

Die Vorteile der Verwendung einer Walking-Oberfläche zum Navigieren in virtuellen Umgebungen

ROY A. RUDDLE und SIMON LESSELS University of
Leeds

Die Navigation ist die häufigste interaktive Aufgabe, die in dreidimensionalen virtuellen Umgebungen (VEs) ausgeführt wird. Sie ist jedoch auch eine Aufgabe, die Benutzern häufig schwer fällt. Wir untersuchten, wie körperbasierte Informationen über die Translations- und Rotationskomponenten der Bewegung den Teilnehmern bei der Durchführung einer Navigationssuchaufgabe halfen (Suche nach Zielen, die in Kisten in einem raumgroßen Raum versteckt sind). Wenn die Teilnehmer physisch um das VE herumgingen, während sie es auf einem am Kopf montierten Display (HMD) betrachteten, führten sie 90% der Versuche perfekt durch, vergleichbar mit Teilnehmern, die in einer früheren Studie eine äquivalente Aufgabe in der realen Welt ausgeführt hatten. Im Gegensatz dazu führten die Teilnehmer weniger als 50% der Versuche perfekt durch, wenn sie ein angebundenes HMD (Bewegung durch physisches Drehen, aber Drücken einer Taste zum Übersetzen) oder ein Desktop-Display (keine körperbasierten Informationen) verwendeten. Dies ist die komplexeste Navigationsaufgabe, bei der in einem VE ein reales Leistungsniveau erreicht wurde. Verhaltensdaten weisen darauf hin, dass sowohl translatorische als auch rotationskörperbasierte Informationen erforderlich sind, um die Position während der Navigation genau zu aktualisieren, und Teilnehmer, die gingen, neigten dazu, Hindernissen auszuweichen, obwohl keine Kollisionserkennung implementiert und kein Feedback gegeben wurde. Eine Laufschnittstelle würde einer Reihe von VE-Anwendungen unmittelbare Vorteile bringen. obwohl keine Kollisionserkennung implementiert wurde und kein Feedback gegeben wurde. Eine Laufschnittstelle würde einer Reihe von VE-Anwendungen unmittelbare Vorteile bringen. obwohl keine Kollisionserkennung implementiert wurde und kein Feedback gegeben wurde. Eine Laufschnittstelle würde einer Reihe von VE-Anwendungen unmittelbare Vorteile bringen.

Kategorien und Fachbeschreibungen: I.3.6 [**Computergrafik**]: Methodik und Techniken - *Interaktionstechniken*; I.3.7 [**Computergrafik**]: Dreidimensionale Grafik und Realismus - *Virtuelle Realität*; H.5.2 [**Informationsschnittstellen und Präsentation**]: Benutzeroberflächen- *Eingabegeräte und Strategien*

Allgemeine Begriffe: Experimentieren, Human Factors, Leistung

Grundlegende Daten zur Suchleistung (Prozentsatz der perfekten Suche und Anzahl der Ziele / Täuschkörper, die zweimal oder mehrmals überprüft wurden) für diese Experimente wurden in Ruddle and Lessels [2006] angegeben. Der Großteil der Daten in diesem Artikel wurde jedoch nicht veröffentlicht, einschließlich des Vergleichs der Suche der Teilnehmer mit dem kürzestmöglichen Pfad, der Daten zur Vermeidung von Hindernissen und des Abschnitts Suchpfade, in dem die Pfade der Teilnehmer auf drei Detailebenen analysiert wurden. Die neuen Daten liefern eine Erklärung für die großen Leistungsunterschiede, die in den Experimenten aufgetreten sind. Dies ist entscheidend, um zu verstehen, warum Ganzkörperinformationen einen solchen Unterschied für die Navigation ausmachen, und um Schlussfolgerungen über die qualitativen Änderungen zu ziehen. Gehschnittstellen bringen zur VE-Navigation,

Diese Forschung wurde durch den Zuschuss GR / R55818 / 01 des Forschungsrats für Ingenieurwissenschaften und Physik unterstützt.

Autorenadressen: School of Computing, Universität Leeds, Leeds, UK; Kontaktieren Sie die E-Mail- Adresse des Autors: roy@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 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 .

© 2009 ACM 1073-0516 / 2009/04-ART5 5,00 USD

DOI 10.1145 / 1502800.1502805 <http://doi.acm.org/10.1145/1502800.1502805>

ACM Transactions on Computer-Human Interaction. 16, Nr. 1, Artikel 5, Erscheinungsdatum: April 2009.

Zusätzliche Schlüsselwörter und -phrasen: Virtuelle Realität, Navigation, Fortbewegung, visuelle Feinheit

ACM-Referenzformat:

Ruddle, RA und Lessels, S. 2009. Die Vorteile der Verwendung einer Laufschnittstelle zum Navigieren in virtuellen Umgebungen. ACM Trans. Comput-Hum. Interagieren. 16, 1, Artikel 5 (April 2009), 18 Seiten. DOI = 10.1145 / 1502800.1502805
<http://doi.acm.org/10.1145/1502800.1502805>

1. EINLEITUNG

Wenn Menschen in der realen Welt navigieren, verwenden sie Informationen aus verschiedenen Quellen (hauptsächlich visuell und körperbasiert) und mehreren komplementären kognitiven Prozessen. Zum Beispiel kann Bewegung über optischen Fluss (visuell), Propriozeption und vestibuläre Informationen (beide körperbasiert) wahrgenommen werden, und wir können die Pfadintegration (körperbasiert) und die Nähe eines bestimmten Orientierungspunkts (normalerweise visuell) verwenden, um zu bestimmen, wo Wir sind in einer Umgebung gereist [Foo et al. 2005; Loomis et al. 1999; Waller et al. 2004].

Dreidimensionale virtuelle Umgebungen (VEs; Virtual-Reality-Welten) können umfangreiche visuelle Informationen bereitstellen. Es gibt jedoch starke Hinweise darauf, dass visuelle Informationen allein nicht ausreichen, um VEs so effizient wie in der realen Welt zu navigieren. Zum Beispiel haben in einer Studie Teilnehmer, die eine Route durch ein virtuelles Gebäude gelernt haben, dreimal so viele Fehler gemacht, als sie gebeten wurden, dieselbe Route im realen Gebäude zu befolgen, als Teilnehmer, die beide im realen Gebäude gelernt und getestet wurden [Witmer 1996]. In einer anderen Studie wurde eine Navigationssuchaufgabe in 93% der realen Versuche perfekt durchgeführt, während nur 55% der Versuche in einem „fotorealistischen“ VE durchgeführt wurden [Lessels and Ruddle 2005].

Desktop-VE-Schnittstellen (Tastatur, Maus und / oder Joystick) liefern nur wenige körperbasierte Informationen, aber es ist eine andere Geschichte mit immersiven VEs, für die Schnittstellen, die physisches Drehen, Gehen, Gehen an Ort und Stelle und auf Laufbändern umfassen, alle vorhanden waren entwickelt (z. B. [Darken et al. 1997; Hollerbach et al. 2003; Templeman et al. 1999; Whitton et al. 2005]).

Das Ziel der vorliegenden Studie war es zu untersuchen, wie sich eine Gehschnittstelle auf die Navigationsfähigkeit der Menschen auswirkt, und festzustellen, ob die Bereitstellung von Informationen auf Ganzkörperbasis die einfache Navigation von VEs ermöglicht. Es werden sowohl die Leistung (Erweiterung der vorläufigen Daten in Ruddle and Lessels [2006]) als auch die Verhaltensdaten (völlig neu) angegeben. Zunächst fassen wir jedoch Forschungsergebnisse zusammen, die zuvor die Wirkung körperbasierter Informationen untersucht haben.

2. KÖRPERBASIERTE INFORMATIONEN

Bei der Betrachtung körperbasierter Informationen muss zwischen den Rotations- und Translationskomponenten der Bewegung unterschieden werden. In der Vergangenheit wurde die Rotationskomponente als viel wichtiger angesehen, da das Zeigen zwischen Objekten in einem Raum wesentlich genauer ausgeführt wurde, wenn sich die Teilnehmer physisch zu einer Startorientierung drehen, anstatt sich vorzustellen, dass sie dies getan hatten, aber es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen

physische und imaginäre Bewegung in eine Ausgangsposition [Presson und Montello 1994; Rieser 1989].

Für die VE-Navigation besteht die häufigste Methode zur Bereitstellung körperbasierter Informationen darin, die VE auf einem am Kopf montierten Display (HMD) anzuzeigen und die zu implementierenden Kopfbewegungen eines Benutzers zu verfolgen *Blick gerichtet* Reisen [Bowman et al. 2005]. Nur gelegentlich wurden translatorische körperbasierte Informationen isoliert bereitgestellt (z. B. ein lineares Laufband), aber eine wachsende Anzahl von Implementierungen stellt beide Komponenten körperbasierter Informationen bereit, beispielsweise durch Verwendung einer physischen Gehschnittstelle.

Einige Studien haben die Vorteile der Bereitstellung eines weiten Sichtfelds (FOV) hervorgehoben, wobei die Pfadintegration mit nur visuellen Informationen in einem VE mit 180 genau durchgeführt wird - FOV [Riecke et al. 2002] und Objekte, auf die in der realen Welt mit einem uneingeschränkten Sichtfeld genauer hingewiesen wird, als wenn es auf 40 reduziert wurde - $\times 30$ - [Riecke et al. 2004]. Diese Ergebnisse galten jedoch nicht für komplexere räumliche Aufgaben wie die Navigationssuche, die die Teilnehmer in der realen Welt mit ähnlicher Genauigkeit sowohl mit einem normalen Sichtfeld als auch mit einer Beschränkung auf 20 ausführten - $\times 16$ - [Lessels and Ruddie 2005].

2.1 Rotationsinformationen

Im Vergleich zu visuellen Informationen allein bietet das Hinzufügen von Informationen auf der Basis von Rotationskörpern signifikante Vorteile für eine Vielzahl grundlegender räumlicher Aufgaben. Dies äußert sich in einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit, wenn die Teilnehmer aufgefordert wurden, sich um einen vorgeschriebenen Winkel zu drehen [Bakker et al. 1999]; doppelt so konsistent reagieren (gemessen als Winkelfehler), wenn Sie aufgefordert werden, von einem Ziel auf ein anderes zu zeigen, das zuvor betrachtet wurde [Lathrop und Kaiser 2002], und die Pfadintegration in einem Head-Track-HMD genau durchführen, aber große Fehler machen, wenn nur visuell Informationen wurden zur Verfügung gestellt [Klatzky et al. 1998]; auf Reisen mehr umschaun [Ruddle et al. 1999]; und eine Suchaufgabe genauer ausführen, wenn sie von einem festen Ort aus ausgeführt wird [Pausch et al. 1997].

Die obigen Studien zeigen, dass rotationskörperbasierte Informationen für grundlegende räumliche Aufgaben wichtig sind, aber diese Feststellung gilt nicht, wenn komplexe Aufgaben ausgeführt werden. Teilnehmer, die blickgesteuertes Reisen (rotationskörperbasierte Informationen) zur Navigation in einem immersiven VE verwendeten, entwickelten kein wesentlich genaueres Wissen über eine großräumige Umgebung als bei Verwendung eines Desktop-VE (nur visuelle Informationen), unabhängig davon, ob dieses Wissen vorhanden war wurde anhand von Richtungsschätzungen, Entfernungsschätzungen oder der zurückgelegten Entfernungsteilnehmer beim Finden des Weges zwischen Standorten bewertet [Chance et al. 1998; Ruddie und Péruch 2004]. Mit anderen Worten, rotationskörperbasierte Informationen reichen nicht aus, um die bekannten Schwierigkeiten zu lösen, mit denen Menschen in großen VEs effizient navigieren können [Ruddle 2001].

2.2 Übersetzungsinformationen

VE-Schnittstellen, die körperbasierte Informationen ausschließlich für die translatorische Komponente der Bewegung bereitstellen, wurden unter Verwendung von Walking-in-Place-Algorithmen und linearen Laufbändern (in eine Richtung) entwickelt. Das bekannteste Gerät dieses Typs

ist der Sarcos Treadport, für den eine Reihe von Studien zu detaillierten Aspekten der Bewegung durchgeführt wurden, darunter Manövrierstrategien [Vijayakar und Hollerbach 2002] und die Verwendung von Krafterückkopplungen zur Simulation des Gehens einen Hang hinauf [Hollerbach et al. 2003].

In Studien zu anderen grundlegenden räumlichen Aufgaben schätzten Teilnehmer, die auf einem Laufband gingen, die zurückgelegte Strecke nicht genauer als Teilnehmer, die einen Joystick morgen verwendeten [Witmer und Kline 1998]; Wenn ein Laufband in einer Anwendung zur Überprüfung der Architektur verwendet wurde, gab es vereinzelte Berichte über Benutzer, die desorientiert wurden [Brooks et al. 1992]. Die einzige Studie, die einen Vorteil von translatorischen körperbasierten Informationen für die großflächige Navigation zeigte, verglich das einseitige Gehen an Ort und Stelle mit der Joystickbewegung. Nachdem die Teilnehmer auf einer Route zwischen acht Exponaten in einem virtuellen Museum geführt worden waren, wurden sie in das reale Museum gebracht und gebeten, die Exponate in einer anderen Reihenfolge zu finden. Die Joystick-Gruppe reiste 18% weiter als die Teilnehmer, die an Ort und Stelle gingen, die wiederum 17% weiter reisten als eine Kontrollgruppe, die im realen Museum sowohl geschult als auch getestet wurde [Grant und Magee 1998]. Daher gibt es nur begrenzte Hinweise darauf, dass die Translationskomponente körperbasierter Informationen für die Navigation von Vorteil ist.

2.3 Translations- und Rotationsinformationen

Das Wachstum der Weitverkehrs-Tracking-Technologie hat zu Schnittstellen geführt, an denen ein Benutzer physisch durch einen großen leeren Raum läuft, der die virtuelle Welt „enthält“ und mit allen körperbasierten Informationen versorgt wird, die wir bei der Navigation in der Realität haben. Im Vergleich zu blickgesteuerten Reisen (körperbasierte Informationen nur für Rotationsbewegungen) erhöhte das physische Gehen das Präsenzgefühl der Teilnehmer [Usoh et al. 1999] und lassen Sie sie auf ähnliche Weise wie beim Gehen in der realen Welt manövrieren [Whitton et al. 2005] und half den Teilnehmern, genauere Skizzen zu zeichnen, nachdem sie durch einen virtuellen Raum gereist waren [Zanbaka et al. 2005].

Nur wenige Studien haben die Auswirkung des physischen Gehens auf die Navigation großer VEs untersucht. Im Vergleich zu visuellen Informationen führte das Gehen jedoch zu einer kleinen, signifikanten Verbesserung der Genauigkeit, wenn die Teilnehmer die Richtung zu den angetroffenen Objekten schätzten beim Überqueren einer Route [Chance et al. 1998].

Sogar der größte der aktuell verfolgten Räume (z. B. der 20 × 30 m PPTX8 von WorldViz) sind klein im Vergleich zu den Umgebungen, in denen wir täglich navigieren. Dies bedeutet, dass viele Anwendungen eine Alternative zum physischen Gehen erfordern würden. Zu diesem Zweck haben einige Forscher hybride Schnittstellen evaluiert, die physisches Gehen für lokale Manövrierfähigkeit mit blickgesteuertem Fahren für Bewegungen über größere Entfernungen kombinieren [Zanbaka et al. 2005]. Andere Forscher haben die Verwendung von Geräten wie bidirektionalen Laufbändern vorgeschlagen [Darken et al. 1997; Iwata et al. 2005], aber diese sind noch nicht für reale Anwendungen geeignet [Bowman et al. 2004].

Die Einschränkungen bidirektionaler Laufbänder haben mehrere Gruppen dazu veranlasst, Algorithmen zu entwickeln, mit denen Benutzer durch virtuelle Welten reisen können, indem sie vor Ort gehen. Die raffinierteste davon ermöglicht eine feinkörnige Steuerung der Bewegung

[Templeman et al. 1999] und eine andere erhöhte das Präsenzgefühl der Teilnehmer im Vergleich zu blickgesteuerten Reisen [Slater et al. 1995; Usoh et al. 1999]. Im Allgemeinen weisen jedoch alle aktuellen Walking-in-Place-Algorithmen bestimmte Macken auf [Whitton et al. 2005], was bedeutet, dass sie Reisen realistischer machen als blickgesteuerte Techniken, aber weniger als körperliches Gehen.

3. ÜBERBLICK ÜBER DIE EXPERIMENTE

Während physische Geh- und Ortungsschnittstellen es Benutzern zweifellos ermöglichen, sich auf ziemlich realistische Weise in Umgebungen zu bewegen, können wir dies immer noch nicht erklären

- (a) warum Benutzer es so viel schwieriger finden, in VEs zu navigieren als in der realen Welt, und
- (b) Was können wir dagegen tun?

Wir haben diese Fragen beantwortet, indem wir die Teilnehmer gebeten haben, sich in einem raumgroßen Raum fortzubewegen und nach acht Zielen zu suchen, die zufällig an 16 explizit identifizierten möglichen Orten platziert wurden. Wenn ein Teilnehmer jeden Standort einmal überprüft hat, wurde garantiert, dass er erfolgreich ist (a *perfekte Suche*). Dazu mussten sie jedoch Informationen aus mehreren Positionen integrieren und sich daran erinnern, wohin sie gereist waren.

Jeder Teilnehmer navigierte durch das virtuelle Roomby (a) blickgesteuerte Reisen und eine Desktop-Anzeige; (b) Blick gerichtetes Reisen und ein HMD; oder (c) physisch durch den Raum gehen, während er auf einem HMD betrachtet wird. Diese Gruppen unterschieden sich hinsichtlich der Art der körperbasierten Informationen, mit denen sie versorgt wurden (keine vs. Rotation vs. Translation und Rotation) und wurden als solche bezeichnet *Nur visuell drehen* und *gehen*, beziehungsweise.

In Experiment 1 führten die Teilnehmer die Aufgabe in einem detaillierten virtuellen Modell unseres Labors aus. In Experiment 2 wurde ein einfaches ("verarmtes") Modell verwendet. Auf diese Weise konnten wir feststellen, ob ein reales Leistungsniveau erreicht werden kann, unabhängig von der Menge an visuellen Details, die in der Umgebung enthalten sind.

In den nächsten beiden Abschnitten wird über jedes Experiment berichtet. Um den Vergleich zu erleichtern, werden die Ergebnisse für beide Experimente in denselben Zahlen zusammengefasst (z. B. Abbildung 2). Daran schließt sich ein Abschnitt an, in dem die Suchpfade der Teilnehmer in der gesamten Studie analysiert wurden, und anschließend eine allgemeine Diskussion.

4. EXPERIMENT 1

4.1 Methode

4.1.1 *Teilnehmer*. 30 Personen (16 Männer, 14 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 24 Jahren ($SD = 3.4$) hat teilgenommen. Es wurde ein Design zwischen Teilnehmern verwendet, bei dem 10 Teilnehmer zufällig jeder der drei Gruppen zugeordnet wurden (nur visuell, drehen und gehen). Alle Teilnehmer gaben ihre Einwilligung und erhielten ein Honorar. Die Studie wurde von der Ethikkommission der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der University of Leeds genehmigt.

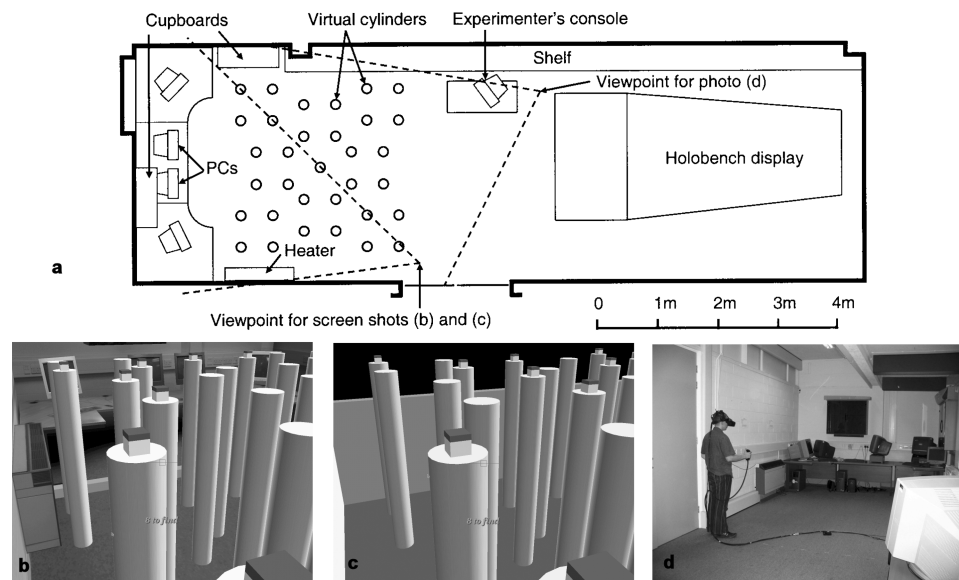


Abb. 1. Versuchsaufbau: (a) Draufsicht auf das physikalische Labor mit Darstellung der Position der virtuellen Zylinder; (b) visuell detailliertes virtuelles Modell, das in Experiment 1 verwendet wurde und alle Möbel, Computer usw. enthielt, die im tatsächlichen Labor vorhanden waren; (c) visuell verarmtes Modell, das in Experiment 2 verwendet wurde und nichts außer den Zylindern, Kästen, Zielen und vier grauen Wänden enthielt; und (d) Person, die in der Position steht, die zum Erzeugen der Ansichten (b) und (c) verwendet wurde, und die das HMD trägt.

4.1.2 Materialien. Das virtuelle Modell wurde unter Verwendung von Messungen der Laborgeometrie (siehe Abbildung 1 (a)) und Fotografien des Innenraums konstruiert. Dem Modell wurden 33 identische Zylinder mit einem Durchmesser von 0,15 m und einer Höhe von 1,35 m sowie 16 identische Kästen hinzugefügt (siehe Abbildung 1 (b)). Die Zylinder waren in acht Viererblöcken angeordnet, wobei der 33. Zylinder zentral war (siehe Abbildung 1 (a)). In jedem Versuch wurden die Kisten auf zufällig ausgewählte Zylinder gestellt, unter der Bedingung, dass ein Zylinder in jedem Block ein Ziel und ein anderer ein Köder war (um sicherzustellen, dass die Ziele und Köder in der Umgebung verteilt waren).

In jedem Versuch wurden die Teilnehmer gebeten, sich im Modell fortzubewegen, bis sie die acht Ziele gefunden hatten. Drücken Sie entweder eine Taste auf einer 3D-Maus (Gruppen gehen und drehen) oder eine Taste auf einer Tastatur (nur visuelle Gruppe), um sie anzuheben / abzusenken einen Kastendeckel, um zu sehen, ob sich ein Ziel darin befand. Die mit OpenPerformer geschriebene Virtual World-Software verhinderte, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr als ein Kastendeckel angehoben wurde. Eine weitere Taste wurde gedrückt, um anzuzeigen, dass ein Ziel gefunden wurde, wodurch es blau wurde. Das Modell wurde von einer SGI Onyx4-Grafik-Workstation mit 60 Bildern / s und einer Gesamtsystemlatenz von ca. 50 ms gerendert.

Die Teilnehmer des Spaziergangs gingen groupphysisch durch das Labor, während sie das entsprechende virtuelle Modell in Stereo auf einem Virtual Research V8 HMD (48) betrachteten ($\times 36^\circ$ FOV; 100% binokulare Überlappung; siehe Abbildung 1 (d)). Die Position und Ausrichtung des Kopfes eines Teilnehmers wurde mit einem WorldViz PPT und einem Intersense InertiaCube2 in sechs Freiheitsgraden verfolgt.

Die Teilnehmer der Rotationsgruppe standen an einem Ort und betrachteten die virtuelle Welt in Stereo auf dem HMD. Sie erreichten Bewegung, indem sie sich physisch drehten, vom InertiaCube2 verfolgt wurden, aber eine Taste auf der 3D-Maus gedrückt hielten, um mit einer Geschwindigkeit von 1 m / s zu übersetzen.

Die Teilnehmer der Nur-Visuell-Gruppe betrachteten eine Nonstereo-Ansicht der virtuellen Welt. Dies wurde auf einem 21-Zoll-Monitor und dem grafischen Sichtfeld dargestellt ($48^\circ \times 39^\circ$) war ähnlich dem Winkel, den der Monitor aus einem normalen Betrachtungsabstand (600 mm) einlegte. Wenn die Teilnehmer den Aufwärtskurve gedrückt hielten, fuhren sie mit einer Geschwindigkeit von 1 m / s in die Richtung, in die sie blickten. Die Blickrichtung wurde mit der Maus gesteuert, wobei die Tonhöhe direkt proportional zum vertikalen Versatz des Cursors von der Bildschirmmitte war (bis zu $\pm 90^\circ$) und Kursänderung mit einer Geschwindigkeit, die proportional zum horizontalen Versatz des Cursors von der Bildschirmmitte war (maximale Drehgeschwindigkeit = 135 Grad / Sek.).

Für alle drei Gruppen wurde die virtuelle Augenhöhe auf 1,65 m initialisiert, um sicherzustellen, dass jeder über die Oberseite der Zylinder sehen konnte. Die Teilnehmer wurden daran gehindert, sich außerhalb des virtuellen Raums zu bewegen, entweder durch einen Kollisionserkennungsalgorithmus, der sie entlang seiner Wände (rotierende und nur visuelle Gruppen) oder an den physischen Wänden des Raums (Gehgruppe) bewegte. In allen drei Gruppen konnten die Teilnehmer frei durch die Zylinder fahren. Die Lauf- und Rotationsgruppen wurden mit einer Stereoansicht versehen, da auf diese Weise normalerweise HMDs verwendet werden, während Desktop-Displays im Allgemeinen im Nicht-Stereo-Modus verwendet werden.

4.1.3 Verfahren. Jeder Teilnehmer der rein visuellen Gruppe führte vier Übungsversuche durch, um sich mit den Steuerelementen der Benutzeroberfläche und der Suchaufgabe vertraut zu machen, und führte dann vier Testversuche durch. Die Teilnehmer der Geh- und Rotationsgruppen führten zwei Übungsversuche mit demselben System wie die nur visuelle Gruppe durch, dann zwei weitere Übungsversuche und die vier Testversuche mit der für ihre Gruppe relevanten Bewegungsart (Gehen oder Drehen). Dies ermöglichte es den Teilnehmern, sich zunächst mit der Aufgabe vertraut zu machen, während sie vor einem Monitor saßen, anstatt ein HMD zu tragen, das den Experimentator verdeckte.

Die Teilnehmer wurden darüber informiert, dass sich die Ziele immer in den Boxen befanden, ihre Positionen sich jedoch zwischen den Versuchen änderten. Sie wurden gebeten, die Aufgabe so effizient wie möglich zu erledigen und nicht jedes Kästchen mehr als einmal anzukreuzen. Es wurde kein Feedback zur Leistung der Teilnehmer oder zu ihrer Suchstrategie gegeben.

Im Durchschnitt brauchte jeder Teilnehmer eine Stunde, um das Experiment abzuschließen. Teilnehmer, die das HMD verwendeten, machten nach jedem HMD-Versuch eine kurze Pause und wurden am Ende des Experiments eine weitere Stunde lang mit dem überwacht

Checkliste für kurze Symptome [Cobb et al. 1999] als Standardvorkehrung gegen die Krankheit der virtuellen Umgebung; es traten nur geringfügige Symptome auf.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

In jedem Versuch wurde die Leistung eines Teilnehmers entweder als perfekt oder als unvollständig eingestuft. Eine perfekte Suche war eine, bei der jedes Ziel / Lockvogel nur einmal überprüft wurde (die Teilnehmer hatten keine Vorkenntnisse darüber, welche Kästchen Ziele enthielten, aber das Aktivieren jedes Kästchens einmal garantierte Erfolg), während unvollständige Suchvorgänge diejenigen waren, bei denen mindestens ein Ziel oder Köder erneut überprüft wurde. Um den Effekt zu analysieren

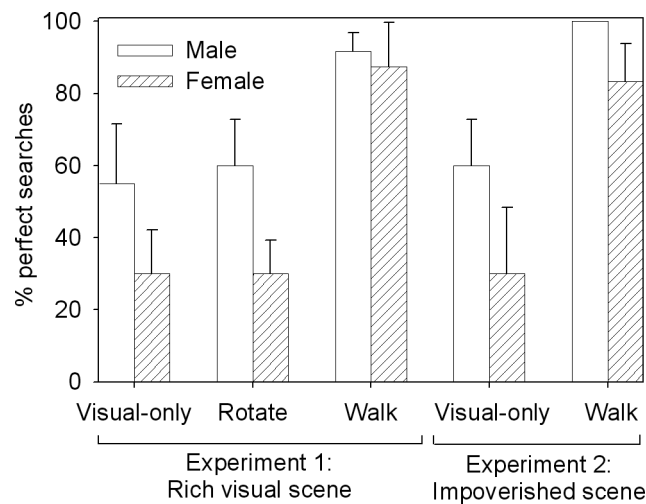


Abb. 2. Mittlerer Prozentsatz der von den Teilnehmern durchgeführten perfekten Suche. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.

Da verschiedene Navigationsoberflächen die Fähigkeit der Teilnehmer hatten, Hindernisse zu vermeiden, wurde die Rate berechnet, mit der die Teilnehmer mit den Zylindern kollidierten.

Erste Analysen zeigten keine signifikanten Änderungen der Leistung oder Kollisionen während der Testversuche. Daher wurden die Daten über Versuche gemittelt und unter Verwendung von zwei Faktoren (Bewegung) analysiert \times Geschlecht) zwischen Teilnehmer-Varianzanalysen (ANOVAs). Es wurde eine Quadratsummenberechnung vom Typ III verwendet, die für ein unausgeglichenes Design geeignet ist (aufgrund der zufälligen Zuordnung von Teilnehmern zu Gruppen gab es fünf Männer in der rotierenden und nur visuellen Gruppe, aber sechs in der Gehgruppe). Es gab keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen Bewegung und Geschlecht.

4.2.1 Suchleistung. Die Gehgruppe führte viel mehr perfekte Suchvorgänge durch als die rotierenden und nur visuellen Gruppen (siehe Abbildung 2), und eine ANOVA zeigte signifikante Bewegungseffekte. $F(2, 24) = 10,11$, $p < .01$ und Geschlecht,

$F(1, 24) = 4,26$, $p < .05$. Bonferroni-Post-hoc-Tests zeigten, dass Teilnehmer, die gingen, signifikant perfektere Suchvorgänge durchführten als Teilnehmer der rotierenden und nur visuellen Gruppen ($p < .01$ in beiden Fällen); Die beiden letztgenannten Gruppen sind gleichwertig.

Um die Sucheizienz jedes Versuchs zu quantifizieren, wurde der Pfad eines Teilnehmers bei jeder Überprüfung durch gerade Liniensegmente zwischen dem Startpunkt und dem Zentrum der Ziele / Täuschkörper angenähert und dann mit dem kürzestmöglichen Pfad verglichen, der alle 16 Ziele / besuchte Lockvögel. Der kürzeste Weg wurde unter Verwendung eines umfassenden Algorithmus für reisende Verkäufer berechnet, der von den Autoren geschrieben wurde, und Pfade berechnet, die am 16. endeten in Ziel / Köder, im Gegensatz zu herkömmlichen Versionen des Algorithmus, die Pfade berechnen, die an derselben Stelle beginnen und enden. Teilnehmer in der Gehbedingung reisten durchschnittlich 7% weiter als der kürzeste Weg, während Teilnehmer in der Rotations- und Nur-Sicht-Bedingung 32% bzw. 46% weiter reisten.

Tabelle I. Anzahl der Versuche, bei denen eine bestimmte Anzahl von Zielen / Ködern erneut überprüft wurde (· 0 = perfekte Suche; ein oder mehrere Ziele / Täuschkörper = unvollständige Suche). Experiment 1 verwendete die Reichen

Szene und Experiment 2 der verarmte

Gruppe	Visuelle Szene	Anzahl der Ziele / Täuschkörper erneut überprüft															
		0 ·	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Gehen	Reich	36	3		1												
	Verarmt 36		1	2		1											
Drehen	Reich	18	10	3	1	1	2	1	1						1		1
Nur visuell	Reich	17	7	2	5	1	1	1	2						2		1
	Verarmt 18		2	2	1	1	2					3			2	3	1
																	3
																	2

Bei Versuchen, die nicht perfekt durchgeführt wurden, gab es große Leistungsschwankungen (siehe Tabelle I). Die Teilnehmer der Wandergruppe machten nur kleine Fehler, indem sie entweder ein Kästchen (3 Versuche) oder drei Kästchen (1 Versuch) erneut ankreuzten. Im Gegensatz dazu überprüften die Teilnehmer der Rotations- und der Nur-Sicht-Gruppe in 20% bzw. 22,5% der Versuche mindestens ein Viertel (vier oder mehr) der Kästchen. Der Unterschied zwischen einem typischen Versuch und dem schlechtesten Versuch für jede Gruppe ist in Abbildung 3 dargestellt. Bei dem schlechtesten Versuch von allen (Bild oben rechts in Abbildung 3) hat der betroffene Teilnehmer jedes Kästchen durchschnittlich vier Mal zuvor angekreuzt das endgültige Ziel finden!

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Gehen einen dramatischen Effekt hatte. Die Wandergruppe zeigte eine vergleichbare Leistung wie Teilnehmer einer anderen Studie, die an einer ähnlichen Aufgabe in der realen Welt teilgenommen hatten (90% der Versuche waren perfekt) [Lessels und Ruddle 2005]. Im Gegensatz dazu war die Leistung ähnlich, wenn die Teilnehmer nur mit visuellen Informationen suchen mussten, wenn keine translatorischen körperbasierten Informationen bereitgestellt wurden (die rotierende Gruppe). Die Ergebnisse für diese beiden Gruppen zeigen auch, dass die Bereitstellung einer Stereoansicht keinen Einfluss auf die Leistung hatte.

Männer übertreffen Frauen häufig bei räumlichen Aufgaben [Waller 2000]. Dies traf zwar auf unsere rotierenden und nur visuellen Gruppen zu, aber wenn die Teilnehmer gingen, war der Unterschied zwischen den Geschlechtern minimal. Diese Verringerung der geschlechtsspezifischen Unterschiede wurde auch beobachtet, als den Teilnehmern ein breites Sichtfeld zur Verfügung gestellt wurde [Czerwinski et al. 2002].

4.2.2 Hindernisvermeidung. Inspektion der Teilnehmerpfade (siehe Abbildung

3) zeigt, dass die Gehgruppe dazu neigte, sich um Zylinder zu bewegen, die anderen Gruppen jedoch durch sie fuhren. Für jeden Versuch berechneten wir die Kollisionsrate als die Häufigkeit, mit der der Pfad einen Zylinder kreuzte, geteilt durch die zurückgelegte Strecke (klar, längere Pfade hätten mehr Kreuzungen). Zur Berechnung der Entfernung wurde Jitter, der durch Sensorrauschen in den Positionsdaten der Gehgruppe verursacht wurde, mit zwei Durchgängen eines Butterworth-Tiefpassfilters entfernt [Winter 1990].

Die Gehgruppe kollidierte weniger als halb so oft wie die rotierenden und nur visuellen Gruppen (siehe Abbildung 4). Eine ANOVA zeigte einen Haupteffekt der Bewegung, $F(2, 24) = 24,13, p < .001$ - und Bonferroni-Post-hoc-Tests zeigten, dass der Unterschied zwischen der Gehgruppe und jeder der anderen Gruppen signifikant war ($p < .001$ in beiden Fällen); es gab keine Auswirkung des Geschlechts, $F(1, 24) = 2,28, p > .05$. Mit anderen Worten, die Gehoberfläche half den Teilnehmern, Hindernissen auszuweichen, obwohl keine Kollisionserkennung oder Rückmeldung bereitgestellt wurde. Dies ist das erste Mal, dass solche Verhaltensunterschiede quantifiziert wurden, und die Ergebnisse unterstützen dies

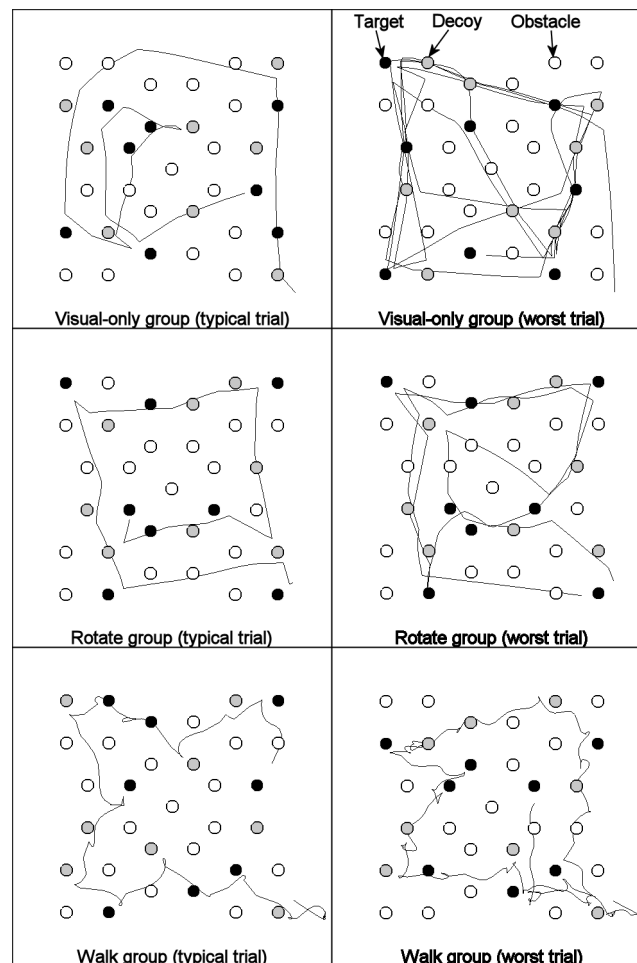


Abb. 3. Von den Teilnehmern während eines typischen (Medianleistung in Bezug auf die Anzahl der erneut überprüften Ziele / Täuschkörper) und des schlechtesten Versuchs für jede Gruppe in Experiment 1 verfolgte Pfade.

anekdotische Beobachtungen in früheren Studien [Witmer et al. 2002; Zambaka et al. 2005].

5. EXPERIMENT 2

Die visuelle Umgebung im ersten Experiment enthielt viele hervorstechende Umgebungsmerkmale (z. B. Tür, Schränke und Computer; siehe Abbildung 1), die den Teilnehmern möglicherweise dabei geholfen haben, ihre Orientierung beizubehalten und somit die Teile der Umgebung zu identifizieren, die (nicht) vorhanden waren. wurde gesucht. Um zu untersuchen, ob die Teilnehmer nur dann effizient navigieren können, wenn sowohl umfassende visuelle Informationen als auch Ganzkörperinformationen bereitgestellt werden, haben wir ein zweites Experiment mit einem verarmten virtuellen Modell durchgeführt.

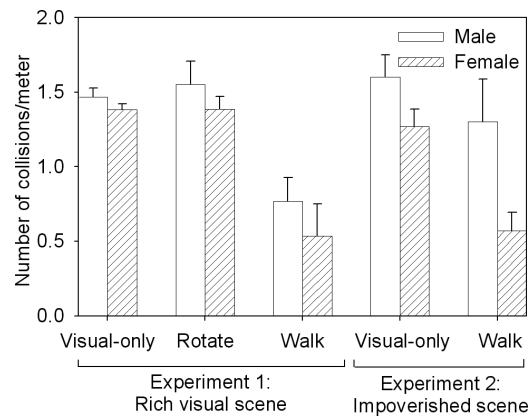


Abb. 4. Mittlere Anzahl von Kollisionen mit Zylindern pro zurückgelegtem Meter; Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

5.1 Methode

5.1.1 Teilnehmer. Zwanzig neue Teilnehmer (8 Männer; 12 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 22 Jahren ($SD = 4.0$) wurden rekrutiert und zufällig zwei Gruppen zugeordnet. Die Hälfte der Teilnehmer ging um das verarmte virtuelle Modell herum (Gehgruppe) und die anderen bewegten sich mit Maus und Tastatur (nur visuelle Gruppe). Eine Rotationsgruppe wurde nicht verwendet, da in Experiment 1 die Leistung der Rotations- und Nur-Sicht-Gruppen ähnlich war.

5.1.2 Materialien und Verfahren. Das verarmte Modell enthielt nur die Zylinder, Kästen, Ziele und vier grauen Wände (siehe Abbildung 1 (c)) und lieferte weit weniger visuelle Informationen, die ein Teilnehmer verwenden konnte. Das Verfahren war das gleiche wie für Experiment 1.

5.2 Ergebnisse und Diskussion

Erste Analysen der Daten zeigten keine Auswirkung der Versuchsnummer, wie im Experiment 1 wurden die Daten über Versuche für die folgenden Analysen gemittelt. Aufgrund der zufälligen Zuordnung der Teilnehmer zu Gruppen gab es fünf Männer in der nur visuellen Gruppe und vier in der Gehgruppe. Die verwendete Berechnung der Quadratsummen vom Typ III ist jedoch für ein unausgeglichenes Design geeignet.

Ein Zwei-Faktor (Bewegung \times Geschlecht) ANOVA zeigte, dass die Wandergruppe signifikant perfektere Suchvorgänge durchführte als die nur visuelle Gruppe.

$F(1, 16) = 12,80, p < .005$, aber der Unterschied zwischen Männern und Frauen war nicht signifikant, $F(1, 16) = 3,20, p > .05$ (siehe Abbildung 2).

Eine andere ANOVA (Bewegung \times Geschlecht \times visuelle Szene) verglich die Leistung der Walk- und Nur-Visual-Gruppen in den beiden Experimenten. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen der reichen und der verarmten visuellen Szene.

$F(1, 32) = 0,07, p > .05$, aber Männer führten wesentlich perfektere Suchen durch als Frauen, $F(1, 32) = 4,59, p < .05$; und wie erwartet führten Teilnehmer, die gingen, signifikant perfektere Suchvorgänge durch als die Teilnehmer in den nur visuellen Gruppen. $F(1, 32) = 28,07, p < .001$.

Wie in Experiment 1 wurde die Suche effizienz quantifiziert, indem die Pfade der Teilnehmer mit dem kürzestmöglichen Pfad verglichen wurden, der unter Verwendung eines Algorithmus für reisende Verkäufer berechnet wurde. Die Teilnehmer an der Gehbedingung reisten durchschnittlich 16% weiter als auf dem kürzesten Weg, verglichen mit 69% weiter für die Nur-Sicht-Bedingung.

In Bezug auf die Vermeidung von Hindernissen in Experiment 2 zeigte eine ANOVA, dass die Gehgruppe signifikant seltener mit Zylindern kollidierte als die nur visuelle Gruppe. $F(1, 16) = 8,95, p < .01$, und Frauen kollidierten seltener als Männer, $F(1, 16) = 10,21, p < .01$. Männer in der Gehgruppe kollidierten doppelt so oft wie in Experiment 1 (siehe Abbildung 4).

Die Leistung der Teilnehmer wurde von der Detailgenauigkeit in der visuellen Szene weitgehend nicht beeinflusst, was darauf hinweist, dass für eine effiziente Navigation vollständige körperbasierte Informationen erforderlich sind, eine reichhaltige visuelle Szene jedoch nicht. Die erhöhte Kollisionsrate männlicher Wanderer in Experiment 2 verdient weitere Untersuchungen.

6. SUCHPFAD

In beiden Experimenten war die Leistung der Teilnehmer der Gehgruppe der der Teilnehmer der anderen Gruppen bei weitem überlegen. Um zu verstehen, warum, wurden die Wege, denen die Teilnehmer in den beiden Experimenten folgten, zusammen auf drei Detailebenen analysiert.

Zunächst wurde die in früheren Untersuchungen verwendete Methode (Bestimmung der Reihenfolge, in der jeder Quadrant der Umgebung besucht wurde [Lessels and Ruddle 2005]) als (a) Perimeter klassifiziert (die Teilnehmer überprüften zunächst die Ziele / Täuschkörper um die Umgebung) Umfang der Umgebung und überprüfte dann diejenigen, die sich in der Mitte befanden) (b) Rasenmäher (Suche in einer Reihe paralleler Fahrspuren) oder (c) andere (2% der Versuche umfassten keine einzige klare Strategie). Aperiometer Die Strategie war unabhängig von der Gruppen- oder Sucheleistung der Teilnehmer dominant. In den Gehgruppen betrafen 79% der perfekten Suchvorgänge die Perimeterstrategie. In den Gruppen "Rotieren" und "Nur visuell" wurde eine Perimeterstrategie für 68% perfekte Suchvorgänge verwendet und 67% der ineffizientesten Suchanfragen (bei denen mindestens die Hälfte der Ziele / Täuschkörper erneut überprüft wurde).

Die Umgebung enthielt acht Blöcke mit jeweils vier Zylindern, und in jedem Versuch war ein Zylinder in jedem Block ein Ziel und ein anderer ein Köder (siehe Abschnitt)

4.1.2). Die zweite Analyse umfasste nur Versuche, bei denen eine Perimeterstrategie verwendet wurde, und verglich die Pfade der Teilnehmer auf der Detailebene der Blöcke. Jeder Pfad wurde als eine Folge von Blöcken ausgedrückt (siehe 5) und Maße wie die Sequenzlänge, die Anzahl der Vorkommen jeder Sequenz und die mittlere Bearbeitungsentfernung (mittlere Anzahl von Operationen, die erforderlich sind, um eine gegebene Sequenz in jede andere zu ändern Sequenzen wurden berechnet [Levenshtein 1966].

Bei perfekter Suche war die bestimmte Sequenz, die am häufigsten (21 Mal) auftrat, {1,2,3,4,5,6,7,8} (siehe 5 (a)). Dies war auch die Sequenz, die allen anderen am ehesten entsprach (mittlerer Bearbeitungsabstand = 1,7), obwohl die mittlere Länge der perfekten Suchsequenzen 9,0 Blöcke betrug ($SD =$

1,0). Mit anderen Worten, eine typische perfekte Suche bestand darin, sieben Blöcke einmal und einen Block zweimal zu überprüfen (der Köder des Blocks bei einer Gelegenheit und sein Ziel bei der anderen); Ein Beispiel für einen solchen Pfad ist in 5 (b) gezeigt.

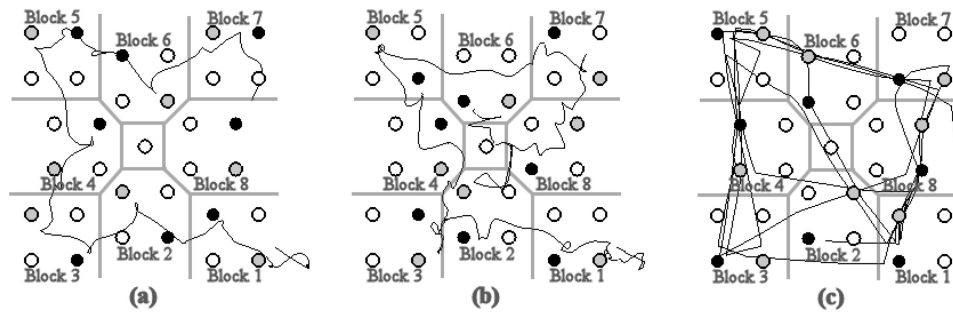


Abb. 5. Sequenzen, in denen Ziele (blau) und Täuschkörper (gelb) in jedem Block überprüft wurden: (a) Sequenz, die am häufigsten bei perfekten Suchvorgängen auftrat {1,2,3,4,5,6,7,8};; (b) perfekte Suchsequenz von durchschnittlicher Länge (9 Blöcke; {1,2,3,4,5,7,8,2,6}); und (c) ineffiziente Suche, bei der Ziele / Täuschkörper in sieben Blöcken überprüft wurden (in der folgenden Reihenfolge unterstrichen), bevor ein Ziel / Täuschkörper erneut besucht und die verbleibenden Ziele gefunden wurden (vollständige Sequenz)

{7,6,5,4,3,1,8 7,8,1,2,6,5,4,3,2,8,7,6,5,4,3,4,5,6,2,1,8,1,8,2,4 5,6,7,8,1,2}).

Die ineffizientesten Suchvorgänge (mindestens die Hälfte der erneut überprüften Ziele / Täuschkörper) hatten eine mittlere Sequenzlänge von 22,3 Blöcken ($SD = 5,7$), von denen 7,1 Blöcke besucht wurden, bevor das erste Ziel / der erste Köder erneut besucht wurde. Dies deutete darauf hin, dass die Teilnehmer in einen Teil der Umgebung zurückkehrten, bevor sie alle anderen überprüften. Ein Beispiel, in dem Block 2 anfänglich vernachlässigt wurde, ist in 5 (c) gezeigt.

Die dritte und feinste Detailebene für die Pfadanalyse konzentrierte sich auf das, was während des ersten Teils der Suche der Teilnehmer geschah. Jeder Versuch wurde in seine unterteilt *Primärphase* (Der Weg wurde zurückgelegt, bis ein Ziel oder ein Köder zweimal überprüft wurde. Für eine perfekte Suche war dies der gesamte Prozess *Sekundärphase* (alle nachfolgenden Bewegungen). Dann stellten wir für jedes Ziel, das in der Primärphase nicht gefunden wurde, fest, ob der Teilnehmer bereits daran vorbeigefahren war (a *Fräulein*) oder *vernachlässigt* um seine Lokalität zu besuchen, die mithilfe der Delaunay-Triangulation definiert wurde (siehe Abbildung 6). Die Definition des Ortes auf diese Weise bedeutete, dass Fehlschläge sich auf Situationen bezogen, in denen ein bestimmtes Ziel hätte überprüft werden müssen, weil nichts zwischen ihm und dem Teilnehmer lag, wohingegen in *vernachlässigen*

Ein Teilnehmer hätte sich an anderen Zylindern vorbei bewegen müssen, um das Ziel zu erreichen.

Die meisten Fehler waren *Vernachlässigung* (siehe Abbildung 7), wobei Fehlschläge nur eine sekundäre Ursache für die beobachteten Leistungsunterschiede sind. Die nur visuellen Gruppenmademanyomemisse als jede der anderen Gruppen, die entweder nie (Gehgruppe) oder kaum jemals (Rotationsgruppe) ein Ziel verfehlt haben. Die Teilnehmer beider letzterer Gruppen konnten während der Navigation durch einfaches Drehen des Kopfes (Rotationsbeweglichkeit) schnelle Seitenblicke werfen, wie dies zuvor bei der Navigation virtueller Gebäude festgestellt wurde [Ruddle et al. 1999].

7. ALLGEMEINE DISKUSSION

In dieser Studie sollten zwei Fragen beantwortet werden: (1) Warum finden Benutzer die Navigation in virtuellen Welten so viel schwieriger als in der realen Welt, und (2) wie sollten wir das Gelernte auf VE-Anwendungen anwenden? Antworten auf diese Fragen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

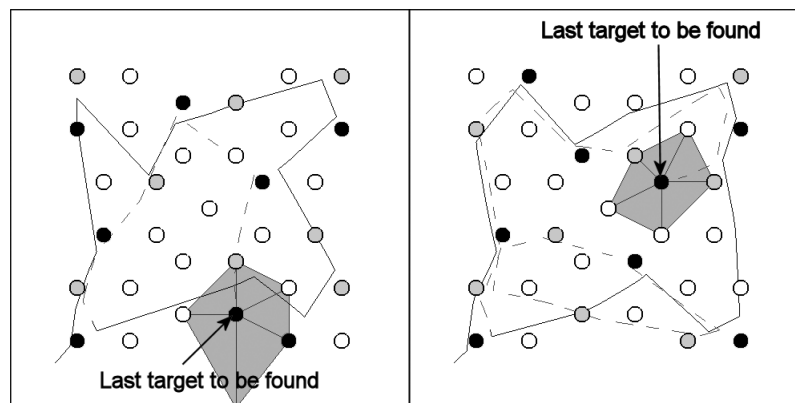


Abb. 6. Beispiele für a *Fräulein* (links) und *Vernachlässigung* (rechts). Der schattierte Bereich zeigt die Lokalisation des letzten Ziels. Der in der Primärphase verfolgte Pfad ist eine durchgezogene Linie und in der Sekundärphase ist er gestrichelt.

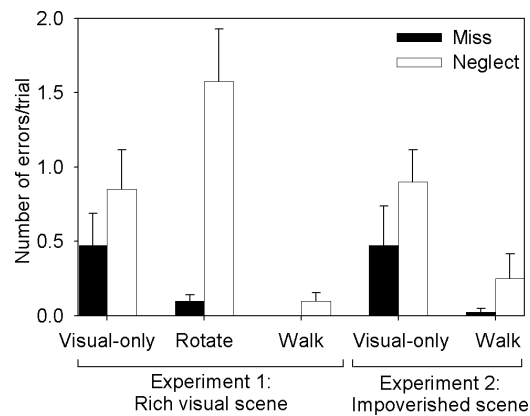


Abb. 7. Mittlere Anzahl von *Fräulein* und *vernachlässigten* Fehler in jedem Versuch; Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

7.1 Warum ist es schwierig, in virtuellen Welten zu navigieren?

Die Forschung zu dieser Frage hat sich auf drei Faktoren konzentriert: Umweltflexibilität, Sichtfeld und Bewegungsflexibilität [Waller et al. 1998]. Umgebungsflexibilität bezieht sich hauptsächlich auf die Menge an visuellen Details, die in einem VE-Modell enthalten sind, und obwohl für ästhetische Zwecke (z. B. in Computerspielen) Umgebungen mit hoher Feinheit erforderlich sein können, hat die Forschung durchweg gezeigt, dass Landmarken oder reichhaltige visuelle Elemente hinzugefügt werden Szenen führen bestenfalls zu einer bescheidenen Verbesserung der Navigationsleistung [Ruddle et al. 1997; Ruddle 2005; Steck und Mallot 2000]. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie verleihen dieser Schlussfolgerung weiteres Gewicht.

Es wurde gezeigt, dass ein breites Sichtfeld die Leistung bei grundlegenden räumlichen Aufgaben wie der Pfadintegration verbessert [Riecke et al. 2002] und enge Sichtfelder beeinflussen die Wahrnehmung eines Raumes [Alfano und Michel 1990]. Ein breites Sichtfeld hat jedoch wie die Umweltverträglichkeit nur eine bescheidene Wirkung, wenn komplexere Aufgaben wie z

als Navigationssuche werden in VEs durchgeführt [Lessels and Ruddle 2004; Ruddle und Jones 2001].

Im Gegensatz zu den beiden anderen Faktoren haben körperbasierte Informationen (dh Bewegungsflexibilität) bei beiden Grundaufgaben einen großen Einfluss auf die Leistung [Bakker et al. 1999; Klatzky et al. 1998] und die Aufgabe der vorliegenden Studie der Navigationssuche. Dies wird durch Untersuchungen zur Bildgebung des Gehirns von Ratten untermauert, die zeigten, wie das Brennen von Hippocampus-Ortszellen durch motorische Eingaben beeinflusst wurde (für eine Übersicht über die Forschung auf diesem Gebiet siehe Brotons-Mas et al. [2006]).

In der vorliegenden Studie waren sowohl translatorische als auch rotationskörperbasierte Informationen (die Gehgruppe) für eine effiziente Navigation erforderlich. Wenn nur die Rotationskomponente bereitgestellt wurde (die Rotationsgruppe) oder keine der Komponenten (die nur visuelle Gruppe), wurde der Prozess des Erinnerns, wohin man gereist war, viel fehleranfälliger, und dies wurde weitgehend nicht beeinflusst, ob es sich um eine reiche oder eine arme Gruppe handelte. Eine verarmte visuelle Szene wurde zur Verfügung gestellt. Die Pfadanalyse ergab, dass die von den Teilnehmern verfolgte Gesamtstrategie (Umfang vs. Rasenmäher) keinen Einfluss auf die Leistung hatte. Unterschiede wurden jedoch deutlich, wenn die Pfaddaten auf feineren Detailebenen analysiert wurden. Dies führte uns zu der Hypothese, dass die Wandergruppe perfektere Suchen durchführte, weil

(a) Das Gehen erhöhte die Beweglichkeit der Teilnehmer, was es einfacher machte, davon abzuweichen

Ziele und Täuschkörper (es ist bekannt, dass kleine Zeitunterschiede bei den Interaktionskosten einen großen Einfluss auf die Leistung haben können [Gray und Fu 2001]); oder

(b) es war nur, wenn translatorische und rotationskörperbasierte Informationen waren

vorausgesetzt, die Teilnehmer konnten sich genau erinnern, wohin sie (nicht) gereist waren (räumliche Aktualisierung [Loomis et al. 1999]).

Die Dominanz von Vernachlässigungsfehlern zeigt, dass die räumliche Aktualisierung (Hypothese (b)) die Hauptursache für die beobachteten Leistungsunterschiede war. Der große Unterschied zwischen der Geh- und der Rotationsgruppe in Experiment 1 hat die entscheidende Rolle hervorgehoben, die die translatorische Komponente der Bewegung bei der Aktualisierung des eigenen Standorts während der Navigation spielt.

7.2 Nutzung körperbasierter Informationen in VE-Anwendungen

Unsere Studie umfasste bei weitem die bislang komplexeste Navigationsaufgabe, bei der in einem VE ein reales Leistungsniveau erreicht wurde, und ist somit ein bemerkenswerter Schritt zur Schaffung von Umgebungen, die in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit eine virtuelle „Wirklichkeit“ sind. Für einige Anwendungen würden Benutzer unmittelbare Vorteile aus einer Laufschnittstelle ziehen, die mit der in unserer Studie identischen identisch ist, da die beteiligten Räume klein genug sind, um von der aktuellen Technologie im Maßstab 1: 1 verfolgt zu werden. Beispiele für geeignete Anwendungen sind die Gestaltung des Layouts von Kontrollräumen oder die Herstellung von Zellen in einer Fabrik. Dabei handelt es sich häufig um überfüllte Räume, und es sollte betont werden, dass, wie aus unseren Verhaltensdaten hervorgeht, eine Gehoberfläche den Teilnehmern das Manövrieren um Hindernisse erleichtert hat.

In anderen Anwendungen (z. B. Architekturdesign, Schulung für Notevakuierung und virtueller Tourismus) müssen Benutzer in großen Umgebungen wie Gebäuden oder Städten navigieren. Dies unterscheidet sich eindeutig von der Navigation in einem Raum, aber es gibt bemerkenswerte Parallelen in (a) der großen Minderheit der Teilnehmer, die Schwierigkeiten beim Navigieren haben (30 +% in großen Räumen [Ruddle 2001] gegenüber 20 +% der Versuche in der derzeitige Studie); und (b) die Tendenz der Teilnehmer sowohl in großen als auch in raumgroßen Räumen, bestimmte Teile wiederholt zu durchsuchen, während andere unberührt bleiben. Weitere Forschung ist in zwei verschiedenen Bereichen erforderlich.

Zunächst müssen wir feststellen, ob die Navigationsvorteile, die durch das tatsächliche Gehen erzielt werden, auch für Schnittstellen wie das Gehen an Ort und Stelle gelten [Slater et al. 1995; Templeman et al. 1999; Whitton et al. 2005] und Laufbänder [Darken et al. 1997; De Luca et al. 2007; Hollerbach et al. 2003; Iwata et al. 2005]. Diese liefern körperbasierte Informationen aus einer propriozeptiven Quelle (Muskelbewegung) für die Translations- und Rotationskomponenten der Bewegung, jedoch nur aus einer vestibulären Quelle (Gleichgewichtssystem) für die Rotationskomponente. Die propriozeptive Quelle ist für eine optimale Leistung bei grundlegenden räumlichen Aufgaben wesentlich [Bakker et al. 1999; Peruch et al. 2005], aber der Beitrag der vestibulären Quelle bleibt eine offene Frage. Obwohl Bewegungsaspekte auf niedriger Ebene unter Verwendung von Laufflächen und Laufbandschnittstellen untersucht wurden (z. [Hollerbach et al. 2003; Pelah und Koenderink 2007; Whitton et al. 2005]) ist die Auswirkung auf die Navigation in großem Maßstab unbekannt.

Zweitens sind Untersuchungen erforderlich, um festzustellen, ob die Navigation beeinträchtigt ist, wenn die Schnittstellen dann angepasst werden, um die Verwendung von VEs zu ermöglichen, wenn Schnittstellen wie Walk-in-Place und Laufbänder die Erzielung einer realen Navigationsleistung in VEs ermöglichen Anzeigen, die einen Benutzer nur teilweise umgeben (z. B. dreiseitige CAVE oder 180° gekrümmte Projektionsfläche), beispielsweise durch die Implementierung einer umgeleiteten Gehtechnik [Razzaque et al. 2002].

Schließlich übertrafen Männer Frauen in unserer Studie, aber das Ausmaß dieses Unterschieds war für die Gehgruppe viel geringer als für die anderen Gruppen. Moderne VE-Anwendungen haben eine vielfältige Benutzerpopulation, daher sind Interaktionstechniken zu begrüßen, die die Leistungsunterschiede zwischen Personen verringern.

VERWEISE

- EINFANO, PL UND M. ICHEL, GF 1990. Einschränkung des Sichtfeldes: Wahrnehmungs- und Leistungseffekte. *Perceptual Motor Skills* 70, 35–45. B. AKKER, NH, W. ERKHOVEN, PJ, UND P. ASSENIER, PO 1999. Die Auswirkungen von propriozeptivem und visuellem Feedback auf die geografische Ausrichtung in virtuellen Umgebungen. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 8, 36–53.
- B. OWMAN, DA, K. RULIFF, E., L. AVIOLA, JJ, UND P. OUPYREV, I. 2004. *3D-Benutzeroberflächen: Theorie und Trainieren*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- B. DÄCHER, FP, A. IREY, J., A. LSPAUGH, J., B. ELL, A., B. ROWN, R., H. KRANK, C., N. IMSCHECK, U., R. HEINGANS, P., R. OHLF, J., S. MITH, D., T. URNER, D., V. ARSHNEY, A., W. ANG, Y., W. EBER, H., UND Y. UAN, X. 1992. Sechs Generationen von Komplettlösungen: Technischer Abschlussbericht an die National Science Foundation. Technik. rep.TR92-026, Institut für Informatik, Universität von North Carolina, Chapel Hill. B. ROTONS- M. WIE, JR, O ' MARA, S., UND S. ANCHEZ- V. IVES, MV 2006. Neuronale Verarbeitung räumlicher Informationen: Was wir über Ortszellen wissen und was sie uns über Präsenz sagen können. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 15, 485–499. C. HANCE, SS, G. TANTE, F., B. EALL, AC, UND L. OOMIS, JM 1998.

Fortbewegungsmodus nach

Beeinflusst die Aktualisierung von Objekten, die während der Reise angetroffen werden: Der Beitrag des Vestibulars

und propriozeptive Eingaben zur Pfadintegration. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 7, 168–178.

C. OBB, SVG, N. ICHOLS, S., R. AMSEY, EIN., UND W. ILSON, JR 1999. Durch virtuelle Realität induzierte Symptome und Wirkungen (VRSE). *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 8, 169–186. C. ZERWINSKI, M., T. EIN, DS, UND R. OBERSTON, GG 2002. Frauen vertreten eine breitere Sichtweise. Im *Verfahren der SIGCHI-Konferenz über Human Factors in Computersystemen*. ACM, New York, 195–202. D. ARKEN, RP, C. OCKAYNE, WR, UND C. ARMEIN, D. 1997. Das omnidirektionale Laufband: A.

Fortbewegungsgerät für virtuelle Welten. Im *Vorträge des 10. jährlichen ACM-Symposiums zu Software und Technologie für Benutzeroberflächen*. ACM, New York, 213–221. D. E. L. UCA, A., M. ATTONE, R., UND R. OBUFFO G IORDANO, S. 2007. Steuerung des CyberCarpet auf Beschleunigungsniveau. Im *Vorträge der IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

IEEE Press, Los Alamitos, CA, 2330–2335. F. OO, P., W. ARREN, WH, D. UCHON, EIN., UND T. ARR, MJ 2005. Integrieren Menschen Routen in eine kognitive Karte? Karten- und Orientierungspunktnavigation neuartiger Verknüpfungen. *J. Exper. Psych. Lernen. Gedächtniskognition* 31, 195–215. G SCHIMPFEN, SC UND M. ALTER, LE 1998. Beiträge der Propriozeption zur Navigation in virtuellen Umgebungen. *Human Factors* 40, 489–497. G STRAHL, WD UND F. U. W. 2001. Perfektes Wissen in der Welt für unvollkommenes Wissen im Kopf ignorieren: Implikationen rationaler Analyse für das Interface-Design. Im *Vorträge der SIGCHI-Konferenz über Human Factors in Computersystemen*. ACM, New York, 112–119. H. OLLERBACH, JM, C. HECCACCI, D., N. OMA, H., Y. ANAGIDA, Y., UND T. ETSUTANI, N. 2003. Simulation von Seitenschrägen an Fortbewegungsschnittstellen unter Verwendung von Rumpfkraften. Im *Vorträge des 11. Symposiums über haptische Schnittstellen für virtuelle Umgebungen und Teleoperation*. IEEE Press, 91–98. ICH WATA, H., Y. ANO, H., F. UKUSHIMA, H., UND N. OMA, H. 2005. CircularFloor: Eine Fortbewegungsschnittstelle unter Verwendung der Zirkulation von beweglichen Fliesen. Im *Tagungsband der IEEE Virtual Reality Conference*. IEEE Press, 223–230.

K. LATZKY, RL, L. OOMIS, JM, B. EALL, AC, C. HANCE, SS, UND G OLLEDGE, RG 1998. Räumliche Aktualisierung der Selbstposition und Orientierung während der realen, imaginären und virtuellen Fortbewegung. *Psych. Wissenschaft* 9, 293–298.

L. ATHROP, WB UND K. AISER, MK 2002. Wahrgenommene Orientierung in physischer und virtueller Funktion der verfügbaren idiothetischen Informationen. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 11, 19–32. L. ESSELS, S. UND R. UDDLE, RA 2005. Bewegung in realen und virtuellen überfüllten Umgebungen. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 14, 580–596. L. ESSELS, S. UND R. UDDLE, RA 2004. Änderungen im Navigationsverhalten, die durch ein weites Sichtfeld und eine hochflexible visuelle Szene hervorgerufen werden. Im *Ablauf des Workshops zu virtuellen Umgebungen*.

S. Coquillart et al. Hrsg., Eurographics Association, 71–78.

L. EVENSSTEIN, VI 1966. Binärcodes, die Löschungen, Einfügungen und Umkehrungen korrigieren können.

Sowjetische Physik Doklady 10, 707–710. L. OOMIS, JM, K. LATZKY, RL, G. OLLEDGE, RG, UND P. HILBECK, JW 1999. Menschliche Navigation durch Pfadintegration. Im *Wegfindung: Kognitive Kartierung und andere räumliche Prozesse*, RG Golledge Ed., John Hopkins Press, Baltimore, MD, 125–151.

P. AUSCH, R., P. ROFFITT, D., UND W. ILLIAMS, G. 1997. Quantifizierung des Eintauchens in die virtuelle Realität. Im

Vorträge der 24. Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken,

ACM, New York, 13–18. P. ELAH, EIN. UND K. OENDERINK, JJ 2007. Editorial: Gehen in realen und virtuellen Umgebungen. *ACM*

Trans. Appl. Percep. 4, 1–4. P. ÉRUCH, P., B. OREL, L., M. AGNAN, J., UND L. ACOUR, M. 2005. Richtungs- und Entfernungsdefizite bei der Pfadintegration nach einseitigem vestibulären Verlust hängen von der Komplexität der Aufgabe ab. *Kognitive Gehirnforschung*

25, 862–872.

P. RESSON, CC UND M. ONTELLO, DR 1994. Aktualisierung nach rotatorischen und translatorischen Körperbewegungen: Koordinatenstruktur des perspektivischen Raums. *Wahrnehmung* 23, 1447–1455. R. AZZAQUE, S., S. WAPP, D., S. SPÄTER, M., W. HITTON, MC, UND S. TEED, A. 2002. Umgeleitetes Gehen an Ort und Stelle. Im *Ablauf des Workshops zu virtuellen Umgebungen*. W. Stürzlinger und S. Müller Hrsg., Eurographics Association, 123–130.

R. IECKE, SEIN UND B. ÜLTHOFF, HH 2004. Räumliche Aktualisierung in realer und virtueller Umgebung mente: Beitrag und Interaktion von visuellen und vestibulären Hinweisen. Im *Verfahren der*

1. *Symposium zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung*. ACM, New York, 9–17.

R. UDDLE, RA UND P. ÉRUCH, S. 2004. Auswirkungen von propriozeptivem Feedback und Umwelteigenschaften auf das räumliche Lernen in virtuellen Umgebungen. *Int. J. Hum. Comput. Zucht.* 60, 299–326. R. IECKE, BE, V. EIN V. EEN, HAHC, UND B. ÜLTHOFF, HH 2002. Visuelles Homing ist ohne Orientierungspunkte möglich: Eine Pfadintegrationsstudie in der virtuellen Realität. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 11, 443–473.

R. IESER, JJ 1989. Zugang zu Kenntnissen der räumlichen Struktur an neuartigen Beobachtungspunkten. *J. Exper. Psych. Lernen. Gedächtniskognition* 15, 1157–1165. R. UDDLE, RA UND L. ESSELS, S. 2006. Für eine effiziente Navigationssuche benötigen Menschen volle körperliche Bewegung, aber keine reichhaltige visuelle Szene. *Psych. Wissenschaft* 17, 460–465. R. UDDLE, RA 2005. Die Auswirkung von Trails auf die erstmalige und nachfolgende Navigation in einer virtuellen Umgebung. Im *Tagungsband der IEEE Virtual Reality Conference*. IEEE Press, 115–122. R. UDDLE, RA UND J. EINSEN, DM 2001. Bewegung in überfüllten virtuellen Umgebungen. *Gegenwart:*

Teleoperat. Virt. Environ. 10, 511–524. R. UDDLE, RA 2001. Navigation: Bin ich wirklich verloren oder praktisch da? Im *Technische Psychologie*

und kognitive Ergonomie vol. 6, D. Harris Ed., Ashgate, Burlington, VT, 135–142. R. UDDLE, RA, P. AYNE, SJ, UND J. EINSEN, DM 1999. Navigieren in großen virtuellen Umgebungen: Welche Unterschiede treten zwischen am Helm montierten und Desktop-Displays auf? *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 8, 157–168. R. UDDLE, RA, P. AYNE, SJ, UND J. EINSEN, DM 1997. Navigieren in Gebäuden in virtuellen Umgebungen auf dem Schreibtisch: Experimentelle Untersuchungen mit erweiterter Navigationserfahrung. *J. Exper. Psycho. Appl.* 3, 143–159. 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. Comput. Summen. Interagieren.* 2, 201–219. S. TECK, SD UND M. ALLOT, HA 2000.

Die Rolle globaler und lokaler Orientierungspunkte in virtuellen

Umgebungsnavigation. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 9, 69–83. T. EMPELMAN, JN, D. ENBROOK, PS, UND S. IBERT, LE 1999. Virtuelle Fortbewegung: Gehen Sie an Ort und Stelle durch virtuelle Umgebungen. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 8, 598–617. U. SOH, M., A. RTHUR, K., W. HITTON, MC, B. ASTOS, R., S. TEED, WIE SPÄTER, M., A. ND B. DÄCHER, FP 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. LIYAKAR, EIN, UND H. OLLERBACH, J. 2002. Auswirkung der Drehstrategie auf die Manövrierfähigkeit unter Verwendung der Treadport-Fortbewegungsschnittstelle. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 11, 247–258. W. ALLER, D. 2000. Individuelle Unterschiede beim räumlichen Lernen aus computer-simulierten Umgebungen. *J. Exper. Psych. Appl.* 6, 307–321. W. ALLER, D., H. UNT, E., UND K. NAPP, D. 1998.

Der Transfer von räumlichem Wissen in virtuell

Umweltraining. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.*, 7, 129–143. W. ALLER, D., L. OOMIS, JM, UND H. TANTE, DBM 2004. Körperbasierte Sinne verbessern das Wissen über Richtungen in großen Umgebungen. *Psychonomischer Bulle. Rev.* 11, 157–163. W. HITTON, MC, C. OHN, JV, F. STAFFELEI, J., Z. IMMONS, P., R. AZZAGUE, S., P. OULTON, SJ, M. CLEOD, B., UND

B. DÄCHER, FP 2005. Vergleich der VE-Fortbewegungsschnittstellen. Im *Tagungsband der IEEE Virtual Reality Conference*. IEEE Press, 123–130. W. INTER, DA 1990. *Biomechanik und Motorik der menschlichen Bewegung* 2nd Ed. Wiley-

Interscience, New York.

W. ITMER, BG, B. AILEY, JH, K. NERR, BW, UND P. ARSONS, KC 1996. Virtuelle Räume und reale Orte: Transfer von Routenwissen. *Int. J. Hum. Comput. Zucht.* 45, 413–428. W. ITMER, BG UND K. LINIE, PB 1998. Beurteilung der wahrgenommenen und zurückgelegten Entfernung in virtuellen Umgebungen. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 7, 144–167. W. ITMER, BG, S. ADOWSKI, W J, UND F. INKELSTEIN, NM 2002. VE-basierte Trainingsstrategien zum Erwerb von Umfragewissen. *Präsenz: Teleoperat. Virt. Environ.* 11, 1–18. Z. ANBAKA, CA, L. OK, BC, B. ABU, SV, U. LINSKI, AC, UND H. ODGES, LF 2005. Vergleich von Pfadvisualisierungen und kognitiven Maßnahmen in Bezug auf Reisetchniken in einer virtuellen Umgebung.

IEEE Trans. Visuell. Comput. Graph. 11, 694–705.

Eingegangen im Januar 2007; überarbeitet im November 2007; akzeptiert Juni 2008 von Alistair Sutcliffe.

ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 16, Nr. 1, Artikel 5, Erscheinungsdatum: April 2009.