aus der Wahrnehmungspsychologie ist bekannt, dass das Sehen häufig die Propriozeption und das vestibuläre Empfinden dominiert, wenn sie nicht übereinstimmen [2] [10]. In Wahrnehmungsexperimenten, bei denen menschliche Teilnehmer nur das Sehen verwenden können, um ihre Bewegung durch eine virtuelle Szene zu beurteilen, können sie ihre momentane Richtung der Selbstbewegung erfolgreich abschätzen, sind jedoch viel weniger gut darin, ihre Reisewege wahrzunehmen [4] [23]. Da Benutzer dazu neigen, kleine Inkonsistenzen beim Gehen unabsichtlich auszugleichen, ist es daher möglich, sie auf Pfaden in der realen Welt zu führen, die sich von dem in der virtuellen Welt wahrgenommenen Pfad unterscheiden. Dies umgeleitetes Gehen

ermöglicht es Benutzern, eine virtuelle Welt zu erkunden, die erheblich größer ist als der verfolgte Arbeitsbereich [28].

Wie in 1 dargestellt, kann ein Pfad, den ein Benutzer in der physischen Welt geht, skaliert und gebogen werden, und reale Rotationen von Benutzern können erhöht oder verringert werden, wenn die Bewegungen auf die virtuelle Kamera angewendet werden. Bisher wurden jedoch keine großen Anstrengungen unternommen, um Schwellenwerte zu ermitteln, die zeigen, wie viel Benutzer beim Aufwachen manipuliert werden können.

Da umgeleitete Gehtechniken auf Unvollkommenheiten in der Wahrnehmung des menschlichen Sehwegs beruhen, muss die menschliche Wahrnehmung der Selbstbewegung untersucht werden, um Schwellenwerte für zu ermitteln

tolerierbare Abweichungen zwischen virtuellen und realen Bewegungen. Wenn visuelle, vestibuläre und propriozeptive sensorische Signale, die normalerweise die Wahrnehmung von Selbstbewegung unterstützen, in Konflikt stehen, z. B. wenn stationären Menschen visuelle Bewegungsstimuli präsentiert werden, kann das Sehen die vestibulären und propriozeptiven Informationen dominieren. In der Illusion der linearen Vektion [3] fühlen sich Beobachter beispielsweise bewegt, obwohl sie physisch stationär sind, einfach weil ihnen eine visuelle Bewegung mit großem Feld präsentiert wird, die dem Bewegungsmuster ähnelt, das normalerweise während einer realen Selbstbewegung auftritt. Dieses visuelle Bewegungsmuster wird aufgerufen

optischer Fluss, und viele Forschungen haben gezeigt, dass Menschen im Prinzip Selbstbewegungsinformationen aus dem optischen Fluss extrahieren können (vgl. [23], [37]).

In diesem Artikel präsentieren wir eine Reihe von Experimenten, in denen wir quantifiziert haben, wie viel Menschen umgeleitet werden können, ohne Inkonsistenzen zwischen realen und virtuellen Bewegungen zu beobachten. Wir führten drei psychophysische Studien durch, in denen die Probanden zwischen realen und virtuellen Bewegungen unterscheiden mussten, insbesondere Rotationen, Übersetzungen und Laufrichtungen.

Der Rest dieses Dokuments ist wie folgt strukturiert: Abschnitt 2 fasst frühere Arbeiten zur Fortbewegung und Wahrnehmung in Umgebungen mit virtueller Realität zusammen. Abschnitt 3 enthält eine Taxonomie umgeleiteter Gehtechniken, wie sie in den in Abschnitt 4 beschriebenen Experimenten verwendet werden. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse zusammen und erörtert die Auswirkungen auf das Design von Benutzeroberflächen für die virtuelle Fortbewegung. Der letzte Abschnitt gibt auch einen Überblick über zukünftige Arbeiten.

2 R. BEGEISTERT W. ORK

Derzeit stehen Fortbewegung und Wahrnehmung in IVEs im Mittelpunkt vieler Forschungsgruppen, die die Wahrnehmung sowohl in der realen als auch in der virtuellen Welt analysieren. Zum Beispiel haben Forscher beschrieben, dass Entfernungen in virtuellen Welten im Vergleich zur realen Welt unterschätzt werden [15], [16], [25], die visuelle Geschwindigkeit beim Gehen in VEs unterschätzt wird [1] und die zurückgelegte Entfernung ist auch unterschätzt [13]. Manchmal haben Benutzer allgemeine Schwierigkeiten, sich in virtuellen Welten zu orientieren [29].

Aus egozentrischer Sicht erscheint die reale Welt stationär, wenn wir uns bewegen oder unseren Kopf und unsere Augen drehen. Sowohl visuelle als auch extraretinale Hinweise, die aus anderen Teilen des Geistes und des Körpers stammen, helfen uns, die Welt als stabil wahrzunehmen [7] [36] [38]. Extraretinale Hinweise stammen aus dem Vestibularsystem, der Propriozeption, unserem kognitiven Modell der Welt oder aus einer Effizienzkopie der motorischen Befehle, die die jeweiligen Körperteile bewegen. Wenn einer oder mehrere dieser Hinweise mit anderen Hinweisen in Konflikt stehen, wie dies häufig bei IVEs der Fall ist (z. B. aufgrund von Tracking-Fehlern oder Latenz), scheint die virtuelle Welt räumlich instabil zu sein. Experimente zeigen, dass der Benutzer eine gewisse Inkonsistenz zwischen visuellen und propriozeptiven Empfindungen bei IVEs toleriert [9] [21] [22] [27] [28] [33] [20]. In diesem Zusammenhang, Das umgeleitete Gehen bietet eine vielversprechende Lösung für das Problem des begrenzten Verfolgungsraums und die Herausforderung, Benutzern die Möglichkeit zu geben, eine virtuelle Welt durch Gehen zu erkunden [28]. Bei diesem Ansatz wird der Benutzer über Manipulationen umgeleitet, die auf die angezeigte Szene angewendet werden

Benutzer können Szenenbewegungen unwissentlich kompensieren, indem sie sich neu positionieren und / oder neu ausrichten.

Es wurden verschiedene Ansätze zur Umleitung von Auser in einem IVE vorgeschlagen. Ein naheliegender Ansatz besteht darin, Translationsbewegungen zu skalieren, um beispielsweise eine virtuelle Distanz zurückzulegen, die größer ist als die im physischen Raum zurückgelegte Distanz. Interrante et al. schlagen vor, die Skalierung ausschließlich auf die Hauptlaufrichtung anzuwenden, um unbeabsichtigte seitliche Verschiebungen zu vermeiden [17]. Bei den meisten Neuorientierungstechniken wird die virtuelle Welt unmerklich um das Zentrum einer stationären Benutzerin gedreht, bis sie so ausgerichtet ist, dass sich keine physischen Hindernisse vor ihr befinden [22] [27] [28]. Dann kann der Benutzer weiter in die gewünschte virtuelle Richtung gehen. Alternativ kann eine Neuorientierung auch angewendet werden, während der Benutzer geht [14] [28] [33]. Wenn der Benutzer beispielsweise eine lange Strecke in der virtuellen Welt geradeaus laufen möchte, kleine Drehungen der Kamera lenken ihn unbewusst auf einen Bogen in die entgegengesetzte Richtung in der realen Welt. Wenn ein Benutzer umgeleitet wird, stimmt die visuelle Empfindung mit der Bewegung in der IVE überein, aber die propriozeptive Empfindung spiegelt die Bewegung in der physischen Welt wider. Wenn die induzierten Manipulationen jedoch klein genug sind, hat der Benutzer den Eindruck, in der Lage zu sein, in der virtuellen Welt ohne Einschränkungen in jede Richtung zu gehen. Im Rahmen dieses Dokuments befassen wir uns mit der Frage, wie viele Manipulationen an der virtuellen Kamera für den Menschen nicht wahrnehmbar sind. Wenn die induzierten Manipulationen klein genug sind, hat der Benutzer den Eindruck, in der virtuellen Welt in jede Richtung ohne Einschränkungen gehen zu können. Im Rahmen dieses Dokuments befassen wir uns mit der Frage, wie viele Manipulationen an der virtuellen Kamera für den Menschen nicht wahrnehmbar sind.

Umleitungstechniken wurden insbesondere in der Robotik zur Steuerung eines entfernten Roboters durch Gehen angewendet [14]. Für solche Szenarien wurden große Anstrengungen unternommen, um Kollisionen zu verhindern. Eine ausgefeilte Pfadvorhersage ist daher unerlässlich [14] [26]. Diese Techniken führen Benutzer auf physischen Pfaden, für die Längen und Drehwinkel der visuell wahrgenommenen Pfade beibehalten werden, aber der Benutzer beobachtet die Diskrepanz zwischen beiden Welten.

Bis vor kurzem wurden nur wenige Untersuchungen durchgeführt, um Schwellenwerte zu ermitteln, die auf die tolerierbare Abweichung zwischen Sehvermögen und Propriozeption während der Bewegung des Benutzers hinweisen. Vorläufige Studien haben gezeigt, dass umgeleitete Geharbeiten im Allgemeinen funktionieren [33] [27] [28]. In diesen Experimenten mussten Benutzer nach dem Gehen eines manipulierten Pfades feststellen, ob sie eine Manipulation bemerkten oder nicht. Quantifizierte Analysen der Schwellenwerte wurden in diesen Experimenten nicht durchgeführt. Es wurden einige Arbeiten durchgeführt, um Schwellenwerte für die Erfassung der Szenenbewegung während der Kopfdrehung zu ermitteln [21] [36] [20], aber das Gehen wurde in diesen Experimenten nicht berücksichtigt. Steinicke et al. [31] führten psychophysische Studien durch, um Erkennungsschwellen für umgeleitete Gehgewinne zu identifizieren. Ähnlich wie bei den in diesem Artikel beschriebenen Experimenten Die Probanden mussten zwischen virtuellen und realen Bewegungen unterscheiden. Danach entschieden sie in einem Ja / Nein-Urteil, ob eine physische Bewegung größer als das virtuelle Gegenstück war oder nicht. Dieses Ja / Nein-Urteil hat den Nachteil, dass es möglicherweise eine Verzerrung hervorruft, da ein Thema, das sich über die wahre Antwort nicht sicher ist, das „oder nicht“ bevorzugen könnte, es sei denn, die Bewegung ist deutlich größer.

Zusammenfassend wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um es einem Benutzer zu ermöglichen, durch ein großflächiges VE zu gehen, aber es sind viele Untersuchungen erforderlich, um das Gefühl des natürlichen Gehens zu verbessern.

3 T. AXONOMIE VON R. EDIRECTED W. ALKING T. ECHNIKEN

Eine grundlegende Aufgabe eines IVE besteht darin, auf der Anzeigefläche dargestellte Bilder mit den Kopfbewegungen des Benutzers so zu synchronisieren, dass die Elemente der virtuellen Szene im Weltraum stabil erscheinen. Umgeleitetes Gehen und Neuorientierungstechniken nutzen die Unvollkommenheiten des menschlichen visuell-vestibulären Systems aus, indem sie absichtlich nicht wahrnehmbare Bewegungen der Szene injizieren. Wenn ein Benutzer durch echtes Gehen durch ein IVE navigiert, bestehen Bewegungen aus Translations- und Rotationsbewegungen. Translationsbewegungen werden verwendet, um von einer Position zur anderen zu gelangen, Rotationsbewegungen werden verwendet, um sich im IVE neu zu orientieren. Durch die Kombination beider Arten von Bewegungen können Benutzer auf kurvenartigen Trajektorien navigieren. Wir klassifizieren Umleitungstechniken in Bezug auf diese Arten von Lokomotionen.

Umgeleitetes Gehen kann mithilfe von Gewinnen implementiert werden, die definieren, wie verfolgte reale Bewegungen dem VE zugeordnet werden. Diese Verstärkungen werden in Bezug auf ein Koordinatensystem angegeben. Zum Beispiel können sie durch einheitliche Skalierungsfaktoren definiert werden, die auf die virtuelle Welt angewendet werden, die mit dem Verfolgungskoordinatensystem registriert ist, so dass alle Bewegungen skaliert werden. Wann jedoch alle Bewegungen werden gleichzeitig skaliert, laterale und vertikale Bewegungen werden ebenfalls beeinflusst, was intuitive und natürliche Bewegungen erschwert [15].

3.1 Dreifache Fortbewegung des Menschen

In [32] haben wir die menschliche Fortbewegungsdreifach (HLT) $\vec{s}, \vec{u}, \vec{w}$ durch drei normalisierte Vektoren, dh Strafe-Vektor \vec{s} , up Vektor \vec{u} , und Laufrichtung \vec{w} . Die Laufrichtung des Benutzers kann durch die tatsächlich verfolgte Laufrichtung oder unter Verwendung der Pose des Benutzers bestimmt werden, die beispielsweise durch die Ausrichtung der Gliedmaßen oder die Blickrichtung definiert ist. In unseren Experimenten definieren wir \vec{w} durch die tatsächliche Laufrichtung, die vom Verfolgungssystem verfolgt und gefiltert wird. Der Strafe-Vektor,

aka rechter Vektor, ist orthogonal zur Laufrichtung und parallel zur Lauffläche. Während die Laufrichtung und der Strafevektor orthogonal zueinander sind, ist der Aufwärtsvektor \vec{u}

ist nicht auf das Kreuzprodukt von beschränkt \vec{s} und \vec{w} . Wenn ein Benutzer einen Hang hinaufgeht, wird die Laufrichtung entsprechend der Ausrichtung der Fußebene definiert, während der Aufwärtsvektor nicht orthogonal zu dieser geneigten Ebene ist. Wenn Menschen auf Abhängen gehen, neigen sie dazu, sich nach vorne zu lehnen, so dass der Aufwärtsvektor ist umgekehrt zur Richtung der Schwerkraft. Solange die Laufrichtung gilt $\vec{w} \cdot \vec{g} > 0$, Das HLT bildet ein Koordinatensystem. In den folgenden Abschnitten beschreiben wir, wie Gewinne auf dieses Fortbewegungs-Tripel angewendet werden können. Wir definieren \vec{u} durch den Aufwärtsvektor der verfolgten Kopforientierung. In unseren Experimenten haben wir nur planare Gründe berücksichtigt.

3.2 Übersetzungsgewinne

Angenommen, die Verfolgungs- und Koordinatensysteme der virtuellen Welt sind kalibriert und registriert. Wenn das Tracking-System eine Änderung der realen Position des Benutzers erkennt

definiert durch den Vektor $\vec{T} = \frac{1}{4} \vec{P}_{cur} - \vec{P}_{vor}$, wo \vec{P}_{cur} ist der aktuelle Position und \vec{P}_{vor} ist die vorherige Position, \vec{T} wird der virtuellen Kamera eins zu eins in Bezug auf die zugeordnet Registrierung zwischen virtueller Szene und Tracking-Koordinaten System. Dann wird die virtuelle Kamera von bewegt $\vec{j} = \vec{T} \cdot \vec{u}$ Einheiten in der entsprechenden Richtung in der Koordinate der virtuellen Welt

System. Das Verfolgungssystem aktualisiert die Positionsänderung mehrmals pro Sekunde, solange sich der Benutzer im Bereich des Verfolgungssystems befindet.

Ein Übersetzungsgewinn $G_{T,2IR3}$ wird für jede Komponente des HLT (siehe Abschnitt 3.1) durch den Quotienten des abgebildeten definiert

Übersetzung in die virtuelle Welt $T_{virtuell}$ und die verfolgte reale Übersetzung T_{echt} , dh $G_T = \frac{T_{virtuell}}{T_{echt}}$. Wenn eine Übersetzung gewinnt G_T wird auf eine Translationsbewegung angewendet T_{echt} . Die virtuelle Kamera wird vom Vektor bewegt

$G_T \cdot T_{echt}$ in die entsprechende Richtung. Dies ist besonders nützlich, wenn der Benutzer IVEs untersuchen möchte, deren Größe unterschiedlich ist

deutlich von der Größe des verfolgten Raumes. Wenn ein Benutzer beispielsweise molekulare Strukturen erforschen möchte, müssen Bewegungen in der realen Welt verkleinert werden, wenn sie vorhanden sind

auf virtuelle Bewegungen abgebildet, z. $G_T = 0$. Im Gegensatz dazu ist die Erkundung eines Fußballfeldes durch echtes Gehen in einem Arbeitsraum erfordert einen Übersetzungsgewinn $G_T = 20$.

Solche einheitlichen Gewinne ermöglichen die Erforschung von IVEs, deren Größen unterscheiden sich von der Größe des Arbeitsraums, schränken jedoch häufig natürliche Bewegungen ein. Neben der Skalierung von Bewegungen in Laufrichtung werden seitliche und vertikale Bewegungen durch gleichmäßige Verstärkungen beeinflusst. In den meisten VR-basierten Szenarien profitieren Benutzer von der Möglichkeit, nahe Objekte über Kopfbewegungen zu erkunden, die durch die Skalierung auch vertikaler oder lateraler Bewegungen behindert werden können. Daher sind gleichmäßige Gewinne häufig unzureichend. Ungleichmäßige Translationsgewinne werden verwendet, um zwischen Bewegungen in der Hauptlaufrichtung, seitlichen Bewegungen und vertikalen Bewegungen zu unterscheiden [15]. Generische Gewinne für Translationsbewegungen können

ausgedrückt werden durch $\delta G_{T,s} = G_T \cdot \frac{1}{2} s$; $G_T \cdot \frac{1}{2} u$; $G_T \cdot \frac{1}{2} w$, wobei jede Komponente auf die entsprechenden Vektoren angewendet wird s , u , und w , respec- die Übersetzung komponieren. In unseren Experimenten haben wir haben sich auf die Sensibilität für Übersetzungsgewinne konzentriert $G_T \cdot \frac{1}{2} w$ und haben sowohl seitliche als auch vertikale Bewegungen gefiltert.

3.3 Rotationsgewinne

Reale Kopfdrehungen können durch einen Vektor angegeben werden bestehend aus drei Winkeln, dh $R_{echt} = \frac{1}{2} \delta$ Tonhöhe $echt$; gieren $echt$; rollen $echt$ P . Die verfolgte Orientierungsänderung wird auf die virtuelle Kamera angewendet. Analog zu Abschnitt 3.2 sind Rotationsgewinne definiert für jede Komponente (Nick / Gieren / Rollen) der Rotation und angewendet auf die Achsen des Fortbewegungs-Tripels.

Ein Rotationsgewinn G_R wird durch den Quotienten der betrachteten Komponente einer Rotation der virtuellen Welt definiert $R_{virtuell}$ und die reale Rotation R_{echt} , dh $G_R = \frac{R_{virtuell}}{R_{echt}}$. Wenn ein Rotationsverstärkung G_R Wird auf eine reale Rotation angewendet, wird die virtuelle Kamera von gedreht G_R statt P . Das heisst

dass wenn $G_R = \frac{1}{2} 1$, Die virtuelle Szene bleibt stabil

Die Ausrichtung des Kopfes ändert sich. Im Falle $G_R = 1$, Die virtuelle Szene scheint sich gegen die Richtung des Kopfes zu bewegen

drehen, während ein Gewinn $G_R < 1$ bewirkt, dass sich die Szene in Richtung der Kopfdrehung dreht. Zum Beispiel, wenn sich der Benutzer dreht ihr Kopf um 90 Grad, ein Gewinn $G_R = \frac{1}{2} 1$ ordnet diese Bewegung eins zu eins einer 90-Grad-Drehung der virtuellen Kamera in der VE. Das Gerät eines Gewinns $G_R = \frac{1}{2} 0$: 5 bedeutet, dass der Benutzer den Kopf physisch um 180 Grad drehen muss, um eine virtuelle 90-Grad-Drehung erreichen; nochmal $G_R = \frac{1}{2} 2$ bedeutet, dass der Benutzer den Kopf nur um 45 Grad drehen muss physisch, um eine virtuelle 90-Grad-Rotation zu erreichen.

Wiederum werden Verstärkungen für jede Komponente der Rotation definiert, dh Gieren, Neigen und Rollen, und werden auf die angewendet

Achsen der Fortbewegung dreifach. Rotationsgewinne können sein

ausgedrückt durch $\delta G_{R,s} = G_R \cdot \frac{1}{2} s$; $G_R \cdot \frac{1}{2} u$; $G_R \cdot \frac{1}{2} w$, wo der Gewinn $G_R \cdot \frac{1}{2} s$ angegeben für Tonhöhe wird angewendet auf s , der Gewinn $G_R \cdot \frac{1}{2} u$ spezifiziert für Gieren ist

angewendet u , und $G_R \cdot \frac{1}{2} w$ angegeben für Rolle wird angewendet auf w . In unseren Experimenten haben wir uns auf Rotationsgewinne für Gieren konzentriert

Drehung $G_R = \frac{1}{2} u$. Gieren ist die am häufigsten manipulierte Rotation beim umgeleiteten Gehen [9] [21] [22] [27] [28] [33].

3.4 Krümmungsverstärkungen

Anstatt Gewinne mit Übersetzungen oder Rotationen zu multiplizieren, können Offsets zu Bewegungen in der realen Welt hinzugefügt werden. Dabei werden Kameramanipulationen erzwungen, wenn nur eine Art von Bewegung verfolgt wird, z. B. wenn der Benutzer den Kopf dreht, aber stillsteht oder der Benutzer sich gerade ohne Kopfdrehungen bewegt. Wenn die injizierten Manipulationen relativ klein sind, kompensiert der Benutzer diese Offsets unwissentlich, was zum Gehen einer Kurve führt. Die Verstärkungen können angewendet werden, um Rotationen zu injizieren, während Benutzer virtuell gerade gehen, oder Verstärkungen können angewendet werden, um Übersetzungen zu injizieren, während Benutzer nur ihre drehen

Köpfe. Die Krümmungsverstärkung G_c bezeichnet die resultierende Biegung eines realen Pfades.

Wenn sich der Benutzer beispielsweise geradeaus bewegt, a

Eine Krümmungsverstärkung, die relativ kleine iterative Kameradrehungen zu einer Seite verursacht, zwingt den Benutzer, entlang einer Kurve in die entgegengesetzte Richtung zu gehen, um auf einem geraden Weg in der virtuellen Welt zu bleiben. Die Kurve wird durch einen Kreisbogen mit bestimm

Radius r , und wir definieren $G_c = \frac{1}{2} \frac{1}{r}$. Falls keine Krümmung vorliegt angewendet ist es $r = \frac{1}{2} 1$ $G_c = \frac{1}{2} 0$, während, wenn die Krümmung verursacht

Der Benutzer muss sich danach um 90 Grad im Uhrzeigersinn drehen zm , theuser hat einen Viertelkreis mit Radius bedeckt $r = \frac{1}{2} 1$ $G_c = \frac{1}{2} 1$.

Alternativ können Gewinne als Umrechnungsversätze verwendet werden während der Benutzer den Kopf dreht und keine Translationsbewegungen beabsichtigt sind. Während sich der Benutzer dreht, bewirkt eine solche Verstärkung, dass sich die Kamera in eine Richtung verschiebt, so dass sich der Benutzer unwissentlich in die entgegengesetzte Richtung bewegt, um eine unbeabsichtigte Verschiebung in der virtuellen Welt auszugleichen. Potenziell können solche Verstärkungen auf jede Achse des HLT angewendet werden. In unseren Experimenten haben wir uns jedoch auf das übliche Verfahren konzentriert, mit dem Benutzer gezwungen werden, auf einem Bogen zu gehen

parallel zur Gangebene mittels Krümmungsverstärkungen $G_c = \frac{1}{2} w$.

Darüber hinaus können Gewinne zeitabhängig angewendet werden, aber

Dieser Ansatz fällt nicht in den Geltungsbereich dieses Dokuments.

4 EXPERIMENTS

In diesem Abschnitt stellen wir drei Experimente vor, in denen wir quantifiziert haben, wie viel Menschen unwissentlich umgeleitet werden können. Wir haben das Gerät der Übersetzung analysiert

$G_T = \frac{1}{2} w$, Drehung $G_R = \frac{1}{2} u$, und Krümmungsgewinne $G_c = \frac{1}{2} w$.

4.1 Versuchsaufbau

Da das Hauptziel unserer Experimente darin besteht, Benutzern das unbegrenzte Gehen in 3D-Stadtumgebungen zu ermöglichen, bestand der visuelle Reiz aus virtuellen Szenen der Stadt Münster (siehe Abb. 3). Vor jedem Versuch wurden ein Randomplace und eine horizontale Blickrichtung gewählt. Die einzige Einschränkung für diese Startszene war, dass sich keine vertikalen Objekte darin befanden 10 m der Ausgangsposition, um Kollisionen in der VE zu verhindern.

4.1.1 Hardware-Setup

Wir haben alle Experimente in a durchgeführt 10 m 7 m abgedunkelter Laborraum. Die Probanden trugen ein HMD (3DVisor Z800,

800 600 @ 60Hz, 40 Grad diagonales Sichtfeld (FoV)) für die Stimuluspräsentation. Auf dem HMD wurde eine Infrarot-LED angebracht. Wir haben die Position dieser LED im Raum mit einem aktiven optischen Verfolgungssystem (Precise Position Tracking of World Viz) verfolgt, das Submillimetergenauigkeit und Subzentimetergenauigkeit bietet. Die Aktualisierungsrate betrug 60 Hz und lieferte Echtzeit-Positionsdaten der aktiven Marker. Für die Verfolgung der Ausrichtung von drei Freiheitsgraden (DoF) verwendeten wir einen InertiaCube 2 (InterSense) mit einer Aktualisierungsrate von 180 Hz. Der InertiaCube wurde ebenfalls oben auf dem HMD befestigt. In den Experimenten verwendeten wir einen Intel-Computer für visuelle Anzeige, Systemsteuerung und Protokollierung mit Dual-Core-Prozessoren, 4 GB Hauptspeicher und einem nVidia GeForce 8800.

Die virtuelle Szene wurde mit OpenGL und unserer eigenen Software gerendert, mit der das System eine Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde beibehielt. Während des Experiments wurde der Raum vollständig abgedunkelt, um die Wahrnehmung der realen Welt durch den Benutzer zu verringern. Die Probanden erhielten Anweisungen zu den im HMD präsentierten Folien. Eine Nintendo Wii-Fernbedienung diente als Eingabegerät, über das die Probanden ihre Bewegungen beurteilten.

Wir haben das HMD-Display mit einem 12 m langen VGA-Kabel verbunden, wodurch sichergestellt wurde, dass während des gesamten Experiments kein Assistent neben dem Benutzer gehen musste, um die Drähte im Auge zu behalten. Um die Probanden auf die Aufgaben zu konzentrieren, wurde während des Experiments keine Kommunikation zwischen Experimentator und Proband durchgeführt. Alle Anweisungen wurden in der VE angezeigt, und die Probanden antworteten über das Wii-Gerät. Akustische Rückkopplung wurde im Experiment für Umgebungsgeräusche in der Stadt verwendet, so dass eine Orientierung mittels akustischer Rückkopplung in der realen Welt nicht möglich war.

4.1.2 Teilnehmer

Neun Männer und fünf Frauen (19-50 Jahre; 25:54) Die Probanden nahmen an der Studie teil. Die meisten Fächer waren Studenten oder Abteilungsmitglieder (Informatik, Mathematik, Psychologie, Geoinformatik und Physik). Alle hatten normales oder auf normales Sehen korrigiertes Sehen; 8 Brille oder Kontaktlinsen tragen. Zwei hatten keine Spielerfahrung, 6 hatten einige und 6 hatten viel Spielerfahrung. Von den Probanden hatten 3 Erfahrung mit dem Gehen in VR-Umgebungen unter Verwendung eines HMD-Setups. Zwölf Probanden waren Rechtshänder, zwei waren Linkshänder. Zwei der Autoren dienten als Themen; Alle anderen Probanden waren den experimentellen Bedingungen nicht gewachsen. Einige Probanden erhielten für ihre Teilnahme eine Klassengutschrift. Die Gesamtzeit pro Fach einschließlich Vorfragebogen, Anweisungen, Schulung, Experiment, Pausen und Nachbesprechung betrug 3 Stunden. Die Probanden durften jederzeit Pausen einlegen.

Für alle Experimente verwendeten wir die Methode der Konstanten Reize in a Zwei-Alternativen-Zwangswahl (2AFC) Aufgabe. In dem Bei der Methode der konstanten Stimuli werden die angewendeten Gewinne nicht von einem Versuch zum nächsten in Beziehung gesetzt, sondern zufällig und gleichmäßig verteilt dargestellt. Das Subjekt wählt eine der beiden möglichen Antworten, z. B. „War die virtuelle Bewegung kleiner oder größer als die körperliche Bewegung?“, antwortet wie „Ich kann es nicht sagen.“ ist nicht gestattet. Wenn die Testperson in dieser Version das Signal nicht erkennen kann, muss sie in 50 Prozent der Versuche raten und wird im Durchschnitt korrekt sein. Die Frage „War das größer oder nicht?“ das in [31] verwendet wurde, könnte eine Tendenz eingeführt haben, in dem Fall mit „Nein“ zu antworten

der Unsicherheit. Die in der vorliegenden Studie verwendete Zwei-Alternativen-Frage „größer oder kleiner“ mit erzwungener Wahl vermeidet dieses Problem.

Der Gewinn, mit dem das Subjekt in der Hälfte der Versuche „kleiner“ reagiert, wird als der angenommene Punkt der subjektiven Gleichheit (PSE), bei der das Subjekt die physische und die virtuelle Bewegung als identisch wahrnimmt. Wenn die Verstärkung von diesem Wert abnimmt oder zunimmt, nimmt die Fähigkeit des Subjekts zu, den Unterschied zwischen physischen und virtuellen Bewegungen zu erfassen, was zu einer psychometrischen Kurve für die Unterscheidungsleistung führt. Eine Schwelle ist der Intensitätspunkt, an dem Probanden nur eine Diskrepanz zwischen physischen und virtuellen Bewegungen erkennen können. Stimuli bei Werten nahe den Schwellenwerten sind jedoch häufig nachweisbar. Daher werden Schwellenwerte als die Gewinne angesehen, bei denen die Manipulation nur zu einem gewissen Teil der Zeit erfasst wird. In psychophysischen Experimenten wird normalerweise der Punkt als Schwelle genommen, an dem die Kurve die Mitte zwischen dem Zufallsniveau und 100 Prozent erreicht. Deshalb definieren wir die Erkennungsschwellen (DTs) für Verstärkungen, die kleiner als die PSE sind, als Wert der Verstärkung, bei der das Subjekt eine 75-prozentige Wahrscheinlichkeit hat, die „kleinere“ Antwort korrekt zu wählen, und die Erkennungsschwelle für Verstärkungen, die größer als die PSE sind, als Wert der Verstärkung, bei der Das Subjekt wählt in nur 25 Prozent der Versuche die „kleinere“ Antwort (da dann in 75 Prozent der Trails die richtige Antwort „größer“ gewählt wurde).

In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf den Bereich der Gewinne, über den das Subjekt den Unterschied nicht zuverlässig erkennen kann, sowie auf den Gewinn, bei dem Subjekte die physischen und virtuellen Bewegungen als identisch wahrnehmen. Der Gewinnbereich von 25 bis 75 Prozent gibt uns ein Intervall möglicher Manipulationen, die für das umgeleitete Gehen verwendet werden können. Die PSEs geben Hinweise, wie Benutzerbewegungen der virtuellen Kamera so zugeordnet werden können, dass virtuelle Bewegungen den Benutzern auf natürliche Weise angezeigt werden.

4.2 Experiment 1 (E1): Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen Rotationen

In diesem Experiment untersuchten wir die Fähigkeit des Probanden zu unterscheiden, ob eine physische Rotation kleiner oder größer als die simulierte virtuelle Rotation war (siehe Abschnitt 3.3). Daher haben wir die Probanden angewiesen, sich an einem physischen Punkt zu drehen, und diese Drehung einer entsprechenden virtuellen Drehung zugeordnet, auf die unterschiedliche Verstärkungen angewendet wurden (siehe Abb. 2a).

4.2.1 Material und Methoden für E1

Zu Beginn jedes Versuchs wurde die virtuelle Szene auf dem HMD zusammen mit der schriftlichen Anweisung präsentiert, sich physisch nach rechts oder links zu drehen, bis ein in Augenhöhe gezeichneter roter Punkt direkt vor der Blickrichtung des Probanden lag. Die Probanden zeigten das Ende der Runde mit einem Knopfdruck auf dem Wii-Controller an. Anschließend mussten die Probanden entscheiden, ob die simulierte virtuelle Rotation kleiner (Abwärts-Taste) oder größer (Aufwärts-Taste) als die physische Rotation war. Bevor der nächste Versuch begann, wandten sich die Probanden einer neuen Ausrichtung zu. Wir haben den Neuorientierungsprozess im IVE-Setup durch einen weißen Bildschirm und zwei Orientierungsmarkierungen (aktuelle Orientierung und Zielorientierung) angezeigt. Wir haben diese zufällige Neuorientierung implementiert, um zu verhindern, dass die Probanden von den Drähten umwickelt werden.

Orientierung. Wir haben den Gewinn variiert $G_R: \frac{1}{4}$ u zwischen dem physischen

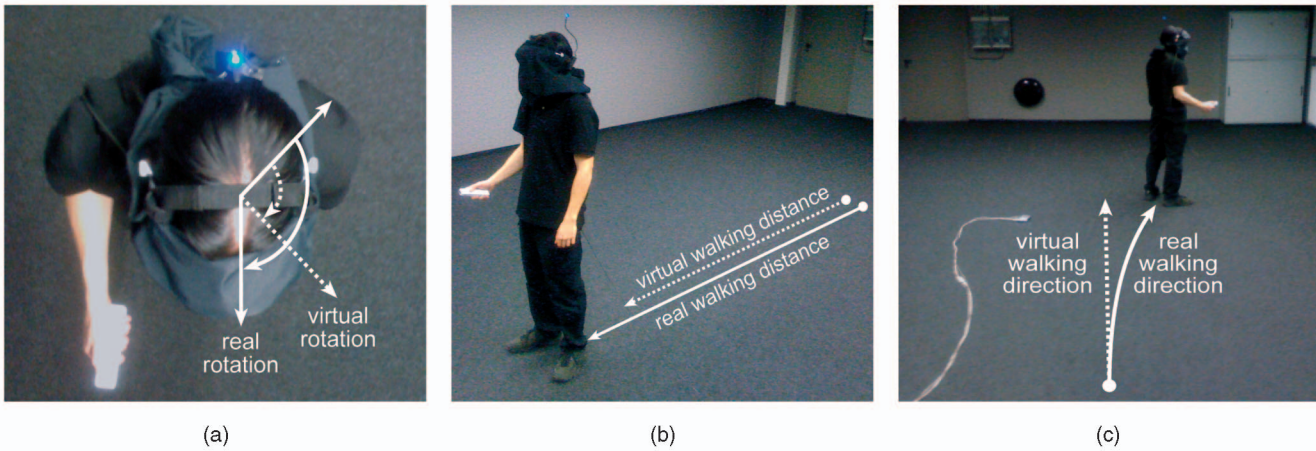


Abb. 2. Bilder aus den Experimenten. (a) Experiment E1: Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen Rotationen, (b) Experiment E2: Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen direkten Bewegungen und (c) Experiment E3: Unterscheidung der Pfadkrümmung.

und virtuelle Rotationen zufällig im Bereich zwischen 0,5 (physische Drehung um 180 Grad führte zu einer virtuellen Drehung um 90 Grad) und 1,5 (physische Drehung um 60 Grad führte zu einer virtuellen Drehung um 90 Grad) in Schritten von 0,1. Wir haben jeden Gewinn 10 Mal in zufälliger Reihenfolge getestet. An diesem Experiment nahmen 14 Probanden teil (siehe Abb. 2a).

4.2.2 Ergebnisse von E1

Fig. 4 zeigt die mittleren Nachweisschwellen zusammen mit dem Standardfehler über alle Probanden für die getesteten Gewinne. Das x- Achse zeigt die angelegte Rotationsverstärkung $G_R \cdot \frac{1}{2} u$, das y- Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer physikalischen Drehung größer als die Zugeordnete virtuelle Rotation. Die durchgezogene Linie zeigt die angepasste psychometrische Funktion der Form $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}}$ mit real Zahlen ein und b. Wir fanden keinen Unterschied zwischen Rotationen nach links und Rotationen nach rechts und bündelten daher die beiden Bedingungen. Wir mussten den Datensatz von zwei Probanden aus weiteren Analysen herausnehmen, da diese Probanden entweder die Antwortschaltflächen verwechselt oder die Aufgabe missverstanden haben.

Aus der psychometrischen Funktion ermittelten wir eine Verzerrung für den Punkt der subjektiven Gleichheit bei PSE $\frac{1}{2} 0:96$. Wie in Tabelle 1 dargestellt, schwankte die PSE für einzelne Probanden zwischen 0,83 und 1,34 (sechs Probanden mit einer PSE von mehr als 1,0, sieben Probanden von weniger als 1,0). Erkennungsschwellen von

75 Prozent wurden bei Zuwächsen von 0,67 für größere Antworten und bei 1,24 für kleinere Antworten erreicht. Gainedifferenzen innerhalb dieses Bereichs können nicht zuverlässig geschätzt werden, dh die Probanden hatten Probleme, zwischen einer virtuellen 90-Grad-Rotation und einer realen Rotation zwischen 72,6 und 134,3 Grad zu unterscheiden.

4.2.3 Diskussion von E1

Nach früheren Ergebnissen [31] [21] nahmen wir eine asymmetrische Eigenschaft der psychometrischen Funktion an, die in unserem Experiment reproduziert werden konnte. Die Asymmetrie ist in 4 gezeigt, wo der 75-Prozent-DT weiter von der PSE entfernt ist als der 25-Prozent-DT. Die Ergebnisse zeigen, dass Probanden physisch um 49 Prozent mehr oder 20 Prozent weniger gedreht werden können als die wahrgenommene virtuelle Rotation. Dieses Ergebnis ähnelt dem in [31] gefundenen Ergebnis, bei dem die Erkennungsschwellen angaben, dass die Probanden physisch um 68 Prozent mehr oder 10 Prozent weniger als die wahrgenommene virtuelle Rotation gedreht werden könnten. Die Abweichung zwischen beiden Experimenten



Abb. 3. Beispielszene aus Virtual Münster für die Experimente E1 und E2. Die Probanden mussten gehen, bis der grüne Punkt rot wurde. Innerhalb von 10 m Entfernung vom Benutzer befinden sich keine Hindernisse.

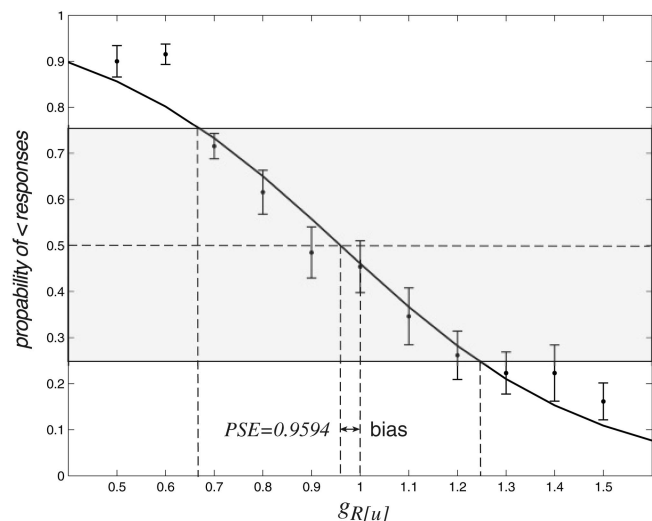


Abb. 4. Zusammengefasste Ergebnisse der Unterscheidung zwischen virtuell und physisch Rotationen. Das x- Achse zeigt die angewendete Rotationsverstärkung $G_R \cdot \frac{1}{2} u$, das y- Die Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit, eine virtuelle Rotation zu schätzen, die kleiner als ist physisches Gegenstück.

TABELLE 1
Individuelle PSE-Werte der teilnehmenden Probanden
in den Experimenten E1, E2 und E3

Subject	Exp. 1	Exp. 2	Exp.3
ab	0.8624	1.1432	0.0169
bb	1.3369	1.0613	—
df	1.0072	1.2161	0.0186
dw	0.9849	0.9958	-0.0194
fs	0.9241	1.0320	0.0013
gb	0.8592	1.0107	-0.0009
jp	0.9067	1.0416	-0.0164
kk	1.1404	1.0841	—
tb	0.8341	1.1968	0.0526
ee	—	—	0.0100
fz	0.8108	1.0552	-0.0100
sw	1.1871	0.9340	-0.0047
ms	0.8720	0.9938	0.0150
cs	1.1661	1.1623	0.0084
mh	—	—	—
$\bar{\sigma}$	0.9594	1.0665	0.0022

Wir haben einige Datensätze aus den in Abschnitt 4 genannten Gründen verworfen.

kann durch die geringe Teilnehmerzahl und / oder verursacht werden

die dem vorherigen Experiment innewohnende Vorspannung.

Die Asymmetrie der Erkennungsschwellen impliziert dies

nochmal $G_{R. \frac{1}{2} u} < 1$ Das Herunterskalieren einer physischen Rotation ist für die Probanden weniger auffällig. In diesem Fall scheint die Szene

Bewegen Sie sich leicht mit der Kopfdrehung, wie in früheren Untersuchungen gezeigt [21]. Fig. 4 zeigt, dass die mittlere PSE

war bei $G_{R. \frac{1}{2} u} \frac{1}{4} 0:96$, was darauf hinweist, dass die Probanden a

Virtuelle 90-Grad-Drehung, skaliert mit einer Verstärkung $G_{R. \frac{1}{2} u} \frac{1}{4} 0:96$

identisch mit der physischen 90-Grad-Drehung. Mit so einem

Gewinn, Benutzer müssen sich um ungefähr 95 Grad drehen, um eine virtuelle Drehung um 90 Grad zu erreichen, dh die Probanden unterschätzen diese Drehung um ungefähr 5 Prozent. In früheren Experimenten [31] haben Steinicke et al. fand eine größere Tendenz (PSE $\frac{1}{4} 0:8403$), was durch die verursacht werden könnte

Schätzung basierend auf einem Ja / Nein-Urteil (vgl. Abschnitt 2).

Berücksichtigt man auch die Ergebnisse anderer Forscher [11], [21],

[31] scheinen Probanden dazu zu neigen, virtuelle Rotationen zu unterschätzen;

obwohl einige Forscher die gegenteiligen Ergebnisse gefunden haben

(Überschätzung der Rotationen) [20]. Eine Unterschätzung der

Bewegungsentfernung wurde bereits für Übersetzungen berichtet [13] [16] [24]. Die

beobachtete Unterschätzung der Rotationen könnte mit der für Übersetzungen gemeldeten zusammenhängen, dies muss jedoch in weiteren Analysen überprüft werden. Zusammenfassend zeigt das Experiment, dass Probanden physische und

virtuelle Rotationen über den angegebenen Bereich von Gewinnen nicht unterscheiden konnten. Folglich ist die Neuorientierung von Benutzern über Rotationsgewinne eine gültige Technik, um Benutzer umzuleiten, ohne dass sie es bemerken.

4.3 Experiment 2 (E2): Unterscheidung zwischen virtuell und physisch unkompliziert Bewegungen

In diesem Experiment haben wir die Fähigkeit analysiert, zwischen virtuellen und physischen einfachen Bewegungen zu unterscheiden (siehe Abb. 2b). Die virtuelle Bewegung in Gehrichtung

wurde mit einem entsprechenden Übersetzungsgewinn skaliert $G_{T. \frac{1}{2} w}$ (siehe Abschnitt 3.2).

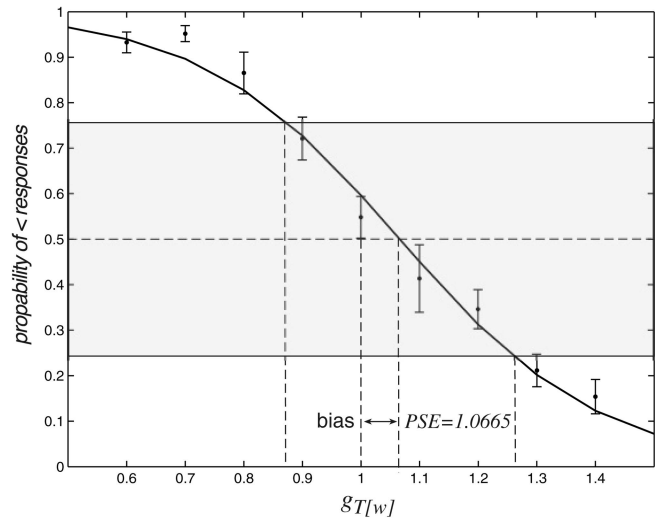


Abb. 5. Zusammengefasste Ergebnisse der Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen Bewegungen. Das x- Achse zeigt die angewendete Übersetzung dazugewonnen $G_{T. \frac{1}{2} w}$, das y- Die Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass Probanden die virtuelle direkte Bewegung kleiner als die physische Bewegung schätzen.

4.3.1 Material und Methoden für E2

In der IVE mussten die Probanden immer eine virtuelle Distanz von 5 m zurücklegen. Die Laufrichtung wurde durch einen grünen Punkt vor den Probanden angezeigt (siehe Abb. 3). Wenn die Probanden 5 m in der virtuellen Szene zurücklegten, wurde der Punkt rot, um das Ende der Entfernung anzuzeigen. Der Punkt hatte eine konstante Größe und befand sich auf Augenhöhe des Probanden über dem Boden. Die physische Distanz, die die Probanden gehen mussten, variierte zwischen 3 und

7 m, dh Gewinn $G_{T. \frac{1}{2} w}$ lag zwischen 0,6 und 1,4 in Schritten von 0,1. Wir haben die Gewinne jeweils acht Mal randomisiert dargestellt. Die Aufgabe bestand darin zu beurteilen, ob die virtuelle Fahrstrecke kleiner oder größer als die physische Gehstrecke war. Nach jedem Versuch musste der Proband in die Ausgangsposition zurückgehen, geführt von zwei Referenzmarkierungen auf einem ansonsten weißen Bildschirm. Ein Marker zeigte die tatsächliche Position des Subjekts relativ zum zweiten festen Marker, der die Startposition darstellte. 15 Probanden nahmen an diesem Experiment teil.

4.3.2 Ergebnisse von E2

Fig. 5 zeigt die mittlere (über alle Subjekte) Wahrscheinlichkeit, dass ein Subjekt schätzt, dass die virtuelle Distanz kleiner ist als die physisch wahrgenommene Distanz gegenüber den getesteten Gewinnen. Die Fehlerbalken zeigen Standardfehler für jede getestete Verstärkung. EIN

Übersetzungsgewinn $G_{T. \frac{1}{2} w}$, was befriedigt $G_{T. \frac{1}{2} w} < 1$, führt zu einer größeren physischen Gehstrecke im Vergleich zur virtuellen

Entfernung. Nochmal $G_{T. \frac{1}{2} w} > 1$ führt zu einer geringeren physischen Gehentfernung im Vergleich zur virtuellen Entfernung. Wir haben gepasst

die Daten mit der gleichen Sigmoidfunktion wie in Experiment E1. Wir haben den Datensatz von zwei Probanden aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Ein Proband gab immer an, dass die virtuelle Gehstrecke kürzer als die physische war. Das zweite Thema hat entweder die Antwortschaltflächen verwechselt oder die Aufgabe falsch verstanden. Die PSE für die gepoolten Daten der verbleibenden 12 Probanden beträgt 1,07. Dies bedeutet, dass die Probanden schätzen, dass sie die 5 m lange Strecke nach dem Aufwachen nur 4,69 zurückgelegt haben. Die PSEs für einzelne Probanden sind in Tabelle 1 gezeigt. Die berechnete PSE für die einzelnen Probanden variierte zwischen 0,93 und 1,22 (fünf Probanden mit PSE oben

oder gleich acht Probanden unter 1,07). DTs zur Schätzung von einfachen Bewegungen werden mit Gewinnen angegeben, die kleiner als sind 0,86 oder mehr als 1,26. Die DTs gewinnen $G_{T. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 0:86$ oder größer als $G_{T. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 1:26$ bedeuten, dass die Probanden nicht zuverlässig zwischen 4,3 und 6,3 m physisch unterscheiden konnten Entfernung, während sie 5 m in der virtuellen Welt gingen.

4.3.3 Diskussion von E2

Abb. 5 zeigt, dass Probanden physisch um etwa 14 Prozent mehr oder 26 Prozent weniger manipuliert werden können als die wahrgenommene virtuelle Übersetzung. Die PSE ist bei $G_{T. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 1:07$. In den Ergebnissen der in [31] durchgeführten Experimente fanden wir ähnliche Erkennungsschwellen $G_{T. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 0:78$ und $G_{T. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 1:22$, aber keine Asymmetrie im Bereich der Erkennungsschwellen konnte überprüft werden. Dies kann wiederum durch eine Schätzung verursacht werden, die auf dem Ja / Nein-Urteil anstelle des 2AFC beruhte.

Eine PSE größer als eins steht im Einklang mit früheren Befunden, dass Probanden dazu neigen, die Reisedistanzen in der EU zu unterschätzen virtuelle Welt [13], [15], [16], [25]. Nochmal $G_{T. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 1:07$ erscheint für Personen, die nur laufen müssen, natürlich 4,69 m in der realen Welt, um 5 m virtuell zu gehen. Dies entspricht einer 7-prozentigen Überschätzung der physischen Gehstrecke, was mit anderen Worten die Unterschätzung der virtuellen Entfernungen unterstreicht.

Man könnte andererseits argumentieren, dass eine Unterschätzung von 7 Prozent angesichts der Schwierigkeit der Aufgabe in VE nicht viel ist. Unter diesem Gesichtspunkt zeigen die Ergebnisse, dass der Mensch sehr genau zwischen virtuellen und realen Translationsbewegungen unterscheiden kann, wenn er tatsächlich eine Strecke in einer vertrauten Umgebung wie einem realistischen 3D-Stadtmodell zurücklegt. Da die Probanden die VE aus der realen Welt kannten, konnten sie Entfernungshinweise wie die Höhe von Bäumen, Straßengrößen usw. ausnutzen. Wie in [17] angegeben, unterstützen solche Hinweise die Probanden eher bei der Schätzung von Entfernungen im Vergleich zur Bewertung von Merkmalen in künstliche Umgebungen.

4.4 Experiment 3 (E3): Unterscheidung der Pfadkrümmung

In diesem Experiment analysieren wir die Empfindlichkeit gegenüber Krümmungsverstärkungen, die den Benutzer dazu zwingen, auf einer Kurve zu gehen, um auf einem geraden Pfad zu bleiben (siehe Abschnitt 3.4). Die Probanden wurden angewiesen, im VE entlang einer geraden Linie zu gehen. Da der Pfad jedoch manipuliert wurde, mussten sie physisch entlang eines gekrümmten Pfades gehen, damit der virtuelle Pfad gerade blieb (siehe Abb. 2c). Wir fragten, ob die Probanden in der Lage waren, die Biegerichtung des physischen Pfades zu unterscheiden, und wenn ja, ab welcher Schwelle sie dies zuverlässig tun.

Ein Problem bei solchen Experimenten besteht darin, dass die Probanden im ersten Schritt typischerweise unsicher sind [31] und im ersten Schritt Schwierigkeiten haben, auf dem richtigen Weg zu bleiben. Zum Beispiel verließen die Probanden einer früheren Studie nach zwei Schritten den Bürgersteig und mussten sich neu auf das Ziel ausrichten und den Spaziergang fortsetzen. Folglich neigen sie dazu, eher in einem Dreieck als in einem Bogen zu laufen. Um dieses Problem zu vermeiden, begannen die Probanden mit einem 2-m-walk ohne Szenenmanipulation, bevor Manipulationen an der virtuellen Kamera mittels Krümmung vorgenommen wurden

dazugewinnen $G_{c. \frac{1}{2} w}$.

4.4.1 Material und Methoden für E3

Um die Benutzer beim virtuellen Gehen auf einem geraden Weg zu unterstützen, haben wir einen 1 m breiten Bürgersteig eingeführt (siehe Abb. 6). In Höhe von

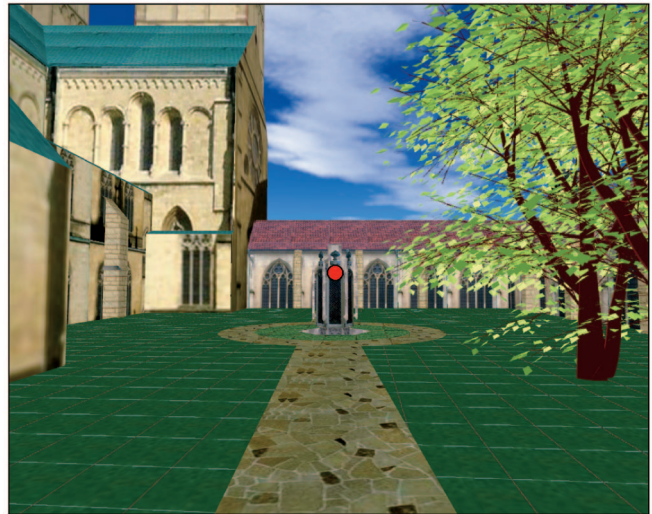


Abb. 6. Beispielszene aus Virtual Münster für das Experiment E3. Der Bürgersteig, der die Motive beim Gehen unterstützt, wurde der Szene hinzugefügt. Innerhalb von 10 m Entfernung vom Benutzer befinden sich keine Hindernisse.

In der Augenhöhe des Probanden haben wir der Szene einen grünen Punkt hinzugefügt, der rot wurde, als die Probanden gegangen waren 2 p 5 m darauf zu. Während die Probanden über den Bürgersteig gingen, drehten wir die Szene mit einer Geschwindigkeit, die mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Probanden zusammenhängt, zu beiden Seiten. Die Szene drehte sich nach 5 m zu Fuß um 5, 10, 15, 20 und 30 Grad. Dies entspricht einem Krümmungsradius von ungefähr 57,3, 28,65, 19,10, 14,32 bzw. 9,55 m. Daher waren die Krümmungsverstärkungen gegeben durch

$$G_{c. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} f_{30}; \quad \text{---} \quad \overline{45}; \quad \overline{60}; \quad \overline{90}; \quad \overline{180} G.$$

Die Rotation der virtuellen Kamera begann, nachdem die Probanden die 2-m-Startphase durchlaufen hatten. Nachdem die Probanden eine Gesamtstrecke von 7 m in der virtuellen Welt zurückgelegt hatten, wurde der Bildschirm weiß und die Frage nach der Diskriminierungsaufgabe erschien. Die Aufgabe des Probanden bestand darin, durch Drücken der entsprechenden Taste „links“ oder „rechts“ auf dem Wii-Controller zu entscheiden, ob der physische Pfad nach links oder rechts gekrümmt war. Das Subjekt ging dann auf einem ansonsten weißen Bildschirm zurück zu der Startposition, die von den Markierungen (einer zeigte die aktuelle und einer die Zielposition / -orientierung an) geführt wurde. Zwölf Probanden nahmen an diesem Experiment teil.

4.4.2 Ergebnisse von E3

In Abb. 7 haben wir die mittlere Wahrscheinlichkeit für die Antwort aufgetragen, dass der physikalische Pfad nach links gegen den gekrümmt war Krümmungsgewinne $G_{c. \frac{1}{2} w}$. Fehlerbalken entsprechen dem Standard Error. Die PSE für die gepoolten Daten ist $1:423 \frac{1}{4} 0:002$. Bei dieser PSE sind die Probanden tatsächlich auf einem Kreisbogen mit gelaufen einen Radius von 453,14 m und nach 5 m um weniger als ein Grad gedreht. Die PSEs für einzelne Probanden sind in dargestellt Tabelle 1. Sie variierten zwischen $162:51 \frac{1}{4} 0:049$ und $60:90 \frac{1}{4} 0:052$ (10 Probanden mit PSE über oder gleich, zwei Probanden weniger als 0,0022). Die Erkennungsschwellen sind durch die Reizintensität gegeben, bei der die Probanden die Biegung des Pfades in 75 Prozent der Fälle korrekt erfassen. Erkennung Schwellen waren $G_{c. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} 0:045$, dh $G_{c. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} \frac{69:23}{69:23}$ für links-biegsame Wege und $G_{c. \frac{1}{2} w \frac{1}{4}} \frac{69:23}{69:23}$ für rechts-biegene Wege. Bei diesen Schwellenwerten gingen die Probanden

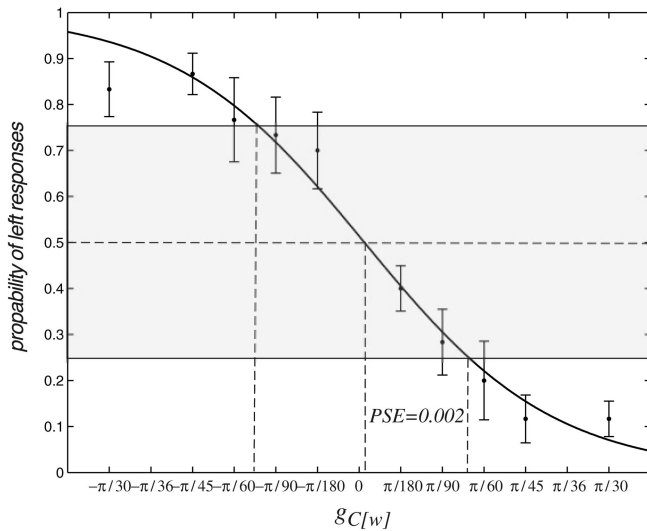


Abb. 7. Zusammengefasste Ergebnisse der Unterscheidung der Pfadkrümmung. Das x- Die Achse zeigt die angelegte Krümmungsverstärkung, die den Laufweg entweder zu biegt die linke ($G_C \cdot w < 0$) oder das Recht ($G_C \cdot w > 0$), das y- Die Achse zeigt den Anteil der linken Antworten der Probanden.

physikalisch auf einem Kreisbogen mit einem Radius von ca.

22,03 m. Innerhalb dieses Bereichs von Erkennungsschwellen können Probanden nicht zuverlässig schätzen, ob sie gerade oder auf einer Kurve gehen.

4.4.3 Diskussion von E3

Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden nach einer Entfernung von 5 m um 13 Grad nach links oder rechts neu ausgerichtet werden können, was einem Schritt entlang eines Kreisbogens mit einem Radius von ca. 22 m entspricht. Wenn also der Laborraum eine Fläche von ungefähr abdeckt 40 m 40 m, Es wird möglich, den Benutzer auf einem Kreisbogen in der physischen Welt zu führen, während der Benutzer unbegrenzt direkt in der VE laufen kann.

5 C. SCHLUSSFOLGERUNG UND D. DISCUSSION

In diesem Artikel haben wir die Fähigkeit der Benutzer analysiert, umgeleitete Gehmanipulationen in drei verschiedenen Experimenten zu erkennen. Wir haben generische Konzepte für Umleitungstechniken eingeführt und die entsprechenden Gewinne in einem praktisch nützlichen Bereich auf ihre Wahrnehmbarkeit getestet. Die Ergebnisse umfassen Erkennungsschwellen, die wesentliche Auswirkungen auf das Design zukünftiger Benutzeroberflächen für die Fortbewegung haben, die auf umgeleitetem Gehen basieren.

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Unsere Ergebnisse zeigen, dass Benutzer physisch um 49 Prozent mehr oder 20 Prozent weniger als die wahrgenommene virtuelle Rotation gedreht werden können, ohne den Unterschied zu bemerken. Wir haben eine Verzerrung für den Punkt der subjektiven Gleichheit ermittelt, die zu a führt $PSE \approx$

0:95 für die virtuelle Rotationen für Benutzer am natürlichsten erscheinen. Unsere Ergebnisse stimmen mit früheren Ergebnissen überein [21], [31], dass Benutzer empfindlicher auf Szenenbewegungen reagieren, wenn sich die Szene gegen die Kopfdrehung bewegt, als wenn sich die Szene mit der Kopfdrehung bewegt. Die beobachtete Unterschätzung der Rotationen könnte mit der für Übersetzungen gemeldeten zusammenhängen, dies muss jedoch in weiteren Analysen überprüft werden.

Gehbare Entfernungen in der realen Welt können um 14 Prozent verkleinert und um 26 Prozent vergrößert werden, wenn sie es sind

auf virtuelle Bewegungen abgebildet. Diese Asymmetrie stimmt mit früheren Befunden überein, wonach Benutzer Entfernungen tendenziell unterschätzen [13] [15] [16] [25]. Die PSE für die gepoolten Daten der Probanden beträgt 1,07. Dies bedeutet, dass die Probanden schätzen, dass sie nach dem Aufwachen nur 4,69 m zurückgelegt haben. Weitere Experimente und Analysen könnten durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob diese Unterschätzung mit der Ganglänge übereinstimmt, die normalerweise für Personen mit HMD kleiner ist [39].

Beim Anwenden von Krümmungsverstärkungen können Benutzer so umgeleitet werden, dass sie unwissentlich auf einem Kreisbogen laufen, wenn der Radius größer oder gleich 22 m ist.

Im Vergleich zu der in [31] vorgestellten Studie hat die Versuchsplanung auf der Grundlage einer 2AFCT wahrscheinlich den größten Teil der Verzerrung verringert, die durch Fragen verursacht wird, die auf Ja / Nein-Urteilen beruhen.

Das umgeleitete Gehen ist zwar eine subjektive Angelegenheit, aber die Ergebnisse können als Schwellenwerte für die Entwicklung zukünftiger Fortbewegungsschnittstellen dienen. Die aus unseren Experimenten abgeleiteten Erkennungsschwellen sind konservative Schätzungen, da die Aufgabe eines Probanden darin bestand, Diskrepanzen zwischen vestibulären, propriozeptiven und efferenten Kopiersignalen, die in der realen Welt wahrgenommen werden, und visuellem Feedback, das in der virtuellen Umgebung wahrgenommen wird, zu erkennen. In tatsächlichen VR-basierten Anwendungen, die auf umgeleitetem Gehen basieren, werden Benutzer nicht auf offensichtliche Weise mit solchen Diskrepanzen konfrontiert, sondern konzentrieren sich auf andere Aufgaben wie die Auswahl oder Manipulation von Objekten im Raum. Wir haben erfahren, dass Probanden wesentlich größere Gewinne tolerieren, wenn sie sich der Manipulation nicht bewusst sind, insbesondere wenn sie mit ihren Hauptaufgaben beschäftigt sind. $G \approx 0:64$ sind auffällig, aber immer noch nicht übermäßig ablenkend. In diesem Fall laufen Benutzer auf einem Kreisbogen mit einem Radius von ca. 3,3 m, was für die meisten VR-basierten Setups viel praktischer ist. Daher bieten die in diesem Dokument vorgeschlagenen Schwellenwerte Unter- und Obergrenzen für die Empfindlichkeit des Menschen gegenüber umgeleitetem Gehen. In den meisten Szenarien können jedoch viel größere Gewinne erzielt werden, ohne dass der Benutzer bemerkt, dass sie manipuliert werden.

5.1.1 Postquestionnaires

Nach den Experimenten haben wir weitere Fragebögen durchgeführt, um mögliche Nachteile des experimentellen Designs zu identifizieren. Die Probanden schätzten die Schwierigkeit der Aufgaben mit durchschnittlich 1,57 auf einer 4-Punkte-Likert-Skala (0 entspricht sehr einfach, 4 entspricht sehr schwierig). Darüber hinaus haben wir Probanden nach ihrer Angst vor Kollisionen mit physischen Objekten gefragt. Die Probanden zeigten ihren Grad an Angst auf einer 4-Punkte-Likert-Skala (0 entspricht keiner Angst, 4 entspricht einem hohen Grad an Angst). Im Durchschnitt beträgt die Bewertung ungefähr 1,36, was zeigt, dass sich die Probanden ziemlich sicher fühlten, obwohl sie ein HMD trugen und wussten, dass sie manipuliert wurden.

Wir haben die Simulatorkrankheit mit Hilfe von Kennedys Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) gemessen. Der Pre-SSQ-Score beträgt für alle Probanden durchschnittlich 8,55 und der Post-SSQ-Score bis 24.04. Wir haben an einem anderen Tag einen Folgetest für Probanden mit hohen Post-SSQ-Werten durchgeführt, um dies zu untersuchen

ob die Krankheit durch die angewendeten umgeleiteten Gehmanipulationen verursacht wurde oder nicht. Es konnten jedoch keine Hinweise darauf gefunden werden, dass die beschriebenen umgeleiteten Gehtechniken zu den Symptomen der Simulatorkrankheit beitragen oder diese abziehen.

5.2 Zukünftige Arbeit

In Zukunft werden wir andere Umleitungsansätze betrachten, die in der Taxonomie umgeleiteter Gehtechniken vorgestellt werden [32], die im Rahmen dieses Papiers nicht analysiert wurden. Wir planen, diese Konzepte auch auf Rückwärtsbewegungen auszudehnen. Darüber hinaus müssen weitere Bedingungen berücksichtigt und auf ihre Auswirkungen auf das umgeleitete Gehen getestet werden, z. B. Entfernungen von Szenenobjekten, Detaillierungsgrad, Kontrast usw. Informelle Tests haben motiviert, dass Manipulationen in einigen Fällen verstärkt werden können, z. Wenn sich weniger Objekte in der Nähe der Kamera befinden, kann dies zu weiteren Bewegungshinweisen führen, während der Benutzer geht. Darüber hinaus wollen wir den Einfluss der Anpassung untersuchen. Aus unserer Erfahrung glauben wir, dass die Gewinne im Laufe der Zeit schrittweise gesteigert werden können, ohne dass der Benutzer dies bemerkt. Daher kann es möglich sein, größere Verstärkungsbereiche bereitzustellen,

Der vorgestellte umgeleitete Gehansatz weist einige Einschränkungen auf. Beispielsweise kann es vorkommen, dass Benutzer zu Punkten geführt werden, an denen sie direkt in Wände blicken. Die körperlichen Bewegungen sind in einer solchen Situation eingeschränkt. Dann kann es unmöglich werden, Benutzer so umzuleiten, dass sie die Manipulation nicht beobachten können. Manchmal ist es überhaupt nicht möglich, Benutzer durch visuelle Reize umzuleiten, beispielsweise wenn ein Benutzer mit verbundenen Augen geht. In solchen Extremsituationen müssen größere Manipulationen berücksichtigt werden, um eine ausreichende Manipulation zu unterstützen. Darüber hinaus müssen bestimmte Sicherheitsmechanismen implementiert werden. Zum Beispiel blenden wir die Visualisierung auf dem HMD aus und zeigen dem Benutzer ein akustisches Warnsignal an, wenn er sich einer physischen Wand nähert.

Es hat sich gezeigt, dass bestimmte Faktoren einen Einfluss auf den Verstärkungsbereich haben können, bei dem Szenenmanipulationen für Benutzer nicht wahrnehmbar sind. Zum Beispiel haben Peck et al. [27] Verwenden Sie virtuelle Objekte (z. B. einen Schmetterling) vor dem Benutzer, um den Benutzer von der Neuorientierung abzulenken und viel größere Manipulationen zu ermöglichen. In diesem Artikel haben wir die Situation betrachtet, in der sich die Probanden darauf konzentrieren, die Diskrepanz zwischen virtuellen und realen Bewegungen zu erkennen. Wir sind daher zuversichtlich, dass die in diesem Dokument vorgestellten Erkennungsschwellen ein großes Potenzial für unterschiedliche Bedingungen haben und während des Entwurfsprozesses anderer Benutzeroberflächen für die Fortbewegung angewendet werden können, die auf umgeleitetem Gehen basieren.

R. EFERENZEN

- [1] T. Banton, J. Stefanucci, F. Durgin, A. Fass und D. Proffitt, "Die Wahrnehmung der Gehgeschwindigkeit in einer virtuellen Umgebung". Gegenwart, vol. 14, nein. 4, S. 394-406, 2005.
- [2] A. Berthoz, Das Bewegungsgefühl des Gehirns. Harvard Univ. Drücken Sie, 2000.
- [3] A. Berthoz, B. Pavard und LR Young, "Wahrnehmung der linearen horizontalen Selbstbewegung, die durch peripheres Sehen (Linearektion) induziert wird", Grundlegende Merkmale und visuell-vestibuläre Wechselwirkungen, vol. 23, S. 471-489, 1975.
- [4] RJ Bertin, I. Israël und M. Lappe, "Wahrnehmung von 2D, simulierten Ego-Bewegungsbahnen aus dem optischen Fluss", Visionsforschung, vol. 40, nein. 21, S. 2951-2971, 2000.
- [5] L. Bouguila und M. Sato, "Virtuelles Fortbewegungssystem für eine großflächige virtuelle Umgebung", Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 291-292, 2002.
- [6] L. Bouguila, M. Sato, S. Hasegawa, H. Naoki, N. Matsumoto, A. Toyama, J. Ezine und D. Maghrebi, "Proc. ACM SIGGRAPH, p. 63, 2002.
- [7] B. Bridgeman, AHC van der Heijden und BM Velichkovsky, "Eine Theorie der visuellen Stabilität über sakkadische Augenbewegungen hinweg", Verhaltens- und Gehirnwissenschaften, vol. 17, S. 247-292, 1994.
- [8] G. Burdea und P. Coiffet, Virtual Reality-Technologie. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [9] E. Burns, S. Razzaque, AT Panter, M. Whitton, M. McCallus und F. Brooks, "Die Hand ist langsamer als das Auge: Eine quantitative Untersuchung der visuellen Dominanz über die Propriozeption" Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 3-10, 2005.
- [10] J. Dichgans und T. Brandt, "Visuelle vestibuläre Interaktion: Auswirkungen auf die Selbstbewegungswahrnehmung und die Haltungskontrolle", Wahrnehmung. Handbuch der sensorischen Physiologie, R. Held, HW Leibowitz und HL Teuber, Hrsg., Vol. 8, S. 755-804, Springer, 1978.
- [11] D. Engel, C. Curio, L. Tcheang, B. Mohler und SH Bühlhoff, "Ein psychophysisch kalibrierter Controller für die Navigation durch große Umgebungen in einem begrenzten Freilaufraum". Proc. ACM Symp. Virtual Reality Software und Technologie (VRST), S. 157-164, 2008.
- [12] J. Feasel, M. Whitton und J. Wendt, "LLCM-WIP: Low-Latency, Continuous-Motion-Walking-in-Place" Proc. Symp. 3D-Benutzeroberflächen 2008, S. 97-104, 2008.
- [13] H. Frenz, M. Lappe, M. Kolesnik und T. Bührmann, "Abschätzung der Reiestrecke von visuellen Bewegungen in virtuellen Umgebungen", ACM Trans. Angewandte Wahrnehmung, vol. 3, nein. 4, S. 419-428, 2007.
- [14] H. Groenda, F. Nowak, P. Rößler und UD Hanebeck, "Telepräsenz-Techniken zur Steuerung der Avatar-Bewegung in First-Person-Spielen", Proc. Int'l Conf. Intelligente Technologien für interaktive Unterhaltung (INTETAIN '05), S. 44-53, 2005.
- [15] V. Interrante, L. Anderson und B. Ries, "Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited", Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 3-10, 2006.
- [16] V. Interrante, B. Ries, J. Lindquist und L. Anderson, "Aufklärung der Faktoren, die die veridische räumliche Wahrnehmung in immersiven virtuellen Umgebungen erleichtern können". Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 11-18, 2007.
- [17] V. Interrante, B. Riesand und L. Anderson, "Sieben Liga-Stiefel: Eine neue Metapher für eine erweiterte Fortbewegung durch mittelgroße immersive virtuelle Umgebungen". Proc. IEEE Symp. 3D-Benutzeroberflächen, S. 167-170, 2007.
- [18] H. Iwata, Y. Hiroaki und H. Tomioka, "Powered Shoes" Proc. ACM SIGGRAPH, vol. 28, 2006.
- [19] H. Iwata, H. Yano, H. Fukushima und H. Noma, "CirculaFloor" IEEE-Computergrafik und -Anwendungen, vol. 25, nein. 1, S. 64-67, Jan./Feb. 2005.
- [20] PM Jaekl, RS Allison, LR Harris, UT Jasiobedzka, HL Jenkin, MR Jenkin, JE Zacher und DC Zikowitz, "Wahrnehmungsstabilität während der Kopfbewegung in der virtuellen Realität", Proc. Int'l Conf. Virtuelle Realität, S. 149-155, 2002.
- [21] J. Jerald, T. Peck, F. Steinicke und M. Whitton, "Empfindlichkeit gegenüber Szenenbewegungen für Phasen von Kopfgieren", Proc. Conf. Angewandte Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung, S. 155-162, 2008.
- [22] L. Kohli, E. Burns, D. Miller und H. Fuchs, "Kombination passiver Haptik mit umgeleitetem Gehen", Proc. Int'l Conf. Augmented Tele-Existence, vol. 157, S. 253-254, 2005.
- [23] M. Lappe, F. Bremmer und AV van den Berg, "Wahrnehmung der Selbstbewegung aus dem visuellen Fluss", Trends in den Kognitionswissenschaften, vol. 3, nein. 9, S. 329-336, 1999.
- [24] M. Lappe, M. Jenkin und LR Harris, "Schätzung der Reiestrecke aus visuellen Bewegungen durch undichte Pfadintegration", Experimentelle Hirnforschung, vol. 180, S. 35-48, 2007.
- [25] JM Loomis und JM Knapp, "Visuelle Wahrnehmung egozentrischer Distanz in realen und virtuellen Umgebungen", Virtuelle und adaptive Umgebungen, LJ Hettinger und MW Haas, Hrsg., Lawrence Erlbaum Assoc., 2003.
- [26] N. Nitzsche, U. Hanebeck und G. Schmidt, "Bewegungskompression für telepräsentes Gehen in großen Zielumgebungen", Gegenwart, vol. 13, S. 44-60, 2004.
- [27] T. Peck, M. Whitton und H. Fuchs, "Evaluierung von Neuorientierungstechniken für das Gehen in großen virtuellen Umgebungen", Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 121-128, 2008.

- [28] S. Razzaque, "Redirected Walking", Dissertation, Univ. von North Carolina, 2005.
- [29] B. Riecke und J. Wiener: „Können Menschen in VR nicht von links nach rechts unterscheiden? Point-to-Origin-Studien haben qualitative Fehler bei der Integration visueller Pfade aufgedeckt.“ Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 3-10, 2007.
- [30] M. Schwaiger, T. Thümmel und H. Ulbrich, „Cyberwalk: Implementierung einer Kugellagerplattform für Menschen“, Proc. Int'l Conf. Mensch-Computer-Interaktion (HCI), S. 926-935, 2007.
- [31] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz und M. Lappe, „Analysen der menschlichen Empfindlichkeit gegenüber umgeleitetem Gehen“, Proc. 15. ACM Symp. Virtual Reality Software und Technologie, S. 149-156, 2008.
- [32] F. Steinicke, G. Bruder, L. Kohli, J. Jerald und K. Hinrichs, „Taxonomie und Implementierung von Umleitungstechniken für allgegenwärtiges passives haptisches Feedback“, Proc. Int'l Conf. Cyberwelten, S. 217-223, 2008.
- [33] F. Steinicke, G. Bruder, T. Ropinski und K. Hinrichs, „Auf dem Weg zu allgemein anwendbarem umgeleitetem Gehen“, Proc. Virtuelle Realität Int'l Conf. (VRIC), S. 15-24, 2008.
- [34] J. Su, "Bewegungskompression für Telepräsenz-Fortbewegung", Präsenz: Teleoperator in virtuellen Umgebungen, vol. 4, nein. 16, S. 385-398, 2007.
- [35] 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". Proc. ACM SIGGRAPH, S. 359-364, 1999.
- [36] H. Wallach, "Wahrnehmung einer stabilen Umgebung, wenn man sich bewegt" Ann. Rev. Psychology, vol. 38, S. 1-27, 1987.
- [37] WH Warren Jr., "Visuell kontrollierte Fortbewegung: 40 Jahre später" Ökologische Psychologie, vol. 10, S. 177-219, 1998.
- [38] AH Wertheim, "Bewegungswahrnehmung während der Selbstbewegung, die direkte versus inferentielle Kontroverse überarbeitet", Verhaltens- und Gehirnwissenschaften, vol. 17, nein. 2, S. 293-355, 1994.
- [39] M. Whitton, J. Cohn, P. Feasel, S. Zimmons, S. Razzaque, B. Poulton, B. McLeod und F. Brooks, "Comparing VE Locomotion Interfaces". Proc. IEEE Virtual Reality Conf., S. 123-130, 2005.
- [40] B. Williams, G. Narasimham, TP McNamara, TH Carr, JJ Rieser und B. Bodenheimer, „Aktualisierung der Orientierung in großen virtuellen Umgebungen mithilfe eines skalierten Translationsgewinns“. Proc. Drittes Symp. Angewandte Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung, vol. 153, S. 21-28, 2006.



Die Forschung untersucht die Bewegungswahrnehmung in virtuellen Umgebungen. Er ist studentisches Mitglied des IEEE.



Jason Jerald erhielt 1998 den BS-Abschluss in Informatik von der Washington State University. Derzeit arbeitet er an der University of North Carolina in Chapel Hill an der Promotion. Er hat an mehreren Forschungseinrichtungen gearbeitet, darunter an den Battelle Pacific Northwest National Laboratories, den Argonne National Laboratories, den HRL Laboratories, den Navy Research Laboratories und dem NASA Ames Research Center. Sein Strom

Harald Frenz promovierte 2003 am Institut für Biologie der Ruhr-Universität Bochum. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Wahrnehmung visuell simulierter Selbstbewegungen.



Markus Lappe promovierte in Physik an der Universität Tübingen. Am Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik in Tübingen forschte er über rechnergestützte und kognitive Neurowissenschaften des Sehens. die National Institutes of Health, Bethesda; und das Institut für Biologie der Ruhr-Universität Bochum. 1999 wurde er mit dem BioFuture-Preis des Bundesministeriums für Bildung und Bildung ausgezeichnet

Forschung. Seit 2001 ist er ordentlicher Professor für experimentelle Psychologie an der Universität Münster. Er ist außerdem Mitglied des Otto-Creutzfeldt-Zentrums für kognitive und Verhaltensneurowissenschaften an der Universität Münster.

Weitere Informationen zu diesem oder einem anderen Computerthema finden Sie in unserer digitalen Bibliothek unter www.computer.org/publications/dlib.



Frank Steinicke promovierte 2006 in Informatik an der Universität Münster. Derzeit ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Visualisierung und Computergrafik (VisCG) an der Universität Münster. Seine Forschungsinteressen umfassen die Mensch-Computer-Interaktion unter besonderer Berücksichtigung von VR, Wahrnehmung und Kognition in computergenerierten Umgebungen und Visualisierungen. Er ist Mitglied des IEEE.



Gerd Bruder erhielt 2009 das Diplom in Informatik von der Universität Münster. Derzeit arbeitet er an der Promotion in der VisCG-Forschungsgruppe der Universität Münster. Seine Forschungsinteressen umfassen Computergrafik, VR-basierte Fortbewegungstechniken und Wahrnehmung in immersiven virtuellen Umgebungen. Er ist studentisches Mitglied des IEEE.