

Vermeidung von Hindernissen beim Gehen in realen und virtuellen Umgebungen

PHILIP W. FINK

Florida Atlantic University

PATRICK S. FOO

Universität von North Carolina in Asheville und

WILLIAM H. WARREN

Universität Brown

Immersive virtuelle Umgebungen sind ein vielversprechendes Forschungsinstrument für die Untersuchung von Wahrnehmung und Handeln unter der Annahme, dass das visuell-motorische Verhalten in virtuellen und realen Umgebungen im Wesentlichen ähnlich ist. Wir haben dieses Problem auf das Bewegungsverhalten untersucht und die Allgemeingültigkeit des Lenkdynamikmodells von Fajen und Warren [2003] getestet. Die Teilnehmer gingen zu einem stationären Ziel und vermieden dabei ein stationäres Hindernis in abgestimmten physischen und virtuellen Umgebungen. Es gab kleine, aber zuverlässige Unterschiede in den Bewegungswegen mit einer größeren maximalen Abweichung ($= 0,16$ m), einer größeren Hindernisfreiheit ($= 0,16$ m) und einer langsameren Gehgeschwindigkeit ($= 0,13$ m / s) in der virtuellen Umgebung. Separate Modellanpassungen haben die mittleren virtuellen und physischen Pfade genau erfasst (R. \geq

0,98). Simulationen implizierten, dass die Pfadunterschiede nicht auf die Gehgeschwindigkeit oder eine 50% ige Entfernungskomprimierung in virtuellen Umgebungen zurückzuführen sind, sondern möglicherweise auf eine größere Unsicherheit über die egozentrische Position virtueller Hindernisse zurückzuführen sind. Andererseits hatten Pfade in beiden Umgebungen ähnliche Formen ohne Unterschied in der mittleren Krümmung und konnten mit einem einzigen Satz von Parameterwerten (R) modelliert werden ($\geq 0,95$). Die ursprünglichen Parameter von Fajen und Warren wurden erfolgreich auf neue virtuelle und physische Objektkonfigurationen verallgemeinert (R. $\geq 0,95$). Diese Ergebnisse rechtfertigen die Verwendung virtueller Umgebungen zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens.

Kategorien und Fachbeschreibungen: J.4 [**Computer Anwendungen**]: Sozial- und Verhaltenswissenschaften - *Psychologie*

Allgemeine Begriffe: Verifikation, Experimentieren, Theorie

Zusätzliche Schlüsselwörter und Sätze: Fortbewegung, virtuelle Realität, Modellierung

ACM-Referenzformat:

Fink, PW, Foo, PS und Warren, WH 2007. Vermeidung von Hindernissen beim Gehen in realen und virtuellen Umgebungen. ACMTrans. Appl. Percpt. 4, 1, Artikel 2 (Januar 2007), 18 Seiten. DOI = 10.1145 / 1227134.1227136 <http://doi.acm.org/10.1145.1227134.1227136>

1. EINLEITUNG

Die Virtual-Reality-Technologie bietet ein Werkzeug für die Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung und des menschlichen Handelns, nach dem Forscher auf diesem Gebiet seit langem gesucht haben. Es erlaubt uns, die Gesetze der Physik und Optik zu brechen, um zu testen

Autorenadressen: Philip W. Fink, Zentrum für komplexe Systeme und Gehirnwissenschaften, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida 33431; Patrick S. Foo, Institut für Psychologie, Universität von North Carolina in Asheville, Asheville, North Carolina 28801; William H. Warren, Institut für Kognitions- und Sprachwissenschaften, Brown University, Providence, Rhode Island 02912. Die Erlaubnis, digitale oder gedruckte Kopien eines Teils oder aller dieser Arbeiten für den persönlichen Gebrauch oder den Unterricht zu erstellen, wird ohne Gebühr erteilt, sofern keine Kopien angefertigt oder verteilt werden Gewinn oder direkter kommerzieller Vorteil, und dass Kopien diesen Hinweis auf der ersten Seite oder auf dem Startbildschirm einer Anzeige zusammen mit dem vollständigen Zitat anzeigen. Urheberrechte für Komponenten dieser Arbeit, die anderen als ACM gehören, müssen anerkannt werden. Das Abstrahieren mit Kredit ist erlaubt. Andernfalls zu kopieren, erneut zu veröffentlichen, Um auf Servern zu posten, auf Listen weiterzugeben oder eine Komponente dieser Arbeit 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 angefordert werden permissions@acm.org.

Hypothesen über wahrnehmungsgesteuertes Handeln durch Manipulation der Umgebung und visueller Informationen während des laufenden Verhaltens [Tarr und Warren 2002]. Es ermöglicht uns auch, auf explizite Beurteilungsaufgaben wie Größenschätzung, erzwungene Auswahl oder visuell gerichtete Aktion mit offenem Regelkreis zu verzichten und visuell gesteuerte Online-Aktionen im Prozess zu messen. Virtuelle Umgebungen bieten somit die Möglichkeit, naturalistisches visuell-motorisches Verhalten in das Labor zu bringen und es experimentell mit Informationsmanipulationen und geeigneten Kontrollen zu untersuchen. Insbesondere ambulante virtuelle Umgebungen, in denen der Teilnehmer mit einem am Kopf montierten Display (HMD) frei laufen kann, bieten ein neues Werkzeug, mit dem Theorien der visuell geführten Fortbewegung rigoros getestet werden können.

1.1 Wahrnehmung in virtuellen Umgebungen

Diese Begeisterung beruht auf der Annahme, dass das visuell-motorische Verhalten in immersiven virtuellen Umgebungen im Wesentlichen das gleiche ist wie in der realen Welt. In dieser Hinsicht gibt es Gründe zur Vorsicht. Wenn der Teilnehmer beispielsweise nach einem Objekt greift, um festzustellen, dass das Objekt virtuell ist, ändern sich die Greifeigenschaften aufgrund fehlender haptischer Rückkopplung und ähneln einer pantomimischen Version [Opitz et al. 1996]. Dies wirft die Frage auf, ob das bloße Wissen, dass man eine virtuelle Umgebung betrachtet, das visuell-motorische Verhalten verändern kann.

Es wird häufig beobachtet, dass die wahrgenommene Größe des virtuellen Raums selbst unter vollständigen visuellen Informationsbedingungen ungenau ist. In einer extremen Darstellung dieses Punktes bemerken die Teilnehmer nicht die allmähliche Ausdehnung eines strukturierten virtuellen Raums um den Augenpunkt um bis zu 200%, obwohl genaue binokulare Disparität und Bewegungsparallaxe verfügbar sind [Glennerster et al. 2006]. Größenbeurteilungen bei 3 und 6 m werden von der Größe des Testobjekts relativ zum Raum dominiert, obwohl Beurteilungen bei nahen Entfernungen (1,5 m) von Disparität und Bewegung dominiert werden. Bewegungsparallaxe scheint sowohl in realen als auch in virtuellen Umgebungen nur schwache Informationen für die absolute Skalierung zu liefern [Beall et al. 1995]. Da jedoch bei diesen Experimenten Informationen zur relativen Größe der Augenhöhe in der Wandtextur vorhanden blieben, selbst wenn der Boden und die Decke entfernt wurden, Diese Ergebnisse stimmen mit dem Vorschlag überein, dass die Größenwahrnehmung in virtuellen Umgebungen weitgehend durch Informationen bestimmt werden kann, die die Objektgröße als Anteil des Hintergrunds und / oder der simulierten Augenhöhe angeben [Sedgwick 1980; Warren und Whang 1987; Dixon et al. 2000]. Dies würde bedeuten, dass, wenn die Teilnehmer Schwierigkeiten haben, ihre Augenhöhe in der Szene zu bestimmen, dies zu einer virtuellen Umgebung mit einer mehrdeutigen Skala führen kann.

Darüber hinaus scheint die wahrgenommene egozentrische Distanz in virtuellen Umgebungen systematisch verzerrt zu sein, gemessen an visuell gerichteten „Blind-Walking“-Aufgaben. Die Leistung ist in realen Umgebungen über Entfernungen von 2 bis 25 m sehr genau, es wurde jedoch wiederholt festgestellt, dass die Entfernung in virtuellen Umgebungen um etwa 50% unterschätzt wird [Loomis und Knapp 2003; Thompson et al. 2004]. Eine vergleichbare Unterschätzung wird sowohl beim blinden Gehen als auch beim blinden Werfen eines Sitzsacks auf ein zuvor gesehenes Ziel in einem virtuellen Flur beobachtet [Sahm et al. 2005], was darauf hinweist, dass der Effekt eher auf eine wahrgenommene Entfernung als auf eine Verzerrung der räumlichen Aktualisierung während des Blindwandels oder auf eine aktionsspezifische visuell-motorische Kalibrierung zurückzuführen ist.

Thompson und seine Kollegen [Thompson et al. 2004; Creem-Regehr et al. 2005] haben systematisch Erklärungen für eine Unterschätzung der Entfernung aufgrund der Grafikqualität, der Okklusion der Füße, des Fehlens von Disparität und Bewegungsparallaxe oder eines eingeschränkten Sichtfelds ausgeschlossen (sofern eine Kopfdrehung zulässig ist). Angesichts der Tatsache, dass die wahrgenommene Entfernung entlang des Bodens auf dem Neigungswinkel des Ziels zu beruhen scheint [Philbeck 1997; Ooi et al. 2001] könnte die wahrgenommene Entfernungskompression auf eine nach unten gerichtete Vorspannung des wahrgenommenen Blickwinkels, eine frontale Vorspannung in der wahrgenommenen Neigung der Grundebene und / oder eine Unterschätzung der Augenhöhe in virtuellen Umgebungen zurückzuführen sein. In Übereinstimmung mit dieser Interpretation haben Willemsen et al. [2004] stellten fest, dass die zusätzliche Vorwärtsmasse eines HMD mehr als ein Drittel der Entfernung ausmacht

Komprimierung, obwohl Messing und Durgin [2005] die erwarteten Auswirkungen einer Blickwinkelvorspannung nicht fanden. Zum Glück für die Forscher haben Mohler et al. [2006] berichtet kürzlich, dass diese Unterschätzung der Entfernung durch 5–7 Minuten Gehen zu Zielen in einem virtuellen Flur mit kontinuierlicher visueller Rückmeldung nahezu aufgehoben wird. Daher scheint sich die Bewegungsentfernung in virtuellen Umgebungen schnell anzupassen, entweder durch eine Neuskalierung der wahrgenommenen Entfernung oder durch eine Neukalibrierung des Wahrnehmungsmotors.

1.2 Wahrnehmung und Handlung

Es besteht Grund zur Frage, ob explizite Urteile wie visuell gerichtetes blindes Gehen gute Prädiktoren für visuell kontrolliertes Online-Handeln sind. Visuelle Urteile und visuelles Verhalten, die auf einem gemeinsamen Wahrnehmungsraum zu beruhen scheinen, können tatsächlich aufgabenspezifisch sein, da sie von unterschiedlichen Umwelteigenschaften, Informationsvariablen oder wahrnehmungsmotorischen Prozessen abhängen [Milner und Goodale 1995]. Ein typisches Beispiel ist die jüngste Forschung zum Erreichen einer visuellen Illusion wie der Ebbinghaus-Illusion. Trotz der Illusion, dass einer von zwei gleichen Kreisen größer als der andere ist, bleibt die Handöffnung während einer tatsächlichen Greifbewegung von der Illusion relativ unberührt [Aglioti et al. 1995; Glover und Dixon 2001; Smeets et al. 2003], obwohl dieser Befund umstritten bleibt [Franz et al. 2000; Franz 2003]. In einer Analyse Die berichtete Dissoziation zwischen Wahrnehmung und Handlung resultiert aus einer aufgabenspezifischen Abhängigkeit von den absoluten egozentrischen Positionen der Objektkanten zur Kontrolle des Greifens im Gegensatz zu einer Abhängigkeit von relativen exozentrischen Ausmaßen in der räumlichen Wahrnehmung [Smeets und Brenner 1999; Vishton et al. 1999]. Es ist wahrscheinlich, dass ähnliche Unterschiede zwischen Wahrnehmungsurteilen und visuell kontrollierten Handlungen in virtuellen Umgebungen auftreten können. Diese Möglichkeit lässt den Schluss zu, dass man zur Beurteilung der virtuellen Realität als Forschungsinstrument für Wahrnehmung und Handeln das wahrnehmungsmotorische Verhalten direkt testen muss. Insbesondere sind Validierungsstudien erforderlich, die das gleiche visuell kontrollierte Verhalten in abgestimmten realen und virtuellen Umgebungen vergleichen. Nach unserem Kenntnisstand wurde dies noch nicht für die Fortbewegung mit Beinen versucht.

1.3 Ein dynamisches Modell der Bewegungsbahnbildung

Die Studie wurde im Rahmen eines Forschungsprogramms zur Verhaltensdynamik der menschlichen Fortbewegung durchgeführt, das von der Arbeit von Schöner et al. [1995] über ein Steuerungssystem für mobile Roboter. Durch *Verhaltensdynamik* wemian die zeitliche Entwicklung des beobachteten Verhaltens, die für Bewegungsbahnen durch die Fahrtrichtung (Richtung) und ihre Änderungsrate (Drehrate) parametrisiert werden kann. Wir nehmen an, dass die Fortbewegung in (mindestens) vier elementare Verhaltensweisen zerlegt werden kann, einschließlich (a) Steuern auf ein stationäres Ziel, (b) Vermeiden eines stationären Hindernisses, (c) Abfangen eines sich bewegenden Ziels und (d) Vermeiden eines sich bewegenden Hindernisses. Ziel der Forschung ist es, ein dynamisches Modell jedes Grundverhaltens zu spezifizieren und dann zu bestimmen, ob die Fortbewegung in immer komplexeren Umgebungen durch die lineare Kombination dieser Komponenten mit festen Parametern vorhergesagt werden kann.

Stellen Sie sich einen Agenten vor, der zu einem stationären Ziel steuert. Die aktuelle Kursrichtung φ (definiert in Bezug auf eine exozentrische Referenzachse) und die Drehrate $\dot{\varphi}$ bestimmen die *Zustandsraum* des Systems unter der Annahme einer konstanten Fahrgeschwindigkeit v (siehe Abbildung 1). Aus dem aktuellen des Agenten (x, z) Position liegt ein Ziel in der Richtung ψ in einiger Entfernung d_g . Ein Hindernis kann auch in Richtung liegen ψ_o in einiger Entfernung d_o . Die einfachste Beschreibung der Steuerung in Richtung eines Ziels besteht darin, dass der Agent den Ziel-Kurswinkel (den Kurs) ermittelt Fehler) auf Null ($\varphi - \psi_g = 0$). Dies definiert eine *Attraktor* im Zustandsraum bei $(\varphi, \dot{\varphi}) = (\psi_g, 0)$. Umgekehrt besteht die einfachste Beschreibung der Hindernisvermeidung darin, den Kurswinkel des Hindernisses zu vergrößern ($\varphi - \psi_o > 0$), welche definiert a *Repeller* im Zustandsraum bei $(\varphi, \dot{\varphi}) = (\psi_o, 0)$. Darüber hinaus kann erwartet werden, dass die Entfernung eines Ziels oder Hindernisses (oder gleichwertig seine Kontaktzeit) die Lenkung beeinflusst, da der Agent dies tun muss

Drehen Sie sich schneller, um ein näheres Ziel zu erreichen oder einem näheren Hindernis auszuweichen. Das Problem besteht darin, ein System zu formalisieren

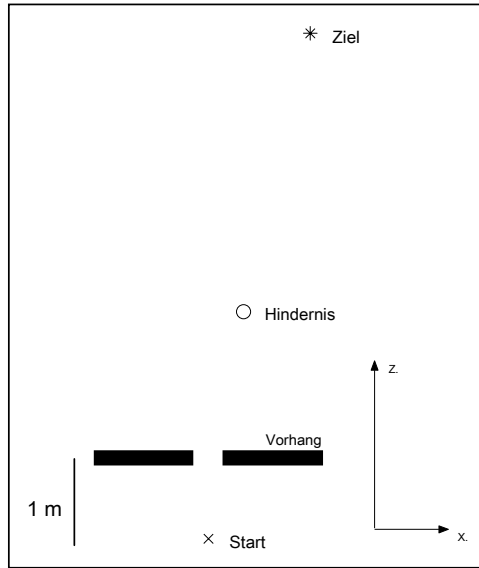


Abb. 1. Schema der Objektkonfiguration mit $+8^\circ$ Zielwinkel, mit dem Ziel auf 8 m und dem Hindernis auf 3 m (in der Z. Richtung). Die Teilnehmer begannen jeden Versuch um X und ging durch die Lücke im Vorhang um das Hindernis zum Ziel.

von Differentialgleichungen, a *dynamisches System*, deren Lösungen den beobachteten Verhaltenstrajektorien im Zustandsraum entsprechen. Da der physische Körper ein Trägheitsmoment hat, erfordert das Ändern der Fahrtrichtung eine Winkelbeschleunigung, was bedeutet, dass es sich mindestens um ein System zweiter Ordnung handeln muss.

1.3.1 *Ein Ziel erreichen.* Um diese Gleichungen zu spezifizieren, führten Fajen und Warren [2003] eine Reihe von Experimenten zum menschlichen Gehen in einer ambulanten virtuellen Umgebung durch. Im ersten Experiment beobachteten sie, dass die Teilnehmer auf einen geraden Weg in Richtung eines stationären Ziels abbiegen, mit einer Winkelbeschleunigung, die mit dem Kursfehler zunimmt und mit der Entfernung abnimmt. Sie modellierten dieses Verhalten als eckiges „Masse-Feder“-System. Stellen Sie sich intuitiv vor, dass die aktuelle Kursrichtung des Agenten durch eine gedämpfte Feder mit der Zielrichtung verbunden ist. Die Winkelbeschleunigung ($\ddot{\phi}$) der Lenkung

hängt also von der Federsteifigkeit ab (k_g) und der Kursfehler ($\beta_g = \phi - \psi_g$):

$$\ddot{\phi} = -b\dot{\phi} - k_g(\phi - \psi_g)(e^{-c_1 d_g} + c_2) \quad (1)$$

Der Begriff "Dämpfung" (b) widersteht dem Drehen, was dazu neigt, gerade Wege zu ergeben und Schwingungen zu reduzieren.

Der Begriff "Steifheit" (k_g) zeigt an, dass die Winkelbeschleunigung linear mit dem Kursfehler zunimmt. Außerdem nimmt die Steifheit mit der Entfernung exponentiell ab (d_g), wo c_1 bestimmt die Zerfallsrate und c_2 eine minimale Winkelbeschleunigung für entfernte Ziele. Die kleinsten Quadrate passen zur mittleren Zeitreihe

der Überschrift ergab $b = 3,25$, $k_g = 7,50$, $c_1 = 0,40$ und $c_2 = 0,40$ mit einem Durchschnitt $R^2 = 0,98$ über alle Bedingungen. Das Modell hat das mittlere Lenkverhalten mit simulierten Bewegungswegen sehr gut erfasst das war den menschlichen Daten sehr ähnlich [Fajen und Warren 2003].

1.3.2 *Hindernisvermeidung.* Betrachten Sie nun die Aufgabe, ein Hindernis zu vermeiden. Im zweiten Experiment von Fajen und Warren [2003] wandten sich die Teilnehmer mit einer Winkelbeschleunigung vom Hindernis ab, die sowohl mit dem Winkel des Hinderniskurses als auch mit der Hindernisentfernung abnahm. Stellen Sie sich zur Modellierung dieses Verhaltens vor, dass die Kursrichtung durch eine andere Feder von der Hindernisrichtung abgestoßen wird. Winkelig

Die Beschleunigung hängt also von der Federsteifigkeit ab ($k\phi$) und der Hindernis-Richtungswinkel ($\phi - \psi\phi$):

$$\ddot{\phi} = -b\dot{\phi} + k\phi - \psi\phi e_3 - c_3|\dot{\phi} - \psi\phi|e_3 - c_4 d\phi \quad (2)$$

Der positive Begriff "Steifheit" zeigt an, dass die Winkelbeschleunigung als Mittel exponentiell abnimmt

geht weiter links oder rechts vom Hindernis; Die Amplitude dieser Funktion wird bestimmt durch $k\phi$ und seine Zerfallsrate durch c_3 . Die Steifheit nimmt auch mit dem Hindernisabstand exponentiell auf Null ab, wobei

c_4 ist die Abklingrate. Die kleinsten Quadrate, die zur mittleren Zeitreihe des Hinderniskurswinkels passen, ergaben Parameterwerte von $k\phi = 198,0$, $c_3 = 6,5$ und $c_4 = 0,8$ mit einem Mittelwert $R^2 = 0,97$ über alle Bedingungen.

Basierend auf ihrem dritten Experiment haben Fajen und Warren anschließend die angepasste c_4 Parameter auf 1,6; Wir werden diesen Wert hier verwenden. Das Modell erfasste somit die Verhaltensdynamik der Hindernisvermeidung und Simulationen reproduzierten die menschlichen Pfade ziemlich genau. Das Hinzufügen von 10% Gaußschem Rauschen zu allen Wahrnehmungsvariablen und Modellparametern führte nur zu einer Standardabweichung von einigen Zentimetern in der seitlichen Position des Pfades um ein Hindernis, was zeigt, dass das Modell robust ist.

In komplexeren Konfigurationen von Zielen und Hindernissen werden die Modellkomponenten additiv kombiniert, um das Verhalten ohne zusätzliche Parameter vorherzusagen. Tatsächlich wird dem Modell für jedes Objekt eine Feder hinzugefügt, und die aktuelle Überschrift ergibt sich aus allen Federkräften, die zu diesem Zeitpunkt auf das Mittel wirken. Bewegungsrouten ergeben sich somit aus der Interaktion von Agent und Umgebung in einer Online-Art und Weise, anstatt explizit im Voraus geplant zu werden. Anschließend wurde eine dritte Komponente entwickelt, um das Abfangen eines sich bewegenden Ziels zu modellieren [Fajen und Warren 2004, 2005] sowie eine vierte Komponente zur Vermeidung eines sich bewegenden Hindernisses [Cohen und Warren 2005]. Das Ziel dieses Forschungsprogramms ist es zu bestimmen, ob menschliche Bewegungswege in komplexen dynamischen Umgebungen durch lineare Kombinationen dieser vier Elementarkomponenten vorhergesagt werden können.

Eine einfachere Hypothese zum Lenken zu einem stationären Ziel schlägt vor, dass der Agent das Ziel bei einer festen Exzentrizität in Bezug auf die Bewegungsachse hält, anstatt den Steuerkursfehler auf Null zu bringen [Rushton et al. 2002]. Dies erzeugt Pfade in Form von gleichwinkligen Spiralen, deren Krümmung am Ende der Flugbahn zunimmt, wenn sich das Ziel nähert. Die Daten von Fajen und Warren [2003] zeigen jedoch deutlich das entgegengesetzte Muster, bei dem sich die Teilnehmer zunächst auf einen geraden Weg mit größerer Krümmung zu Beginn der Flugbahn wenden.

Eine alternative Hypothese schlägt vor, dass der Agent steuert, um abubrechen *Zieldrift*, das heißt, die Winkelgeschwindigkeit des Ziels in Bezug auf die Bewegungsachse (β_g) oder ein Rahmen, der an der Bewegungsachse befestigt ist [Llewellyn 1971; Rushton et al. 2002]. Wie von Wilkie und Wann [2003] formalisiert, hat das Modell nur zwei Parameter, analog zu einem Steifheits- und Dämpfungsterm, ohne Abstandsterm. Wenn man annimmt Als Translationspfad der Fortbewegung geht die Zieldrift auf Null ($\beta_g = 0$) nur wenn man mit einem unterwegs ist gerader Weg zum Ziel ($\beta_g \neq 0$). Dies liegt daran, dass nach dem Grundgesetz des optischen Flusses [Nakayama und Loomis 1974] die Winkelgeschwindigkeit des Ziels proportional zum Sinus des Ziel-Richtungswinkels ist und umgekehrt proportional zur Entfernung. Wenn der Agent jedoch sowohl drehen als auch übersetzen kann, wird die Nullung vorgenommen β_g erzeugt auch gleichwinklige Spiralfade zum Ziel, die von den Anfangsbedingungen abhängen. Also anscheinend Einfachere Modelle, die auf fester Exzentrizität oder Zieldrift basieren, reproduzieren menschliche Pfade ohne zusätzliche Parameter nicht erfolgreich.

1.4 Fortbewegung in realen und virtuellen Umgebungen

In der vorliegenden Studie haben wir die Bewegungswege in einer virtuellen Umgebung mit denen in einer angepassten physischen Umgebung verglichen. Die Aufgabe des Teilnehmers bestand darin, zu einem stationären Ziel zu gelangen und dabei ein stationäres Hindernis auf dem Weg zu umgehen. Die Objekte waren vertikale Pfosten auf einer strukturierten Grundebene und ihre Positionen wurden von Versuch zu Versuch variiert.

Der Zweck des Experiments war zweifach. Zunächst wollten wir die Ähnlichkeit von Bewegungswegen in realen und virtuellen Umgebungen untersuchen. Einerseits frühere Hinweise auf große Wahrnehmungsunterschiede

zwischen den beiden Umgebungen kann dazu führen, dass große Verhaltensunterschiede zu erwarten sind. Eine Hypothese ist, dass die Teilnehmer, wenn bekannt ist, dass ein Hindernis virtuell ist und daher keine physischen Konsequenzen hat, in virtuellen Umgebungen ein riskanteres Verhalten zeigen können, z. B. weniger Freiraum und mehr Kollisionen mit Hindernissen. Umgekehrt könnte eine größere Unsicherheit über die Größe, Position oder den Charakter virtueller Objekte oder über die eigene Position des Teilnehmers im virtuellen Raum zu größeren Abweichungen um Hindernisse führen. Darüber hinaus lässt die in virtuellen Umgebungen beobachtete 50% ige Abstandskomprimierung auf die Hypothese schließen, dass Umwege um ein Hindernis früher eingeleitet werden und zu größeren Abweichungen führen könnten.

Andererseits gibt es auch Gründe zu der Annahme, dass das Bewegungsverhalten in realen und virtuellen Umgebungen sehr ähnlich sein kann. Die Kompression des Bewegungsabstands in virtuellen Umgebungen wird durch eine Anpassung von 5 bis 7 Minuten mit kontinuierlicher visueller Rückmeldung weitgehend eliminiert [Mohler et al. 2006]. Frühere Ergebnisse legen nahe, dass die visuell-motorische Steuerung in einigen Aufgaben nicht auf expliziten Wahrnehmungsurteilen basiert, sondern auf aufgabenspezifischen Steuerungsbeziehungen, die in beiden Umgebungen vergleichbar sein können. In dem Maße, in dem die Bewegungswege in realen und virtuellen Umgebungen ähnlich sind, würde die Verwendung der virtuellen Realität teilweise als Forschungsinstrument für die Untersuchung der menschlichen Fortbewegung validiert.

Zweitens wollten wir untersuchen, wie gut sich das Lenkdynamikmodell von der virtuellen Umgebung, in der es entwickelt wurde [Fajen und Warren 2003], auf neue virtuelle Ziel- / Hinderniskonfigurationen sowie auf eine reale Umgebung mit physischen Objekten verallgemeinert. Es werden zwei Ebenen der Allgemeinheit betrachtet: ob die gegenwärtige Form von Gl. (1) und (2) können das mittlere Verhalten unter neuen Bedingungen erfassen und ob die spezifischen Parameterwerte von Fajen und Warren [2003] dies können. Eine verwandte Frage ist, ob individuelle Unterschiede im Bewegungsverhalten durch unterschiedliche Parameterwerte im Modell berücksichtigt werden können. Bis zu diesem Punkt war das Modell so angepasst, dass es Pfade bedeutet, aber hier führen wir auch separate Parameteranpassungen für die Daten jedes Teilnehmers durch.

Die beobachteten Bewegungswege wurden auf zwei Arten bewertet. Zunächst verglichen wir direkte Messungen der Pfade selbst, einschließlich der Krümmung des Pfades um das Hindernis, der Abweichung des Pfades von einer geraden Linie zum Ziel und der Überholstrecke vom Hindernis. Zweitens haben wir das Lenkdynamikmodell verwendet, um die gesamte Pfadform zu vergleichen, indem wir das Modell an die mittleren Pfade in jeder Umgebung angepasst und die resultierenden Parameterwerte verglichen haben. Bestimmte Parameterunterschiede können einen Einblick in die Bewegungsstrategien in realen und virtuellen Umgebungen geben. Zum Beispiel,

Eine direktere Steuerung zu einem Ziel kann sich sowohl in einem höheren „Steifheitsparameter“ widerspiegeln (k_d). Dies bestimmt die Anziehungskraft der Kursrichtung in Richtung der Zielrichtung (Gleichung 1) und eine langsamere Abklingrate der Anziehung mit der Entfernung (c_1). Riskantes Verhalten, bei dem ein Teilnehmer ein Hindernis passiert mit weniger Spiel könnte durch eine geringere „Steifheit“ des Hindernisses erfasst werden (k_d) oder in einer Zunahme der c_3 Parameter, der die Winkelabklingrate der Abstoßungsfunktion und damit ihre laterale bestimmt

Verbreitung. Wenn Sie sich dem Hindernis nähern, bevor Sie davon abweichen, kann dies durch eine Erhöhung des Hindernisses ausgedrückt werden c_4 Parameter (Gleichung 2), der die Abklingrate der Abstoßungsfunktion mit der Entfernung bestimmt.

2. METHODE

2.1 Teilnehmer

Zehn Teilnehmer im College-Alter, 6 Frauen und 4 Männer, nahmen an dem Experiment teil. Die Einverständniserklärung wurde vor der Teilnahme an der Studie eingeholt.

2.2 Gerät

Das Experiment wurde im Virtual Environment Navigation Lab (VENLab) der Brown University in einem offenen Raum von 12 m durchgeführt × 12m Zimmer. Die Aufgabe bestand darin, zu einem stationären Ziel zu gehen und dabei ein stationäres Hindernis zu vermeiden, ähnlich wie bei Fajen und Warrens [2003] Experiment 2 (siehe Abbildung 1 für eine schematische Darstellung der experimentellen Bedingungen). Die Teilnehmer begannen jeden Versuch, indem sie durch eine 0,60 m breite Lücke gingen

ein Vorhang, 1 m von der Ausgangsposition entfernt. Das Ziel, ein grüner Pfosten (Radius 0,08 m; 2 m hoch), wurde 8 m vom Vorhang entfernt (in der Z. Richtung) in einem Winkel von der ursprünglichen Fahrtrichtung (- - 12,

- - 8 - nach links oder +8, +12 - Nach rechts); es war nicht durch den Vorhang sichtbar. Das Hindernis, ein weißer Pfosten (0,08 m Radius; 2 m hoch), wurde entweder 3 oder 5 m vom Vorhang entfernt (in der Z. Richtung) und 3 -

näher an der ursprünglichen Fahrtrichtung (z. B. wenn sich das Ziel auf befand - - 12 - Das Hindernis wurde an platziert - - 9 -).

Es wurden zwei Umgebungen getestet. Im virtuellen Zustand betrachteten die Teilnehmer eine immersive virtuelle Umgebung, die den VENLab-Raum simulierte, einschließlich des Vorhangs 1 m vom Startort, dem Zielpfosten und dem Hindernispfosten entfernt. Es wurde in einem Kaiser ProView-80 HMD (Kaiser Electro-Optics, Carlsbad, CA) mit einer 60 präsentiert - (horizontal) \times 40 - (vertikales) binokulares Sichtfeld und eine Auflösung von 640 \times 480 Pixel in jedem Auge. Stereobilder der dreidimensionalen (3D) Umgebung wurden unter Verwendung einer Onyx2-Infinite-Reality-Workstation (SGI, Mountain View, CA) mit einer Bildrate von 60 Hz unter Verwendung der WorldToolKit-Software (Sense8, Inc., SanRafael, CA) erzeugt. Die Kopfposition (4mmRMS-Fehler) und die Ausrichtung des Teilnehmers (0.1 - RMS-Fehler) wurden unter Verwendung eines IS-900-Hybrid-Inertial- / Ultraschall-Trackers (InterSense, Burlington, Massachussetts) mit einer Abtastrate von 60 Hz gemessen und sowohl zur Aktualisierung der Anzeige als auch zur Erfassung von Daten für die Analyse verwendet. Die Gesamtlatenz betrug ungefähr 68 ms (4 Bilder), wie durch Kreuzkorrelation zwischen den Signalen von zwei Fotodioden bestimmt, von denen eine auf dem Tracker eine stationäre Graustufenrampe liest und die andere im HMD eine virtuelle Rampe liest, die auf dem HMD angezeigt wird Bildschirm, wie das HMD von Hand übersetzt wurde. Das HMD-Kabel wurde an einem Hüftgurt befestigt, und ein „Wrangler“ folgte dem Teilnehmer, um das Kabel zu handhaben.

In der physischen Umgebung betrachteten die Teilnehmer den tatsächlichen Raum, während sie mit einem Fahrradhelm anstelle des HMD im VENLab herumliefen. Die Position und Ausrichtung des Kopfes wurden mit demselben am Helm montierten Tracker erfasst und die Daten zur Analyse aufgezeichnet. Um der virtuellen Umgebung zu entsprechen, wurde ein Vorhang an der Decke aufgehängt und Ziel- und Hindernispfosten wurden an identischen Positionen präsentiert. Die Pfosten bestanden aus PVC-Rohren und wurden zwischen den Versuchen von Hand neu positioniert. Das Ziel, das Hindernis, der Vorhang und der Teppich in der virtuellen Umgebung waren ungefähr farblich auf ihre physischen Gegenstücke abgestimmt.

2.3 Vorgehensweise

Vor dem Testen im virtuellen Zustand wurde der Linsenabstand im HMD an den Augenabstand des Teilnehmers angepasst. Um die stereoskopische Fusion zu überprüfen, wurde ein zufälliges Punkstereogramm eines Quadrats präsentiert und gegebenenfalls weitere Anpassungen vorgenommen. Die Teilnehmer wurden angewiesen, normal zum grünen Ziel zu gehen und dabei das weiße Hindernis zu umgehen. Jeder Teilnehmer führte in jeder Umgebung einen Übungsversuch durch, um zu zeigen, dass er die Aufgabe verstanden und mit der Ausrüstung vertraut war. Sie wurden informiert, dass sie zwischen den Versuchen Pausen einlegen oder ganz aufhören könnten, wenn Symptome einer Simulatorkrankheit auftreten. Kein Teilnehmer berichtete über solche Symptome oder entschied sich, das Experiment abubrechen.

Das Experiment hatte eine 2 (Umgebung) \times 2 (Zielwinkel) \times 2 (Hindernisabstand) \times 2 (Richtung links / rechts) innerhalb des Motivs. Die virtuellen und physischen Umgebungen wurden in separaten Sitzungen in einer ausgeglichenen Reihenfolge getestet. In jeder Umgebung wurden fünf Versuche mit jeder Ziel- / Hinderniskonfiguration in zufälliger Reihenfolge für insgesamt 80 Testversuche präsentiert. Eine Sitzung dauerte ungefähr 45 Minuten.

2.4 Datenanalyse

Auf dem Pfad in der horizontalen Ebene wurden drei Metriken berechnet, um den Umweg des Teilnehmers um das Hindernis zu charakterisieren. Erstens der Median \cdot *Krümmungsradius* wurde über die gesamte Länge berechnet

¹ Der mittlere Krümmungsradius wurde anstelle des mittleren Krümmungsradius verwendet, um Probleme zu reduzieren, die durch große Radien verursacht werden, die auftreten, wenn der Pfad nahezu linear ist.

des Weges vom Vorhang zum Ziel. Der Krümmungsradius (κ) an jedem Punkt auf dem Weg wurde berechnet als

$$\kappa = \frac{(\dot{X}_2 + \dot{Z}_2)_{1.5}}{((\dot{X}_2 - \dot{X}_Z) - \dot{X}_Z)} \quad (3)$$

wo X und Z sind Kopfpositionskoordinaten in einer horizontalen Ebene und der Themenwert wurde berechnet. Dies liefert eine Schätzung der Gesamtkrümmung des Pfades, dh seiner durchschnittlichen Abweichung von einem geraden Pfad an allen Punkten. Zweitens die *maximale Abweichung* Für jeden Versuch wurde eine gerade Linie zwischen der Lücke im Vorhang und dem Ziel berechnet. Dies liefert eine Schätzung der Abweichung von einem geraden Pfad an einem Punkt, der nicht notwendigerweise neben dem Hindernis liegt. Drittens die *Mindestabstand* zwischen dem Weg und dem Hindernis wurde berechnet. Dies liefert ein Maß für die Überholstrecke - wie nahe der Pfad dem Hindernis an seinem nächsten Punkt kam.

Es gab keine Reihenfolgeeffekte der virtuellen und physischen Umgebung auf diese drei Metriken ($p > 0.2$), so dass die Daten in nachfolgenden Analysen über die Reihenfolge hinweg zusammengefasst wurden. Um Unterschiede zwischen den Bedingungen zu untersuchen, misst eine Vier-Wege-ANOVA (Umgebung) \times Zielwinkel \times Hindernisabstand \times Richtung) wurde für jede der drei Metriken durchgeführt; Um die individuellen Unterschiede zu untersuchen, wurden diese ANOVAs für die Daten jedes Teilnehmers wiederholt. Es wurde erwartet, dass die unterschiedlichen Zielwinkel und Hindernisabstände den Pfad des Teilnehmers beeinflussen und sich daher auf jede Metrik auswirken. Tests dieser Haupteffekte und Wechselwirkungen werden eingeschlossen, um festzustellen, dass ausreichend Kraft vorhanden ist, um Verhaltensunterschiede zu erkennen. Ein signifikanter Haupteffekt der Umgebung oder jegliche Interaktion mit der Umgebung würde auf Unterschiede im Verhalten zwischen der virtuellen und der physischen Umgebung hinweisen.

2.5 Modellparameteranpassung

Da unser Ziel das mittlere menschliche Verhalten war, wurde in jeder Versuchsbedingung ein Amean-Pfad berechnet, um die Parameter des Lenkdynamikmodells von Fajen und Warren [2003] anzupassen. Die Verwendung eines mittleren Pfades entsprach der Dauer und dem Gewicht jedes Versuchs und verringerte die Auswirkungen von Messrauschen und intertrialer Variabilität. (Wir haben auch die Versuchsdaten angepasst und festgestellt, dass die Parameterwerte im Wesentlichen unverändert sind.) Da die Versuchsdauer variierte, haben wir zunächst die Zeitreihendaten normalisiert, indem wir die mittlere Position in Intervallen von 0,5 m entlang der berechnet haben Z . Achse von 0,5 m hinter dem Vorhang bis innerhalb von 1,5 m vom Ziel, was 13 Datenpunkte pro Versuch ergibt. Dieses Intervall wurde als ausreichend erachtet, um die allmähliche Änderung der lateralen Position im Verlauf eines Versuchs zu erfassen. Für jedes Intervall die Stichprobe, in der der Teilnehmer ist Z . Die Position war der angegebenen am nächsten Z . Position gefunden wurde, und die entsprechende X . Position wurde identifiziert. Der Mittelwert von X . wurde dann für jedes Intervall in jeder Bedingung für jedes Subjekt berechnet; Die großen Mittelwerte wurden themenübergreifend berechnet.

Parameterwerte wurden durch eine Methode der kleinsten Quadrate gefunden, die die Zielfunktion minimierte

$$f(q) = \sum_{j=1} \sum_{i=1} (X_{ij} - \hat{X}_{ij})^2 \quad (4)$$

wo q stellt die zu passenden Parameter dar, X . ist thematisch X . Wert in den Daten für die 13 Z . Positionen, \hat{X} ist der X . vom Modell vorhergesagter Wert, und $ncond$ ist die Anzahl der Bedingungen, die bei der Parameteranpassung verwendet werden. Die Parameter wurden mit NOMAD, einem verallgemeinerten Suchprogramm mit MATLAB-Skript, angepasst [Abramson et al. 2004]. NOMAD sucht in der Nähe der anfänglichen Schätzung nach Parameterwerten, die niedrigere Werte der Zielfunktion finden. Das Parameteranpassungsprogramm wurde beendet und ein optimaler Parametersatz wurde gefunden, wenn die Maschengröße < 0.0001 war.

Um Unterschiede zwischen den Bedingungen zu untersuchen, wurden verschiedene Parametersuchen mit einer Modellgeschwindigkeitskonstante von 1 m / s durchgeführt, wie in Fajen und Warren [2003]. Zunächst wurden eine Reihe von Parameteranpassungen vorgenommen

wird mit den Grand-Mean-Daten aller Teilnehmer durchgeführt, einschließlich einer Anpassung für alle experimentellen Bedingungen und dann getrennter Anpassungen für die virtuelle Umgebung und die physische Umgebung allein. Zweitens wurden zur Untersuchung individueller Unterschiede die Parameter für jeden Teilnehmer in jeder Umgebung separat geschätzt. R_2 Die Werte wurden für jede der Parameterschätzungen unter Verwendung der folgenden Gleichungen berechnet:

$$\begin{aligned}
 SSE &= \sum_{j=1}^{ncond} \sum_{i=1}^{13} ((X_{ij} - \bar{X}_{.j})^2) \\
 SST &= \sum_{j=1}^{ncond} \sum_{i=1}^{13} ((X_{ij} - \bar{X}_j)^2) \\
 R_2 &= 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

wo \bar{X} ist der gemittelte X Wert in den Daten, \bar{X} ist der X vom Modell vorhergesagter Wert, \bar{X} ist der Mittelwert X .

aus den gemittelten Daten für die Versuchsbedingung und $ncond$ ist die Anzahl der Bedingungen, die bei der Berechnung der R_2 Werte. R_2 Wenn angemessen, R_2 Die Werte wurden statistisch durch einseitige Anwendung verglichen F Test des Verhältnisses zwischen SSE-Begriffen, ähnlich einem Test zum Vergleich von Standardabweichungen zwischen zwei Proben.

3. ERGEBNISSE

Beispieldaten für zwei Teilnehmer sind in Abbildung 2 dargestellt, in der die Pfade für jeden Versuch in allen Ziel- / Hinderniskonfigurationen dargestellt sind. Durchgezogene rote Spuren entsprechen der physischen Umgebung und gestrichelte blaue Spuren der virtuellen Umgebung. Abbildung 2a zeigt einen Teilnehmer, der nur geringe systematische Unterschiede zwischen der virtuellen und der physischen Umgebung aufwies. Im Gegensatz dazu zeigte der Teilnehmer in 2b den größten Unterschied zwischen den Umgebungen, wie durch den quadratischen Mittelwertfehler zwischen den mittleren Pfaden geschätzt; Die Pfade in der physischen Umgebung waren gerader und weichen nicht so stark um das Hindernis herum wie in der virtuellen Umgebung. Für viele Teilnehmer schien es kleine, aber systematische Unterschiede zwischen der physischen und der virtuellen Umgebung zu geben:

3.1 Krümmungsradius

Der mittlere Krümmungsradius unterschied sich statistisch nicht statistisch ($M = 1,09$ m, $SD = 0,20$ m) und virtuell ($M = 1,17$ m, $SD = 0,10$ m) Umgebungen, $F(1, 9) = 2,47$, $p = 0,1505$ oder in Wechselwirkungen mit der Umwelt. Wie erwartet gab es einen Einfluss auf die Objektkonfiguration mit signifikanten Haupteffekten des Zielwinkels. $F(1, 9) = 21,96$, $p = 0,0011$, Richtung links / rechts, $F(1, 9) = 171,09$, $p < 0,001$ und ihre Interaktion, $F(1, 9) = 5,22$, $p = 0,0482$. Tukey-Post-hoc-Tests zeigten größere mittlere Krümmungsradien (was auf gerade Wege hinweist) mit Zielwinkeln von $\pm 8^\circ$ verglichen mit $\pm 12^\circ$ und bei Versuchen, bei denen das Ziel rechts von der ursprünglichen Bewegungsrichtung platziert wurde. Die signifikante Wechselwirkung resultierte aus einem kleineren Krümmungsradius (dh einer stärker gekrümmten Flugbahn) in der $\pm 12^\circ$ Zustand, der nur aufgrund der Haupteffekte zu erwarten wäre (siehe Abbildung 3). Bei den einzelnen Probanden-ANOVAs wurde nur bei 4 von 10 Teilnehmern ein signifikanter Umwelteffekt beobachtet. Somit war die Gesamtpfadkrümmung in physischen und virtuellen Umgebungen vergleichbar.

² Diese Berechnung von R_2 ist nicht identisch mit dem R_2 Wert für eine Regression. Einige der Annahmen bei der Durchführung einer Anpassung eines linearen Modells gelten nicht mehr, so dass die bekannte Form von $SSR + SSE = SST$ nicht korrekt ist. Trotzdem liefert dieser Ansatz ein gutes Maß für das Ausmaß der Variabilität, das durch das Modell erklärt wird.

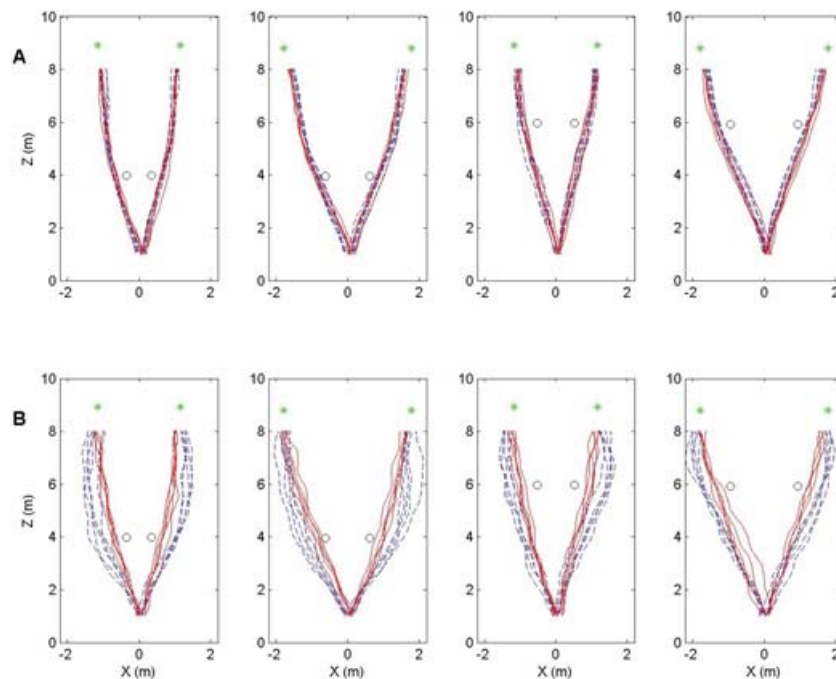


Abb. 2. Beispieldaten von zwei Teilnehmern, die alle Pfade in den Konfigurationen mit vier Objekten (Spalten) zeigen. Zeile A, Ein Teilnehmer mit ähnlichen Pfaden in der physischen und virtuellen Umgebung. Zeile B: Der Teilnehmer mit dem größten Unterschied zwischen den Umgebungen. Abszisse ist X -Richtung (m) und Ordinate ist Z -Richtung (m); Einheiten sind nicht gleich. Blaue Striche, virtuelle Umgebung; rot fest, physische Umgebung.

3.2 Maximale Abweichung

Im Gegensatz dazu war die maximale Abweichung von einem geraden Pfad geringfügig (um 0,16 m), in der virtuellen Umgebung jedoch signifikant größer ($M = 0,59$ m, $SD = 0,17$ m) als in der physischen Umgebung ($M = 0,43$ m, $SD = 0,12$ m), $F(1, 9) = 10,35$, $p = 0,0105$. Es gab auch eine signifikante Drei-Wege-Wechselwirkung zwischen Zielwinkel, Richtung und Hindernisentfernung. $F(1, 9) = 5,69$, $p = 0,0407$, was sich aus größeren Abweichungen im +12° ergab: +0,4 m und die -12°, 6 m Hinderniskonfigurationen als bei den anderen Konfigurationen. Die einzelnen Probanden-ANOVAs zeigten bei 6 von 10 Teilnehmern einen signifikanten Einfluss auf die Umwelt. Daher weichen die meisten Teilnehmer in der virtuellen Umgebung etwas weiter von einem geraden Weg zum Ziel ab als in der physischen Umgebung.

3.3 Mindestabstand

Ein ähnlicher Effekt wurde für den Mindestabstand zum Hindernis beobachtet, der in der virtuellen Umgebung um 0,16 m größer war ($M = 0,51$ m, $SD = 0,19$ m) als in der physischen Umgebung ($M = 0,35$ m, $SD = 0,15$ m), $F(1, 9) = 11,02$, $p = 0,0089$. Es gab auch signifikante Effekte der Objektkonfiguration, einschließlich des Zielwinkels, $F(1, 9) = 9,02$, $p = 0,0149$, Hindernisabstand, $F(1, 9) = 49,12$, $p < 0,0001$ und Richtung, $F(1, 9) = 8,17$, $p = 0,0188$. Darüber hinaus gab es eine signifikante Drei-Wege-Wechselwirkung zwischen Zielwinkel, Hindernisabstand und Richtung. $F(1, 9) = 6,79$, $p = 0,0285$, resultierend aus einem kleineren Mindestabstand in der -12°, 4m Hinderniskonfiguration als in den anderen Konfigurationen. Die einzelnen ANOVAs bestätigten bei 8 der 10 Teilnehmer einen signifikanten Umwelteffekt. Somit im Einklang mit

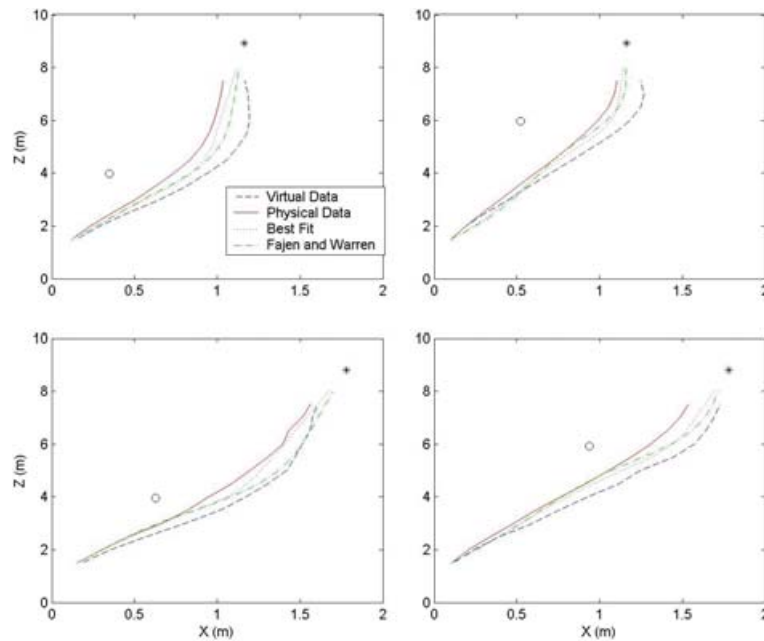


Abb. 3. Mittlere Pfade und Gesamtmodellsimulationen für jede Objektkonfiguration (Panels). Abszisse ist X. Richtung (m), Ordinate ist Z. Richtung (m), und die Daten werden links / rechts reduziert. Blaue Striche, Daten der virtuellen Umgebung; rote feste physische Umgebungsdaten; schwarze Punkte, insgesamt bester Passpfad; grüne Striche, Pfad, der mit den Parametern von Fajen und Warren [2003] generiert wurde.

Bei der Messung der maximalen Abweichung kamen die meisten Teilnehmer etwas weiter von virtuellen Hindernissen entfernt als von physischen Hindernissen.

3.4 Gehgeschwindigkeit

Die Teilnehmer gingen im virtuellen etwas langsamer ($1,17 \text{ m/s} \pm 0,11 \text{ m/s}$) als die physikalische ($1,30 \text{ m/s} \pm 0,12 \text{ m/s}$) Umgebung $F(1, 9) = 19,36, p = 0,00017$.

3.5 Parameteranpassung

3.5.1 Gesamtanpassung. Wir haben das Modell zunächst an die über alle Teilnehmer gemittelten Daten angepasst, insbesondere an den mittleren Pfad für jede Objektkonfiguration (dh beide Umgebungen zusammen). Die resultierenden Parameterwerte und R^2 Maßnahmen sind in Tabelle I dargestellt; Der Best-Fit-Pfad für jede Konfiguration (schwarz gepunktete Kurve) ist in Abbildung 3 dargestellt und liegt zwischen den mittleren menschlichen Pfaden in der physischen Umgebung (durchgezogene rote Kurve) und der virtuellen Umgebung (blau gestrichelte Kurve). Die allgemeine Passgenauigkeit war mit ziemlich hoch $R^2 = 0,9597$. Vergleichbar R^2 Werte wurden erhalten, wenn dieselben Gesamtparameter zur Modellierung der Daten der physischen Umgebung verwendet wurden ($R^2 = 0,9543$) getrennt von den Daten der virtuellen Umgebung ($R^2 = 0,9638$), $F(12, 12) = 1,26, p = 0,3477$. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Modell die Daten aus beiden Umgebungen mit einem einzigen Parametersatz approximieren kann.

3.5.2 Physische und virtuelle Umgebungen. Das Modell wurde dann getrennt an die Daten der physischen und virtuellen Umgebung angepasst (siehe Tabelle I). Die simulierten Pfade für die physische Umgebung (grüne Punkt-Strich-Kurve) und die virtuelle Umgebung (schwarze gepunktete Kurve) stimmen eng mit den entsprechenden mittleren menschlichen Pfaden für jede Konfiguration überein (siehe Abbildung 4). Die Güte des Anpassungsmaßes in jeder Umgebung war signifikant höher als die für die Gesamtanpassung an die jeweilige Umgebung; für die virtuelle Umgebung die R^2

Tabelle I. Parameterwerte und zugehörige R_2 für Modell passt zu den mittleren Pfaden in der Virtuelle (V) und physische (P) Umgebungen. ein

	Gesamtanpassung	V Datenanpassung	P Datenanpassung	V Datenanpassung (reduziert)	P Datenanpassung (reduziert)	Fajen und Labyrinth
b	6.55	6,95	11.25	3.25	3.25	3.25
K_G	28.8	21.8	40.4	25.6	17.9	7.5
c_1	0,42	0,63	0,43	0,53	1,00	0,4
c_2	0,31	0,3515	0,334	0,40	0,40	0,4
K_O	50	51,75	51,75	198	198	198
c_3	3.5	3.45	3.45	6.88	11.34	6.5
c_4	0,6	0,575	0,575	1.01	1,06	1.6
Insgesamt R_2	0,9597	--	--			0,9540
V Daten R_2	0,9638	0,9886	0,9220	0,9825	0,9140	0,9513
P Daten R_2	0,9543	0,7649	0,9838	0,7718	0,9810	0,9575

ein V Daten R_2 gibt die Anpassungsgüte der Spaltenparameter für die Daten der virtuellen Umgebung und P-Daten an R_2 das für die Spaltenparameter zu den physischen Umgebungsdaten.

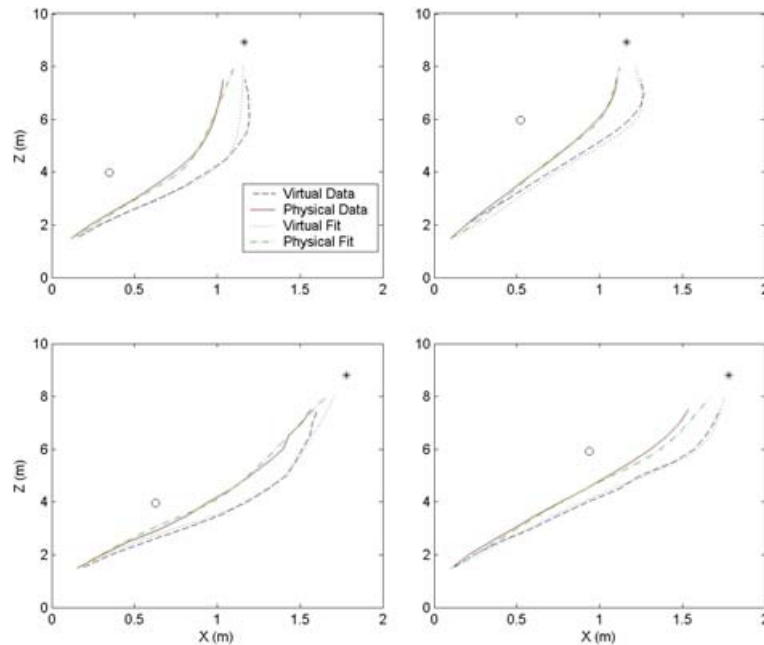


Abb. 4. Mittlere Pfade mit separaten Modellsimulationen für die virtuelle und physische Umgebung (Panels wie in Abbildung 3). Blaue Striche, Daten der virtuellen Umgebung; schwarze Punkte, bester Pfad zu virtuellen Daten; rote feste physische Umgebungsdaten; Grüner Punkt - Striche, bester Pfad zu physischen Daten.

Wert stieg auf 0,9886, $F(12, 12) = 3,17$, $p = 0,0282$, während die R_2 für die physische Umgebung auf 0,9838 erhöht, $F(12, 12) = 2,82$, $p = 0,0425$. Wenn im Gegensatz dazu die virtuellen Parameter zum Modellieren der Daten aus der physischen Umgebung verwendet wurden, wird die R_2 fiel auf 0,7649, $F(12, 12) = 5,14$, $p = 0,0041$; und als die physikalischen Parameter verwendet wurden, um die virtuellen Daten zu modellieren, rutschte sie auf 0,9220 ab. $F(12, 12) = 2,75$,

$p = 0,0463$. Dies bestätigt, dass es kleine, aber systematische Unterschiede zwischen Pfaden in den beiden Umgebungen gibt, die durch unterschiedliche Parameterwerte erfasst werden können. Um die Quelle dieser zu untersuchen

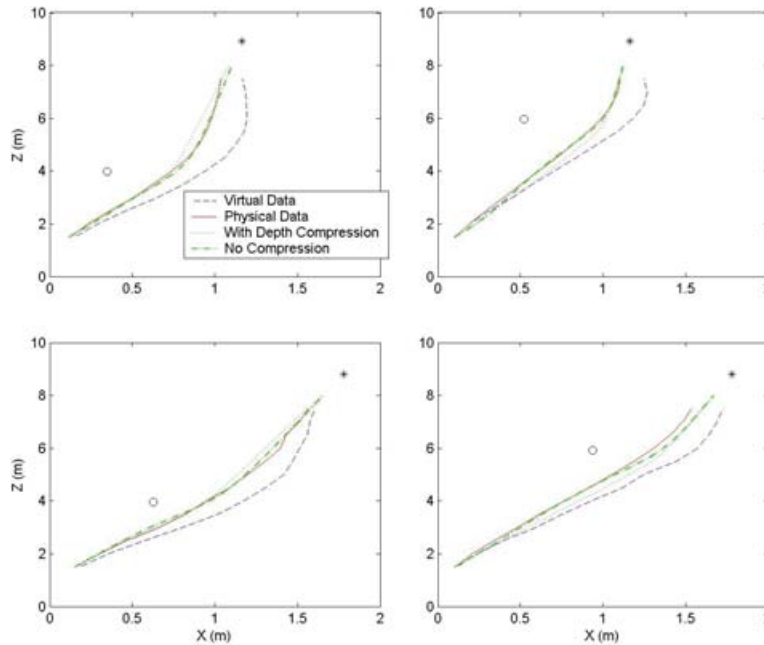


Abb. 5. Simulationen der mittleren Pfade und der Gesamttiefenkompression für jede Konfiguration (wie in Abbildung 3). Blaue Striche, Daten der virtuellen Umgebung; rote feste physische Umgebungsdaten; schwarze Punkte, Modellpfad mit 50% Tiefenkomprimierung; grüne Striche, Best-Fit-Pfad ohne Tiefenkomprimierung.

Unterschiede untersuchten wir die Möglichkeiten, die durch den beobachteten Unterschied in der Gehgeschwindigkeit oder durch die Tiefenkomprimierung in der virtuellen Realität beeinflusst wurden.

3.5.3 Schrittgeschwindigkeit. Um zu beurteilen, ob der signifikante Unterschied in der Gehgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Pfade in virtuellen und physischen Umgebungen verantwortlich sein könnte, haben wir den Anpassungsvorgang unter Verwendung der Durchschnittsgeschwindigkeit für jede Umgebung im Modell wiederholt. Die insgesamt R_z zeigten einen kleinen, aber nicht signifikanten Rückgang der Passform ($R_z = 0,9458$), $F(12, 12) = 1,34$, $p = 0,3101$, ebenso wie die separate Anpassungsgüte an die virtuellen Daten ($R_z = 0,9471$), $F(12, 12) = 1,46$, $p = 0,2611$ und die physischen Daten ($R_z = 0,9440$), $F(12, 12) = 1,23$,

$p = 0,3628$. Die Berücksichtigung der Geschwindigkeit verbessert daher die Modellanpassung an die Daten nicht wesentlich, was darauf hindeutet, dass der Unterschied zwischen dem physischen und dem virtuellen Pfad wahrscheinlich keine Folge der Gehgeschwindigkeit ist.

3.5.4 Entfernungskomprimierung. Wir wollten dann herausfinden, ob eine homogene Entfernungskompression von 50% die größeren Pfadabweichungen in der virtuellen Umgebung erklären kann. Um Pfade durch die virtuelle Umgebung zu simulieren, haben wir jedoch Modellparameter aus der physischen Umgebung verwendet multiplizierte die Eingangsentfernungen d_{OG} und d_{OH} um 0,5 bei jedem Zeitschritt. Dadurch wurde der wahrgenommene egozentrische Abstand zum Ziel und zum Hindernis effektiv um 50% komprimiert. die visuelle Umgebung also allmählich erweiterte sich in der Tiefe, als der Agent durch sie reiste. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die simulierten Pfade mit Entfernungskomprimierung (schwarze Punkte) sind nahezu identisch mit denen ohne Komprimierung (grüne Punkte - Striche), die den physischen menschlichen Daten (roter Feststoff) sehr nahe kommen. Die simulierte Komprimierung führt nur zu einer geringfügigen und statistisch nicht signifikanten Verbesserung der Anpassungsgüte an die virtuellen menschlichen Daten ($R_z = 0,9307$) im Vergleich zu keiner Komprimierung ($R_z = 0,9220$), $F(12, 12) = 1,13$, $p = 0,4179$. Simulationen mit anderen Kompressionswerten ergaben ähnlich kleine Effekte; wir werden überlegen

die Gründe für diese Feststellung in der Diskussion. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die Entfernungskomprimierung an sich nicht die größeren Abweichungen berücksichtigt, die in der virtuellen Umgebung beobachtet werden.

3.5.5 Fajen- und Warren-Parameter. Um festzustellen, wie gut sich die ursprünglichen Parameterwerte von Fajen und Warren [2003] auf neue Objektkonfigurationen in einer virtuellen Umgebung sowie auf eine entsprechende physische Umgebung verallgemeinern lassen, haben wir das Modell mit Parameterwerten aus ihrem Experiment simuliert

3. Die simulierten Pfade (grüne Punkte - Striche) in Abbildung 3 liegen zwischen den mittleren physischen und virtuellen Daten nahe dem gesamten Best-Fit-Pfad (schwarze Punkte). Die Anpassungsgüte an den gesamten Datensatz ($R^2 = 0,9540$) unterscheidet sich nicht wesentlich von der Anpassung an die Daten der physischen Umgebung ($R^2 = 0,9575$), die Daten der virtuellen Umgebung ($R^2 = 0,9513$) oder die aktuelle Gesamtanpassung mit freien Parametern ($R^2 = 0,9597$) ($p > 0,05$ für alle Vergleiche; siehe Tabelle I). Es scheint also, dass sich die Parameter von Fajen und Warren auf neue virtuelle Konfigurationen sowie auf entsprechende physikalische Konfigurationen verallgemeinern lassen, was wiederum zeigt, dass das Modell Daten aus beiden Umgebungen mit einem einzigen Parametersatz approximieren kann.

3.5.6 Reduziertes Modell. Die Tatsache, dass sich die Parameterwerte von der vorliegenden Gesamtanpassung trotz Ähnlichkeiten in der Anpassungsqualität etwas von den Werten von Fajen und Warren unterscheiden, zeigt, dass die Daten durch verschiedene Kombinationen von Parametern eng angenähert werden können. Das heißt, der Parametersatz enthält Redundanzen, so dass verschiedene Parameterkombinationen sehr ähnliche Pfade erzeugen. Dies deutet darauf hin, dass das ursprüngliche Modell möglicherweise mehr freie Parameter enthält, als minimal erforderlich sind, um die menschlichen Daten in diesem Experiment zu berücksichtigen. Um diese Frage zu untersuchen, haben wir ermittelt, wie gut ein reduzierter Parametersatz die beobachteten Unterschiede zwischen der physischen und der virtuellen Umgebung erfassen würde. Zuerst haben wir den Parameter „Dämpfung“ festgelegt b unter der Annahme, dass es den physischen Widerstand gegen Drehen widerspiegelt (z. B. entgegengesetzt zur Zentripetalkraft, die erforderlich ist, um die Körpermasse auf a zu verschieben

gekrümmter Weg). Zweitens haben wir die Ziele festgelegt c_2 Parameter, weil es eine Konstante ist, die einfach eine minimale Zielanziehung bei großen Entfernungen gewährleistet. Drittens haben wir den Parameter für die Hindernisstiefteigigkeit festgelegt k_0 . Dies gibt die Amplitude der Abstoßungsfunktion an, da sie mit dem Parameter redundant ist c_3 , welche beeinflusst sowohl die Amplitude als auch die Ausbreitung der Abstoßungsfunktion; so lange wie k_0 hat einen hohen Wert, c_3 bestimmt die Abweichung des Agenten um das Hindernis. Diese drei Parameter wurden somit konstant gehalten zu den Werten von Fajen und Warren ($b = 3,25$, $c_2 = 0,4$, $k_0 = 198$), während die verbleibenden vier Parameter frei variieren konnten. Trotz der reduzierten Anzahl freier Parameter blieben die Passungen recht stark ($R^2 = 0,9825$ für die virtuelle und $R^2 = 0,9810$ für die physische Umgebung), ohne signifikante Unterschiede zum vollständigen Modell ($F(12, 12) = 1,54$, $p = 0,2328$ für die virtuelle Umgebung und $F(12, 12) = 1,17$, $p = 0,3950$ für die physische Umgebung). Dieses Ergebnis impliziert, dass das reduzierte Modell ausreicht, um die beobachteten Unterschiede zwischen den beiden Umgebungen zu berücksichtigen.

3.5.7 Individuelle Passungen. Da das reduzierte Modell gut zu den Gruppendaten passt, haben wir es als Fenster zu individuellen Leistungsunterschieden verwendet. Der reduzierte Parametersatz wurde in allen Konfigurationen sowohl für die virtuelle als auch für die physische Umgebung separat an die mittleren Daten jedes Teilnehmers angepasst (siehe Tabelle II). Mit Ausnahme von Teilnehmer 4 in der physischen Umgebung waren die Passungen sehr stark und reichten von $R^2 = 0,9595$ – $0,9977$, was darauf hinweist, dass das reduzierte Modell ausreicht, um individuelle Unterschiede zu erfassen. Wilcoxon-Signed-Rank-Summen-Tests wurden auf jeden Parameter angewendet, um Unterschiede zwischen den Umgebungen zu identifizieren. Signifikante Unterschiede zwischen den Umgebungen wurden in gefunden c_1 ($T_{+} = 2$, $p < 0,005$) und c_3 ($T_{+} = 1$, $p < 0,005$), während k_0 näherte sich, erreichte aber keine Bedeutung ($T_{+} = 46$, $p = 0,064$). Das c_1 Parameter, die Abklingrate der Anziehung mit der Entfernung, war in der physischen Umgebung größer als in der virtuellen Umgebung, was bedeutet, dass sich die Teilnehmer in der virtuellen Umgebung in einer bestimmten Entfernung tendenziell schneller dem Ziel zuwenden. Dies wird in schnelleren Kurven reflektiert, nachdem sich das virtuelle Hindernis befindet bestanden (Abbildung 4); die geringfügig höhere Steifheit (k_0) in der virtuellen Umgebung würde ebenfalls zu diesem Effekt beitragen. Ein entsprechender Unterschied trat in der nicht auf c_4 Parameter, die Zerfallsrate im Hindernis

Tabelle II. Parameter passt für das reduzierte Parametermodell und das zugehörige R_z Werte für jeden Teilnehmer an der virtuellen (V) und physischen (P) Umgebung.

	K: G		c1		c3		c4		R_z	
	V.	P.	V.	P.	V.	P.	V.	P.	V.	P.
1	42.05	34,78	0,0950	0,1041	2.681	3,250	0,600	0,600	0,9793	0,9903
2	29,83	15.69	0,1963	0,4200	2.950	9,563	0,600	0,984	0,9689	0,9752
3	50.00	27.81	0,0575	1.1519	2.347	22.700	0,616	0,594	0,9871	0,9595
4	50.00	50.00	0,1044	0,2700	2,525	4,756	0,600	1.400	0,9695	0,6514
5	50.00	15.54	0,2122	0,5222	3.234	15.413	0,600	0,638	0,9812	0,9906
6	49,98	16.65	0,1575	1.1078	2.338	17.159	0,638	0,869	0,9787	0,9977
7	10.29	32.44	0,2113	2.0000	13.188	13.084	0,959	0,884	0,9940	0,9951
8	50.00	13.80	0,0000	2.0000	1,938	30.000	0,613	0,250	0,9895	0,9721
9	50.00	34,68	0,0569	0,9500	2.331	7,959	0,725	1.216	0,9697	0,9937
10	35,55	37,68	0,6550	0,5822	7.000	7,956	1.200	1,694	0,9884	0,9967
Bedeuten	41,77	27,91	0,1746	0,9108	4.0532	13.184	0,7151	0,9129	0,9806	0,9522

Abstoßung mit Distanz. Im Gegensatz dazu ist die c_3 Parameter, der laterale Abfall der Hindernisabstoßung, war in der physischen Umgebung höher als in der virtuellen Umgebung; daher wurde der Teilnehmer seitlich von abgestoßen virtuell mehr als von physischen Hindernissen. Dies spiegelt die Erkenntnis wider, dass die Teilnehmer dazu neigen, auf einem breiteren Weg um Hindernisse in der virtuellen Umgebung herum abzuweichen.

4. DISKUSSION

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass es einen kleinen, aber zuverlässigen Unterschied im Bewegungsverhalten zwischen realen und virtuellen Umgebungen gibt. Eine Mehrheit der Teilnehmer neigte dazu, ein Hindernis in der virtuellen Umgebung etwas weiter zu umgehen als in der angepassten physischen Umgebung. Andererseits betrug der mittlere Unterschied in der maximalen Abweichung nur 0,16 m - ungefähr eine Kopfbreite - und 40% der Teilnehmer zeigten keinen solchen Unterschied (Abbildung 2a). Darüber hinaus waren die Gesamtformen der physischen und virtuellen Pfade qualitativ ähnlich (Abbildung 3), ohne dass sich die mittlere Pfadkrümmung statistisch unterschied. Die Tatsache, dass die Gesamtparameteranpassung ergab R_z Werte über 0,95 sowohl für die virtuellen als auch für die physischen Daten zeigen an, dass die Pfade mit einem einzigen Satz von Parameterwerten eng angenähert werden können.

Dieses Ergebnismuster lässt den Schluss zu, dass virtuelle Umgebungen ein wertvolles Forschungsinstrument für die Untersuchung der visuell gesteuerten Fortbewegung darstellen, insbesondere wenn eine experimentelle Manipulation der realen Umgebung unzulässig ist. Die qualitativen Verhaltensmuster sind ausreichend ähnlich, um theoretische Fragen in virtuellen Umgebungen testen zu können, obwohl quantitative Details wie bestimmte Abstände und Parameterwerte möglicherweise für eine physische Umgebung angepasst werden müssen.

Der verbleibende Unterschied im Bewegungsverhalten zwischen realen und virtuellen Umgebungen ist ein Rätsel. Erstens scheint die Hypothese, dass Menschen mit virtuellen Objekten ein riskanteres Verhalten zeigen, durch die Tatsache ausgeschlossen zu sein, dass die Hindernisfreiheit in der virtuellen Umgebung tatsächlich größer ist als in der physischen. Zweitens scheint der kleine Unterschied in der Gehgeschwindigkeit zwischen den beiden Umgebungen ($\approx 0,13$ m / s) den Wegunterschied nicht zu erklären, da die Anpassung der Modellgeschwindigkeit die Anpassung an die Daten nicht wesentlich verbessert. Wenn wir das Modell als eine angemessene Charakterisierung des Bewegungsverhaltens betrachten, bedeutet dies, dass der Unterschied zwischen virtuellen und physischen Pfaden nicht durch die Gehgeschwindigkeit erklärt wird. Dritte, Die Ergebnisse untergraben auch die Hypothese, dass der Pfadunterschied auf die 50% ige Unterschätzung der Entfernung in virtuellen Umgebungen zurückzuführen ist. Überraschenderweise erzeugten Modellsimulationen mit einer 50% igen Abstandskomprimierung Pfade, die nahezu identisch mit denen ohne Komprimierung waren. In Kombination mit Mohler et al. (2006) wird die Feststellung, dass die Distanzkompression in einer virtuellen Umgebung durch eine kurze Anpassungszeit mit kontinuierlichem Sehen nahezu beseitigt wird.

Die Ergebnisse werfen Zweifel an der Verzerrung der Fernwahrnehmung als Erklärung für Unterschiede in den Bewegungswegen auf.

Warum wirkt sich eine so große Entfernungskomprimierung vernachlässigbar auf die simulierten Pfade aus, da das Modell Entfernungsterme enthält? In dem Modell ergibt sich der Kurs des Agenten zu jedem Zeitpunkt aus dem Wettbewerb zwischen der Anziehungskraft der Kursrichtung in Richtung der Zielrichtung und ihrer Abstoßung von der Hindernisrichtung weg. Die Anziehungs- und Abstoßungsfunktionen nehmen beide mit der Entfernung mit ähnlichen Raten allmählich ab, so dass sie nahezu parallel sind. Eine proportionale Kompression der Ziel- und Hindernisentfernungen führt somit zu einer proportionalen Erhöhung sowohl der Anziehung als auch der Abstoßung, wobei ihr Verhältnis im Wesentlichen erhalten bleibt. Die geringfügigen Unterschiede zwischen den Pfaden in 5 ergeben sich aus kleinen Unterschieden zwischen den exponentiellen Abklingfunktionen. In dem Maße, in dem das Modell die Dynamik des Bewegungsapparates angemessen darstellt, Die Simulationen implizieren, dass der Unterschied zwischen virtuellen und physischen Umgebungen nicht auf die Entfernungskomprimierung zurückzuführen ist. Das Modell sagt jedoch einen Effekt der Entfernungsunterschätzung voraus, wenn es nur ein einziges Ziel in der Szene gibt (höhere Drehrate zum Ziel, wenn die Tiefe komprimiert wird), da in diesem Fall die Anziehungskraft nicht durch Abstoßung ausgeglichen wird. Dies zeigt sich in simulierten Pfaden nach dem Passieren des Hindernisses (Abbildung 5).

Schließlich legt die Analyse der individuellen Passungen unter Verwendung des reduzierten Modells nahe, dass die Ursache für Unterschiede liegt zwischen den Umgebungen gibt es zwei. Erstens die Abklingrate bei der seitlichen Abstoßung vom Hindernis (c_3) war in der virtuellen Umgebung kleiner als in der physischen Umgebung. Dies führt zu einer größeren maximalen Abweichung. und Hindernisbeseitigung, wie in der virtuellen Umgebung beobachtet. Ein solcher Parameterunterschied könnte eine größere Unsicherheit über die Position eines Hindernisses in Bezug auf die eigene Position des Beobachters in der virtuellen als in der physischen Welt widerspiegeln. Dies könnte eine Folge des eingeschränkten Sichtfeldes in der HMD sein ($60^\circ \cdot H$) oder die Tatsache, dass der Körper des Beobachters (z. B. Füße auf dem Boden, Abstand der Hände) in der virtuellen Welt nicht sichtbar dargestellt wurde. Zweitens ist der Rückgang der Anziehungskraft auf das Ziel mit c_1 war in der virtuellen Umgebung kleiner als in der physischen Umgebung, was zu einem schnelleren Wenden führte Rate in Richtung des Ziels; eine geringfügig höhere Torsteifigkeit (k_g) würde auch zu einer schnelleren Wende beitragen. Dies ist als schnellere Wende zu beobachten, nachdem das Hindernis in der virtuellen Umgebung passiert wurde. Zusammengefasst deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass der größere Umweg und die schärfere Wendung in der virtuellen Umgebung auf eine Kombination aus größerer seitlicher Abstoßung vom Hindernis zurückzuführen sein könnten, möglicherweise aufgrund der Unsicherheit über seine egozentrische Position und der größeren Anziehungskraft auf die Zielrichtung in der virtuellen Umgebung. Diese Unterschiede sind zwar gering, können jedoch durch Parametereinstellungen im Modell erfasst werden. Einzelne Unterschiede in bevorzugten Pfaden können auch als Unterschiede in denselben drei Parametern interpretiert werden.

Die zweite Motivation für die vorliegende Studie bestand darin, festzustellen, ob sich das Lenkdynamikmodell von Fajen und Warren [2003] auf neue Bedingungen verallgemeinert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell auf zwei Ebenen der Allgemeinheit erfolgreich auf neue Objektkonfigurationen, Umgebungen und Teilnehmer übertragen wird. Auf einer abstrakten Ebene die funktionale Form des Systems zweiter Ordnung, das im Wesentlichen zu einem Ziel führt, indem der Kursfehler auf Null gesetzt wird ($\beta = \varphi - \psi$) (Gl. 1) und vermeidet Hindernisse durch Abstoßung vom Nullpunkt (Gl. 2), war ausreichend, um die mittleren Pfade in allen Konfigurationen mit anzupassen R^2 Werte besser als 0,98 in der virtuellen und physischen Umgebung. Darüber hinaus reproduzierten die simulierten Pfade unter den meisten Bedingungen genau die Formen der mittleren Pfade (Abbildung 4).

Auf der parametrischen Ebene verallgemeinert sich das Modell auch auf neue Bedingungen mit festen Parametern. Die ursprünglichen Parameterwerte von Fajen und Warren [2003] modellierten die vorliegenden Daten ($R^2 = 0,9540$) fast so gut wie die aktuelle Gesamtbestform ($R^2 = 0,9597$) und ergab R^2 Werte besser als 0,95 in jeder Umgebung. Die simulierten Pfade liegen zwischen den aktuellen virtuellen und physischen Daten und stimmen nahezu mit den aktuellen Best-Fit-Pfaden überein (Abbildung 3). Somit kann das Lenkdynamikmodell das menschliche Verhalten mit neuen Objektkonfigurationen, Umgebungen und Teilnehmern ohne freie Parameter erfolgreich vorhersagen.

Es ist interessant festzustellen, dass die signifikanten statistischen Effekte der Objektkonfiguration auf die Hindernisfreiheit auf natürliche Weise aus dem Lenkdynamikmodell herausfallen, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Zusammen mit dem signifikanten Effekt der Ziel- und Hindernisposition für den Krümmungsradius Minimaler Abstand und maximale Abweichung Dieses Ergebnis legt nahe, dass der Hindernisabstand nicht durch einen festen persönlichen Raum oder Sicherheitsabstand für stationäre Hindernisse bei jedem Teilnehmer bestimmt wird, sondern vielmehr von der Konfiguration der Start-, Hindernis- und Zielpositionen abhängt. In der vorliegenden Darstellung wird das, was gemeinhin als Zone des „persönlichen Raums“ angesehen wird [Gérin-Lajoie et al. 2005] wird als eine emergente Eigenschaft des dynamischen Zusammenspiels von Anziehungs- und Abstoßungskräften in einer bestimmten Objektkonfiguration angesehen.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass das Lenkdynamikmodell, obwohl es eine Reihe von freien Parametern aufweist, nicht ganz allgemein ist. Das Modell kann nicht an einen beliebigen Bewegungsweg angepasst werden, sondern erzeugt eine eingeschränkte Familie menschlicher Wege. Wie in der Einleitung beschrieben, können anscheinend einfachere Modelle die menschliche Steuerung nicht erfolgreich erfassen und erfordern zusätzliche Begriffe, die zur Vermeidung von Hindernissen erweitert werden müssen. Darüber hinaus zeigen die vorliegenden Simulationsergebnisse, dass der ursprüngliche Satz von sieben freien Parametern im Modell von FajenandWarren [2003] effektiv auf vier reduziert werden kann (zwei für Ziele und zwei für Hindernisse) und dennoch den Pfadbereich in den vorliegenden Daten anpasst. Das reduzierte Modell erfasst die Unterschiede zwischen virtuellen und physischen Umgebungen mit R^2 Werte über 0,98 und Unterschiede zwischen einzelnen Teilnehmern mit R^2 Werte über 0,95. Somit beschreibt das Modell die menschliche Lenkdynamik auch bei reduziertem Parametersatz mit hoher Genauigkeit. Vor allem die Tatsache, dass das ursprüngliche Modell von Fajen und Warren [2003] Pfade unter neuen Bedingungen mit festen Parametern berücksichtigen kann, macht es nicht nur beschreibend, sondern auch vorhersagend. Unser aktuelles Forschungsprogramm ermittelt, ob das Modell auf komplexere Situationen skaliert werden kann, indem Objektkomponenten ohne freie Parameter linear kombiniert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass menschliche Pfade in realen und virtuellen Umgebungen trotz eines geringen quantitativen Unterschieds in der Abweichung um ein Hindernis qualitativ ähnlich geformt sind und eng mit einem festen Satz von Modellparametern übereinstimmen können. Wir schließen daraus, dass diese Ergebnisse es rechtfertigen, virtuelle Umgebungen zu nutzen, um Hypothesen über das Bewegungsverhalten zu testen, mit der Einschränkung, dass bestimmte Details möglicherweise für physische Umgebungen angepasst werden müssen.

VERWEISE

- EIN BRAMSON, MA, A. UDET, C., UND D. ENNIS, JE 2004. Verallgemeinerte Mustersuche mit abgeleiteten Informationen. *Mathematisch Programmierung* 100, 3–25.
- EIN GLIOTI, S., D. ESOUZA, JFX, UND G OODALE, MA 1995. Größenkontrast-Illusionen täuschen das Auge, aber nicht die Hand. *Aktuelle Biologie* 5, 679–685.
- B. EALL, AC, L. OOMIS, JM, P. HILBECK, JW, UND F. IKES, TJ 1995. Die absolute Bewegungsparallaxe bestimmt schwach die visuelle Skalierung in realen und virtuellen Umgebungen. *Verfahren des SPIE* 2411, 288–297.
- C. OHEN, JAB, H. UND W. ARREN, WH 2005. Schaltverhalten bei der Vermeidung bewegter Hindernisse. *Journal of Vision* 5, 312a.
- C. REEM- R. EGEHR, SH, W. ILLEMSEN, P., G. OOOCH, AA, UND T. HOMPSON, WB 2005. Der Einfluss eingeschränkter Betrachtungsbedingungen auf die egozentrische Distanzwahrnehmung: Implikationen für reale und virtuelle Innenräume. *Wahrnehmung* 34, 191–204.
- D. IXON, MW, W. RAGA, MJ, P. ROFFITT, DR, UND W. ILLIAMS, GC 2000. Augenhöhenskalierung von absoluter Größe in immersiven und nicht immersiven Displays. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung*, 582–593.
- F. AJEN, BR UND W. ARREN, WH 2003. Verhaltensdynamik von Lenkung, Hindernisvermeidung und Routenauswahl. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie: Menschliche Wahrnehmung und Leistung* 29, 343–362.
- F. AJEN, BR UND W. ARREN, WH 2004. Visuelle Anleitung zum Abfangen eines sich bewegenden Ziels zu Fuß. *Wahrnehmung* 33, 689–715. F. AJEN, BR UND W. ARREN, WH in der Presse. Verhaltensdynamik beim Abfangen eines sich bewegenden Ziels. Experimentelle Hirnforschung. F. RANZ, VH 2003. Planung versus Online-Kontrolle: Dynamische Illusioneffekte beim Greifen? *Räumlichkeit* 16, 211–223.
- F. RANZ, VH, G. EGENFURTER, KR, B. ÜLTHOFF, HH UND F. AHLE, M. 2000. Visuelle Illusionen erfassen: Keine Hinweise auf eine Dissoziation zwischen Wahrnehmung und Handlung. *Psychologische Wissenschaft* 11, 20–25.
- GÉRIN- L. AJOIE, HERR ICHARDS, CL, UND M. CFADYEN, BJ 2005. Die Aushandlung stationärer und sich bewegnender Hindernisse beim Gehen: Vorausschauende Anpassungen des Bewegungsapparates und Erhaltung des persönlichen Raums. *Motorsteuerung* 9, 242–269.

- G LENNERSTER, BEIM CHEANG, L., G. ILSON, SJ, F. ITZGIBBON, AW, UND P. ARKER, AJ 2006. Menschen ignorieren Bewegung und Stereo-Signale zugunsten einer funktional stabilen Welt. *Aktuelle Biologie* 16, 428–432.
- G LIEBHABER, S. UND D. IXON, S. 2001. Dynamische Illusionseffekte bei einer Erreichungsaufgabe: Belege für separate visuelle Darstellungen bei der Planung und Steuerung des Erreichens. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung* 27, 560–572.
- L. LEWELLYN, KR 1971. Visuelle Führung der Fortbewegung. *Journal of Experimental Psychology* 91, 224–230.
- L. OOMIS, JM UND K. NAPP, JM 2003. In *Virtuelle und adaptive Umgebungen*. LJ Hettinger und MW Haas, (Hrsg.) Lawrence Erlbaum, Mahwan, NJ. 21–46.
- M. ESSING, RM UND D. URGIN, FH 2005. Entfernungswahrnehmung und visueller Horizont in Head-Mounted-Displays. *Transaktionen am Angewandte Wahrnehmung* 2, 234–250.
- M. ILNER, ANZEIGE UND G ODDALE, MA 1995. *Das visuelle Gehirn in Aktion*. Oxford University Press, Oxford, England.
- M. OHLER, BJ, C. REEM- R. EGEHR, SCH, UND T. HOMPSON, WB 2006. Der Einfluss von Rückmeldungen auf egozentrische Entfernungsurteile in realen und virtuellen Umgebungen. Unveröffentlichtes Manuskript.
- N. AKAYAMA, K. K. UND L. OOMIS, JM 1974. Optische Geschwindigkeitsmuster, geschwindigkeitsempfindliche Neuronen und Raumwahrnehmung: Eine Hypothese, *Wahrnehmung* 3, 63–80.
- Ö OI, TL, W. U. B., UND H. E. ZJ 2001. Entfernung bestimmt durch die Winkeldeklination unter dem Horizont. *Nature London* 414, 197–200.
- Ö PITZ, D., G. EGENFURTER, KR, UND B. ÜLTHOFF, HH 1996. Ein Vergleich des Erfassens realer und virtueller Objekte. *Wahrnehmung* 25 (Suppl.), 92–93.
- P. HILBECK, JW 1997. Vergleich zweier Indikatoren für die wahrgenommene egozentrische Distanz unter Bedingungen mit vollem und reduziertem Cue. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung* 23, 72–85.
- R. USHTON, SK, W. DE, J., UND EIN LLISON, RS 2002. *Proceedings Lecture Notes in Computer Science*, 2525. Springer-Verlag, Berlin. 576–591.
- S. AHM, CS, C. REEM- R. EGEHR, SH, T. HOMPSON, WB, UND W. ILLEMSEN, S. 2005. Werfen versus Gehen als Indikatoren für die Fernwahrnehmung in ähnlichen realen und viralen Umgebungen. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung* 2, 35–45.
- S. CHÖNER, G., D. OSE, M., UND E. NGELS, C. 1995. Dynamik des Verhaltens: Theorie und Anwendungen für autonome Roboterarchitekturen. *Robotik und autonome Systeme* 16, 213–245.
- S. EDGWICK, H. 1980. In *Die Wahrnehmung von Bildern*, MA Hagen, Ed. Akademische Presse, New York. 1. S. TRIFFT, JBJ UND B. RENNER, E. 1999. Eine neue Sicht auf das Greifen. *Motorsteuerung* 3, 237–271.
- S. TRIFFT, JBJ, G. LIEBHABER, S., UND B. RENNER, E. 2003. Modellierung des zeitabhängigen Effekts der Ebbinghaus-Illusion auf das Greifen. *Raumblick* 16, 311–324.
- T. ARR, M. UND W. ARREN, WH 2002. Virtuelle Realität in der Verhaltensneurowissenschaft und darüber hinaus. *Nature Neuroscience*, 5 (Suppl.), 1089–1092.
- T. HOMPSON, WB, W. ILLEMSEN, P., G. OUCH, AA, C. REEM- R. EGEHR, SH, L. OOMIS, JM, UND B. EALL, AC 2004. Ist die Qualität der Computergrafik bei der Beurteilung von Entfernungen in visuell immersiven Umgebungen von Bedeutung? *Präsenz* 13, 560–571.
- V. ISHTON, PM, R. EA, JG, C. UTTING, JE, UND N. UNEZ, LN 1999. Vergleich der Auswirkungen der horizontal-vertikalen Illusion auf die Griffskalierung und -beurteilung: Relativ versus absolut, nicht Wahrnehmung versus Aktion. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung* 25, 1659–1672.
- W. ARREN, WH UND W. AUFHÄNGEN, S. 1987. Visuelle Führung beim Gehen durch Öffnungen: Körper-skalierte Informationen für Erschwinglichkeiten. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung* 13, 371–383.
- W. ILKIE, RM UND W. ANN, J. 2003. Steuerung der Lenkung und Beurteilung der Richtung: Netzhautfluss, visuelle Richtung und Informationen außerhalb der Netzhaut. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung* 29, 363–378.
- W. ILLEMSEN, P., C. OLTON, MB, C. REEM- R. EGEHR, SCH, UND T. HOMPSON, WB 2004. *ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung*. Los Angeles, Kalifornien. 35–38.

Eingegangen im Dezember 2005; überarbeitet im Oktober 2006; akzeptiert Dezember 2006