

In der virtuellen Realität laufen lernen

ROY A. RUDDLE, Universität Leeds und Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik

EKATERINA VOLKOVA, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik

HEINRICH H. BÜLTHOFF, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik und Korea University

Dieser Artikel enthält Längsschnittdaten für den Zeitpunkt, an dem die Teilnehmer gelernt haben, mit einer Metapher für das Gehen durch VR-Welten (Virtual Reality) zu reisen. Dabei wurden Schnittstellen verwendet, die von reinen Joysticks über lineare und omnidirektionale Laufbänder bis hin zum tatsächlichen Gehen in VR reichten. Es wurden drei Metriken verwendet: Reisezeit, Kollisionen (ein Maß für die Genauigkeit) und das Geschwindigkeitsprofil. Die Zeit, die die Teilnehmer benötigten, um eine asymptotische Leistung für das Reisen zu erreichen, und was diese Asymptote war, variierte zwischen den Schnittstellen erheblich. Insbesondere wenn eine Welt enge Kurven hatte (0,75 m Korridore), waren die Teilnehmer, die gingen, effizienter als diejenigen, die einen Joystick zur Lokomotive verwendeten und sich auch nach 10 Minuten Training entweder physisch oder mit einem Joystick drehten. Das Geschwindigkeitsprofil zeigte, dass dies dadurch verursacht wurde, dass die Teilnehmer einen bemerkenswerten Prozentsatz der stationären Zeit verbrachten. unabhängig davon, ob sie häufig Computerspiele spielten oder nicht. Die Studie zeigt, wie Geschwindigkeitsprofile verwendet werden können, um die Eignung der Teilnehmer mit Reiseschnittstellen zu bewerten, und unterstreicht die Notwendigkeit, das Training so zu strukturieren, dass bestimmte Schwachstellen in der Eignung (z. B. Start-Stopp-Bewegung) behoben werden, und Studien, um dies zu messen und zu melden Pro fi zienz.

Kategorien und Fachbeschreibungen: H.5.2 [**Informationsschnittstellen und Präsentation**]: Benutzeroberflächen- *Eingabegeräte und Strategien* (z. B. *Maus, Touchscreen*); I.3.6 [**Computergrafik**]: Methodologie und Techniken - *Interaktionstechniken*; I.3.7 [**Computergrafik**]: Dreidimensionale Grafik und Realismus - *Virtuelle Realität*

Allgemeine Begriffe: Experimentieren, Human Factors, Leistung

Zusätzliche Schlüsselwörter und -phrasen: Virtual-Reality-Schnittstellen, Navigation, Reisen, Metriken

ACM-Referenzformat:

Ruddle, RA, Volkova, E. und Bühlhoff, HH 2013. Lernen, in der virtuellen Realität zu laufen. ACM Trans. Appl. Wahrnehmen. 10, 2, Artikel 11 (Mai 2013), 17 Seiten.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2465780.2465785>

1. EINLEITUNG

Die Notwendigkeit der Navigation ist für die virtuelle Realität (VR) von wesentlicher Bedeutung, da eine Anwendung zur Überprüfung von Konstruktionsentwürfen, Unterhaltung, sozialer Kommunikation, Planung oder Schulung dient [Blascovich und Bailenson 2011; Bowman et al. 2004; Stone 2002], wenn Benutzer den eigentlichen Zweck der Verwendung einer bestimmten VR-Welt erreichen möchten, müssen sie diese von verschiedenen Orten aus betrachten. Eine Vielzahl von Metaphern für die Navigation

Diese Forschung wurde durch ein Alexander von Humboldt-Stipendium für erfahrene Forscher unterstützt, das RA Ruddle, der Max-Planck-Gesellschaft und dem WCU-Programm (World Class University) durch die vom Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Technologie finanzierte National Research Foundation of Korea (Korea) verliehen wurde. R31-10008).

Autorenadressen: RA Ruddle, School of Computing, Universität Leeds, LS2 9JT, UK; E. Volkova, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Spemannstraße 38, 72076 Tübingen; SH Bühlhoff, Institut für Gehirn- und Kognitive Technik, Korea University, Seoul, Südkorea. Korrespondenz-E-Mail: royr@comp.leeds.ac.uk.

Die Erlaubnis, digitale oder gedruckte Kopien eines Teils oder des gesamten Werks für den persönlichen Gebrauch oder den Unterricht zu erstellen, wird kostenlos erteilt, sofern keine Kopien zum Gewinn oder zum kommerziellen Vorteil angefertigt oder verteilt werden und die Kopien diesen Hinweis auf der ersten Seite oder auf dem ersten Bildschirm von anzeigen eine Anzeige zusammen mit dem vollständigen Zitat. Urheberrechte für Komponenten dieser Arbeit, die anderen als ACM gehören, müssen anerkannt werden. Das Abstrahieren mit Kredit ist erlaubt. Um etwas anderes zu kopieren, erneut zu veröffentlichen, auf Servern zu veröffentlichen, auf Listen weiterzugeben oder eine Komponente dieses Werks in anderen Werken zu verwenden, ist eine vorherige Genehmigung und / oder eine Gebühr erforderlich. Genehmigungen können bei Publications Dept., ACM, Inc., 2 Penn Plaza, Suite 701, New York, NY 10121-0701 USA, Fax +1 (212) 869-0481 oder permissions@acm.org angefordert werden .

© 2013 ACM 1544-3558 / 2013/05-ART11 \$ 15.00 DOI:
<http://dx.doi.org/10.1145/2465780.2465785>

wurde vorgeschlagen (z. B. Gehen, Fliegen, Szene in der Hand und Augapfel in der Hand [Bowman et al. 2004; Chen et al. 1988]), aber der größte Teil der Forschung zu diesen Metaphern hat ihre Wirkung auf die kognitive Aspekte der Navigation (z. B. Entfernungen beurteilen, sich an eine Route erinnern, eine kognitive Karte entwickeln oder ein verbessertes Präsenzgefühl haben) und nicht ihre Auswirkungen auf die Reise- und Manövrierfähigkeit der Benutzer.

Die Fähigkeit zu reisen, während nur minimale Aufmerksamkeitsressourcen verbraucht werden, zeigt an, dass ein Benutzer eine bestimmte Benutzeroberfläche gut nutzen kann, und liegt im Zentrum der individuellen und geschlechtsspezifischen Unterschiede beim Erwerb räumlichen Wissens, über die in Studien zur VR-Navigation berichtet wurde [Waller 2000]. In Studien, in denen Teilnehmer, die regelmäßig FPS-Computerspiele (First Person Shooter) spielen, mit solchen verglichen werden, bei denen dies nicht der Fall ist, wird die Reiseeffizienz implizit als Faktor in das Studiendesign einbezogen [Smith und Du'Mont 2009], aber es gibt einen bemerkenswerten Mangel an Forschung in die Zeit, die Benutzer benötigen, um sich in VR-Welten zurechtzufinden.

Die vorliegende Studie zielt darauf ab zu bestimmen: (1) wie sich die Reisefreundlichkeit der Benutzer im Laufe der Zeit ändert, (2) wie sich die Reisefreundlichkeit zwischen den Schnittstellen unterscheidet und (3) wie die Reisefähigkeit bewertet werden sollte. Die Beiträge der Forschung identifizieren grundlegende Unterschiede zwischen Schnittstellen für die Effizienz, mit der Benutzer reisen, identifizieren Metriken, die diese Unterschiede charakterisieren und zur Messung des Benutzerfortschritts während des Trainings verwendet werden können, schlagen Trainingsprogramme vor, die diese Unterschiede beheben können, und heben sie hervor die Auswirkung dieser Unterschiede auf die Ergebnisse zuvor gemeldeter Studien.

Der Umfang der vorliegenden Forschung beschränkt sich auf Reisen, bei denen eine Metapher für das Gehen verwendet wird, da diese in der Navigationsforschung am häufigsten verwendet wird. In den folgenden Abschnitten werden frühere Untersuchungen zu Metriken zur Bewertung der Reiseeffizienz und der Auswirkung verschiedener Schnittstellen auf diese Effizienz zusammengefasst. Anschließend werden Daten aus zwei Studien berichtet, in denen die Teilnehmer strukturiert geschult wurden, um das Reisen durch VR-Welten zu lernen, bevor sie aufgefordert wurden, höhere Leistungen zu erbringen (Routen- und Vermessungswissen) Navigationsaufgaben. Die Ergebnisse dieser Aufgaben wurden bereits veröffentlicht. Ruddle et al. [2011a, 2011b], aber die Trainingsdaten sind neu. Die in den Studien verwendeten Schnittstellen reichten von Joysticks über echtes Gehen bis hin zu linearen und omnidirektionalen Laufbändern.

2. TERMINOLOGIE

In der gesamten VR-Literatur werden manchmal unterschiedliche Begriffe für dieselben Schnittstellentypen verwendet. Dieser Artikel verwendet die folgende Terminologie für VR-Schnittstellen.

- - *Desktop*. Ein Benutzer betrachtet eine VR-Welt auf einem Computermonitor.
- - *Immersiv*. Ein Benutzer betrachtet eine VR-Welt mithilfe eines Displays, das visuelle Hinweise aus der realen Welt weitgehend ausschließt und (zumindest teilweise) auf die physischen Bewegungen des Benutzers reagiert, z. B. ein am Kopf montiertes Display (HMD) oder CAVE.
- - *Reise*. Bewegung durch eine VR-Welt mit jeder Schnittstelle.
- - *Blickrichtung*. Ein Benutzer kann nur in die Richtung reisen, in die er schaut (manchmal auch als blickgesteuertes Reisen bezeichnet).
- - *Entkoppelte Reise*. Ein Benutzer kann sich in eine Richtung bewegen, die sich von der Richtung unterscheidet, in die er schaut (z. B. mit einem Joystick straffen oder in der die Fahrtrichtung durch die Ausrichtung des Oberkörpers des Benutzers definiert wird).
- - *Joystick Reisen*. Ein Benutzer bewegt sich, indem er einen Joystick vorwärts, rückwärts und seitwärts bewegt.
- - *Tatsächliches Gehen in VR*. Ein Benutzer geht durch einen leeren physischen Raum, der die VR-Welt „enthält“, sodass eine 1: 1-Entsprechung zwischen den Bewegungen des Benutzers in der realen Welt und der VR besteht.
- - *Walking-in-Place*. Ein Benutzer macht eine Schrittbewegung, um durch eine VR-Welt zu reisen, während er in der realen Welt an einer Position bleibt.
- - *Lineares Laufband*. Ein herkömmliches Laufband.

- - *Omnidirektion Laufband*. Ein Laufband, auf dem ein Benutzer in jede Richtung gehen kann, sodass er sich sowohl physisch dreht als auch übersetzt.

3. VERWANDTE ARBEIT

Metriken zur Beurteilung der Reiseeffizienz stammen aus drei großen Bereichen: VR selbst, Biomechanik und Mensch-Computer-Interaktion. In VR wurde eine Reihe standardisierter Reiseaufgabentests vorgeschlagen, deren Metriken auf Zeit und Genauigkeit basieren [Bowman und Johnson 2001; Lampton et al. 1994]. Typischerweise wird die Zeit für die Fahrt zwischen zwei definierten Punkten oder entlang eines definierten Pfades gemessen. In einigen Forschungsarbeiten war das Reisen mit einer ausgefeilteren Oberfläche schneller (eine, die die Fahr- und Blickrichtungen entkoppelte, anstatt nur das Reisen in Blickrichtung zuzulassen) [Bowman und Hodges 1997], in anderen Forschungen war das Gegenteil der Fall [Bowman und Johnson 2001]. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Teilnehmer der letzteren Studie nicht ausreichend geschult wurden, was explizit in den Ergebnissen einer räumlichen Suchstudie gezeigt wird, in der Teilnehmer, die vorwärts reisen könnten,

Nur wenige Studien haben eine Längsschnittuntersuchung verschiedener Reisearten durchgeführt. Eine bemerkenswerte Ausnahme [Feasel et al. 2008], in dem das Gehen in der realen Welt mit dem tatsächlichen Gehen in VR, dem Gehen an Ort und Stelle und dem Joystick verglichen wurde, wurden Unterschiede in der Menge an Training hervorgehoben, die für verschiedene Schnittstellen erforderlich ist (am wenigsten für das tatsächliche Gehen), und die Tatsache, dass im Übermaß für das Gehen vor Ort und das Fahren mit dem Joystick waren 15 Minuten Training erforderlich. Von den 44 Studien, die in zwei Überprüfungen der VR-Navigation enthalten waren und aktives Reisen im Gegensatz zum passiven Transport beinhalteten, gaben 30% den Teilnehmern vor Beginn der Studie selbst keine Übung zum Reisen durch VR-Welten [Ruddle 2011; Ruddle and Lessels 2006]. Dies dürfte die Varianz der Daten dieser Studien erhöht haben. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit verringert, dass statistisch signifikante Unterschiede gemeldet werden, und / oder die Ergebnisse werden zugunsten natürlicher / einfacherer Schnittstellen verzerrt. Tatsächlich stellt eine Studie fest, dass Teilnehmer, die tatsächlich gingen, „am wenigsten Zeit brauchten, um sich mit der Reisetchnik vertraut zu machen“, und unterstützt dies mit Kommentaren der Teilnehmer (z. B. „Ich habe mich nie an die Navigation gewöhnt!“ Für Joystick-Reisen) [Zanbaka et al. 2005].

Bei Verwendung als VR-Reisemetrik wurde die Genauigkeit normalerweise gemessen, indem gezählt wurde, wie oft ein Benutzer mit der Welt (z. B. einer Wand) oder Objekten darin kollidiert. Diese Daten können entweder positiv oder negativ mit der Zeit korreliert sein, da Kollisionen einen Benutzer verlangsamen können [Lampton et al. 1994], oder der Benutzer kann absichtlich schnell reisen und akzeptieren, dass Kollisionen auftreten (ein Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit). Letzteres ist wahrscheinlicher, wenn ein VR-System keine Kollisionsstrafe verhängt, im Gegensatz zur realen Welt, in der die Vermeidung von Hindernissen eine Voraussetzung für das Überleben der Menschen ist [Pelah und Koenderink 2007].

Einige Studien haben gezeigt, dass weniger Kollisionen mit tatsächlichen Laufflächen auftreten als mit einem Desktop-Joystick oder einer immersiven Blickrichtung mit einem am Kopf montierten Display (HMD) [Ruddle and Lessels 2009; Zanbaka et al. 2005]. Andere Untersuchungen, bei denen ausschließlich ein HMD verwendet wurde, zeigten jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen dem tatsächlichen Gehen und dem Reisen in Blickrichtung, sondern es traten mehr Kollisionen mit Teilnehmern auf, die dorthin reisten, wo sie mit der Hand zeigten [Suma et al. 2010], was darauf hinweist, dass es möglicherweise angemessener ist, die Ansicht und die Fahrtrichtung der Benutzer zu entkoppeln, indem der Torso anstelle der Handrichtung verwendet wird, um die Fahrt zu diktieren (siehe z. B. Ruddle und Jones [2001]).

Die Biomechanik bietet eine Vielzahl von Metriken, die auf Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung basieren und sich entweder darauf beziehen, wie sich ein Benutzer bewegt (Bewegungsdynamik) oder wohin (Pfad) [Winter 1990]. Zu den Metriken, die auf VR-Fahrten angewendet wurden, gehören Schrittlänge, Geschwindigkeit und Spitzenverzögerung („wie“) sowie Entfernung von einem Punkt oder Hindernisabstand („wo“) [Feasel et al. 2008; Fink et al. 2007; Whitton et al. 2005]. Diese Metriken wurden hauptsächlich verwendet, um zu analysieren, inwieweit VR-Schnittstellen, bei denen der Benutzer eine physische Gehbewegung ausführen muss, mit dem realen Gehen identisch sind. Nur

Tabelle I. In den beiden Studien verwendete Reiseschnittstellen

Schnittstelle	Studie 1	Studie 2
Joystick fahren	Desktop-Display und Gamepad-Joysticks zum Drehen (Überschrift und Tonhöhe) und Übersetzen (vorwärts, rückwärts und seitwärts)	
HMD-Blickrichtung Reise	Drehen Sie sich physisch mit einem HMD, aber verwenden Sie zum Übersetzen einen Gamepad-Joystick (vorwärts, rückwärts und seitwärts).	
Walking-basiert	Tatsächliches Gehen, Tragen ein HMD	Gehen Sie auf einem linearen Laufband, tragen Sie ein HMD, aber Verwenden Sie zum Drehen einen Gamepad-Joystick (Überschrift und Tonhöhe).
		Gehen Sie auf einem Laufband in alle Richtungen und tragen Sie ein HMD

Es werden kleine Unterschiede zwischen dem tatsächlichen Gehen in VR und dem Gehen in einer realen Version der Umgebung berichtet [Fink et al. 2007; Whitton et al. 2005]. Zumindest im Prinzip könnten ein lineares Laufband oder Laufflächen an Ort und Stelle so abgestimmt werden, dass die Erfahrung der Benutzer mit VR-Reisen dem Gehen in der realen Welt sehr ähnlich ist [Feasel et al. 2008; Hollerbach 2002; Souman et al. 2010; Whitton et al. 2005], aber Reisen mit abstrakten Geräten (z. B. einem Joystick, einer Maus oder einer Tastatur) ist von Natur aus deutlich anders [Fink et al. 2007].

Andere Metriken erfassen subjektive Aspekte des Reisens. Zum Beispiel haben VR-Studien die Teilnehmer gebeten, die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit einer Schnittstelle, die Natürlichkeit der Bewegung und die Präsenz selbst zu melden [Bowman et al. 1997; Slater et al. 1995] und im Mainstream sind Mensch-Computer-Interaktionskonzepte wie „Flow“ in einigen Usability-Fragebögen enthalten (z. B. „Ich fühlte mich im Einklang mit der Umwelt“ [van Schaik und Ling 2005]). Diese Metriken erfassen Aspekte der Schnittstelle Verwendung, die sich nur schwer objektiv ausdrücken lässt und verwendet wurde, um signifikante Unterschiede zwischen Umleitungsmethoden für das Gehen an Ort und Stelle zu identifizieren [Peck et al. 2009], und dass das Präsenzgefühl der Teilnehmer beim tatsächlichen Gehen signifikant größer ist in VR als Walk-in-Place oder Fly [Usoh et al. 1999].

Zusammenfassend sollten zwei Hauptpunkte wiederholt werden. Erstens, obwohl Zeit und Genauigkeit häufig als Metriken für Reisen verwendet werden, bedeuten potenzielle Verwechslungen (z. B. ob diese Metriken negativ oder positiv korreliert sind), dass zusätzliche Metriken ebenfalls erforderlich sind. Zweitens haben die meisten früheren Untersuchungen nur Momentaufnahmen von VR-Reisen gemeldet (z. B. die durchschnittliche Leistung der Teilnehmer über eine Reihe von Versuchen), sodass nur wenig über Längsschnittänderungen dieser Leistung bekannt ist. Der Rest dieses Artikels analysiert zuvor nicht gemeldete Trainingsdaten aus zwei Studien. Im ersten Schritt machte jeder Teilnehmer 10 Durchquerungen einer 24-Meter-Route, um das Reisen zu lernen [Ruddle et al. 2011b], und im zweiten machte jeder Teilnehmer zwei Durchquerungen einer 270-Meter-Route, um das Reisen zu lernen [Ruddle et al. 2011a]. Tabelle I fasst die Schnittstellen zusammen, die in jeder Studie verwendet wurden. Diese wurden hauptsächlich entwickelt, um die Auswirkung der translatorischen und rotatorischen Komponenten körperbasierter Informationen auf das Routen- und Vermessungswissen der Teilnehmer zu untersuchen. Der Joystick-Weg liefert keine körperbasierten Informationen, der HMD-Blick in Blickrichtung liefert die Rotationskomponente, ein lineares Laufband liefert die Translationskomponente und das tatsächliche Gehen und ein omnidirektionales Laufband liefern beide Komponenten. Daraus folgt, dass die Schnittstellen zwischen HMD-Blickrichtung und linearem Laufband aufgrund der Komponenten der physischen Körperbewegung, die einbezogen wurden, weniger immersiv waren als die omnidirektionale Laufbandschnittstelle. Obwohl beide Studien den gleichen allgemeinen Stil der VR-Welt (orthogonale virtuelle Marktplätze) verwendeten, war der erste kompakter, sodass die Korridore, auf denen die Teilnehmer reisten, wesentlich enger waren (0,75 m vs.

4. STUDIE 1: KOMPAKTE WELT

Diese Studie umfasste zwei Experimente, in denen die Auswirkungen von Orientierungspunkten (Experiment 1) und körperbasierten sensorischen Informationen (Experiment 2) auf die Fähigkeit der Teilnehmer, Routen zu lernen, untersucht wurden. Die Routenlernenden wurden bereits veröffentlicht [Ruddle et al. 2011b], aber die Schnittstellentrainingsdaten

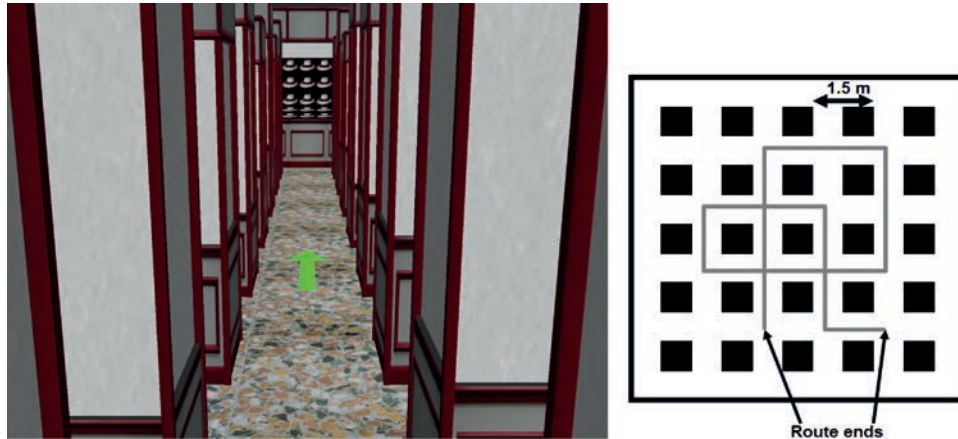


Abb. 1. Innenansicht (links) und Draufsicht (rechts) der in Studie 1 verwendeten 24-m-Route. Die Teilnehmer folgten dem Pfeil entlang der Route, die sich mehrmals kreuzte.

hier berichtet sind neu. Experiment 1 hatte vier wegweisende Bedingungen, aber alle Teilnehmer verwendeten dieselbe Joystick-Reiseschnittstelle und absolvierten ein identisches Training, um das Gehen mit dieser Schnittstelle zu lernen. Daher werden in diesem Artikel alle Teilnehmer als zu demselben gehörend bezeichnet *Nur Joystick* Gruppe. In Experiment 2 wurde das Routenlernen unter zwei Bedingungen untersucht, bei denen beide ein HMD verwendeten: Blickrichtung (*HMD-Turn*) und tatsächliches Gehen (*HMD-Spaziergang*).

4.1 Methode

4.1.1 *Teilnehmer*. Insgesamt 107 Personen (50 Männer; 57 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 25,7 Jahren ($SD = 5.7$) nahmen an der Studie teil, 12 Teilnehmer zogen sich jedoch wegen Reisekrankheit aus der Studie zurück. Die in diesem Artikel angegebenen Daten beziehen sich auf die anderen 95 Teilnehmer. Insgesamt 57 Teilnehmer waren in der Nur-Joystick-Gruppe, 20 in der HMD-Turn-Gruppe und 18 in der HMD-Walk-Gruppe. Die Daten für die Routenüberquerungen 9 und 10 eines Nur-Joystick-Teilnehmers gingen aufgrund eines Aufzeichnungsfehlers verloren. Die Teilnehmer erhielten für ihre Teilnahme ein Honorar. Die Studie wurde von der örtlichen Ethikkommission genehmigt.

4.1.2 *Materialien*. Innen- und Draufsichten auf die Route, auf der die Teilnehmer das Laufen lernten, sind in Abbildung 1 dargestellt. Die VR-Software wurde mit C++ geschrieben, auf einem Dell Inspiron M1710-Laptop ausgeführt und die Szene mit 60 Bildern / Sekunde gerendert. Die Position und Orientierung der Teilnehmer in den VR-Welten wurde mit der gleichen Geschwindigkeit in einer Protokolldatei für die nachfolgende Analyse aufgezeichnet.

Die Nur-Joystick-Gruppe verwendete die daumengesteuerten Joysticks auf einem Logitech Rumblepad, um ihre Bewegung zu steuern. Durch Manipulieren des linken Joysticks konnten die Teilnehmer mit einer Geschwindigkeit von bis zu 0,9 m / s (langsames Gehen) in jede Richtung fahren, und mit dem rechten Joystick konnten die Teilnehmer den Blickwinkel und die Tonhöhe variieren. Der Kurs und die Tonhöhe können mit bis zu 120 bzw. 25 Grad / Sekunde geändert werden. Die Kursänderungen verliefen nahtlos, die Tonhöhe war jedoch so eingeschränkt, dass die Teilnehmer nur vertikal nach oben und unten schauen konnten. Es wurde ein 20-Zoll-Dell-Flachbildschirm-Display ohne Stereo (1600 × 1200 Pixel). Das grafische Sichtfeld (FOV; $48^\circ \times 38^\circ$) war ähnlich dem Winkel, den der Monitor aus einem normalen Betrachtungsabstand (600 mm) einlegte.

Die HMD-Turn-Gruppe stand an einem Ort, betrachtete die VR-Welt in Stereo auf einem HMD und bewegte sich durch physisches Drehen (verfolgt von einem Vicon MX13-Bewegungserfassungssystem) und Verwenden eines Joysticks

das Rumblepad zu übersetzen. Das HMD war ein nVisor SX (47° × 38° FOV; 100% binokulare Überlappung; 1280 × 1024 Pixel in jedem Auge).

Die HMD-Walk-Gruppe ging physisch um eine große Verfolgungshalle (siehe <http://www.cyberneum.org>) herum, während sie die VR-Welt im HMD betrachtete. Die Position und Ausrichtung des Kopfes eines Teilnehmers wurde mit dem Vicon-System in sechs Freiheitsgraden verfolgt. Für jede Gruppe wurde ein Algorithmus zur Reaktion auf Schlupfkollisionen implementiert [Jacobson und Lewis 1997], sodass die Teilnehmer an Objekten entlanggleiten konnten, wenn eine Kollision stattfand, anstatt sofort anzuhalten.

4.1.3 Verfahren. Zunächst demonstrierte der Experimentator, wie die Übungsroute der Benutzeroberfläche mithilfe des Desktop-Displays und der Gamepad-Oberfläche durchlaufen werden kann. Dann überquerten die Teilnehmer diese Route zehnmal, zuerst von A nach B, dann zurück nach A, dann zurück nach B und so weiter. Die Nur-Joystick-Gruppe verwendete immer dieses Gerät und eine Desktop-Anzeige. Die Gruppen HMD-Turn und HMD-Walk führten die ersten beiden Durchgänge mit dem Gamepad und dem Desktop-Display und die anderen acht Durchgänge mit einem HMD und der Schnittstelle durch, die sie anschließend im Hauptexperiment verwendeten.

4.2 Ergebnisse

Drei Aspekte der Reise der Teilnehmer wurden analysiert: Zeit, Genauigkeit und Geschwindigkeit. Um zu verhindern, dass eine Pause zu Beginn eines Versuchs die Ergebnisse beeinflusst, wurde die Zeit vom Erreichen der ersten Kreuzung (1,5 m vom Startpunkt) bis zum Ende der Route gemessen. Die Genauigkeit wurde gemessen, indem die Route in Blöcke unterteilt wurde (jeder Block befand sich von der Mitte einer Kreuzung zur Mitte der nächsten) und der Prozentsatz der Blöcke berechnet wurde, in denen ein Teilnehmer mit den Wänden kollidierte. Dies maß die Menge der Route, auf der die Teilnehmer Schwierigkeiten hatten, entlang zu fahren, während das einfache Zählen der Anzahl der Kollisionen nicht zwischen einem Teilnehmer, der viele Kollisionen in einem lokalisierten Teil der Route ausführt, und einem anderen Teilnehmer, der gelegentlich Kollisionen auf der gesamten Route ausführt, unterschieden hätte. Die Geschwindigkeit wurde hinsichtlich ihres Profils und des Prozentsatzes der Zeit analysiert, für die die Teilnehmer „stationär“ waren (Fahren mit 0,25 m / s oder langsamer; Rauschen des Tracking-Systems bedeutet, dass die Teilnehmer selten absolut stationär gewesen wären). Die prozentualen Kollisions- und stationären Daten wurden unter Verwendung einer Arcsin-Transformation normalisiert, bevor Varianzanalysen (ANOVAs) durchgeführt wurden. In den folgenden Analysen werden nur signifikante Wechselwirkungen angegeben, die Quadratsumme vom Typ III wurde aufgrund der ungleichen Gruppengrößen verwendet und a Die prozentualen Kollisions- und stationären Daten wurden unter Verwendung einer Arcsin-Transformation normalisiert, bevor Varianzanalysen (ANOVAs) durchgeführt wurden. In den folgenden Analysen werden nur signifikante Wechselwirkungen angegeben, die Quadratsumme vom Typ III wurde aufgrund der ungleichen Gruppengrößen verwendet und a Die prozentualen Kollisions- und stationären Daten wurden unter Verwendung einer Arcsin-Transformation normalisiert, bevor Varianzanalysen (ANOVAs) durchgeführt wurden. In den folgenden Analysen werden nur signifikante Wechselwirkungen angegeben, die Quadratsumme vom Typ III wurde aufgrund der ungleichen Gruppengrößen verwendet und a nach einer p Der Wert zeigt an, dass die Greenhouse-Geisser-Korrektur angewendet wurde, da der Mauchly-Sphärizitätstest signifikant war. Games-Howell-Post-hocs wurden aufgrund der ungleichen Größe und Varianz der Gruppen ausgewählt.

Die longitudinale Variation der mittleren Zeiten der Gruppen ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Daten für die letzten acht Durchquerungen der Route wurden unter Verwendung einer (ANOVA) analysiert, die die Durchquerung als Faktor innerhalb der Teilnehmer und die Gruppe als Faktor zwischen den Teilnehmern behandelte. Es gab signifikante Unterschiede für die Gruppe,

$F(2, 91) = 5,87, p < .01$, Durchquerung, $F(3, 307) = 19,61, p < .01$, und eine Gruppe × Traversal Interaktion,

$F(7, 307) = 2,26, p < .05$. Games-Howell-Post-hocs zeigten, dass die HMD-Walk-Gruppe deutlich weniger Zeit in Anspruch nahm als die HMD-Runde ($p < .05$) und Nur-Joystick-Gruppen ($p < .01$).

Die Kollisionsdaten (siehe Abbildung 3) wurden zeitgleich analysiert. Es gab einen signifikanten Unterschied für die Gruppe, $F(2, 91) = 8,58, p < .01$, aber nicht zum Durchqueren, $F(6, 12) = 1,56, p > .05$. Games-Howell-Post-hocs zeigten, dass die HMD-Walk-Gruppe in deutlich weniger Blöcken auf der Route mit den Wänden kollidierte als die HMD-Turn- und Joystick-only-Gruppen ($p < .01$, in beiden Fällen). In früheren Studien wurden Reisezeit und Genauigkeit manchmal positiv und manchmal negativ korreliert (siehe oben). In der vorliegenden Studie ergab eine Analyse der Traversal 10-Daten für Teilnehmer nur mit Joystick und HMD-Turn (die HMD-Walk-Gruppe wurde ausgeschlossen, da nur ein Teilnehmer dieser Gruppe Kollisionen machte), dass die Reisezeit negativ mit dem Prozentsatz korrelierte der Route, mit der die Teilnehmer kollidierten, $r(75) = -.020, p < .05$. Mit anderen Worten, es gab einen Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit.

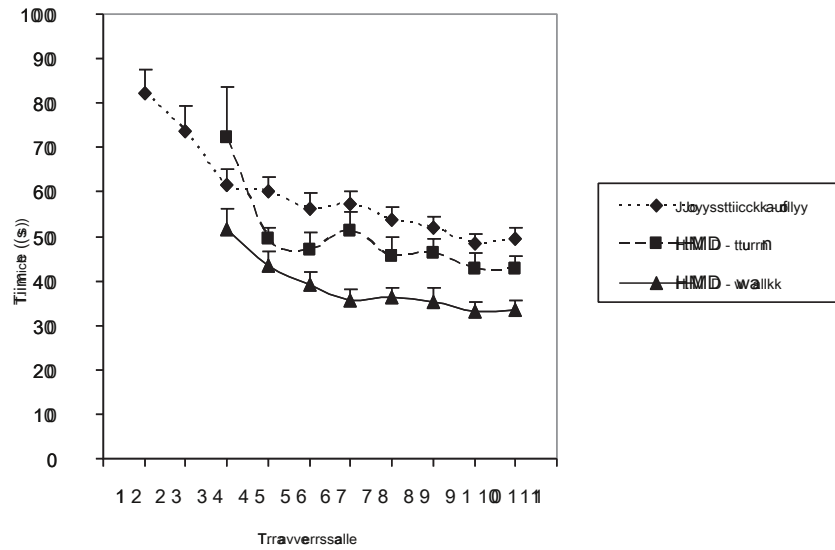


Abb. 2. Fahrzeit für die Durchquerungen von Studie 1. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts.

Hinweis: Die Gruppen HMD-Turn und HMD-Walk führten zwei Durchquerungen mit der Nur-Joystick-Schnittstelle durch, bevor acht Durchquerungen mit ihrer HMD-Schnittstelle durchgeführt wurden.

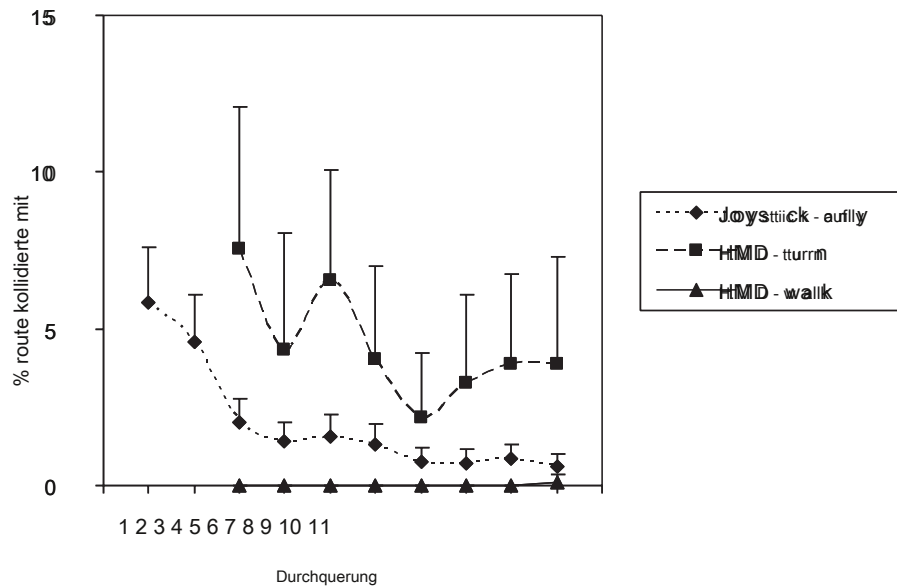


Abb. 3. Mittlerer Prozentsatz der Route, mit der die Teilnehmer in Studie 1 kollidierten, berechnet aus den normalisierten Daten und dann nicht transformiert. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts.

Hinweis: Die Gruppen HMD-Turn und HMD-Walk führten zwei Durchquerungen mit der Nur-Joystick-Schnittstelle durch, bevor acht Durchquerungen mit ihrer HMD-Schnittstelle durchgeführt wurden.

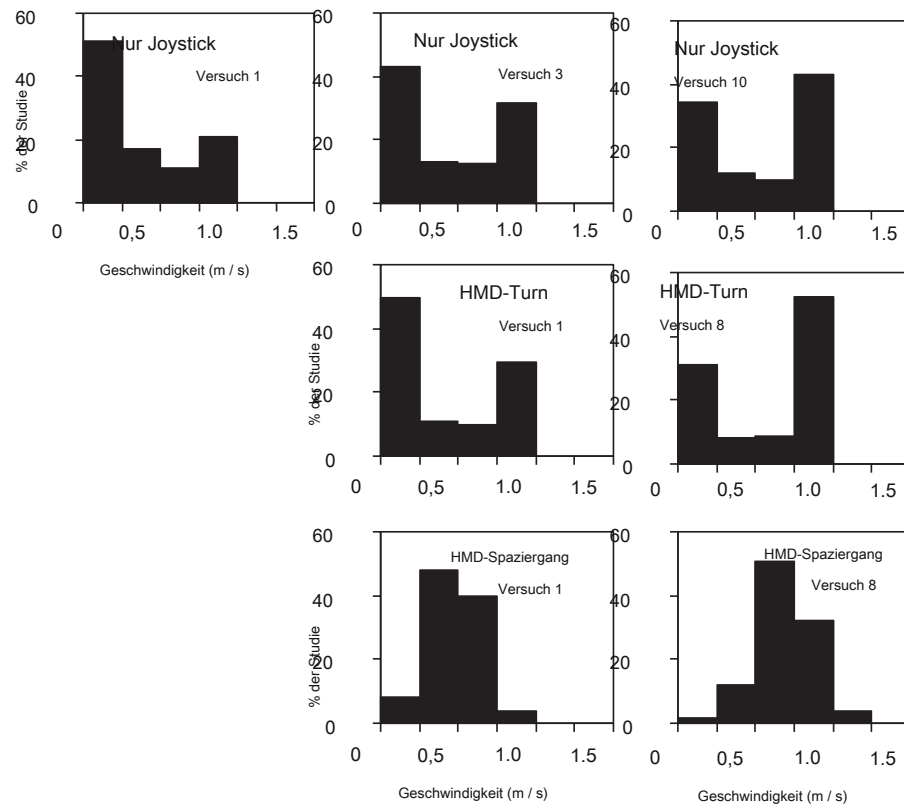


Abb. 4. Geschwindigkeitsprofil für jede Schnittstellengruppe in Studie 1.

Hinweis: Die Gruppen HMD-Turn und HMD-Walk führten zwei Versuche mit der Nur-Joystick-Schnittstelle durch, bevor acht Versuche mit ihrer HMD-Schnittstelle durchgeführt wurden.

Um zu analysieren, wie sich die Geschwindigkeit der Teilnehmer veränderte, wurde der Prozentsatz der Zeit für jede Überquerung berechnet, die die Teilnehmer in 0,25 m / s „Geschwindigkeitsbehältern“ verbracht haben (siehe Abbildung 4). Dies unterstreicht einen grundlegenden Unterschied zwischen der HMD-Walk-Gruppe und den anderen Gruppen. Die HMD-Walk-Gruppe verbrachte nur einen kleinen Prozentsatz der stationären Zeit, selbst bei der ersten Überquerung und bei der letzten Überquerung mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,7 m / s. Im Gegensatz dazu verbrachten die anderen Gruppen fast die Hälfte der ersten stationären Durchquerung, und selbst bei der letzten Durchquerung verbrachten sie 31% (HMD-Turn) und 35% (nur Joystick) der stationären Zeit. Die Analyse der Änderungen in der Ansichtsüberschrift der Teilnehmer ergab, dass sich die Nur-Joystick-Gruppe in 43% der Zeit, in der sie während der ersten Durchquerung stationär war, nicht drehte und sich bei der letzten Durchquerung auf 25% reduzierte. Äquivalente Prozentsätze für die HMD-Drehung betrugen 44% und 26%, obwohl zu beachten ist, dass dies auch die Zeit einschließt, in der sich die Teilnehmer langsam drehten (<15 Grad / Sekunde), da Sensorrauschen bedeutet, dass sie niemals vollständig still sind. Wenn sie nicht stationär waren, bewegten sich die Gruppen HMD-Turn und Joystick nur mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit (0,9 m / s; langsamer Gang).

Der Prozentsatz der Zeit, in der die Teilnehmer stationär waren (dh Geschwindigkeit $\leq 0,25$ m / s) wurde in analysiert genauso wie die Zeit- und Kollisionsdaten. Es gab signifikante Unterschiede für die Gruppe, $F(2, 91) = 71,12$, $p < .01$ und Durchquerung, $F(5, 435) = 17,82$, $p < .01$. Games-Howell-Post-hocs zeigten, dass die HMD-Walk-Gruppe für einen signifikant geringeren Prozentsatz der Zeit stationär war als die HMD-Turn- und Joystick-only-Gruppen ($p < .01$, in beiden Fällen).

Tabelle II. Durchlaufzeit, % stationäre Zeit und % kollidierte Route für Teilnehmer der Nur-Joystick- und HMD-Turn-Gruppen, die häufig (mindestens einmal pro Woche) Computerspiele spielten, vs.

Spielen	Häufig					
	Durchlaufzeit		% Zeit stationär		% Kollisionen	
	Initiale	Die letzten vier	Initiale	Die letzten vier	Initiale	Die letzten vier
Häufig	42 s	36 s	35%	29%	3%	2%
Nicht häufig	66 s	51 s	45%	36%	8%	5%

Initiale zeigt Mittelwerte für die ersten 6 (nur Joystick) oder 4 (HMD-Drehung) Durchquerungen. Für beide Gruppen

Die letzten vier zeigt Mittelwerte für die letzten 4 Durchquerungen.

In einem Fragebogen gaben 11 der Teilnehmer an, dass sie häufig (mindestens einmal pro Woche) Computerspiele spielten, und sechs davon waren in der Nur-Joystick-Gruppe und vier in der HMD-Turn-Gruppe. Der Leistungsunterschied dieser Teilnehmer gegenüber den anderen (Nicht-Spielern) in diesen Gruppen verringerte sich im Verlauf des Trainings (siehe Tabelle II). Es fällt auf, dass selbst Teilnehmer, die Spiele spielten, selbst in den letzten vier Durchquerungen häufig eine erhebliche Minderheit der Zeit stationär verbrachten.

4.3 Diskussion

Bei allen drei Metriken gab es ein ähnliches Ergebnismuster. Die HMD-Walk-Gruppe reiste schneller und machte weniger Kollisionen als die anderen Gruppen, deren Leistung einander gleichwertig war. Die Geschwindigkeitsdaten zeigten, dass eine Hauptursache für den Zeitunterschied darin bestand, dass sich die HMD-Walk-Gruppe reibungslos entlang der Route bewegte, während sich die anderen Gruppen Start-Stopp-Bewegung bewegten und eine beträchtliche Menge stationärer Zeit verbrachten.

Nach vier Durchquerungen (3 Minuten kumulierte Reisezeit) erreichte die HMD-Walk-Gruppe eine nahezu asymptotische Leistung, verbrachte fortan vernachlässigbare Zeit im Stillstand und kollidierte mit einer Ausnahme nie mehr mit der Umgebung. Diese Daten stützen anekdotische Beweise dafür, dass die Teilnehmer auch ohne vorherige Erfahrung mit Computerspielen sofort zum eigentlichen Gehen für VR-Reisen übergehen.

Die Nur-Joystick- und HMD-Turn-Gruppen hatten beide Schwierigkeiten, sich auf der Strecke fortzubewegen, und selbst häufige Computerspielspieler verbrachten ein Drittel der Zeit stationär. Am Ende des Trainings (7 Minuten kumulierte Reisezeit) zeigen die Zeit- und Kollisionsdaten, dass die Teilnehmer eine Leistungsasymptote erreicht hatten, die der HMD-Walk-Gruppe unterlegen war. Es könnte sein, dass dieser asymptote Unterschied einen grundlegenden Unterschied zwischen der Art und Weise widerspiegelt, wie Teilnehmer mit diesen Schnittstellen reisen. Alternativ könnten die Unterschiede verringert worden sein, wenn ein alternatives Trainingsregime eingeführt wurde, das beispielsweise die Teilnehmer anweist, sich auf Reisen zu bewegen, ohne anzuhalten und sich umzudrehen, und ihnen nur erlaubt, die Trainingsphase zu „bestehen“, wenn sie eine ununterbrochene Überquerung ohne Kollisionen absolvieren.

Schließlich verwendete die Nur-Joystick-Gruppe die monokulare Anzeige auf einem Desktop-Display, während die anderen Gruppen die Stereo-Anzeige in einem HMD verwendeten. Die Leistung der Nur-Joystick-Gruppe im Vergleich zur HMD-Turn-Gruppe legt nahe, dass die monokulare Anzeige kein Nachteil ist, wenn diese Art der Navigation mit Desktop-VR durchgeführt wird.

5. STUDIE 2: GEBÄUDEGRÖSSE WELT

Diese Studie umfasste zwei Experimente, in denen die Auswirkung körperbasierter sensorischer Informationen auf die Fähigkeit der Teilnehmer untersucht wurde, eine kognitive Karte zu entwickeln. Die kognitiven Kartendaten wurden bereits veröffentlicht [Ruddle et al. 2011a], aber die hier gemeldeten Schnittstellentrainingsdaten aus Experiment 2 sind neu (Experiment 1 ist nicht enthalten, da kein Trainingsverfahren mit einer vorgeschriebenen Route verwendet wurde). Es gab vier Teilnehmergruppen, zwei mit denselben Schnittstellen wie der Nur-Joystick und



Abb. 5. Innenansicht (links) und Draufsicht (rechts) der in Studie 2 verwendeten Route. Die Teilnehmer reisten vom Anfang bis zum Ende auf einer 270 m langen Route, die sich mehrmals kreuzte.

Die oben beschriebenen HMD-Turn-Gruppen und Gruppen, die ein lineares Laufband (HMD-linear) und ein omnidirektionales Laufband (HMD-omni; siehe Tabelle I) verwendeten.

5.1 Methode

5.1.1 Teilnehmer. Vierundvierzig Personen (21 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 26 Jahren ($SD = 5.1$) teilgenommen. Vier Teilnehmer zogen sich jedoch wegen Reisekrankheit zurück. Die in diesem Artikel angegebenen Daten beziehen sich auf die anderen 40 Teilnehmer (10 in jeder Gruppe). Die Teilnehmer erhielten für ihre Teilnahme ein Honorar. Die Studie wurde von der örtlichen Ethikkommission genehmigt.

5.1.2 Materialien. Innen- und Draufsichten der Route, auf der die Teilnehmer das Reisen übten, sind in Abbildung 5 dargestellt. In der Studie wurde dieselbe VR-Software wie in Studie 1 verwendet. Für jede Gruppe wurde ein Algorithmus zur Reaktion auf Schlupfkollisionen implementiert [Jacobson und Lewis 1997], sodass die Teilnehmer rutschten entlang von Objekten, wenn eine Kollision stattgefunden hat, anstatt sofort anzuhalten.

Die Schnittstellen der Nur-Joystick- und HMD-Turn-Gruppen waren identisch mit der in Studie 1 verwendeten, mit der Ausnahme, dass die Höchstgeschwindigkeit 1,34 m / s betrug (schneller als in Studie 1), was der Höchstgeschwindigkeit ähnlich war der Laufbänder. Die HMD-linearen Teilnehmer gingen auf einem 6 m langen linearen Laufband (siehe Abbildung 6 (a)), das sich mit der Geschwindigkeit der Teilnehmer bewegte, und um sich umzusehen oder die Teilnehmer zu drehen, verwendeten sie dasselbe Gerät wie die Nur-Joystick-Gruppe. Führungsseile wurden verwendet, um den Teilnehmern zu helfen, in einer geraden Linie entlang des Laufbandes zu laufen. Die HMD-Omni-Gruppe ging auf einer 4 × 4 m omnidirektionales Laufband (siehe Abbildung 6 (b)), das sich mit der Geschwindigkeit der Teilnehmer bewegte, und die Teilnehmer wurden aufgefordert, normal zu gehen. Beide Laufbänder hatten Steueralgorithmen [De Luca et al. 2009; Souman et al. 2010], die die Teilnehmer kontinuierlich in Richtung der Mitte des Laufbandes bewegten, damit sie mit ihrer eigenen Geschwindigkeit laufen konnten.

5.1.3 Verfahren. Alle Teilnehmer begannen das Experiment, indem sie die experimentelle Aufgabe (Suche nach Objekten auf einem virtuellen Marktplatz) mit Joystick-only-Reisen auf einem Desktop-Display übten. Dies ermöglichte es dem Experimentator, die Aufgabe von Angesicht zu Angesicht zu erklären, und dauerte durchschnittlich 11 Minuten.

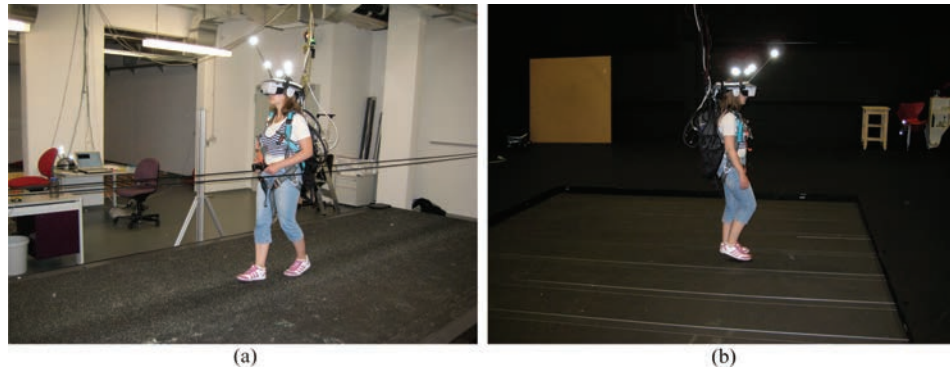


Abb. 6. (a) Das lineare Laufband (HMD-linear) und (b) das omnidirektionale Cyberwalk-Laufband (HMD-omni-Gruppe).

Als nächstes übten die Teilnehmer das Reisen über die Benutzeroberfläche ihrer Gruppe. Zu diesem Zweck ging die HMD-Omni-Gruppe 10 Minuten lang mit normalem Sehvermögen (ohne HMD) auf dem omnidirektionalen Laufband, um sich an die Funktionsweise zu gewöhnen, und durchquerte dann eine definierte 270-m-Route, während sie das HMD trug. Die HMD-lineare Gruppe ging zwei Minuten lang mit normalem Sehvermögen auf dem linearen Laufband, um sich an die Funktionsweise zu gewöhnen (es wurde weniger Zeit benötigt als für das omnidirektionale Laufband, da das Gehen auf einem linearen Laufband fast so einfach ist wie das Verwenden in einem Fitnessstudio) und machte dann zwei Durchquerungen einer definierten 270-m-Route, während er das HMD trug. Die HMD-Turn- und Joystick-only-Gruppen erforderten keine Einweisung in die Praxis (die ersteren mussten sich nur umdrehen, und die letzteren saßen) und daher

5.2 Ergebnisse

Wie in der ersten Studie wurde die Reise der Teilnehmer hinsichtlich Zeit, Genauigkeit und Geschwindigkeit analysiert. Jede Analyse war eine gemischte faktorielle ANOVA, die Traversal als Faktor innerhalb der Teilnehmer und Gruppe als Faktor zwischen Teilnehmern behandelte. Die Datennormalisierung, ANOVAs und Post-hocs wurden auf die gleiche Weise wie in Studie 1 durchgeführt, und nach wie vor werden nur signifikante Wechselwirkungen gemeldet.

Die mittlere Reisezeit für jede Gruppe in jedem Versuch ist in Abbildung 7 dargestellt. Es gab signifikante Unterschiede für die Gruppe. $F(3, 36) = 21,91, p < .001$, Durchquerung, $F(1, 36) = 18,44, p < .001$ und eine Gruppe \times Traversal Interaktion, $F(3, 36) = 5,73, p < .005$. Games-Howell-Post-hocs zeigten, dass die HMD-lineare Gruppe deutlich mehr Zeit in Anspruch nahm als jede andere Gruppe ($p < .005$ in jedem Fall).

Um weiter zu untersuchen, ob Gruppen hinsichtlich der Reisezeit eine asymptotische Leistung erreicht hatten, wurde die Route in zwei Teile mit gleicher Länge und Anzahl von Kurven unterteilt (dazu mussten 10 m in der Mitte der Route in beiden Teilen enthalten sein) und die für die vier Halbstrecken benötigte Zeit (2 Teile) \times 2 Durchquerungen) wurde verglichen (siehe Tabelle III). Dies deutete darauf hin, dass sich die HMD-lineare Gruppe von der ersten bis zur letzten Halbhälfte schrittweise verbesserte, während alle anderen Gruppen vor dem Durchqueren der letzten Halbhälfte eine asymptotische Leistung erreicht hatten.

Die Genauigkeit der Teilnehmer wurde anhand des Prozentsatzes der Blöcke gemessen, in denen ein Teilnehmer mit den Wänden kollidierte. Es gab keine Wirkung der Gruppe, $F(3, 36) = 2,03, p > .05$ oder Durchquerung, $F(1, 36) = 0,01, p > .05$. Im Durchschnitt kollidierten die Teilnehmer in 1% der Blöcke, und 28 Teilnehmer machten überhaupt keine Kollisionen, einschließlich aller 10 Teilnehmer in der HMD-linearen Gruppe. Die HMD-Omni-Gruppe und die Nur-Joystick-Gruppe enthielten acht bzw. sieben Teilnehmer, die keine Kollisionen machten, aber die HMD-Turn-Gruppe enthielt nur drei solcher Teilnehmer.

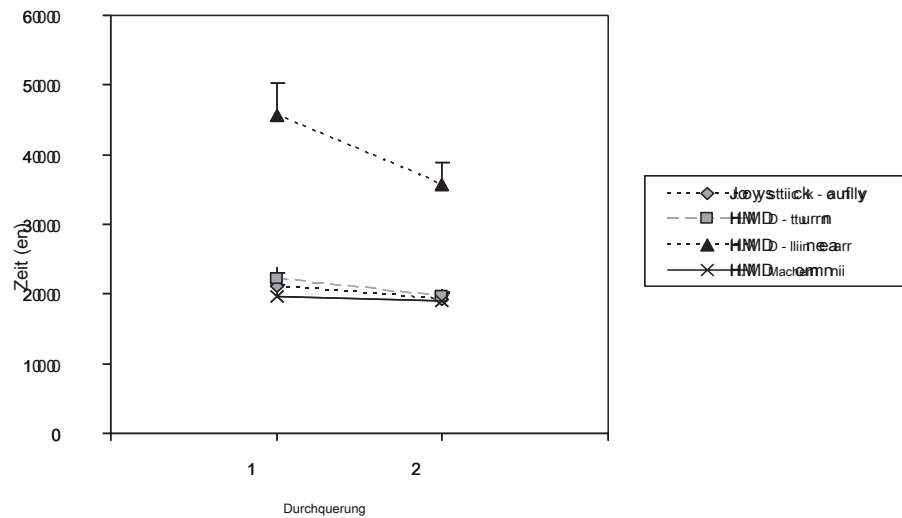


Abb. 7. Laufzeit für die Durchquerungen von Studie 2. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwerts (Hinweis: Für alle außer der HMD-linearen Gruppe war der Standardfehler gering).

Tabelle III. Durchlaufzeit im ersten und zweiten Teil der Route, ausgedrückt als Prozentsatz der Zeit, die für den zweiten Teil während der Durchquerung 2 benötigt wird

Schnittstelle	Durchquerung 1		Durchquerung 2	
	1 st Teil	2 nd Teil	1 st Teil	2 nd Teil
Nur Joystick	117%	102%	101%	100%
HMD-Turn	116%	114%	102%	100%
HMD-linear	147%	120%	108%	100%
HMD-omni	103%	100%	98%	100%

Die Prozentsätze wurden für jeden Teilnehmer separat berechnet und dann für jede Gruppe gemittelt.

Die Analyse der unterschiedlichen Geschwindigkeit der Teilnehmer ergab grundlegende Unterschiede zwischen den Gruppen (siehe Abbildung 8). Die Nur-Joystick- und HMD-Turn-Gruppen fuhren während des größten Teils jeder Überquerung mit der vom Joystick zugelassenen Höchstgeschwindigkeit (1,34 m / s; tägliches Schrittempo). Die HMD-lineare Gruppe bewegte sich langsam, war jedoch selten stationär, und die HMD-Omni-Gruppe zeigte die größte Geschwindigkeitsschwankung. Eine ANOVA zeigte, dass die Teilnehmer stationär waren (dh Geschwindigkeit $\leq 0,25$ m / s) für einen größeren Prozentsatz der Zeit während Traversal 1 als Traversal 2, $F(1, 36) = 5,61$, $p < .05$, aber es gab keine Wirkung der Gruppe, $F(3, 36) = 1,67$, $p > .05$.

5.3 Diskussion

Die Reisezeitdaten zeigen einen starken Kontrast zwischen den Gruppen, wobei die HMD-lineare Gruppe doppelt so lange braucht, um entlang der Route zu fahren wie die anderen Gruppen. Die Ursache war die Unnatürlichkeit der Benutzeroberfläche, die es erforderlich machte, dass sich die Teilnehmer mit einem Joystick drehen, obwohl sie die VR-Welt in einem HMD betrachteten, was möglicherweise dadurch verstärkt wurde, dass die Führungsseile eine leicht elastische Barriere für die seitliche Bewegung darstellten. Rotationsbewegungen des Kopfes eines Teilnehmers hatten keinen Einfluss auf die Ansicht, die im HMD wiedergegeben wurde, aber Translationsbewegungen, weil sie Eingaben in den Laufbandsteuerungsalgorithmus lieferten, der seine Position in der VR-Welt aktualisierte. Obwohl die HMD-lineare Gruppe

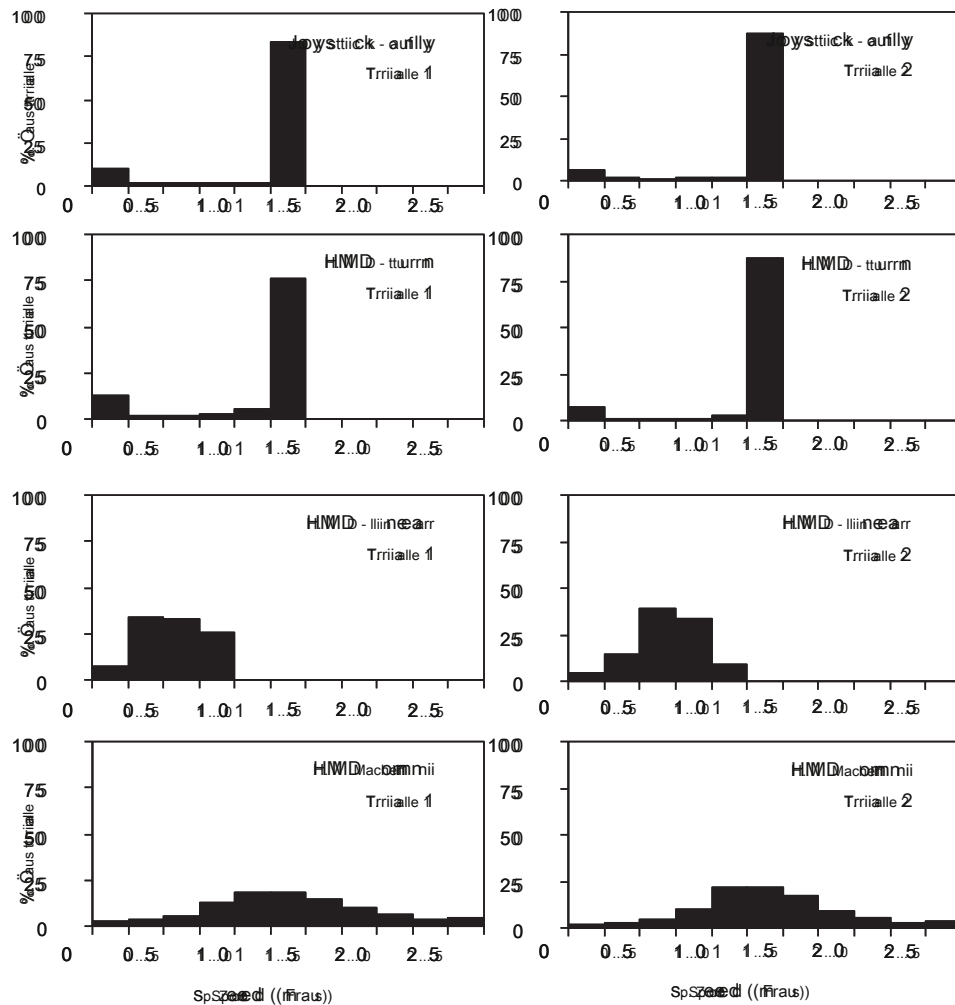


Abb. 8. Geschwindigkeitsprofil für jede Schnittstellengruppe in Studie 2. Für die HMD-Omni-Gruppe zeigt die rechte Leiste den Prozentsatz der Zeit, die mit einer Geschwindigkeit von mehr als 2,5 m / s verbracht wurde.

Mit der Zeit verbessert, war die Zeit, die sie mit Lernen verbrachten (durchschnittlich 14 Minuten über die 2 Durchquerungen), nicht ausreichend, um so einfach zu reisen wie Teilnehmer in den anderen Gruppen.

Die anderen drei Gruppen brauchten eine ähnliche Zeit, um die Durchquerungen abzuschließen, aber die Dynamik ihrer Bewegung war unterschiedlich. Die Nur-Joystick- und HMD-Turn-Gruppen fuhren meistens mit der vom Joystick zugelassenen Höchstgeschwindigkeit (1,34 m / s; ähnlich der maximalen Riemengeschwindigkeit der Laufbänder), obwohl die Anzahl der HMD-Turn-Teilnehmer, die mit Ständen kollidierten, entlang der Route ist bemerkenswert, da die Breite (5 m) der Korridore das Manövrieren unkompliziert hätte machen müssen. Die Geschwindigkeit der HMD-Omni-Gruppe variierte mehr als jede andere Gruppe. Hohe Geschwindigkeiten wurden wahrscheinlich durch Bewegungen des Kopfes eines Teilnehmers verursacht, wenn er sich entweder plötzlich umsah oder Bewegungen des Laufbandes kompensierte (anfangs neigen einige Teilnehmer dazu, wie auf einem Schiff in rauer See zu gehen) als ihre Beine / Körper als Ganzes. Der Laufbandsteuerungsalgorithmus verwendet als Eingabe die Position eines Teilnehmers im Labor, gemessen vom Vicon-System. Derzeit wird diese Position mithilfe von Markern berechnet

auf dem HMD, aber Markierungen auf der Taille eines Teilnehmers wären besser, wenn Probleme, die durch Okklusionsfehler verursacht werden, überwunden werden könnten.

6. ALLGEMEINE DISKUSSION

In diesem Artikel werden Trainingsdaten aus zwei Studien zur VR-Navigation analysiert, um festzustellen, wie sich die Eignung der Benutzer beim Reisen im Laufe der Zeit ändert, wie sich diese Eignung zwischen den Schnittstellen unterscheidet und wie die Eignung für das Reisen bewertet werden sollte. Die Studien umfassten die Navigation der Teilnehmer mit Schnittstellen, die von der Verwendung eines Joysticks mit Desktop-Display über Laufbänder bis hin zum tatsächlichen Gehen mit einem HMD reichten. Die Umgebungen umfassten alle orthogonale Anordnungen von Korridoren, variierten jedoch erheblich in Bezug auf die Häufigkeit von Kurven und die Enge des Korridors (0,75 gegenüber 5 m). Der vorliegende Artikel berichtet effektiv über ein Forschungsfeld des Navigationstrainings, das einen hybriden Ansatz verfolgte (anfängliches Training unter Verwendung einer Nur-Joystick-Desktop-VR-Schnittstelle und anschließende Weiterentwicklung zu gruppenspezifischen Schnittstellen), der sich als pragmatisch erwiesen hat. Infolgedessen analysiert der Artikel das „echte“ Training für weit über 100 Teilnehmer und bezieht einige der Ergebnisse auf zuvor veröffentlichte Ergebnisse zur Leistung der Teilnehmer bei Navigationsaufgaben auf hohem Niveau (Routen- und Vermessungswissen). Einschränkungen unseres Ansatzes konzentrieren sich auf die Tatsache, dass die Ergebnisse daher nicht den Effekt des Trainings zeigen, wenn jede Schnittstelle in strikter Isolation der anderen verwendet wird. Selbst wenn die Studie speziell dafür konzipiert worden wäre, wäre es unwahrscheinlich gewesen, die unterschiedlichen Erfahrungswerte der Teilnehmer mit Aspekten der Setups zu kompensieren, die unter den verschiedenen Bedingungen verwendet wurden (z. B. Desktop) immersive Anzeige). und bezieht einige der Ergebnisse auf zuvor veröffentlichte Ergebnisse über die Leistung der Teilnehmer bei Navigationsaufgaben auf hoher Ebene (Routen- und Vermessungswissen). Einschränkungen unseres Ansatzes konzentrieren sich auf die Tatsache, dass die Ergebnisse daher nicht den Effekt des Trainings zeigen, wenn jede Schnittstelle in strikter Isolation der anderen verwendet wird. Selbst wenn die Studie speziell dafür konzipiert worden wäre, wäre es unwahrscheinlich gewesen, die unterschiedlichen Erfahrungswerte der Teilnehmer mit Aspekten der Setups zu kompensieren, die unter den verschiedenen Bedingungen verwendet wurden (z. B. Desktop) immersive Anzeige). und bezieht einige der Ergebnisse auf zuvor veröffentlichte Ergebnisse über die Leistung der Teilnehmer bei Navigationsaufgaben auf hoher Ebene (Routen- und Vermessungswissen).

Einschränkungen unseres Ansatzes konzentrieren sich auf die Tatsache, dass die Ergebnisse daher nicht den Effekt des Trainings zeigen, wenn jede Schnittstelle in strikter Isolation der anderen verwendet wird. Selbst wenn die Studie speziell dafür konzipiert worden wäre, wäre es unwahrscheinlich gewesen, die unterschiedlichen Erfahrungswerte der Teilnehmer mit Aspekten der Setups zu kompensieren, die unter den verschiedenen Bedingungen verwendet wurden (z. B. Desktop) immersive Anzeige). und bezieht einige der Ergebnisse auf zuvor veröffentlichte Ergebnisse über die Leistung der Teilnehmer bei Navigationsaufgaben auf hoher Ebene (Routen- und Vermessungswissen).

Die Zeit, die die Teilnehmer benötigten, um eine asymptotische Leistung für das Reisen zu erreichen, und was diese Asymptote war, variierte zwischen den Schnittstellen erheblich. Mit einer tatsächlichen Gehoberfläche brauchten die Teilnehmer im Durchschnitt weniger als drei Minuten (4 Durchquerungen), selbst in einer engen Umgebung, die häufig groß war (90°) wendet sich. Dies zeigt die Leichtigkeit, mit der die Teilnehmer in einem begrenzten Raum manövrieren können, wenn sie eine „natürliche“ Schnittstelle verwenden, und stimmt mit den Ergebnissen früherer Forschungen überein [Feasel et al. 2008; Ruddle and Lessels 2009; Zambaka et al. 2005].

Bei anderen Schnittstellen hing die Zeit, die die Teilnehmer benötigten, um eine asymptotische Leistung zu erzielen, von der Umgebung ab. Wenn die Korridore breit waren, war die von uns angebotene Schulungsmenge (durchschnittlich 11 Minuten mit der Nur-Joystick-Schnittstelle (siehe Abschnitt 5.1.3) und 7 Minuten mit der Nur-Joystick- oder HMDturn-Schnittstelle) für die meisten ausreichend Teilnehmer können kollisionsfrei mit voller Geschwindigkeit reisen. Anders war es jedoch, als die Korridore eng waren, da die Teilnehmer trotz Abschluss aller Schnittstellenübungen (durchschnittlich 10 Minuten / Teilnehmer) immer noch wesentlich länger brauchten und mehr Kollisionen machten als Teilnehmer, die ging tatsächlich durch die VR-Welt (siehe Abbildung 2 und 3). Diese Feststellung zur Trainingszeit steht im Einklang mit einer der wenigen anderen Längsschnittstudien zum VR-Reisetraining, die veröffentlicht wurden [Feasel et al. 2008].

Schwierigkeiten beim Manövrieren um scharfe Ecken (90° Kurven in engen Korridoren) mit einer mausbasierten Schnittstelle wurden in früheren Untersuchungen festgestellt [Zhai et al. 1999] und verursachte in der vorliegenden Studie sogar, dass Vielspieler viel Zeit stationär verbrachten. Diese Start-Stopp-Bewegung, die im Gegensatz zum kontinuierlicheren Geschwindigkeitsprofil der HMDwalk-Gruppe (siehe Abbildung 4) steht, hemmt wahrscheinlich die Pfadintegration [Loomis et al. 1999] und reduzieren Sie das Ausmaß, in dem sich die Teilnehmer eine eng beieinander liegende Abfolge von Kurven als einen einzelnen fließenden „Bewegungsblock“ merken können. Man kann nur über die Auswirkungen spekulieren, die dies auf die Ergebnisse früherer VR-Studien hat, da die Zeit, die benötigt wird, um das Manövrieren zu beherrschen, von den Details einer Schnittstelle und der navigierten Welt abhängt. Jedoch, Angesichts der Tatsache, dass die Mehrheit der Studien weniger als 10 Minuten Training bietet (dies war bei mindestens 60% der Studien in den oben genannten Übersichten der Fall [Ruddle 2011; Ruddle and Lessels 2006]) und der Probleme, über die einige Teilnehmer berichteten [Zambaka et al. 2005] ist es wahrscheinlich, dass viele davon

Die Ergebnisse der Studien spiegeln die Fähigkeit der Teilnehmer wider, räumliches Wissen zu entwickeln, während sie noch das Reisen lernten, anstatt die Fähigkeit der Teilnehmer widerzuspiegeln, die in einem bestimmten Reisemodus vollständig geschult waren [Waller 2000].

Daraus folgt, dass ein Mangel an Schulung einige der signifikanten Unterschiede erklären kann, über die in der Testphase der vorliegenden Studien berichtet wurde. In Experiment 2 von Ruddle et al. [2011b] machte die HMDwalk-Gruppe deutlich weniger Fehler als die HMD-Turn-Gruppe, und ein Teil dieses Unterschieds kann auf einen Unterschied zwischen der Schnittstellenfähigkeit der Gruppen zurückgeführt werden. Die Schnittstelleneffizienz berücksichtigt jedoch nicht den deutlichen Vorteil, den die HMDwalk-Gruppe auf den Rückläufen der Route im Vergleich zu den Außenabschnitten zeigte. Es sollte auch beachtet werden, dass die Teilnehmer zwischen dem Erlernen des Reisens (die in diesem Artikel angegebenen Daten) und dieser Testphase acht Durchquerungen einer 15-Meter-Route durchführten, um die Art der Aufgabe zu üben, die während der Testphase verwendet wurde, und dies bot auch weitere Übung beim Reisen. In Experiment 2 von Ruddle et al. [2011a] gab es einen Haupteffekt translatorischer körperbasierter Informationen (HMDlinear & HMDomni-Gruppen vs. HMDturn & Joystick-only-Gruppen) auf die Genauigkeit der geradlinigen Entfernungsschätzungen der Teilnehmer, es wurde jedoch auch festgestellt, dass die Leistung der HMDlinear-Gruppe wurde unterdrückt und dies wurde auf die Unbeholfenheit dieser Schnittstelle zurückgeführt. Dies wird durch Daten über die langsame Geschwindigkeit der HMDlinear-Gruppe gestützt, über die in diesem Artikel berichtet wird (siehe Abbildung 7 und 8).

Unter Bezugnahme auf Metriken, die zur Messung des Fortschritts während des Trainings verwendet werden können, zeigt die vorliegende Studie, dass das Geschwindigkeitsprofil wichtige Erkenntnisse darüber liefert, wie Teilnehmer reisen, die nicht erreicht werden können, wenn nur Zeit- und / oder Genauigkeitsmetriken verwendet werden. Das Geschwindigkeitsprofil unterscheidet sich von den biomechanischen Metriken, die in früheren Untersuchungen verwendet wurden [Feasel et al. 2008; Fink et al. 2007; Whitton et al. 2005] und zeigten, dass in Studie 1 die Hauptursache für den Zeitunterschied zwischen den Gruppen der Prozentsatz der Zeit war, für die die Nur-HMDturn- und Joystick-Gruppen stationär waren, während in Studie 2 die Grundursache für den Zeitunterschied darin bestand, dass die Die HMD-lineare Gruppe bewegte sich einfach langsam.

Der vorliegende Artikel berichtet über die Navigation der Teilnehmer mit Schnittstellen, die von der Verwendung eines Joysticks mit Desktop-Display über Laufbänder bis hin zum tatsächlichen Gehen beim Tragen eines HMD reichten. Die Umgebung umfasste alle orthogonale Anordnungen von Korridoren, variierte jedoch erheblich in Bezug auf die Häufigkeit von Kurven und die Enge des Korridors (0,75 gegenüber 5 m). Um zu beurteilen, inwieweit die Ergebnisse verallgemeinert werden können, teilen wir die Schnittstellen in zwei Kategorien ein: Gehen und Nicht-Gehen. Die Laufschnittstellen (HMD-Walk, HMD-Linear und HMD-Omni) zeigten alle eine Gaußsche Verteilung für das Geschwindigkeitsprofil, wobei die mittlere Geschwindigkeit der Teilnehmer von der spezifischen Schnittstelle beeinflusst wurde (insbesondere langsam bei HMD-Linear), jedoch mit fortschreitendem Training immer größer. Das Profil spiegelte die Manövrierfähigkeit der Teilnehmer auf Reisen wider. Dies bedeutet, dass Benutzer in Umgebungen, in denen sie gekrümmten Pfaden folgen müssen, ähnlich einfach navigieren können sollten, anstatt nur entlang gerader Korridorsegmente zu fahren. Wir sagen auch voraus, dass andere Arten von Gehschnittstellen wie Walk-in-Place [Feasel et al. 2008] und umgeleitetes Gehen [Peck et al. 2009] wird ein ähnliches Geschwindigkeitsprofil haben. Die nicht gehenden Schnittstellen waren durch eine bimodale Verteilung gekennzeichnet (die Teilnehmer fuhren entweder mit voller Geschwindigkeit oder waren stationär), wobei der Anteil der Fahrt mit voller Geschwindigkeit mit dem Training und der Breite der Korridore der Umgebung zunahm. Andere Studien haben die Tendenz der Teilnehmer festgestellt, in geraden Linien zu fahren, und die Unfähigkeit, Hindernissen bei der Verwendung nicht laufender Schnittstellen auszuweichen [Ruddle and Lessels 2009; Zambaka et al. 2005]. Deshalb,

Wir schließen mit einigen Empfehlungen. Das erste ist, dass Studien die Reiseeffizienz der Teilnehmer anhand einer Mischung von Metriken messen sollten, die sowohl ihr Geschwindigkeitsprofil als auch ihre Reisegenauigkeit charakterisieren. Zweitens sollten Studien diese Metriken angeben, um den Lesern zu helfen, die Auswirkungen der Reiseeffizienz auf die Ergebnisse einer Studie zu beurteilen. Es ist eindeutig informativer, wenn Längsschnittdaten

werden eher gemeldet als nur ein Schnappschuss am Ende des Trainings. Drittens sollte das Training so strukturiert sein, dass es direkt auf wahrgenommene Schwächen der Pro fi zienz der Teilnehmer (z. B. Start-Stopp-Bewegung) eingeht, anstatt dass die Teilnehmer sich selbst überlassen bleiben. Viertens sollten Studien in Betracht ziehen, die Teilnehmer nach einem bestimmten Eignungskriterium und nicht nach einem festgelegten (und häufig nominalen) Zeitraum zu schulen, um Unterschiede zwischen den früheren Erfahrungen und der Eignung des Einzelnen auszugleichen.

Danksagung

Wir danken Michael Kerger, Joachim Tesch und Betty Mohler für ihre technische Unterstützung.

VERWEISE

- B. LASCOVICH, J. J. UND B. AILENSEN, JN 2011. *Unendliche Realität*. William Morrow, New York.
- B. OWMAN, D. D. UND H. ODGES, L. 1997. Eine Bewertung von Techniken zum Ergreifen und Bearbeiten von entfernten Objekten in immersiven virtuellen Umgebungen. Im *Vorträge des Symposiums für interaktive 3D-Grafik*. ACM, New York, 35–38.
- B. OWMAN, D. D. UND J. OHNSON, D., LF 2001. Testbed-Bewertung von Interaktionstechniken für virtuelle Umgebungen. *Präsenz: Teleoperatoren Virtuelle Umgebung*. 10, 75–95.
- B. OWMAN, D., K. OLLER, D., UND H. ODGES, L. 1997. Reisen in immersiven virtuellen Umgebungen: Eine Bewertung der Blickwinkel-Bewegungssteuerungstechniken. Im *Tagungsband des IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*. IEEE, Los Alamitos, CA, 45–52.
- B. OWMAN, DA, K. RUIJFF, E., L. AVIOLA, JJ, UND P. OUPYREV, I. 2004. *3D-Benutzeroberflächen: Theorie und Praxis*. Addison-Wesley, London.
- C. HENNE, M., M. OUNTFORD, SJ, UND S. ELLEN, A. 1988. Eine Studie zur interaktiven 3D-Rotation mit 2D-Steuergeräten. *Comput. Graph.* 22, 121–129.
- D. E. L. UCA, A., M. ATTONE, R., G. IORDANO, PR, UND BÜL THOFF, HH 2009. Steuerungsdesign und experimentelle Bewertung der 2D-CyberWalk-Plattform. Im *Vorträge der IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2009*. IEEE, Los Alamitos, CA, 5051–5058.
- F. STAFFELEI, J., W. HITTON, MC, UND W. ENDE, JD 2008. LLCM-WIP: Laufende Ortung mit geringer Latenz und kontinuierlicher Bewegung. Im *Verfahren des IEEE-Symposiums für 3D-Benutzeroberflächen*. IEEE, Los Alamitos, CA, 97–104.
- F. TINTÉ, PW, F. OO, PS, UND W. ARREN, WH 2007. Vermeidung von Hindernissen beim Gehen in realen und virtuellen Umgebungen. *ACM Trans. Appl. Wahrnehmung* 4, Artikel 2.
- H. OLLERBACH, JM 2002. Fortbewegungsschnittstellen. Im *Handbuch für virtuelle Umgebungen: Design, Implementierung und Anwendung* gen, KM Stanney, Hrsg., Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ, 239–254.
- J. ACOBSON, J. J. UND L. EWIS, M. 1997. Ein experimenteller Vergleich von drei Methoden zur Kollisionsbehandlung in virtuellen Umgebungen. Im *Verfahren der 41. Jahrestagung der Human Factors and Ergonomics Society* Human Factors Society, Santa Monica, Kalifornien, 1273–1277.
- L. AMPTON, DR, K. NERR, BW, G. OLDBERG, SL, B. LISS, JP, M. OSHELL, JM, UND B. LAU, BS 1994. Die Batterie zur Leistungsbewertung der virtuellen Umgebung (VEPAB): Entwicklung und Bewertung. *Präsenz: Teleop. Virt. Environ.* 3, 145–157.
- L. ESSELS, S. UND R. UDDLE, RA 2005. Bewegung in realen und virtuellen überfüllten Umgebungen. *Präsenz: Teleoperatoren und Virtuelle Umgebungen* 14, 580–596.
- L. OOMIS, J., K. LATZKY, RL, G. OLLEDGE, RG, UND P. HILBECK, JW 1999. Menschliche Navigation durch Pfadintegration. Im *Wegfindung: Kognitive Kartierung und andere räumliche Prozesse*, R. Golledge, Hrsg., John Hopkins, Baltimore, MD, 125–151.
- P. ECK, TC, F. UCHS, H., UND W. HITTON, MC 2009. Evaluierung von Neuorientierungstechniken und Ablenkern für das Gehen in großen virtuellen Umgebungen. *IEEE Trans. Visuell. Comput. Graph.* 15, 383–394.
- P. ELAH, EIN, UND K. OENDERINK, J. 2007. Editorial: Gehen in realen und virtuellen Umgebungen. *ACM Trans. Appl. Percep.* 4, 1–4.
- R. UDDLE, RA 2011. Die Auswirkung von translatorischen und rotationskörperbasierten Informationen auf die Navigation. Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht.
- R. UDDLE, RA UND J. EISEN, DM 2001. Bewegung in überfüllten virtuellen Umgebungen. *Präsenz: Teleoperatoren und Virtual Environ.* 10, 511–524.
- R. UDDLE, RA UND L. ESSELS, S. 2006. Drei Metrikebenen zur Bewertung der Wegfindung. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebung*. 15, 637–654.
- R. UDDLE, RA UND L. ESSELS, S. 2009. Die Vorteile der Verwendung einer Laufschnittstelle zum Navigieren in virtuellen Umgebungen. *ACM Trans. Computer-Mensch-Interaktion*. 16, Artikel 5.

- R. UDDLE, RA, V. OLKOVA, E., UND BÜLTHOFF, HH 2011. Gehen verbessert Ihre kognitive Karte in Umgebungen, die großräumig und großflächig sind. *ACM Trans. Computer-Mensch-Interaktion* 18, Artikel 10.
- R. UDDLE, RA, V. OLKOVA, E., M. OHLER, B., UND B. ÜLTHOFF, HH 2011b. Die Auswirkung von wegweisenden und körperbasierten sensorischen Informationen auf das Routenlernen. *Memory Cognit.* 39, 686–699.
- S. SPÄTER, M., U. SOH, M., UND S. TEED, A. 1995. Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Gehtechnik auf die Präsenz in der virtuellen Realität. *ACM Trans. Computer-Mensch-Interaktion* 2, 201–219.
- S. MITH, SP UND D. U. 'M. ONT, S. 2009. Messung der Auswirkung des Spielerlebnisses auf Navigationsaufgaben in virtuellen Umgebungen. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums zu 3D-Benutzeroberflächen* IEEE, Los Alamitos, CA, 3–10.
- S. OUMAN, JL, G. IORDANO, PR, F. RISSEN, ICH WÜRDE E. L. UCA, EIN., UND E. RNST, MO 2010. Virtuelles Gehen real werden lassen: Wahrnehmungsbewertung eines neuen Laufbandsteuerungsalgorithmus. *ACM Trans Appl Perception* 7, Artikel 11.
- S. TON, RJ 2002. Anwendungen virtueller Umgebungen: Ein Überblick. Im *Handbuch der virtuellen Umgebungen*, KM Stanney, Hrsg., Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ, 827–756.
- S. UMA, EA, F. INKELSTEIN, SL, R. EID, M., B. ABU, SV, U. LINSKI, AC, UND H. ODGES, LF 2010. Bewertung der kognitiven Effekte der Reisetchnik in komplexen realen und virtuellen Umgebungen. *IEEE Trans. Visuell. Comput. Graph.* 16, 690–702.
- U. SOH, M., A. RTHUR, K., W. HITTON, M., B. ASTOS, R., S. TEED, WIE SPÄTER, M., UND B. DÄCHER, F. 1999. Gehen -> Gehen an Ort und Stelle -> Fliegen in virtuellen Umgebungen. Im *Vorträge der 26. Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken*. ACM, New York, 359–364.
- V. EIN S. CHAIK, P., UND L. ING, J. 2005. Fünf psychometrische Skalen zur Online-Messung der Qualität der Mensch-Computer-Interaktion auf Websites. *Int. J. Human-Comput. Interagieren* 18, 309–322.
- W. ALLER, D. 2000. Individuelle Unterschiede beim räumlichen Lernen aus computer-simulierten Umgebungen. *J. Experim. Psycho. Angewandt* 6, 307–321.
- W. HITTON, MC, C. OHN, JV, F. STAFFELEI, J., Z. IMMONS, P., R. AZZAQUE, S., P. OULTON, SJ, M. CLEOD, B., UND B. DÄCHER, FP 2005. Vergleich der VE-Fortbewegungsschnittstellen. Im *Tagungsband der IEEE Virtual Reality Conference* IEEE, Los Alamitos, CA, 123–130.
- W. INTER, DA 1990. *Biomechanik und Motorik der menschlichen Bewegung*. Wiley-Interscience, New York.
- Z. ANBKA, C., L. OK, B., B. ABU, S., U. LINSKI, EIN., UND H. ODGES, L. 2005. Vergleich von Pfadvisualisierungen und kognitiven Maßnahmen in Bezug auf Reisetchniken in einer virtuellen Umgebung. *IEEE Trans. Visuell. Comput. Graph.* 11, 694–705.
- Z. HAI, S., K. ANDOGAN, E., S. MITH, BA, UND S. ELKER, T. 1999. Auf der Suche nach dem 'Zauberteppich': Design und Experimentieren einer bimanuellen 3D-Navigationsoberfläche. *J. Vis. Lang. Comput.* 10, 3–17.

Eingegangen im Dezember 2011; überarbeitet September 2012 und Dezember 2012; akzeptiert April 2013