

# Natürliches Gehen in der virtuellen Realität: Ein Rückblick

NIELS CHRISTIAN NILSSON und STEFANIA SERAFIN, Universität Aalborg Kopenhagen

FRANK STEINICKE, Universität Hamburg

ROLF NORDAHL, Universität Aalborg Kopenhagen

---

Die jüngsten technologischen Entwicklungen haben die virtuelle Realität (VR) endlich aus dem Labor in die Hände von Entwicklern und Verbrauchern gebracht. Es gibt jedoch noch eine Reihe von Herausforderungen. Virtuelles Reisen ist eine der häufigsten und universellsten Aufgaben, die in virtuellen Umgebungen ausgeführt werden. Die Navigation von Benutzern in virtuellen Umgebungen ist jedoch keine triviale Herausforderung, insbesondere wenn der Benutzer zu Fuß unterwegs ist. In diesem Artikel geben wir zunächst einen Überblick über die zahlreichen virtuellen Reisetechiken, die vor der Kommerzialisierung von VR vorgeschlagen wurden. Dann wenden wir uns dem Reisemodus zu, der am schwierigsten zu erleichtern ist, dh dem Gehen. Die Herausforderung, Benutzern natürliche Lauferlebnisse in VR zu bieten, kann in zwei separate, wenn auch verwandte Herausforderungen unterteilt werden: (1) Ermöglichen eines uneingeschränkten Gehens in virtuellen Welten, die größer als der verfolgte physische Raum sind, und (2) Bereitstellen geeigneter multisensorischer Stimuli als Reaktion auf ihre Interaktion mit der virtuellen Umgebung. In Bezug auf die erste Herausforderung stellen wir Gehtechiken vor, die in drei allgemeine Kategorien unterteilt sind: Repositionierungssysteme, Fortbewegung basierend auf Proxy-Gesten und umgeleitetes Gehen. In Bezug auf multimodale Stimuli konzentrieren wir uns auf die Bereitstellung von drei Arten von Informationen: externe sensorische Informationen (visuell, auditorisch und kutan), interne sensorische Informationen (vestibulär und kinästhetisch / propriozeptiv) und efferente Informationen. Abschließend diskutieren wir, wie die verschiedenen Kategorien von Gehtechiken verglichen werden, und diskutieren die Herausforderungen, denen sich die Forschungsgemeinschaft noch gegenübersteht.

CCS-Konzepte: • **Human-Centered Computing** → **Virtuelle Realität**;

Zusätzliche Schlüsselwörter und Sätze: Virtuelle Realität, virtuelles Reisen, Gehen, Natürlichkeit

## ACM-Referenzformat:

Niels Christian Nilsson, Stefania Serfan, Frank Steinicke und Rolf Nordahl. 2018. Natürliches Gehen in der virtuellen Realität: Ein Rückblick. *ACM Comput. Unterhalten*. 16, 2, Artikel 8 (April 2018), 22 Seiten.

<https://doi.org/10.1145/3180658>

---

## 1. EINLEITUNG

Virtual Reality (VR) ist nicht mehr auf die Labors größerer öffentlicher und privater Institutionen beschränkt. Im Jahr 2016 betrat VR erstmals die Häuser der Verbraucher. Wir verwenden die Bezeichnung VR, um Systeme zu bezeichnen, die es Benutzern durch High-Fidelity-Tracking und -Anzeigen ermöglichen, auf natürliche Weise in computergenerierten Umgebungen zu interagieren. Das heißt, VR unterstützt eine sensomotorische Schleife ähnlich der realen Welt und ermöglicht es den Benutzern, wahrzunehmen und zu handeln, wie sie es in der Realität tun würden. Die Popularisierung von VR wurde teilweise von einer Generation junger Unternehmer angestiftet und

---

Autorenadressen: NC Nilsson, Universität Aalborg, Kopenhagen, AC Meyers Vænge 15, Kopenhagen, 2450, Dänemark; E-Mail: [ncn@create.aau.dk](mailto:ncn@create.aau.dk) ; S. Serafin, Universität Aalborg, Kopenhagen, AC Meyers Vænge 15, Kopenhagen, 2450, Dänemark; E-Mail: [sts@create.aau.dk](mailto:sts@create.aau.dk). F. Steinicke, Universität Hamburg, Vogt-Kölln-Str. 30, Hamburg, D-22527, Deutschland; E-Mail: [m@create.aau.dk](mailto:m@create.aau.dk) ; R. Nordahl, Universität Aalborg, Kopenhagen, AC Meyers Vænge 15, Kopenhagen, 2450, Dänemark; E-Mail: [m@create.aau.dk](mailto:m@create.aau.dk).

Die Erlaubnis, digitale oder gedruckte Kopien aller oder eines Teils dieser Arbeit für den persönlichen Gebrauch oder den Unterricht zu erstellen, wird ohne Gebühr erteilt, vorausgesetzt, Kopien werden nicht zu Gewinn- oder Handelszwecken angefertigt oder verteilt und Kopien tragen diesen Hinweis und das vollständige Zitat auf der ersten Seite. Urheberrechte für Komponenten dieser Arbeit, die anderen als ACM gehören, müssen anerkannt werden. Das Abstrahieren mit Kredit ist erlaubt. Um etwas anderes zu kopieren oder erneut zu veröffentlichen, auf Servern zu veröffentlichen oder auf Listen weiterzugeben, ist eine vorherige Genehmigung und / oder eine Gebühr erforderlich. Berechtigungen anfordern von [permissions@acm.org](mailto:permissions@acm.org). © 2018 ACM 1544-3574 / 2018/04-ART8 \$ 15.00

<https://doi.org/10.1145/3180658>

Crowdfunding-Kampagnen (Morie 2014 ) und wurde seitdem durch die Beteiligung großer Technologieunternehmen - vor allem Facebook, Samsung, Google und Sony - intensiviert. Trotz seiner jüngsten Beliebtheit ist VR keineswegs eine Neuheit. Tatsächlich ist es mehr als 50 Jahre her, dass Sutherland ( 1965 ) präsentierte seine Vision des ultimativen Displays. Insbesondere beschrieb Sutherland die ultimative Anzeige als „einen Raum, in dem der Computer die Existenz von Materie steuern kann. Ein Stuhl, der in einem solchen Raum ausgestellt ist, wäre gut genug, um darin zu sitzen. Handschellen, die in einem solchen Raum ausgestellt sind, wären eng, und eine Kugel, die in einem solchen Raum ausgestellt ist, wäre tödlich. Bei entsprechender Programmierung könnte eine solche Anzeige buchstäblich das Wunderland sein, in das Alice hineinging“ (Sutherland) 1965 , p. 508). Das natürliche Gehen bleibt jedoch eine der größten Herausforderungen für Forscher und Entwickler, die den Benutzern den Zugang zu digitalen Wunderländern wie den von Sutherland geplanten ermöglichen möchten.

In diesem Artikel präsentieren wir einen Überblick über die verschiedenen Ansätze zur Erleichterung des natürlichen Gehens in virtuellen Umgebungen. Im Gegensatz zu kritischen Überprüfungen umfasste die Auswahl der Quellen nicht die Suche nach allen potenziell relevanten Arbeiten anhand reproduzierbarer Kriterien (Cook et al. 1997 ). Stattdessen wurde die Literatur, die die Grundlage für die narrative Überprüfung bildet, anhand von Stichproben bekannter und aktueller Arbeiten identifiziert, die detaillierte Erhebungen zu Themen enthalten, die für das natürliche Gehen in virtuellen Umgebungen relevant sind (Bowman et al. 2004 ;; Fontana und Visell 2012 ;; Nilsson et al. 2016b ;; Steinicke et al. 2013 ;; Suma et al. 2012 ;; Vasylevska und Kaufmann 2017a ).

Das allgemeine Ziel der Überprüfung ist es, einen Überblick über die umfangreiche Arbeit zum Gehen in virtuellen Umgebungen zu geben. Die Überprüfung zielt darauf ab, das virtuelle Gehen in die breitere Kategorie der virtuellen Reisetechiken einzubeziehen (Abschnitt 2 ) und heben die Herausforderungen hervor, die im Zusammenhang mit dem virtuellen Gehen besonders relevant sind (Abschnitt 3 ). Die beiden Hauptherausforderungen, die mit dem natürlichen Gehen in VR verbunden sind, sind (1) das Ermöglichen eines uneingeschränkten Gehens in virtuellen Umgebungen, die größer als der physische Verfolgrungsraum sind, und (2) das Bereitstellen geeigneter multisensorischer Stimuli als Reaktion auf ihre Interaktion mit der virtuellen Umgebung. Infolgedessen zielt die Überprüfung darauf ab, verschiedene Versuche zur Bewältigung dieser beiden Herausforderungen zu untersuchen und zu kategorisieren (Abschnitt 4 und 5 ). Basierend auf der im gesamten Artikel untersuchten Literatur stellen wir schließlich aktuelle Herausforderungen und mögliche Richtungen für zukünftige Arbeiten vor (Abschnitt 6 ).

## 2 VIRTUELLE REISETECHNIKEN

Für die meisten Menschen ist der Umzug von einem Ort zum anderen eine alltägliche Aktivität. Wir legen kürzere Strecken zu Fuß zurück und längere Strecken werden mit Hilfe von Fahrzeugen mit menschlichem Antrieb oder Motor wie Fahrrädern, Autos und Flugzeugen zurückgelegt. In Bezug auf die Wechselwirkung mit dreidimensionalen Grenzflächen haben Bowman et al. (( 2004 ) beschreiben virtuelles Reisen in ähnlicher Weise als eine der häufigsten und universellsten Formen der Interaktion. Darüber hinaus ist virtuelles Reisen in der Regel sekundär zu anderen Aufgaben wie Erkunden, Suchen und Manövrieren. Daher ist es für Benutzer erforderlich, relativ einfach virtuell reisen zu können, ohne dem Akt des Reisens selbst viel explizite Aufmerksamkeit widmen zu müssen. Es ist jedoch nicht trivial, Benutzern dies zu ermöglichen, insbesondere wenn die Person, die durch eine virtuelle Umgebung reist, ein handelsübliches VR-System verwendet, das in einem durchschnittlichen Wohnzimmer eingerichtet ist.

Im Allgemeinen kann die Aufgabe, in realen und virtuellen Umgebungen (dh Navigation) von einem Ort zum anderen zu wechseln, unterteilt werden *Wegfindung* (die kognitive Komponente der Pfadplanung und Entscheidungsfindung) und *Reisen* (die Motorkomponente) (Bowman et al. 2004 ). Bowman et al. (( 1997 ) beschreiben, dass Reisen weiter in drei Unteraufgaben zerlegt werden können: *Richtung*

oder *Zielauswahl* (Angabe, wohin bewegt werden soll), *Geschwindigkeits- / Beschleunigungsauswahl* (Spezifikation von Bewegungsgeschwindigkeit) und *Bedingungen für die Eingabe* (Angabe, wie Reisen angestoßen, fortgesetzt und beendet werden). Wenn der Fahrer beispielsweise mit dem Auto fährt, wählt er mit dem Lenkrad die Fahrtrichtung aus, und die Geschwindigkeit wird mithilfe einer Kombination aus Gaspedal, Schalthebel, ausgewählt.

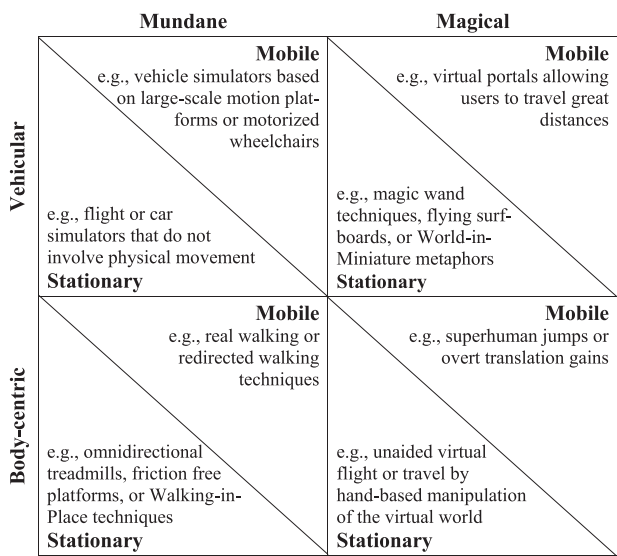


Abb. 1. Nilsson, Serafin und Nordahl ( 2016b ) Taxonomie virtueller Reisetechiken: Die vertikale Achse unterteilt die Techniken danach, ob die Reisetchnik eine körperzentrierte oder eine fahrzeugzentrierte Fahrt darstellt. Die Horizontale unterteilt die Techniken danach, ob die Interaktionsmetapher banal oder magisch ist. Die Teilung jeder Zelle repräsentiert den Grad der Benutzerbewegung relativ zur physischen Umgebung.

und Pausen, die auch die Bedingungen für die Eingabe definieren. Während diese Zerlegung eine nützliche Linse bietet, durch die einzelne Reisetechiken betrachtet werden können, liefert sie kein breiteres Bild davon, wie virtuelles Reisen erreicht werden kann. Inspiriert von bestehenden Kategorisierungen von Reisetechiken (Bowman et al. 2004 ; Slater und Usoh 1994 ; Suma et al. 2012 ; Wendt 2010 ), Nilsson et al. (( 2016b )) vorhandene Reisetechiken in dichotome Kategorien einteilen. Insbesondere unterscheiden sie zwischen Reisetechiken basierend darauf, ob der Benutzer stationär ist oder sich bewegt, ob die Techniken virtuelle Fahrzeuge betreffen oder nicht und ob die Techniken als banal oder magisch gelten. Zahl 1

visualisiert die Taxonomie, die im Folgenden ausführlicher beschrieben wird.

2.1 Mobile und stationäre Reisetechiken

Die Unterscheidung zwischen mobilen und stationären Reisetechiken ist von früheren Arbeiten inspiriert, bei denen Reisetechiken anhand des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins körperlicher Bewegung kategorisiert werden (Bowman et al. 1999 ; Wendt 2010 ). Diese Unterscheidung ist wichtig, da einige im Handel erhältliche VR-Systeme keine Positionsverfolgung enthalten. Dies gilt insbesondere für VR-Systeme, die mit Mobiltelefonen betrieben werden (z. B. Samsung Gear VR, Google Daydream und Google Cardboard), bei denen nur die Kopfausrichtung des Benutzers verfolgt wird. Solche Systeme machen es unmöglich, sich auf mobile Reisetechiken zu verlassen. Stattdessen erfolgt die Richtungsauswahl häufig mithilfe einer blickgesteuerten Lenkung, bei der die Richtung aus der Kopforientierung abgeleitet wird und die Bewegung durch Klicken auf die Taste oder durch anhaltende Fixierung an einem bestimmten Punkt in der Umgebung ausgelöst wird. Blickgerichtete Lenkung kann umständlich sein, wenn vertikale Bewegungen möglich sind (z. B. beim Fliegen). 2004 ). Die Frage, ob eine Reisetchnik körperliche Bewegung erfordert oder nicht, ist auch in Bezug auf Systeme mit höherer Wiedergabetreue wie das HTC Vive und das Oculus Rift wichtig. Solche Systeme umfassen eine Positionsverfolgung, und der Benutzer kann daher den virtuellen Blickwinkel durch physische Bewegung ändern. Diese Systeme leisten sich jedoch nur

Bewegung in einem begrenzten physischen Raum. Dies ist problematisch, da die virtuelle Bewegung des Benutzers nur durch die virtuelle Architektur und Topographie eingeschränkt werden sollte. Im besten Fall kann das Verlassen des verfolgten Bereichs das Gefühl des Benutzers beeinträchtigen, sich in der virtuellen Umgebung zu befinden. Im schlimmsten Fall kann dies gefährlich sein, da der Benutzer beim Tragen des am Kopf montierten Displays (HMD) keine physischen Hindernisse wahrnimmt.

## 2.2 Mundane und magische Reisetechiken

Die Unterscheidung zwischen weltlichen und magischen Reisetechiken wurde von Slater und Usoh übernommen ( 1994 ) und Whittton und Razzaque ( 2008 ). Eine Reisetechik wird als banal oder magisch eingestuft, je nachdem, ob die Bewegung in der virtuellen Umgebung durch physikalische Einschränkungen wie die Gesetze der Physik, die biologische Evolution oder den aktuellen Stand der technologischen Entwicklung eingeschränkt ist. Daher gilt jede Technik, die es dem Benutzer ermöglicht, auf eine Weise zu reisen, die in der realen Welt nicht möglich ist, als magisch, und Techniken, die das reale Reisen imitieren, werden als banal angesehen. Es gibt einige wichtige Unterschiede zwischen magischen und weltlichen Reisetechiken. Erstens können magische Reisetechiken es Benutzern ermöglichen, große Entfernungen innerhalb der virtuellen Umgebung zurückzulegen, ohne dass eine physische Bewegung erforderlich ist. Darüber hinaus haben Bowman et al. (( 2012 ) beschreiben, dass magische Interaktionstechniken absichtlich entwickelt werden können, um die Aufgabenleistung und Benutzerfreundlichkeit gegenüber den vertrauten Begleittechniken zu fördern, die reale Interaktionen imitieren. Wenn ein Benutzer beispielsweise große Entfernungen innerhalb der virtuellen Umgebung zurücklegen soll, ist die Teleportation viel schneller und weniger anstrengend als das Gehen oder Steuern eines virtuellen Fahrzeugs. Trotzdem sind weltliche Reisetechiken manchmal einfacher anzuwenden, da sie auf einer vertrauten Art der Interaktion basieren, und das Szenario selbst kann eine Technik erfordern, die im wirklichen Leben möglich ist (z. B. während Trainingsszenarien oder erzählerischer Erfahrungen, die sich in a entfalten) Welt, die an realen Zwängen festhält).

## 2.3 Fahrzeug- und körperzentrierte Reisetechiken

Schließlich haben Nilsson et al. (( 2016b ) unterscheiden zwischen fahrzeug- und körperzentrierten Reisetechiken, dh Techniken, die das Reisen mit einem virtuellen Fahrzeug simulieren, und Techniken, die Bewegungen simulieren, die durch die Verwendung des Körpers zur Ausübung von Kräften auf die Umwelt (z. B. Gehen, Laufen oder Schwimmen) erzeugt werden. . Beim Fahren mit einem virtuellen Fahrzeug erzeugt der Benutzer indirekt eine Bewegung, indem er die Steuerungen manipuliert, während er relativ zum Fahrzeug stationär bleibt. Daher erfordern Fahrzeugfahrttechniken keinen großen Verfolgungsraum. Selbst wenn der Benutzer physisch stationär ist, kann die Bewegung des virtuellen Blickwinkels zwingende Selbstbewegungssillusionen erzeugen (z. B. Hettinger et al. ( 2002 ) und Warren und Wertheim ( 1990 )). Zwingende Illusionen von Selbstbewegung können jedoch mit Kosten verbunden sein, da angenommen wird, dass sie Cybersickness hervorrufen (Davis et al. 2014 ) oder VR-Krankheit (Fernandes und Feiner 2016 ). Insbesondere ist die vorherrschende Ansicht, dass Cybersickness aus einem Konflikt zwischen externen sensorischen Informationen und vestibulären Empfindungen resultiert (z. B. nimmt der Benutzer Bewegung visuell wahr, aber das vestibuläre System zeigt an, dass er oder sie stationär ist) (Davis et al. 2014 ).

## 3 NATÜRLICHES WANDERN IN VIRTUELLEN UMGEBUNGEN

Menschen navigieren, wie vorgeschlagen, routinemäßig zu Fuß durch ihre Umgebung, und dies im Allgemeinen relativ leicht und ohne den ausgeführten Bewegungen oder den sensorischen Reizen, die als Ergebnis dieser Bewegungen erzeugt werden, viel explizite Aufmerksamkeit zu widmen. Die Aufgabe, Benutzern das Durchlaufen virtueller Welten zu ermöglichen, ist jedoch alles andere als trivial. Nach Angaben von Nordahl et al. (( 2012b ) kann diese Aufgabe in mindestens zwei separate, jedoch miteinander verbundene Herausforderungen unterteilt werden: (1) Schaffung von Reisetechiken, die die Erfahrung des realen Gehens nachahmen, ohne dass ein physischer Raum von der gleichen Größe wie die virtuelle Umgebung erforderlich ist, und (2) Bereitstellung geeigneter multisensorischer Stimuli

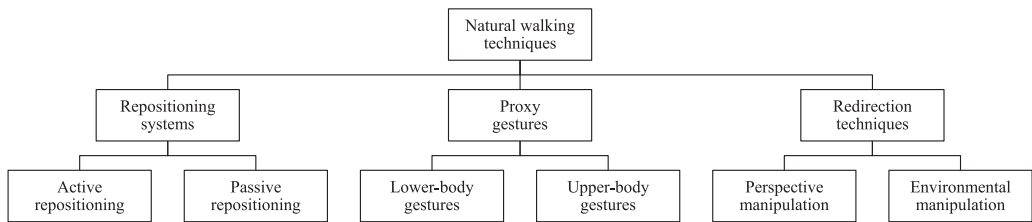


Abb. 2. Drei allgemeine Kategorien von Gehtechiken, die Benutzern relativ natürliche Lauferlebnisse bieten, wenn die virtuelle Umgebung kleiner als der physische Raum ist: Neupositionierungssysteme, Proxy-Gesten und umgeleitetes Gehen. Es ist weiter möglich, zwischen aktiven oder passiven Neupositionierungssystemen, Proxy-Gesten, die auf der Bewegung der Beine oder des Oberkörpers basieren, und umgeleitetem Gehen, das auf der Anwendung von Verstärkungen oder der Manipulation der virtuellen Architektur basiert, zu unterscheiden.

resultierend aus der Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Umgebung (z. B. dem Anblick, dem Ton und der Berührung, die jeden Schritt begleiten). Im Folgenden überprüfen wir die Arbeit, die sich mit diesen beiden Herausforderungen befasst.

## 4 WANDERTECHNIKEN

Innerhalb der akademischen Gemeinschaft wurden zahlreiche Lösungen für das Problem vorgeschlagen, dass Benutzer auf natürliche Weise durch große virtuelle Umgebungen gehen können. Im Allgemeinen fallen diese Techniken

in eine von drei Kategorien: *Neupositionierungssysteme*, *Proxy-Gesten*, und *umgeleitetes Gehen*. Zahl 2 visualisiert die drei Kategorien und die möglichen Unterteilungen, die im Folgenden beschrieben werden.

### 4.1 Neupositionierungssysteme

Repositionierungssysteme wirken im Wesentlichen der Vorwärtsbewegung des Benutzers entgegen und stellen dadurch sicher, dass er oder sie in einer relativ festen Position bleibt. Befolgen Sie daher die in Abschnitt 4 dargestellte Taxonomie 2 Repositionierungssysteme bieten stationäres virtuelles Reisen. Es ist möglich, zwischen Systemen zu unterscheiden, die den Benutzer aktiv oder passiv neu positionieren.

*Aktive Neupositionierung* stützt sich häufig auf aufwändige mechanische Einstellungen, um die Vorwärtsbewegung des Benutzers abubrechen. Eines der einfachsten Beispiele für ein aktives Repositionierungssystem ist das traditionelle lineare Laufband (Feasel et al. 2011 ;; Kassler et al. 2010 ;; Powell et al. 2011 ). Ein inhärenter Nachteil solcher Laufbänder besteht darin, dass der Benutzer nur vorwärts gehen kann, und wenn die Anwendung gedreht werden muss, muss dies auf indirekte Weise erfolgen (z. B. basierend auf der Kopforientierung des Benutzers oder unter Verwendung eines Joysticks) (Bowman et al. 2004 ). Insbesondere wurden auch Anstrengungen unternommen, um das natürliche Gehen mit omnidirektionalen Laufbändern zu erleichtern, die es dem Benutzer ermöglichen, frei in jede Richtung zu gehen (Darken et al.

1997 ;; Iwata 1999 ;; Noma 1998 ;; Souman et al. 2011 ). Eine mögliche Einschränkung solcher Techniken besteht darin, dass diese Bewegung des Laufbandes dazu führen kann, dass der Benutzer während Kurven und Seitenschritten das Gleichgewicht verliert (Bowman et al. 2004 ). Andere Beispiele für Neupositionierungssysteme umfassen motorisierte Bodenfliesen, die sich in die entgegengesetzte Richtung der Gehrichtung bewegen (Iwata et al. 2005 ), Aufhebung der Schritte des Wanderers durch an seinen Schuhen befestigte Schnüre (Iwata et al. 2007 ) und eine humanisierte Hamsterkugel (Medina et al. 2008 ). Drei Beispiele für aktive Neupositionierungssysteme sind in den Abbildungen zu sehen 3 (a) bis 3 (c).

*Passive Neupositionierung* bietet eine einfachere und kostengünstigere Alternative zur aktiven Neupositionierung. Im Allgemeinen basieren passive Neupositionierungssysteme auf reibungsfreien Plattformen, die verhindern, dass die bei jedem Schritt erzeugten Kräfte den Benutzer vorwärts bewegen (Avila und Bailey) 2014 ;; Cakmak und Hager

2014 ;; Huang 2003 ;; Iwata und Fujii 1996 ;; Swapp et al. 2010 ;; Walther-Franks et al. 2013 ). Das *Virtuix*

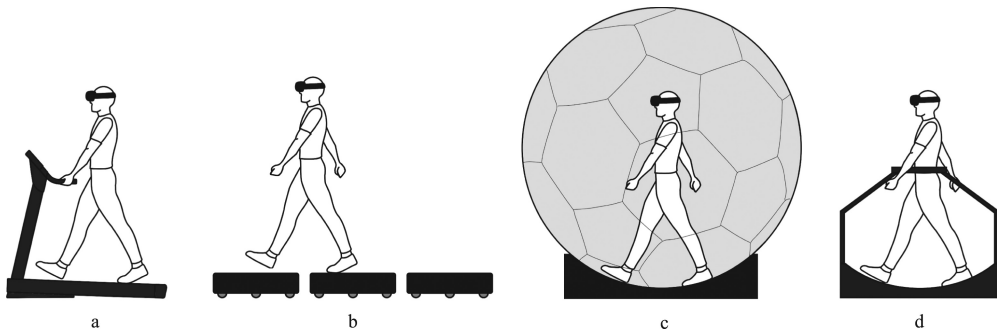


Abb. 3. Vier Beispiele für Neupositionierungssysteme: (a) ein herkömmliches lineares Laufband, (b) motorisierte Bodenfliesen, (c) eine Hamsterkugel in Menschengröße und (d) eine reibungsfreie Plattform.

*Omni*, *Cyberiths Virtualizer*, und *KatVRs Kat Walk* sind Beispiele für kommerzielle Versionen dieses Ansatzes zur Neupositionierung von Benutzern. Ein Beispiel für eine reibungsfreie Plattform ist in Abbildung dargestellt 3 (d).

## 4.2 Proxy-Gesten

Die Fortbewegung basierend auf Proxy-Gesten erfordert, dass der Benutzer Gesten ausführt, die als Proxy für tatsächliche Schritte dienen. Es ist möglich, zwischen verschiedenen Unterkategorien zu unterscheiden, je nachdem, welcher Körperteil zur Ausführung der Proxy-Geste verwendet wird. In diesem Artikel werden Gesten der Einfachheit halber als Ober- und Unterkörpergesten klassifiziert.

Da das Ziel darin besteht, ein Lauferlebnis zu erzeugen, das einem echten Gehen ähnelt, beruhen Proxy-Gesten häufig auf Bewegungen des Unterkörpers. Der gebräuchlichste Ansatz sind sogenannte Walking-in-Place-Techniken (WIP). Wenn der Benutzer mit solchen Techniken durch virtuelle Welten reist, führt er vor Ort stufenartige Bewegungen aus. Die vorhandenen Schritte können basierend auf einer physikalischen Schnittstelle registriert werden, die diskrete Gangereignisse erfasst (z. B. Bouguila et al. (2005, 2003) und Richard et al. ((2007))) oder unter Verwendung von Bewegungsverfolgungssystemen, die eine kontinuierliche Erfassung der Position und Geschwindigkeit von Gliedmaßen ermöglichen (z. B. Bruno et al. (2013), Feasel et al. ((2008), Slater et al. ((1993) und Wendt et al. ((2010))). Obwohl selbst berichtete Maßnahmen ergeben haben, dass Benutzer echtes Gehen einfacher, unkomplizierter und natürlicher finden (Usoh et al. 1999), WIP-Techniken bieten eine Reihe von Vorteilen: (1) WIP-Techniken sind bequem und kostengünstig (Feasel et al. 2008), (2) WIP-Techniken können einen Teil des propriozeptiven Feedbacks liefern, das dem echten Gehen innewohnt (Slater et al. 1994), (3) WIP-Techniken können im Vergleich zu Techniken, bei denen Bewegung durch Drücken einer Taste erzeugt wird, ein erhöhtes Gefühl vermitteln, in der virtuellen Umgebung „da zu sein“ (Slater et al. 1995) und (4) WIP-Techniken können in Bezug auf die Leistung der Benutzer bei einfachen räumlichen Orientierungsaufgaben (dh Aufgaben, bei denen Benutzer Objekte lokalisieren und nach Abschluss der Navigation auf einen bestimmten Ort zeigen müssen) mit echtem Gehen vergleichbar sein (Williams et al. 2011). WIP-Techniken wurden unter Verwendung von im Handel erhältlicher Hardware wie der von Microsoft implementiert *Kinect* (Suma et al. 2011), Nintendos

*Wii Balance Board* (Filho et al. 2012 ;; Williams et al. 2011) und die Trägheitsdaten, die von den Sensoren eines mobilen HMD erhalten wurden (Pfeiffer et al. 2016 ;; Tregillus und Folmer 2016). Bei den meisten WIP-Techniken handelt es sich um eine Geste, die an das Marschieren vor Ort oder das Treppensteigen erinnert (Abbildung 4 (ein)). Neuere Arbeiten legen jedoch nahe, dass das Gehen als natürlicher empfunden werden kann, wenn der Benutzer eine Geste ausführt, die dem tatsächlichen Gehen in Bezug auf den wahrgenommenen Energieverbrauch besser entspricht, z. B. abwechselnd jede Ferse gegen den Boden zu klopfen (Nilsson et al. 2013) (Zahl 4 (b)). Insbesondere führt das Antippen an Ort und Stelle zu Kniebewegungen, die als gestische Eingabe für die virtuelle Fortbewegung an anderer Stelle beschrieben wurden (Guy et al. 2015 ;; Punpongsonan et al. 2016 ;; Templeman et al. 1999).

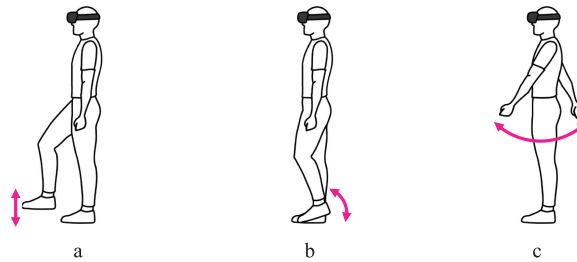


Abb. 4. Drei Beispiele für Proxy-Gesten: (a) die traditionelle WIP-Geste, (b) das Schwingen des Arms und (c) das Antippen an Ort und Stelle. Die violetten Pfeile veranschaulichen die Bewegung der Körperteile, mit denen die Geste ausgeführt wird.

Während Schritte an Ort und Stelle die häufigste Geste des Unterkörpers zu sein scheinen, wurden Alternativen vorgeschlagen. Zum Beispiel Zielinski, McMahan und Brady (2011) kombinierte commonWIP-Fortbewegung für Vorwärtsbewegung mit einer beinbasierten Quetschgeste zum Ausweichen (dh der Benutzer würde mit einem Fuß zur Seite treten und diesen Fuß dann entlang des Bodens nach innen zum anderen Fuß hin schieben). Im Rahmen ihrer Bemühungen, nicht ermüdende und leicht zugängliche Gesten für virtuelles Reisen zu identifizieren, haben Guy et al. ((2015) und Punpongson et al. ((2016) untersuchten die Verwendung einer Reihe von Gesten, darunter das Platzieren eines Fußes vor oder hinter dem Schwerpunkt, Hüftrotationen um die Längsachse des Körpers und seitliche Hüftschwingungen.

Auf den ersten Blick scheinen Oberkörpergesten weniger geeignet zu sein, wenn man ein natürliches Lauferlebnis ermöglichen möchte. Es wurde jedoch vorgeschlagen, dass relativ natürliche Erfahrungen auf der Grundlage von Gesten erzielt werden können, die keine explizite Beinbewegung aufweisen, wie z. B. das Hin- und Herschwingen der Arme (McCullough et al. 2015 ;; Nilsson et al. 2013 ;; Wilson et al. 2016) (Zahl 4 (c)). Die Ergebnisse einer Studie von Nilsson et al. ((2013) schlagen vor, dass Benutzer diese Geste genauso natürlich wie die WIP-Fortbewegung und weniger ermüdend erleben. Die Autoren beschreiben, dass ein möglicher Grund, warum diese Geste als relativ natürlich empfunden wurde, darin besteht, dass sie ein rhythmisches Schwingen der Arme beinhaltet, ähnlich dem, das manchmal beim echten Gehen auftritt (Zehr und Haridas) 2003). Ein inhärenter Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass der Benutzer beim Gehen nicht mit seinen Armen interagieren kann. Trotzdem kann sich das Schwingen des Arms für bestimmte Anwendungen als sinnvolle Lösung erweisen, da Systeme wie der Oculus Rift derzeit nur die Verfolgung von Kopf und Händen unterstützen. Insbesondere eine Implementierung dieser Fortbewegungstechnik, treffend synchronisiert *ArmSwinger*,

steht derzeit Unity-Entwicklern zur Verfügung (electricnightowl.com). Andere Formen von Oberkörpergesten umfassen das Schwanken des Kopfes (Terziman et al. 2010), Schulterrotation (Guy et al. 2015), seitliches und nach vorne geneigtes Oberkörper (Guy et al. 2015 ;; Kitson et al. 2017 ;; Langbehn et al. 2015) und sogar fingerbasierte Gesten (dh Fingertippen auf einem Touchpad (Yan et al. 2016) und abwechselnd auf die Auslösetasten von zwei HTC Vive-Controllern klicken (Sarupuri et al. 2017)).

### 4.3 Umgeleitetes Gehen

Im Gegensatz zu Neupositionierungssystemen und Proxy-Gesten umfasst das umgeleitete Gehen physisches Gehen und gilt daher als mobile Reisetchnik gemäß der in Abschnitt 1 beschriebenen Taxonomie 2. Im Allgemeinen bezieht sich umgeleitetes Gehen auf eine Sammlung von Ansätzen, die es ermöglichen, den Weg des Benutzers durch die physische Umgebung zu steuern, indem die zur Darstellung der virtuellen Umgebung verwendeten Reize manipuliert werden (Suma et al. 2012). Es ist möglich, zwischen Techniken zu unterscheiden, die eine Umleitung basierend auf beiden durchführen *perspektivische Manipulation* oder *Umweltmanipulation*. Die zwei Arten von Techniken werden nachstehend der Reihe nach erörtert.

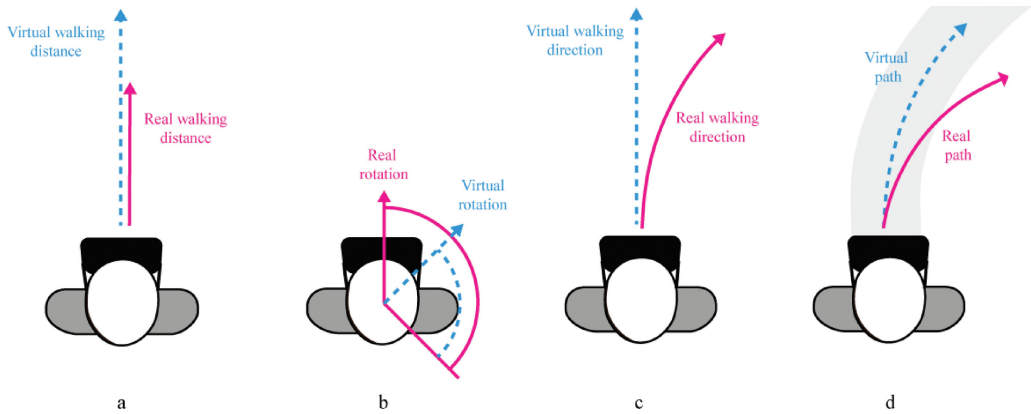


Abb. 5. Die vier Arten von Verstärkungen, die für die perspektivische Manipulation verwendet werden: (a) Translationsverstärkung, (b) Rotationsverstärkung, (c) Krümmungsverstärkung und (d) Biegeverstärkung. Lila und blaue Linien zeigen die realen bzw. virtuellen Transformationen an.

Umleitungstechniken, die auf perspektivischer Manipulation beruhen, wenden Änderungen an der virtuellen Sichtweise (oder dem Standpunkt der Audition) des Benutzers an. Insbesondere wird die Manipulation durch Anwenden von Verstärkungen erreicht, die die Zuordnung zwischen der realen virtuellen Bewegung des Benutzers beeinflussen (z. B. wenn eine Verstärkung von 2,0 auf die Vorwärtsübersetzung des Benutzers angewendet wird, bewegt er sich in der virtuellen Umgebung doppelt so schnell). Zu den gängigen Methoden zur Umleitung von Benutzern mithilfe dieses Ansatzes gehört die Anwendung nicht wahrnehmbarer Translations-, Krümmungs-, Rotations- und Biegegewinne auf die Bewegung der virtuellen Kamera. Die Gewinne skalieren und biegen den Weg des Wanderers und erhöhen oder verringern die virtuellen Rotationen, die sich aus physischen Rotationen ergeben (Interrante et al. 2007 ; Langbehn et al. 2017 ; Razzaque et al. 2001 ) (Zahl 5 ). Wenn der Benutzer beispielsweise aufgefordert wird, über ein virtuelles Fußballfeld zu gehen, ist es möglich, das Feld langsam und unmerklich um den Benutzer herum zu drehen. Dies führt dazu, dass er oder sie im Kreis läuft, obwohl er oder sie denkt, dass er oder sie auf einem geraden Weg geht. Es ist vorzuziehen, dass Umleitungstechniken, die auf perspektivischer Manipulation beruhen, subtil sind, da eine offene Manipulation die natürliche Erfahrung des Gehens durch die virtuelle Umgebung stören würde (Suma et al. 2012 ). Die maximalen und minimalen Gewinne, die angewendet werden können, ohne dass der Benutzer die Manipulation bemerkt (dh die Wahrnehmungserkennungsschwellen), wurden durch empirische Bewertungen ermittelt, die auf psychophysischen Methoden beruhen (Grechkin et al. 2016 ; Steinicke et al. 2010 ). Obwohl Subtilität vorzuziehen ist, gibt es Umleitungstechniken, die auf offener perspektivischer Manipulation beruhen. Insbesondere kann eine Manipulation der offenen Perspektive erforderlich werden, wenn sich der Benutzer gefährlich nahe an der Grenze des Gehraums befindet. Unter solchen Umständen greift das System ein, der Benutzer wird angewiesen, sich umzudrehen, und während des Abbiegens kann das visuelle Bild eingefroren oder eine Verstärkung angewendet werden (Williams et al. 2007 ). Eine zunehmend wachsende Zahl von Arbeiten hat verschiedene Ansätze untersucht, um die Wahrscheinlichkeit zu verringern, dass der Benutzer die Manipulation mithilfe visueller Distraktoren erkennt (Peck et al. 2011 ) durch Manipulieren des Standpunkts des Benutzers während Sakkaden und Augenzwinkern (Bolte und Lappe 2015 ; Langbehn et al. 2016 ) oder indem narrative Ereignisse als Möglichkeiten genutzt werden, den Pfad des Benutzers unmerklich zu manipulieren (Grechkin et al. 2015 ; Neth et al. 2012 ).

Die Arbeit an der perspektivischen Manipulation stützte sich hauptsächlich auf die Manipulation der dem Benutzer präsentierten visuellen Elemente. Es wurde jedoch gezeigt, dass die Umleitung mithilfe von Ton erreicht werden kann, wenn dem Benutzer visuelle Reize entzogen werden (Nogalski und Fohl) 2016 ; Serafin et al. 2013 ). Es bleibt jedoch abzuwarten, ob das Hinzufügen von Ton unter bestimmten Umständen (z. B. in einer schwach beleuchteten oder nebligen Umgebung) die Fähigkeit des Benutzers beeinträchtigen kann, visuelle Manipulationen zu erkennen (Meyer)



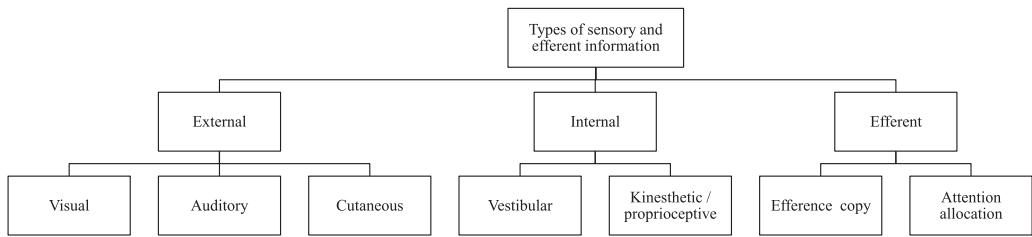


Abb. 6. Ein visueller Überblick über Waller und Hodgson ( 2013 ) drei Arten von Informationen, die Wanderer über ihre Umgebung und ihren Ort und ihre Bewegung erhalten.

et al. 2016 ;; Nilsson et al. 2016 ). Darüber hinaus wurde gezeigt, dass das Hinzufügen von haptischen Hinweisen in Form einer konvexen Oberflächenwand die Fähigkeit zur Umleitung von Benutzern positiv beeinflusst (Matsumoto et al.

2016 ). Darüber hinaus wurden mehrere Versuche unternommen, Lenkgorithmen zu entwickeln, die verschiedene Arten der perspektivischen Manipulation einsetzen, um sicherzustellen, dass der Benutzer innerhalb des verfolgten Raums bleibt (Hodgson und Bachmann) 2013 ;;

Nescher et al. 2014 ;; Razzaque 2005 ). Laut Azmandian, Grechkin und Rosenberg ( 2017 ) ist der am häufigsten verwendete Algorithmus der *Steer-to-Center*

Algorithmus, der kontinuierlich versucht, den Benutzer in Richtung der Mitte des Verfolgungsbereichs zu lenken. Insbesondere wurde dieser Ansatz mit offenen Interventionen kombiniert, um die Sicherheit des Benutzers zu gewährleisten (Peck et al. 2011 ). Während sich die meisten Untersuchungen zur subtilen Manipulation von Perspektiven auf Einzelbenutzerszenarien konzentrierten, wurde in jüngster Zeit begonnen, das Problem der gleichzeitigen Umleitung mehrerer Benutzer in einem gemeinsam genutzten Bereich zu untersuchen (Azmandian et al. 2017 ;;

Bachmann et al. 2013 ;; Holm 2012 ). Umleitungstechniken, die auf Umgebungsmanipulationen beruhen, führen, wie der Name schon sagt, die Umleitung durch Ändern der Eigenschaften der virtuellen Umgebung durch. In seiner einfachsten Form umfasst diese Art der Umleitung die Erstellung virtueller Umgebungen, die hinsichtlich Größe und potenziellen Hindernissen dem physischen Raum entsprechen (Simeone et al. 2015

;; Sra et al. 2016 ). Das Präsentieren virtueller Objekte an den Grenzen des Verfolgungsbereichs sollte die Bewegung der meisten Wanderer enthalten können. Suma et al. (( 2011a )) entwickelten einen Ansatz, der Benutzer durch subtile Manipulation der virtuellen Architektur umleitet, die von Änderungsblindheit inspiriert ist (dh die Unfähigkeit eines Individuums, Änderungen in der Umgebung zu erkennen (Matlin) 2009 )).

Insbesondere haben Suma et al. (( 2011a )) konnten die Ausrichtung der Türen hinter dem Rücken der Benutzer manipulieren und dadurch deren Gehwege beeinflussen. Darüber hinaus haben Suma et al. (( 2012 )) schlug eine Technik vor, die synchronisiert wurde *Unmögliche Räume* Dies ermöglicht es, virtuelle Innenumgebungen mithilfe einer sich selbst überlappenden Architektur in vergleichsweise kleinere physische Räume zu komprimieren (z. B. können zwei benachbarte virtuelle Räume denselben physischen Raum belegen). Wenn das Ziel nicht darin besteht, die räumliche Anordnung eines realen Raums zu replizieren, dann die Technik

Flexibile Räume kann uneingeschränktes Gehen in einer dynamisch erzeugten virtuellen Innenumgebung ermöglichen (Vasylevska und Kaufmann) 2017b ;; Vasylevska et al. 2013 ).

Die Tatsache, dass umgeleitetes Gehen tatsächliches Gehen beinhaltet, bedeutet, dass ein größerer physischer Raum erforderlich ist. Dies bedeutet jedoch auch, dass der Benutzer Informationen zur vestibulären Selbstbewegung erhält, die dem Wanderer das Verständnis der Größe der Umgebung erleichtern und das räumliche Verständnis verbessern können (Bowman et al. 2004 ). Insbesondere konnten Forscher mithilfe eines bestimmten Szenarios Wanderer in Bereichen von nur 6 m erfolgreich umleiten  $\times$  6 m (Suma et al. 2015 ) und 4m  $\times$  4 m (Langbehn et al. 2017 ). Obwohl diese Ergebnisse ermutigend sind, sollte betont werden, dass Umleitungstechniken, die auf Umgebungsmanipulationen beruhen, im Allgemeinen auf Innenumgebungen beschränkt sind (Suma et al. 2011a ). Im Gegensatz dazu kann die perspektivische Manipulation mithilfe von Verstärkungen in offenen Umgebungen wie Außenaufnahmen angewendet werden. Diese Form der Umleitung erfordert jedoch, dass der Benutzer die eingeführte Manipulation, die eine zusätzliche kognitive Belastung mit sich bringen kann, unbewusst kompensiert, wie anhand verbaler und räumlicher Arbeitsgedächtnisaufgaben gezeigt wird (Bruder et al. 2015 ).

## 5 MULTIMODALES FEEDBACK WÄHREND DES SPAZIERGANGS

Das Gehen ist von Natur aus eine multisensorische Aktivität, und verschiedene Quellen liefern dem Wanderer Informationen über die Umgebung sowie über das Gehen selbst. Waller und Hodgson (2013) eine Diskussion der Systeme präsentieren, die dem Einzelnen sensorische Informationen über die Umwelt und ihre Bewegung durch sie liefern. Inspiriert von dieser Arbeit unterscheiden wir drei Kategorien von Informationen: (1) *Externe sensorische Informationen* Enthält Informationen, die aus den visuellen, akustischen und kutanen Sinnen stammen. Die Hautsinne geben Auskunft über Wechselwirkungen auf Hautebene (Robles-De-La-Torre 2006). (2) *Interne sensorische Informationen* wird vom vestibulären und vom kinästhetischen / propriozeptiven System produziert. Das Vestibularsystem befindet sich im Innenohr und registriert die Winkel- und Linearbeschleunigung des Kopfes. Das kinästhetische / propriozeptive System ist für die Erfassung von Positionen, Orientierungen und Bewegungen der Muskulatur und der Gelenke verantwortlich (Waller und Hodgson 2013). (3) Schließlich *efferente Informationen*

bezieht sich auf Aufmerksamkeitsverteilung und Effizienzkopie (die neuronale Darstellung motorischer Befehle vom Zentralnervensystem zur Muskulatur) (Waller und Hodgson 2013). Neben dem Sehen, Hören und den kutanen Sinnen können möglicherweise auch andere externe Quellen dem Wanderer räumliche Informationen liefern (z. B. die olfaktorischen oder geschmacklichen Sinne). Bei alltäglichen Interaktionen sind ihre Beiträge jedoch wahrscheinlich vernachlässigbar (Waller und Hodgson 2013). Im Folgenden fassen wir die Arbeit zusammen, die darauf abzielt, den Benutzern beim virtuellen Gehen geeignete multisensorische Reize zu liefern. Zuerst stellen wir Arbeiten vor, die sich auf externe Quellen sensorischer Informationen beziehen (dh visuelles, akustisches und haptisches Feedback), und dann wird die Rolle interner und efferenter Informationen diskutiert.

### 5.1 Visuelles Feedback

Vision dient als direkte, reichhaltige und präzise Quelle für räumliche Informationen (Waller und Hodgson 2013), und es ist von zentraler Bedeutung, wie Wanderer ihre Bewegung durch eine Umgebung wahrnehmen. Speziell, *optischer Fluss* (dh "das Muster der visuellen Bewegung am sich bewegenden Auge" (Warren et al. 2001, p. 213)) liefert dem Geher Informationen über Translations- und Rotationsbewegungen. Das heißt, expandierende und kontrahierende Strömungsfelder zeigen eine Vorwärts- bzw. Rückwärtsbewegung an. Laminare Strömungsmuster können entweder eine Rotations- oder eine Seitwärtsbewegung anzeigen. Die Interpretation mehrdeutiger externer sensorischer Informationen, wie z. B. laminarer Strömungsmuster, kann je nach Art der gleichzeitigen internen und efferenten Informationen variieren (siehe Abschnitt 5.4).

Der optische Fluss kann durch Informationen, die aus anderen sensorischen Modalitäten und efferenten Quellen stammen, eindeutig werden. Untersuchungen zur sensorischen Psychologie legen jedoch nahe, dass im Falle eines sensorischen Konflikts das Sehen dazu neigt, propriozeptive und vestibuläre Empfindungen zu dominieren (Dichgans und Brandt 1978). Es ist wohl diese visuelle Dominanz, die es ermöglicht, Wanderer durch Anwenden von Translations-, Krümmungs-, Rotations- und Biegegewinnen subtil umzuleiten.

Interessanterweise ist die Wahrnehmung von Selbstbewegungen während des Laufband- und WIP-Gehens anfällig für Verzerrungen. Wenn ein Benutzer auf einem Laufband läuft, während er eine virtuelle Umgebung mit einem HMD betrachtet, würde man erwarten, dass Benutzer eine Übereinstimmung zwischen der visuell dargestellten Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Laufbandes finden, die am realistischsten ist. Entgegen der Intuition wurde jedoch gezeigt, dass Personen dazu neigen, visuell dargestellte Gehgeschwindigkeiten zu unterschätzen, wenn sie lineare Laufbänder für die virtuelle Fortbewegung verwenden. Mit anderen Worten, Wanderer finden visuell dargestellte Geschwindigkeiten wahrscheinlich zu langsam, wenn sie der Geschwindigkeit des Laufbandgurts entsprechen (Banton et al. 2005; Kessler et al.

2010; Nilsson et al. 2016a; Powell et al. 2011). Alle Faktoren, die diese Wahrnehmungsverzerrung beeinflussen, sind unbekannt.

Untersuchungen zur Selbstbewegung beim Gehen auf dem Laufband und zur WIP-Fortbewegung haben jedoch folgende Ergebnisse erbracht: (1) Wenn Wanderer ihren Blick nach unten oder zur Seite richten, wird die Unterschätzung beseitigt (Banton et al. 2005); (2) Die Unterschätzung scheint nicht durch Bildjitter verursacht zu werden (Banton et al. 2005); (3) keine Auswirkung eines erhöhten HMD-Gewichts oder einer variierenden Peripherie

Okklusion wurde gefunden (Nilsson et al. 2015a , 2015b ); (4) Das Ausmaß der Unterschätzung scheint umgekehrt proportional zur Größe des Sichtfelds der Anzeige zu sein (Nilsson et al. 2014a ); (5) In ähnlicher Weise scheint der Grad der Unterschätzung umgekehrt proportional zur Größe des geometrischen Sichtfelds zu sein (Nilsson et al. 2015b ); (6) Das Ausmaß der identifizierten Unterschätzung kann in Abhängigkeit von den Studienmethoden variieren (Nilsson et al. 2015b ); (7) Hohe Schrittfolgen können zu einer stärkeren Unterschätzung führen, aber die Evidenz ist in Bezug auf diesen Effekt etwas zweideutig (Durgin et al. 2007 ;; Kassler et al. 2010 ;; Nilsson et al. 2014b ); (8) Schließlich kann der Grad der Unterschätzung geringfügig variieren, je nachdem, ob der Benutzer auf einem Laufband läuft oder an Ort und Stelle geht (Nilsson et al. 2016a ).

## 5.2 Auditive Rückmeldung

Obwohl das Sehen dazu neigt, die räumliche Wahrnehmung zu dominieren, liefert das Vorsprechen stationären und sich bewegenden Beobachtern Informationen über die Umgebung. Insbesondere Waller und Hodgson ( 2013 ) beschreiben, dass das Vorsprechen dem Einzelnen Informationen über die Größe der Umgebung und die Position von Objekten und Ereignissen in dieser Umgebung liefern kann - vorausgesetzt, sie senden Geräusche aus. Wie aus der Literatur zu Selbstbewegungsillusionen (dh Vektion) hervorgeht, können Schallquellen, die sich relativ zum Hörer bewegen, auch die Bewegungswahrnehmung beeinflussen. Nach Väiljämäe ( 2009 ) sind drei Hinweise für die Unterscheidung der Hörbewegung von zentraler Bedeutung: binaurale Hinweise (z. B. interaurale Zeit- und Pegelunterschiede), der Doppler-Effekt (dh Frequenzverschiebungen während der relativen Bewegung zwischen einer Schallquelle und dem Hörer) und die Schallintensität (z. B. Intensitätsänderungen) eine Schätzung der Zeit bis zur Ankunft). Larsson et al. (( 2010 ) beschreiben, dass Ansätze zur Schallräumlichkeit in zwei allgemeine Kategorien fallen: Schallfeldbezogene Methoden (Mehrkanal-Lautsprechersysteme) und kopfbezogene Methoden (räumliche Wiedergabe von Schall über Kopfhörer). Das Rendern und Wahrnehmen entfernter Hörobjekte wurde ausführlich untersucht. In vergleichsweise wenig Arbeit wurde jedoch untersucht, wie das Gefühl des Gehens natürlicher gestaltet werden kann, indem akustische Hinweise auf die Interaktion zwischen den Füßen der Benutzer und dem virtuellen Boden gegeben werden.

Schritttöne werden häufig in Filmen verwendet, um Informationen über das Vorhandensein von Zeichen auf dem Bildschirm und außerhalb des Bildschirms bereitzustellen. Bei Computerspielen können solche Töne auch verwendet werden, um den Spieler über die zu befahrende Oberfläche zu informieren und ein Gefühl von Gewicht und Gewicht zu erzeugen Ausführungsform. In diesen Fällen basieren Schritttöne häufig auf Aufzeichnungen, die aus Tonbibliotheken abgerufen oder von Foley-Künstlern produziert wurden (Nordahl et al. 2011 ). Eine Alternative zu Aufnahmen sind physikbasierte Klangsynthesealgorithmen. Zu den Pionieren dieses Ansatzes gehört Cook ( 1997 ), der eine Reihe physikalisch informierter stochastischer Modelle (PhiSMs) vorschlug, die alltägliche Schallereignisse simulieren. Cooks ( 2002 ) Die Arbeit umfasst Algorithmen zur Simulation des Geräusches, das beim Gehen auf verschiedenen Oberflächen erzeugt wird. Ebenso Fontana und Bresin ( 2003 ) entwickelten physikalisch informierte Modelle mit der Fähigkeit, das Geräusch von Schritten auf mehreren stochastischen Oberflächen zu reproduzieren.

Visell et al. (( 2009 ) unterscheiden zwischen zwei breiteren Kategorien von Schnittstellen zur Steuerung der Feedback aus Schritten: *instrumentierte Böden* (starre Oberflächen mit Sensoren und Aktoren) und *instrumentierte Schuhe* (mit Sensoren und Aktoren angereichertes Schuhwerk). Ein Vorteil von instrumentierten Böden besteht darin, dass Benutzer keine zusätzlichen Geräte tragen müssen. Im Gegensatz zu tragbaren Lösungen beschränken sie jedoch wahrscheinlich die Bewegung des Benutzers auf einen relativ kleinen Gehbereich, und aktuelle Lösungen sind relativ unpraktisch und teuer. Nordahl et al. (( 2011 ) entwickelte eine physikbasierte Echtzeit-Klangsynthese-Engine und integrierte sie mithilfe eines instrumentierten Bodens in ein VR-Setup. Im Boden eingebettete Kondensatorgrenzmikrofone erkannten die Schritte des Benutzers, mit denen die Soundsynthesemaschine angetrieben wurde. Dieses System war in der Lage, das Geräusch des Gehens auf verschiedenen festen und aggregierten Oberflächen, einschließlich Holz, Schnee und Gras, zu synthetisieren. Die Bewertung des Systems ergab im Allgemeinen vielversprechende Ergebnisse in Bezug auf die Oberflächenerkennung, und wenn die Teilnehmer falsche Beurteilungen vornahmen, verwechselten sie häufig aggregierte und feste Oberflächen mit anderen Oberflächen derselben allgemeinen Kategorie. Darüber hinaus eine zusätzliche

Die Studie ergab, dass es den Teilnehmern leichter fiel, simulierte Oberflächenmaterialien zu erkennen, wenn diese Materialien zusammen mit semantisch kongruenten Umgebungsgeräuschen präsentiert wurden (Nordahl et al.

2011 ). Insbesondere wurde vorgeschlagen, dass Bodenreaktionskräfte von Mikrofonen abgeleitet werden können, die sowohl auf dem Boden als auch auf Schuhen angeordnet sind (Serafin et al. 2009 ). Frühere Arbeiten von Nordahl ( 2005 , 2006 ), stützten sich auf instrumentierte Schuhe zur Erkennung von Fuß-Boden-Interaktionen und zeigten, dass simulierte Schrittgeräusche das Gefühl der Präsenz der Teilnehmer in der virtuellen Umgebung und die vom Benutzer ausgeführte Bewegung erheblich steigern können. Ein ähnliches System zur Erzeugung von Schrittgeräuschen wurde von Papetti et al. ( ( 2009 ) ).

### 5.3 Haptisches Feedback

Die dritte Quelle externer sensorischer Informationen sind die Hautsinne. Insbesondere die somatosensorischen Druckrezeptoren informieren den Wanderer über den physischen Kontakt mit Objekten auf dem Weg (Waller und Hodgson) 2013 ). Haptisches Feedback soll solche Informationen liefern, indem Kräfte, Bewegungen und andere Hautempfindungen reproduziert werden, die über den Tastsinn empfunden werden (Marchal et al.

2013 ). In ähnlicher Weise wie Lindeman et al. ( ( 1999 ) unterscheiden wir zwei Ansätze, um Personen während des virtuellen Gehens mit Hautinformationen zu versorgen. *Passiv-haptisch* Rückkopplungen werden einfach aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Objekte (z. B. ihrer Form und Textur) erzeugt. Im Gegensatz dazu *aktiv-haptisch* Die Rückmeldung wird über einen Computer gesteuert und über eine haptische Anzeige (z. B. vibrotaktile Aktuatoren) abgegeben.

Meehan et al. ( ( 2002 ) beschreiben eine Studie, die passiv-haptisches Feedback mit einem stressigen vir- kombiniert tatsächliche Umgebung. Die stressige Umgebung bestand aus einer virtuellen Grube und die Teilnehmer mussten über einen virtuellen Abgrund schauen. Das passiv-haptische Feedback umfasste einen 1,5-Zoll-Holzvorsprung, der mit dem virtuellen Abgrund zusammengebracht wurde. Unter anderem ergab die Studie, dass die Teilnehmer stärkere physiologische Angstreaktionen zeigten, wenn sie der passiv-haptischen Rückkopplungsleistung ausgesetzt waren, als wenn sie auf dem Boden standen. In jüngerer Zeit haben Suma et al. ( ( 2011b , 2013 ) entwickelten eine virtuelle Umgebung, in der Benutzer mithilfe einer von Änderungsblindheit inspirierten Umleitungstechnik über realen Beton und Kies umgeleitet werden (siehe Abschnitt 4.3 ). Insbesondere stellte die Umleitung sicher, dass die Benutzer physisch auf das richtige Oberflächenmaterial treten, wenn dieses Material in der virtuellen Umgebung vorhanden war.

In Bezug auf aktiv-haptisches Feedback haben Marchal et al. ( ( 2013 ) gab an, dass die Hinzufügung von gerade Taktiles Feedback mit niedriger Wiedergabetreue kann das Gefühl der Präsenz in einer audiovisuellen virtuellen Umgebung erhöhen. In ähnlicher Weise haben Srinivasan und Basdogan ( 1997 ) schlugen vor, dass die potenziellen Vorteile des Hinzufügens eines solchen taktilen Feedbacks größer sein könnten als die Verbesserung der Qualität des Feedbacks, das an eine vorhandene Modalität (z. B. die visuelle Anzeige) geliefert wird. Passiv-haptisches Feedback wird notwendigerweise bodenbasiert sein. Wie bei der akustischen Rückmeldung kann jedoch eine aktiv-haptische Rückmeldung auf der Grundlage der Interaktion mit instrumentierten Böden oder Schuhen abgegeben werden. Tatsächlich wurden in jüngster Zeit zahlreiche Untersuchungen zum auditorischen und haptischen Feedback für das virtuelle Gehen parallel unter Verwendung multimodaler Schnittstellen durchgeführt. Marchal et al. ( ( 2013 ) beschreiben, dass die hochfrequenten Informationen in den mechanischen Signalen der beiden häufig eng miteinander verbunden sind, da die haptischen und auditorischen Reize denselben Ursprung haben (dh physischen Kontakt zwischen Fuß und Boden). Aus diesem Grund wurden dieselben physikbasierten Algorithmen verwendet, um die Signale zu erzeugen, die sowohl akustischen als auch haptischen Anzeigen zugeführt werden (Nordahl et al. 2012b ). Ein Großteil der jüngsten Arbeiten zum audiohaptischen Feedback für virtuelles Gehen wurde im Rahmen des FET-Open EU-Projekts Natural FP (ICT-222107) (Natural Interactive Walking) durchgeführt, in dem die Verwendung von instrumentierten Böden und Schuhen untersucht wurde.

Law et al. ( ( 2008 , 2009 ) erzeugte eine haptische Anzeige auf der Basis eines instrumentierten Bodens. Insbesondere, Sie entwickelten ein System, mit dem Benutzer durch betätigte Bodenfliesen ein aktiv-haptisches Feedback erhalten. Das System umfasste 36 quadratische Fliesen (30,5 cm) × 30,5 cm) angeordnet in einer 6 × 6 Matrix

in der Mitte einer CAVE-ähnlichen Umgebung, einschließlich Bodenprojektionen der virtuellen Bodenoberfläche. Neuere Arbeiten von Kruijff et al. (( 2016 ) zeigten, dass das Hinzufügen von vibrotaktilen Feedback unter anderem das Selbstbewegungsgefühl stationärer Benutzer verbessern kann.

Ein Großteil der Arbeit mit instrumentierten Schuhen zur Bereitstellung von aktiv-haptischem Feedback konzentrierte sich darauf, wie genau die Teilnehmer virtuelle Oberflächen erkennen konnten, die mit dem erweiterten Schuhwerk gerendert wurden. Arbeiten von Nordahl et al. (( 2010 ) legt nahe, dass auditorisches Feedback im Vergleich zu haptischem Feedback eine überlegene Erkennungsleistung erzielen kann und die Kombination von auditorischem und haptischem Feedback keine signifikante Verbesserung bewirkt hat. Serafin et al. (( 2010 ) stellten in ähnlicher Weise fest, dass das auditive Feedback dem haptischen Feedback in Bezug auf die Erkennung überlegen war. Sie stellten jedoch fest, dass audiohaptisches Feedback in einigen Fällen die Erkennung verbesserte. Nordahl et al. (( 2012a ) führten eine Studie durch, in der untersucht wurde, ob die Hinzufügung einer audiohaptischen Simulation der Fuß-Boden-Interaktion den wahrgenommenen Realismus und die Präsenz beeinflusst. Sie verwendeten eine stressige virtuelle Umgebung, die von dem von Meehan et al. (( 2002 ). Die Ergebnisse zeigten keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Präsenz. Die Teilnehmer stellten jedoch fest, dass das Hinzufügen von audiohaptischem Feedback die Erfahrung realistischer erscheinen ließ (Nordahl et al. 2012a ). Eine umfassende Übersicht über das audiohaptische Feedback zum Gehen und die Ergebnisse des NIW-Projekts finden Sie unter Fontana und Visell ( 2012 ).

## 5.4 Interne und effiziente Informationen

Wie vorgeschlagen, ist es möglich, zwischen mindestens drei Arten interner sensorischer Informationen zu unterscheiden: vestibuläre, propriozeptive und kinästhetische Informationen. Neben dem Beitrag zur Selbstbewegung (Riecke et al. 2005 ) unterstützen Informationen, die aus dem Vestibularsystem stammen, verschiedene okulomotorische und Haltungsreflexe, und es wird angenommen, dass sie eine zentrale Rolle für die räumliche Aktualisierung und die Abrechnung von Tönen spielen (Waller und Hodgson) 2013 ). Während die Begriffe „kinästhetisch“ und „propriozeptiv“ häufig synonym verwendet werden, haben Waller und Hodgson ( 2013 ) beschreiben, dass es möglich ist, zwischen kinästhetischen und propriozeptiven Informationen zu unterscheiden. Kinästhetische Informationen beziehen sich insbesondere auf „Informationen über die Bewegung der Gliedmaßen oder Effektoren“ [S. 8], während sich propriozeptive Informationen auf die „relativ statische Position oder Haltung der Muskulatur“ beziehen [S. 8]. In Bezug auf das Gehen impliziert dies, dass kinästhetische Informationen es dem Wanderer ermöglichen, Schritte zu unternehmen, ohne visuell zu bestätigen, dass die Aktion wie beabsichtigt ausgeführt wird, und die propriozeptiven Informationen machen eine Person auch in Abwesenheit auf die Position der unteren Gliedmaßen aufmerksam der Bewegung. Es wird angenommen, dass insbesondere die Propriozeption die Leistung bei der Schätzung von Kurs, Abbiegung und Entfernung sowie bei der räumlichen Aktualisierung positiv beeinflusst. Die letzte Kategorie von Informationen, die von Waller und Hodgson diskutiert wurden ( 2013 ) ist eine wirksame Information. Insbesondere, *Effizienzkopie* ist relevant für die aktuelle Diskussion. Die Effizienzkopie bezieht sich auf die neuronale Darstellung motorischer Befehle vom Zentralnervensystem bis zur Muskulatur (Waller und Hodgson)

2013 ). Diese gleichzeitige Aufzeichnung aktueller Motorbefehle wird verwendet, um sensorische Reize vorherzusagen und die Reaktion der zugehörigen sensorischen Modalität (Pynn und DeSouza) zu modulieren 2013 ). Darüber hinaus wird angenommen, dass die durch die Effizienzkopie bereitgestellten Informationen Vorhersagen über die Konsequenzen der durchgeführten Aktionen ermöglichen, bevor sie aufgetreten sind (Harris et al. 2002 ). So ermöglichen Efferenzkopien unter anderem, dass Individuen Reize, die durch äußere Ereignisse in der Umgebung erzeugt werden, von ähnlichen Reizen unterscheiden können, die durch ihre eigenen Handlungen erzeugt werden (Waller und Hodgson) 2013 ). Zum Beispiel sind es effiziente Informationen über die eigenen Motorbefehle, die es ermöglichen, den laminaren optischen Fluss, der während der Kopfdrehungen erzeugt wird, von dem ähnlichen Muster auf der Netzhaut zu unterscheiden, das sich aus einer kreisförmigen Umgebungsbewegung ergibt.

Interne und effiziente Informationen sind besonders relevant, wenn man bedenkt, wie die verschiedenen Gehtechiken in Abschnitt beschrieben werden 4 erfahren sind. In Bezug auf die vestibuläre Stimulation sind subtile Umleitungstechniken Repositionierungssystemen und WIP-Techniken im Allgemeinen überlegen.

Da Neupositionierungssysteme und WIP-Techniken darauf ausgelegt sind, die Translationsbewegung zu begrenzen, werden Benutzern widersprüchliche visuelle und vestibuläre Informationen garantiert. Im Gegensatz dazu beinhaltet das umgeleitete Gehen eine vestibuläre Stimulation, und solange die angewendeten Gewinne niedrig genug bleiben, bleibt der Konflikt zwischen dem Sehen und dem vestibulären Sinn unbemerkt. Insbesondere wurde vorgeschlagen, dass das Vorwärtslehnen, das eine vestibuläre Stimulation hervorruft, im Namen stationärer Benutzer stärkere Illusionen der Selbstbewegung hervorrufen kann (Kruijff et al. 2015). Eine WIP-Fortbewegung mit Neigung, wie die von Langbehn et al. ((2015)) könnte helfen, die fehlenden vestibulären Informationen zu kompensieren.

Da die subtile Umleitung tatsächliche Schritte umfasst, sollten Ansätze, die zu dieser Kategorie gehören, natürlichere kinästhetische und propriozeptive Informationen liefern als WIP-Techniken. In dieser Hinsicht überschreiten einige Neupositionierungssysteme wahrscheinlich auch die WIP-Techniken. Darüber hinaus können alternative gestische Eingaben wie das Antippen an Ort und Stelle und das Schwingen des Arms als mindestens so natürlich empfunden werden wie die herkömmliche WIP-Geste (siehe Abschnitt 4.2). Eine mögliche Erklärung ist, dass das Antippen an Ort und Stelle wie Schritte an Ort und Stelle zu kinästhetischen Informationen führt, die an die beim echten Gehen erzeugten Informationen erinnern. Wenn Sie jedoch an Ort und Stelle tippen, entspricht dies in Bezug auf die wahrgenommene Anstrengung besser dem tatsächlichen Gehen (Nilsson et al. 2013). In ähnlicher Weise bietet das Schwingen der Arme eine bessere Übereinstimmung in Bezug auf die wahrgenommene Anstrengung, und relevante kinästhetische Informationen werden auch durch rhythmisches Schwingen der Arme erzeugt, das bekanntermaßen während des Gehens auftritt (Zehr und Haridas 2003).

## 6 AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN UND ZUKÜNFTIGE ARBEITEN

Jüngste Fortschritte in der Anzeige- und Tracking-Technologie haben VR für Verbraucher auf beispiellose Weise zugänglich gemacht. Die Popularisierung von VR wird (hoffentlich) dazu führen, dass immer mehr Menschen regelmäßig durch vertraute, fremde und fantastische virtuelle Umgebungen navigieren. In der Tat ist virtuelles Reisen eine der häufigsten und universellsten Aufgaben, die in virtuellen Umgebungen ausgeführt werden. Wie in Abschnitt ausgeführt 2 Es wurden zahlreiche verschiedene virtuelle Reisetechiken vorgeschlagen. Wir haben beschrieben, dass es möglich ist, zwischen Reisetechiken zu unterscheiden, basierend darauf, ob sich der Benutzer physisch bewegt oder nicht, ob es sich bei den Techniken um ein virtuelles Fahrzeug handelt oder nicht und ob sie das Reisen in der realen Welt imitieren oder eine magische Interaktionsmetapher verwenden (Abschnitt 2). Techniken, die physische Bewegung beinhalten, sind besonders problematisch, da die Fähigkeit des Benutzers, virtuell zu reisen, durch die Größe des verfolgten Raums eingeschränkt wird. Sowohl Fahrzeug- als auch magische Reisetechiken umgehen dieses Problem weitgehend. In vielen Szenarien muss der Benutzer jedoch in der Lage sein, große virtuelle Umgebungen zu Fuß zu navigieren.

Die Forschungsgemeinschaft muss noch ein System entwickeln, das ein uneingeschränktes und natürliches Gehen in großen virtuellen Umgebungen ermöglicht. Insbesondere haben wir argumentiert, dass diese Aufgabe zwei Herausforderungen beinhaltet: (1) Schaffung von Reisetechiken, die die Erfahrung des realen Gehens ausreichend nachahmen, ohne einen physischen Raum von der gleichen Größe wie die virtuelle Umgebung zu benötigen, und (2) Bereitstellung geeigneter multisensorischer Reize, die sich daraus ergeben die Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Umgebung. Wie in Abschnitt beschrieben 4 Neupositionierungssysteme, Proxy-Gesten und umgeleitetes Gehen bieten potenzielle Lösungen für die erste der beiden Herausforderungen.

Ein Vorteil aktiver Repositionierungssysteme besteht darin, dass sie es den Benutzern ermöglichen, tatsächliche Schritte zu unternehmen, wodurch ein korrektes propriozeptives / kinästhetisches Feedback sichergestellt wird. Darüber hinaus können solche Systeme die Bewegung des Benutzers erfolgreich auf einen Bereich begrenzter Größe beschränken. Die meisten aktuellen Implementierungen sind jedoch relativ umständlich und teuer, und eine Einschränkung großer mechanischer Konfigurationen, wie z. B. omnidirektionaler Laufbänder, besteht darin, dass sie dazu führen können, dass Benutzer während Kurven und Seitenschritten das Gleichgewicht verlieren (Bowman et al. 2004). Passive Repositionierungssysteme, die auf reibungsfreien Plattformen basieren, bieten eine kostengünstige Alternative. Die Community muss jedoch noch empirisch feststellen, wie gut diese Systeme in Bezug auf Faktoren wie wahrgenommene Natürlichkeit, räumliche Leistung, Aufgabenleistung und Simulatorkrankheit funktionieren. Dies ist ein Bereich, der für zukünftige Arbeiten reif ist.

Es gibt offensichtlich eine Grenze dafür, wie gut Proxy-Gesten die Erfahrung des echten Gehens nachahmen können. Ein wesentlicher Vorteil solcher Ansätze besteht jedoch darin, dass sie relativ kostengünstig sind und nur sehr wenig physischen Platz benötigen. In der Vergangenheit konzentrierte sich die Forschung auf Gesten des Unterkörpers und insbesondere auf WIP-Techniken. Darüber hinaus konzentrierte sich ein Großteil dieser Arbeit auf die Optimierung von Algorithmen zur Schritterkennung und Geschwindigkeitsschätzung sowie die Erforschung verschiedener Hardware zur Erkennung der Bewegungen des Benutzers. Zukünftige Arbeiten sollten die Techniken in Bezug auf die von Feasel et al. ((2008): Gleichmäßige Fortbewegungsgeschwindigkeit zwischen den Schritten, kontinuierliche Geschwindigkeitsregelung innerhalb des Schritts, reales Drehen und Manövrieren sowie geringe Start- und Stopp-Latenz. Bisherige Arbeiten konzentrierten sich jedoch fast ausschließlich auf gestische Eingaben für die Vorwärtsbewegung. Zukünftige Arbeiten sollten herausfinden, welche Gesten des Ober- und Unterkörpers die natürlichste Erfahrung beim Vorwärts-, Rückwärts- und Seitwärtsgehen bieten. Da viele Systeme keine Ganzkörperverfolgung bieten, muss außerdem ermittelt werden, welche Lenkmethoden für Benutzer am natürlichsten sind (z. B. Blicklenkung, Rumpflenkung oder Hüftlenkung) (Nilsson et al. 2016b). Schließlich bleibt abzuwarten, ob ein Gefühl der Eigenverantwortung für einen virtuellen Körper, der ein normales Gangverhalten zeigt, während der Fortbewegung auf der Grundlage von Proxy-Gesten aufrechterhalten werden kann.

Da Repositionierungssysteme und Proxy-Gesten darauf ausgelegt sind, die Translationsbewegung zu begrenzen, beinhalten diese Ansätze begrenzte Informationen zur vestibulären Selbstbewegung. Das umgeleitete Gehen ist wohl der natürlichste der drei allgemeinen Ansätze, da sich der Benutzer physisch bewegt. Dies bedeutet jedoch im Allgemeinen, dass umgeleitetes Gehen einen viel größeren physischen Raum erfordert als Neupositionierungssysteme und Proxy-Gesten. Es ist gut dokumentiert, dass Benutzer durch perspektivische Manipulation (dh Anwendung von Gewinnen) und Umgebungsmanipulation (dh selbstüberlappende virtuelle Architektur) subtil umgeleitet werden können. Bisherige Arbeiten zur Festlegung von Erkennungsschwellen für die perspektivische Manipulation stützten sich jedoch auf Anzeigen, die nicht mit HMDs der aktuellen Generation vergleichbar sind. Darüber hinaus variieren die Schwellenwertschätzungen in Abhängigkeit von den Schätzmethoden erheblich. Die Empfindlichkeit der Benutzer für die Umleitung hängt wahrscheinlich von den individuellen Unterschieden und den Aufmerksamkeitsanforderungen der virtuellen Aufgabe ab. Daher bleibt die Schätzung der Erkennungsschwellen für visuelle (und akustische) Gewinne ein wichtiges Forschungsgebiet. Umgebungsmanipulationen bieten einen relativ sicheren Ansatz für umgeleitetes Gehen, sofern die Innenumgebung die Grenzen des Verfolgungsraums nicht überschreitet. Gleiches gilt jedoch nicht für die perspektivische Manipulation mit Gewinnen. Daher ist es für zukünftige Arbeiten wichtig, nicht aufdringliche Interventionsmöglichkeiten zu untersuchen, wenn der Benutzer zu nahe an die Grenzen des verfolgten Raums kommt. Die Schaffung von Möglichkeiten, den Pfad des Benutzers mithilfe von narrativen Ereignissen unmerklich zu manipulieren, ist eine vielversprechende Richtung für die zukünftige Arbeit. Eine große Herausforderung bei der Arbeit am umgeleiteten Gehen ist die Generalisierbarkeit. Im Idealfall, Der gleiche Umleitungsalgorithmus sollte für verschiedene virtuelle Umgebungen und Szenarien anwendbar sein. In dieser Hinsicht bleiben die automatische Berechnung von navigierbaren Pfaden und Entscheidungspunkten aus einer bestimmten virtuellen Umgebung und die Vorhersage der zukünftigen Pfade der Benutzer große Herausforderungen. Schließlich müssen wir noch lernen, wie genau eine subtile Umleitung Faktoren wie Simulatorkrankheit und kognitive Belastung beeinflusst.

In Bezug auf die zweite Herausforderung, geeignete multisensorische Stimuli bereitzustellen, wurden in Abschnitt drei Themen hervorgehoben 5 : Erleichterung der Wahrnehmung natürlicher Bewegungen, Bereitstellung natürlicher Rückmeldungen, die die Interaktion zwischen Fuß und Boden darstellen, und Sicherstellung korrekter interner und effizienter Informationen.

Wie in Abschnitt beschrieben 5.1 Benutzer neigen dazu, visuell dargestellte Gehgeschwindigkeiten während der Zeit zu unterschätzen. Laufband und WIP-Fortbewegung. Wir wissen jedoch immer noch nicht genau, was diese Wahrnehmungsverzerrung verursacht oder ob sie bei der Verwendung von HMDs der aktuellen Generation gleichermaßen verbreitet ist. Infolgedessen kann es erforderlich sein, HMD-spezifische Richtlinien festzulegen, die beschreiben, welche Gewinne angewendet werden müssen, um eine wahrnehmungsmäßig natürliche Bewegungswahrnehmung zu erzeugen. Es ist hervorzuheben, dass Unterschätzungen der visuellen Gehgeschwindigkeit im Allgemeinen beobachtet wurden, wenn der Benutzer relativ ausgesetzt ist

künstliche Szenarien (z. B. in gerader Linie durch lange Korridore gehen, während der Blick auf das Ende des Korridors gerichtet ist). Daher ist es wahrscheinlich, dass das Problem in Bezug auf komplexere Szenarien weitaus weniger verbreitet und möglicherweise nicht vorhanden sein wird.

Abschnitte 5.2 und 5.3 diskutierten die Verwendung von instrumentierten Böden und Schuhen zur Bereitstellung von akustischem und haptischem Feedback bei Fuß-Boden-Interaktionen. Instrumentierte Böden sind ein vielversprechender Ansatz, um Benutzern, die sich auf WIP-Fortbewegung verlassen, audio-haptisches Feedback zu geben. Dieser Ansatz ist jedoch in Bezug auf umgeleitetes Gehen, das eine große begehbare Fläche erfordert, nicht praktikabel. Stattdessen scheint es möglich zu sein, umgeleitetes Gehen mit instrumentiertem Schuhwerk zu kombinieren. Zusätzlich zur Bereitstellung eines natürlicheren Feedbacks für den Benutzer scheint es auch möglich zu sein, dass instrumentierte Schuhe verwendet werden, um die Fähigkeit des Benutzers zu verringern, perspektivische Manipulationen zu erkennen. Zum Beispiel, (2016). Audio-haptisches Feedback an den Füßen könnte ebenfalls verwendet werden, um visuell dargestellte perspektivische Manipulationen zu unterstützen.

Schließlich wurden die internen und efferenten Informationen zu Repositionierungssystemen, Proxy-Gesten und umgeleitetem Gehen in Abschnitt erläutert 5.4. Wie oben dargelegt, unterscheiden sich die drei Ansätze für virtuelles Gehen in dieser Hinsicht stark. Repositionierungssysteme liefern ein relativ genaues propriozeptives / kinästhetisches Feedback. Die Tatsache, dass der Benutzer stationär bleibt, ist jedoch mit Kosten verbunden, da die vestibulären Informationen begrenzt sind. Ansätze, die auf Proxy-Gesten beruhen, sind aus demselben Grund in Bezug auf das vestibuläre Feedback begrenzt. Diese Ansätze sind jedoch erheblich kostengünstiger und können mit Standardhardware implementiert werden. In Bezug auf interne und effiziente Informationen ahmt das umgeleitete Gehen das echte Gehen am besten nach. Trotzdem erfordert dieser Ansatz viel Platz und die Community muss noch einen Umleitungsalgorithmus erstellen, der wirklich verallgemeinerbar ist.

Wir haben noch keine kommerziell praktikable Lösung gefunden, die in der Lage ist, die Erfahrung des echten Gehens auf engstem Raum zu reproduzieren und gleichzeitig multisensorisches High-Fidelity-Feedback zu liefern. Trotzdem wurden seit Sutherland große Fortschritte gemacht (1965) präsentierte sein ultimatives Display, mit dem Benutzer ein digitales Wunderland betreten (und darin herumlaufen) können. Dieser Artikel gab einen Überblick über diese Arbeit und hob einige der Herausforderungen hervor, die künftige Arbeiten zum virtuellen Gehen wahrscheinlich beeinflussen werden.

## VERWEISE

- Lisa Avila und Mike Bailey. 2014. Virtuelle Realität für die Massen. *IEEE-Computergrafik und -Anwendungen* 34, 5 (2014), 103–104.
- Mahdi Azmadian, Timofey Grechkin und Evan Suma Rosenberg. 2017. Eine Bewertung der Strategien für die Weiterleitung von zwei Benutzern Gehen in gemeinsamen physischen Räumen. Im *2017 IEEE Virtual Reality (VR'17)*. IEEE, 91–98.
- Eric R. Bachmann, Jeanette E. Holm, Michael A. Zmuda und Eric Hodgson. 2013. Kollisionsvorhersage und -prävention in a gleichzeitige immersive virtuelle Umgebung für zwei Benutzer. Im *2013 IEEE Virtual Reality (VR'13)*. IEEE, 89–90.
- Tom Banton, Jeanine Stefanucci, Frank Durgin, Adam Fass und Dennis Proffitt. 2005. Die Wahrnehmung der Gehgeschwindigkeit in eine virtuelle Umgebung. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen* 14, 4 (2005), 394–406.
- Benjamin Bolte und Markus Lappe. 2015. Unterschwellige Neuorientierung und Neupositionierung in immersiven virtuellen Umgebungen mit Sakkadenunterdrückung. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 21, 4 (2015), 545–552.
- Laroussi Bouguila, Evequoz Florian, Michele Courant und Beat Hirsbrunner. 2005. Aktive Gehschnittstelle für Menschen-virtuelle Umgebung skalieren. Im *11. Internationale Konferenz über Mensch-Computer-Interaktion (HCI'05)*, Vol. 5. ACM, 22–27.
- Laroussi Bouguila, Masaru Iwashita, Beat Hirsbrunner und Makoto Sato. 2003. Virtuelle Fortbewegungsschnittstelle mit Boden Oberflächensimulation. Im *Vorträge der Internationalen Konferenz über künstliche Realität und Telexistenz (ICAT'03)*.
- Doug A. Bowman, Elizabeth T. Davis, Larry F. Hodges und Albert N. Badre. 1999. Beibehaltung der räumlichen Orientierung während Reisen in einer immersiven virtuellen Umgebung. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen* 8, 6 (1999), 618–631.
- Doug A. Bowman, David Koller und Larry F. Hodges. 1997. Reisen in immersiven virtuellen Umgebungen: Eine Bewertung von Blickwinkel-Bewegungssteuerungstechniken. Im *IEEE 1997 Virtual Reality Jährliches Internationales Symposium*. IEEE, 45–52.



- Doug A. Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J. LaViola Jr. und Ivan Poupyrev. 2004. *3D-Benutzeroberflächen: Theorie und Praxis*. Addison-Wesley Professional, Redwood City, CA.
- Doug A. Bowman, Ryan P. McMahan und Eric D. Ragan. 2012. Hinterfragung des Naturalismus in 3D-Benutzeroberflächen. *Communications of the ACM* 55, 9 (2012), 78–88.
- Gerd Bruder, Paul Lubos und Frank Steinicke. 2015. Kognitive Ressourcenanforderungen des umgeleiteten Gehens. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 21, 4 (2015), 539–544.
- Luis Bruno, João Pereira und Joaquim Jorge. 2013. Ein neuer Ansatz für das Gehen an Ort und Stelle. Im *Menschliche Interaktion mit dem Computer (INTERACT'13)*. 370–387.
- Tuncay Cakmak und Holger Hager. 2014. Cyberith Virtualizer: Ein Fortbewegungsgerät für die virtuelle Realität. Im *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*. ACM, 6.
- Deborah J. Cook, Cynthia D. Mulrow und R. Brian Haynes. 1997. Systematische Übersichten: Synthese der besten Beweise für die klinische Entscheidungen. *Annalen der Inneren Medizin* 126, 5 (1997), 376–380.
- Perry R. Cook. 1997. Physikalisch informierte Schallmodellierung (PhISM): Synthese perkussiver Klänge. *Computer Music Journal* 21, 3 (1997), 38–49.
- Perry R. Cook. 2002. Modellierung der Gangart von Bill: Analyse und parametrische Synthese von Gehgeräuschen. *Verfahren der AES 22 Internationale Konferenz über virtuelles, synthetisches und Unterhaltungs-Audio*, 73–78.
- Rudolph P. Darken, William R. Cockayne und David Carmein. 1997. Das omnidirektionale Laufband: Ein Fortbewegungsgerät für virtuelle Welten. Im *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'97)*. ACM, 213–221.
- Simon Davis, Keith Nesbitt und Eugene Nalivaiko. 2014. Eine systematische Überprüfung der Cybersickness. Im *Proceedings of the 2014 Konferenz über interaktive Unterhaltung (IE'14)*. ACM, 1–9.
- Johannes Dichgans und Thomas Brandt. 1978. Visuell-vestibuläre Interaktion: Auswirkungen auf die Wahrnehmung von Selbstbewegungen und die Körperhaltung Steuerung. Im *Wahrnehmung: Handbuch der sensorischen Physiologie*, R. Held, HW Leibowitz und H. L. Editors Teuber (Hrsg.). Vol. VIII. Springer, Berlin, 755–804.
- Frank H. Durgin, Catherine Reed und Cara Tigue. 2007. Schrittfrequenz und wahrgenommene Selbstbewegung. *ACM-Transaktionen am Angewandte Wahrnehmung (TAP)* 4, 1 (2007), 5.
- Jeff Feasel, Mary C. Whitton, Laura Kassler, Frederick P. Brooks und Michael D. Lewek. 2011. Die integrierte virtuelle Energie Umweltrehabilitations-Laufbandsystem. *IEEE-Transaktionen zu neuronalen Systemen und Rehabilitationstechnik* 19, 3 (2011), 290–297.
- Jeff Feasel, Mary C. Whitton und Jeremy D. Wendt. 2008. LLCM-WIP: Laufende Ortung mit geringer Latenz und kontinuierlicher Bewegung. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums 2008 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'08)*. IEEE, 97–104.
- Ajoy S. Fernandes und Steven K. Feiner. 2016. Bekämpfung der VR-Krankheit durch subtile dynamische Änderung des Sichtfelds. Im *IEEE-Symposium 2016 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'16)*. IEEE, 201–210.
- Hernandi FK Filho, Wilson J. Sarmiento, Vitor Jorge, Cesar Collazos und Nedel Luciana. 2012. Gehen Sie mit a an Ort und Stelle Balance Board Matrix. Im *Ablauf des Workshops über laufende Arbeiten (SIGGRAPH'12)*. 1–2.
- Federico Fontana und Roberto Bresin. 2003. Physikbasierte Klangsintese und -steuerung: Quetschen, Gehen und Laufen zerknitterte Geräusche. Im *Vorträge des XIV. Kolloquiums über Musikinformatik (CIM'03)*. 109–114. Federico Fontana und Yon Visell. 2012. *Gehen mit den Sinnen: Wahrnehmungstechniken für das Gehen in simulierten Umgebungen mente*. Logos-Verlag, Berlin.
- Timofey Grechkin, Mahdi Azmandian, Mark Bolas und Evan A. Suma. 2015. Hin zu einer kontextsensitiven Neuorientierung für reales Gehen in der virtuellen Realität. Im *2015 IEEE Virtual Reality (VR'15)*. IEEE, 185–186.
- Timofey Grechkin, Jerald Thomas, Mahdi Azmandian, Mark Bolas und Evan Suma. 2016. Überprüfung der Erkennungsschwellen für umgeleitetes Gehen: Kombination von Translations- und Krümmungsgewinnen. Im *Vorträge des ACM-Symposiums zur angewandten Wahrnehmung (TAP'15)*. ACM, 113–120.
- Emilie Guy, Parinya Punpongsonon, Daisuke Iwai, Kosuke Sato und Tamy Boubekeur. 2015. LazyNav: 3D-Bodennavigation mit unkritischen Körperteilen. Im *IEEE-Symposium 2015 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'15)*. IEEE, 43–50.
- Laurence R. Harris, Michael R. Jenkin, Daniel Zikowitz, Fara Redlick, Philip Jaekl, Urszula Jasiobedzka, Heather L. Jenkin, und Robert S. Allison. 2002. Simulation der Selbstbewegung I: Hinweise für die Wahrnehmung von Bewegung. *Virtuelle Realität* 6, 2 (2002), 75–85.
- Lawrence J. Hettinger, Tarah Schmidt, David L. Jones, Behrang Keshavarz, Rudolph P. Darken und Barry Peterson. 2002. *Illusorische Selbstbewegung in virtuellen Umgebungen*. CRC Press, Boca Raton, FL, 471–492.
- Eric Hodgson und Eric Bachmann. 2013. Vergleich von vier Ansätzen für verallgemeinertes umgeleitetes Gehen: Simulation und Live-Benutzerdaten. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 19, 4 (2013), 634–643.
- Jeannette E. Holm. 2012. *Kollisionsvorhersage und -prävention in einer simultanen virtuellen Umgebung mit mehreren Benutzern*. Ph.D. Dissertation. Miami University.
- Jiung-Yao Huang. 2003. Eine omnidirektionale, auf Spaziergängen basierende Virtual-Reality-Schnittstelle und ihre Anwendung auf Laufkränen Ausbildung. *IEEE-Transaktionen auf Multimedia* 5, 1 (2003), 39–51.

- Victoria Interrante, Brian Ries und Lee Anderson. 2007. Sieben Liga-Stiefel: Eine neue Metapher für gesteigerte Fortbewegung durch mittelgroße immersive virtuelle Umgebungen. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums 2007 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'07)*. IEEE, 167–170.
- Hiroo Iwata. 1999. Das Torus-Laufband: Fortbewegung in VR realisieren. *IEEE-Computergrafik und -Anwendungen* 19, 6 (1999), 30–35.
- Hiroo Iwata und Takashi Fujii. 1996. Virtueller Kinderwagen: Ein neuartiges Schnittstellengerät für die Fortbewegung in einer virtuellen Umgebung. Im *Tagungsband des IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 1996*. IEEE, 60–65. Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Hiroyuki Fukushima und Haruo Noma. 2005. CirculaFloor. *IEEE Computer Graphics and Applications* 25, 1 (2005), 64–67.
- Hiroo Iwata, Hiroaki Yano und Masaki Tomiyoshi. 2007. String Walker. Im *Verfahren von SIGGRAPH 2007*. ACM, 20.
- Laura Kessler, Jeff Feasel, Michael D. Lewek, Frederick P. Brooks Jr. und Mary C. Whitton. 2010. Passendes Laufband: Gehgeschwindigkeit und visuell wahrgenommene Gehgeschwindigkeit in einer virtuellen Projektionsumgebung. Im *Vorträge des 7. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung (APGV'10)*. ACM, 161–161.
- Alexandra Kitson, Abraham M. Hashemian, Ekaterina R. Stepanova, Ernst Kruijff und Bernhard E. Riecke. 2017. Vergleichen: Lean-basierte Motion-Cueing-Schnittstellen für die Fortbewegung in der virtuellen Realität. Im *2017 IEEE-Symposium zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'17)*. IEEE, 73–82.
- Ernst Kruijff, Alexander Marquardt, Christina Trepkowski, Robert W. Lindeman, Andre Hinkenjann, Jens Maiero und Bernhard E. Riecke. 2016. Auf den Beinen: Verbesserung der Vektoren in lehn-basierten Schnittstellen durch multisensorische Reize. Im *Vorträge des Symposiums 2016 zur räumlichen Benutzerinteraktion (SUI'16)*. ACM, 149–158.
- Ernst Kruijff, Bernhard Riecke, Christina Trepkowski und Alexandra Kitson. 2015. Die Neigung des Oberkörpers kann sich nach vorne auswirken: Selbstbewegungswahrnehmung in virtuellen Umgebungen. Im *Vorträge des 3. ACM-Symposiums zur räumlichen Benutzerinteraktion (SUI'15)*. ACM, 103–112.
- Eike Langbehn, Gerd Bruder und Frank Steinicke. 2016. Unterschwellige Neuorientierung und Neupositionierung in der virtuellen Realität während Augen blinkt. Im *Vorträge des Symposiums 2016 zur räumlichen Benutzerinteraktion (SUI'16)*. ACM, 213–213.
- Eike Langbehn, Tobias Eichler, Sobin Ghose, Kai von Luck, Gerd Bruder und Frank Steinicke. 2015. Bewertung einer omnidirektionalen Benutzeroberfläche mit virtueller Fortbewegungsgeschwindigkeit, skaliert durch den Vorwärtswinkel. Im *Vorträge des GI-Workshops zu virtueller und erweiterter Realität (GI VR / AR'15)*. 149–160.
- Eike Langbehn, Paul Lubos, Gerd Bruder und Frank Steinicke. 2017. Biegen der Kurve: Empfindlichkeit gegenüber Biegung von gekrümmten Pfaden und Anwendung in VR im Raumlab. *IEEE-Transaktionen zur Visualisierung und Computergrafik* 23, 4 (2017), 1389–1398.
- Pontus Larsson, Aleksander Väljamäe, Daniel Västfjäll, Ana Tajadura-Jiménez und Mendel Kleiner. 2010. Auditorisch induzierte Präsenz in Mixed-Reality-Umgebungen und verwandten Technologien. *Engineering von Mixed-Reality-Systemen* (2010), 143–163. Abgerufen von <http://www.springerlink.com/>
- Alvin W. Law, Jessica W. Ip, Benjamin V. Peck, Yon Visell, Paul G. Kry und Jeremy R. Cooperstock. 2009. Multimodaler Boden für immersive Umgebungen. Im *ACM SIGGRAPH 2009 Neue Technologien*. ACM, 16.
- Alvin W. Law, Benjamin V. Peck, Yon Visell, Paul G. Kry und Jeremy R. Cooperstock. 2008. Eine multimodale Grundfläche für Erleben von Materialverformungen unter den Füßen in der virtuellen Realität. Im *Internationaler IEEE-Workshop zu haptischen audiovisuellen Umgebungen und Spielen, 2008 (HAVE'08)*. IEEE, 126–131.
- Robert W. Lindeman, John L. Sibert und James K. Hahn. 1999. Handfenster: Auf dem Weg zu einer effektiven 2D-Interaktion in immersiven virtuellen Umgebungen. Im *IEEE-Verfahren der virtuellen Realität (VR'99)*. IEEE, 205–212.
- Maud Marchal, Gabriel Cirio, Yon Visell, Federico Fontana, Stefania Serafin, Jeremy Cooperstock und Anatole Lécuyer. 2013. Multimodales Rendern des Gehens über virtuelles Gelände. Im *Menschliches Gehen in virtuellen Umgebungen*. Springer, New York, NY, 263–295.
- Margaret W. Matlin. 2009. Erkenntnis. Siebte Ausgabe. New York: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa und Michitaka Hirose. 2016. Krümmungsmanipulation: Umleitungstechniken unter Verwendung von haptischen Hinweisen. Im *IEEE-Symposium 2016 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'16)*. IEEE, 105–108. Morgan McCullough, Hong Xu, Joel Michelson, Matthew Jackoski, Wyatt Pease, William Cobb, William Kalescky, Joshua Ladd und Betsy Williams. 2015. Myo Arm: Schwingen, um eine VE zu erkunden. Im *Vorträge des ACM SIGGRAPH Symposiums zur angewandten Wahrnehmung (SAP'15)*. ACM, 107–113.
- Eliana Medina, Ruth Fruland und Suzanne Weghorst. 2008. Virtusphere: Gehen in einem VR-Hamsterball in Menschengröße. Im *Tagungsband der Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 52. SAGE Publications, 2102–2106. Michael Meehan, Brent Insko, Mary Whitton und Frederick P. Brooks Jr. 2002. Physiologische Messungen der Präsenz in stressigen virtuellen Umgebungen. *ACM-Transaktionen auf Grafiken (TOG)* 21, 3 (2002), 645–652.
- Florian Meyer, Malte Nogalski und Wolfgang Fohl. 2016. Erkennungsschwellen beim audiovisuell umgeleiteten Gehen. Im *Profi-Tagungsband der Internationalen Konferenz für Sound- und Musik-Computing 2016 (SMC'16)*. Sound and Music Computing Network, Hamburg, 293–299.

- Jacquelyn F. Morie. 2014. Wenn VR wirklich auf die Straße geht. Im *Verfahren von Ingenieuren für fotooptische Instrumente (SPIE'14)*, Vol. 9012. Internationale Gesellschaft für Optik und Photonik, San Francisco, CA, 0120B1–0120B7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2042595>
- Thomas Nescher, Ying-Yin Huang und Andreas Kunz. 2014. Planung von Umleitungstechniken für optimales freies Gehen Erfahrung mit modellprädiktiver Steuerung. Im *IEEE-Symposium 2014 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'14)*. IEEE, 111–118. Christian T. Neth, Jan L. Souman, David Engel, Uwe Kloos, Heinrich H. Bulthoff und Betty J. Mohler. 2012. Velocity-abhängige dynamische Krümmungsverstärkung für umgeleitetes Gehen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 18, 7 (2012), 1041–1052.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin, Morten H. Laursen, Kasper S. Pedersen, Erik Sikström und Rolf Nordahl. 2013. Tapping-In-Place: Steigerung der Natürlichkeit der immersiven Fortbewegung vor Ort durch neuartige gestische Eingaben. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums 2013 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'13)*. IEEE, 31–38.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2013. Die wahrgenommene Natürlichkeit virtueller Fortbewegungsmethoden fehlt von expliziten Beinbewegungen. Im *Bewegungsabläufe in Spielen (MIG'13)*. ACM, 155–164.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2014a. Festlegung der Reichweite des wahrnehmungsmäßig natürlichen visuellen Gehens Geschwindigkeiten für die virtuelle Fortbewegung vor Ort. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 20, 4 (2014), 569–578.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2014b. Der Einfluss der Schrittfrequenz auf den Wahrnehmungsbereich Verbündete natürliche visuelle Gehgeschwindigkeiten beim Gehen an Ort und Stelle und bei der Fortbewegung des Laufbandes. Im *Vorträge des 20. ACM-Symposiums zu Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST'14)*. ACM, 187–190.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2015a. Die Wirkung von am Kopf montiertem Displaygewicht und Fortbewegung Methode zur wahrgenommenen Natürlichkeit virtueller Gehgeschwindigkeiten. Im *2015 IEEE Virtual Reality (VR'15)*. IEEE, 249–250. Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2015b. Der Effekt von visuellen Anzeigeeigenschaften und Präsentationsgewinnen Modus auf die wahrgenommene Natürlichkeit der virtuellen Gehgeschwindigkeiten. Im *2015 IEEE Virtual Reality (VR'15)*. IEEE, 81–88.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2016a. Die wahrgenommene Natürlichkeit virtueller Gehgeschwindigkeiten während WIP-Fortbewegung: Zusammenfassung und Metaanalysen. *PsychNology Journal* 14, 1 (2016), 7–39.
- Niels C. Nilsson, Stefania Serafin und Rolf Nordahl. 2016b. An Ort und Stelle durch virtuelle Welten gehen. Im *International Conference zur Mensch-Computer-Interaktion (HCI'16)*. Springer, Cham, Toronto, Kanada, 37–48.
- Niels C. Nilsson, Evan Suma, Rolf Nordahl, Mark Bolas und Stefania Serafin. 2016. Schätzung der Erkennungsschwellen für audiovisuelle Rotationsgewinne. Im *2016 IEEE Virtual Reality (VR'16)*. IEEE, 241–242.
- Malte Nogalski und Wolfgang Fohl. 2016. Akustisch umgeleitetes Gehen mit akustischen Hinweisen mittels Wellenfeldsynthese. Im *2016 IEEE Virtual Reality (VR'16)*. IEEE, 245–246.
- Haruo Noma. 1998. Entwurf für die Fortbewegungsschnittstelle in einer großen virtuellen Umgebung ATLAS: ATR-Fortbewegungsschnittstelle für aktive Selbstbewegung. Im *Verfahren der AMSE Dynamic System Control Division (DSCD'98)* 64 (1998), 111–118. Rolf Nordahl. 2005. Design und Evaluierung eines multimodalen Schrittreglers mit VR-Anwendungen. Im *Verfahren der 2. Internationale Konferenz über aktive Schnittstellen*. European Enactive Network of Excellence, Genua, Italien, 57–62. Rolf Nordahl. 2006. Steigerung der Bewegung von Benutzern in fotorealistischen virtuellen Umgebungen durch Verwendung von akustischem Rendering der Umwelt und Ego-Bewegung. Im *Der 9. jährliche internationale Workshop über Präsenz (PRESENCE'06)*. Internationale Gesellschaft für Präsenzforschung, Cleveland, OH, 57–63.
- Rolf Nordahl, Amir Berrezag, Smilen Dimitrov, Luca Turchet, Vincent Hayward und Stefania Serafin. 2010. Vorläufig Experimentieren Sie die Kombination von haptischen Schuhen der virtuellen Realität und Audiosynthese. Im *Internationale Konferenz über menschliche haptische Wahrnehmung und berührungsfähige Computeranwendungen (Eurohaptics'10)*. Springer, Amsterdam, Niederlande, 123–129.
- Rolf Nordahl, Stefania Serafin, Niels C. Nilsson und Luca Turchet. 2012a. Verbesserung des Realismus in virtuellen Umgebungen durch Simulation des audio-haptischen Gefühls beim Gehen auf Bodenoberflächen. Im *2012 IEEE Virtual Reality Short Papers und Poster (VRW'12)*. IEEE, 73–74.
- Rolf Nordahl, Serafin Serafin, Luca Turchet und Niels C. Nilsson. 2012b. Eine multimodale Architektur zur Simulation natürlicher interaktives Gehen in virtuellen Umgebungen. *PsychNologie* 9, 3 (2012), 245–268.
- Rolf Nordahl, Luca Turchet und Stefania Serafin. 2011. Klangsynthese und Bewertung interaktiver Schritte und Umgebungen Wiedergabe von Umgebungsgeräuschen für Virtual-Reality-Anwendungen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 17, 9 (2011), 1234–1244.
- Stefano Papetti, Federico Fontana und Marco Civolani. 2009. Eine schuhbasierte Schnittstelle zur ökologischen Bodenverbesserung. Im *Vorträge des 4. Internationalen Haptic and Auditory Interaction Design Workshops (HAID'09)*, Vol. 2. Springer, Dresden, Deutschland, 44.
- Tabitha C. Peck, Henry Fuchs und Mary C. Whittton. 2011. Eine Bewertung der Navigationsfähigkeit im Vergleich umgeleitet Kostenlose Erkundung mit Ablenkern zu den Schnittstellen für das Gehen an Ort und Stelle und die Joystick-Fortbewegung. Im *Proceedings der 2011 IEEE Virtual Reality (VR'11)*. IEEE, 55–62.
- Thies Pfeiffer, Ajoscha Schmidt und Patrick Renner. 2016. Erkennen von Bewegungsmustern anhand von Trägheitsdaten eines Mobiltelefons Head-Mounted-Display zur Navigation per Walk-in-Place. Im *2016 IEEE Virtual Reality (VR'16)*, 263–264.

- Wendy Powell, Brett Stevens, Steve Hand und Maureen Simmonds. 2011. Grenzen verwischen: Die Wahrnehmung des Visuellen Gewinn in Laufband-vermittelten virtuellen Umgebungen. Im *Vorträge des 3. IEEE VR-Workshops zu Wahrnehmungsillusionen in virtuellen Umgebungen (PIVE'11)*. IEEE, 4–8.
- Pariya Punpongsonon, Emilie Guy, Daisuke Iwai, Kosuke Sato und Tamy Boubekeur. 2016. Erweitertes LazyNav: Virtuell 3D-Bodennavigation für große Displays und Head-Mounted-Displays. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 23, 8 (2016), 1952–1963.
- Laura K. Pynn und Joseph FX DeSouza. 2013. Die Funktion von Efference Copy Signalen: Implikationen für Symptome von Schizophrenie. *Visionsforschung* 76 (2013), 124–133.
- Sharif Razzaque. 2005. *RedirectedWalking*. Ph.D. Dissertation. Universität von North Carolina in Chapel Hill, Chapel Hill, NC.
- Berater Fredrick P. Brooks Jr.
- Sharif Razzaque, Zachariah Kohn und Mary C. Whitton. 2001. Umgeleitetes Gehen. Im *Proceedings of Eurographics*, Vol. 9. Eurographics Association, Manchester, England, 105–106.
- Paul Richard, Laroussi Bouguila, Michele Courant und Beat Hirsbrunner. 2007. Enaktive Navigation in virtuellen Umgebungen: Bewertung des Walking PAD. Im *Vorträge der 4. Internationalen Konferenz über aktive Schnittstellen*. Verein ACROE, Grenoble, Frankreich, 225–228.
- Bernhard E. Riecke, Jörg Schulte-Pelkum, Marios N. Avraamides, Markus von der Heyde und Heinrich H. Bühlhoff. 2005. Szenenkonsistenz und räumliche Präsenz erhöhen das Gefühl der Selbstbewegung in der virtuellen Realität. Im *Vorträge des 2. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung (APGV'05)*. ACM, A Corona, Spanien, 111–118.
- Gabriel Robles-De-La-Torre. 2006. Die Bedeutung des Tastsinns in virtuellen und realen Umgebungen. *IEEE Multimedia* 13, 3 (2006), 24–30.
- Bhuvaneswari Sarupuri, Miriam Luque Chipana und Robert W. Lindeman. 2017. Trigger Walking: Eine ermüdungsarme Reise Technik für immersive virtuelle Realität. Im *2017 IEEE-Symposium zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'17)*. IEEE, 227–228.
- Stefania Serafin, Niels C. Nilsson, Erik Sikstrom, Amalia De Goetzen und Rolf Nordahl. 2013. Schätzung der Erkennungsschwellenwerte für akustisch basierte umgeleitete Gehechniken. Im *2013 IEEE Virtual Reality (VR'13)*. IEEE, 161–162.
- Stefania Serafin, Luca Turchet und Rolf Nordahl. 2009. Extraktion von Bodenreaktionskräften für die Echtzeitsynthese von Gehgeräuschen. *Meistens Audio* 1 (2009), 99–105.
- Stefania Serafin, Luca Turchet, Rolf Nordahl, Smilen Dimitrov, Amir Berrezag und Vincent Hayward. 2010. Identifizierung von virtuellen Gründen mit virtueller Realität haptischen Schuhen und Klangsynthese. Im *Vorträge des Eurohaptics Symposium über haptische und audiovisuelle Reize: Verbesserung von Erfahrungen und Interaktion*. 61–70.
- Adalberto L. Simeone, Eduardo Velloso und Hans Gellersen. 2015. Substitutionsrealität: Nutzung der physischen Umgebung Virtual-Reality-Erlebnisse zu gestalten. Im *Vorträge der 33. jährlichen ACM-Konferenz über Human Factors in Computersystemen (CHI'15)*. ACM, 3307–3316.
- Mel Slater, Anthony Steed und Martin Usoh. 1993. Das virtuelle Laufband: Eine naturalistische Metapher für die Navigation im Bildmersive virtuelle Umgebungen. Im *Erster Eurographics Workshop zur virtuellen Realität*, M. Goebel (Hrsg.). Springer, Wien, Barcelona, Spanien, 71–86.
- Mel Slater und Martin Usoh. 1994. Körperzentrierte Interaktion in immersiven virtuellen Umgebungen. *Künstliches Leben und virtuelle Wirklichkeit* 1 (1994), 125–148.
- Mel Slater, Martin Usoh und Anthony Steed. 1994. Stufen und Leitern in der virtuellen Realität. Im *Ablauf der ACMConference zu Virtual Reality Software und Technologie (VRST'94)*. ACM, 45–54.
- Mel Slater, Martin Usoh und Anthony Steed. 1995. Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Gehechnik auf die Präsenz in virtueller Realität. *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion* 2, 3 (1995), 201–219.
- Jan L. Suman, P. Robuffo Giordano, M. Schwaiger, Ilja Frissen, Thomas Thümmel, Heinz Ulbrich, A. De Luca, Heinrich H. Bühlhoff und Marc O. Ernst. 2011. CyberWalk: Ermöglichen eines uneingeschränkten omnidirektionalen Gehens durch virtuelle Umgebungen. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)* 8, 4 (2011), 25.
- Mischa Sra, Sergio Garrido-Jurado, Chris Schmandt und Pattie Maes. 2016. Prozedural erzeugte virtuelle Realität aus 3D rekonstruierter physischer Raum. Im *Vorträge der 22. ACM-Konferenz über Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST'16)*. ACM, 191–200.
- Mandayam A. Srinivasan und Gagay Basdogan. 1997. Haptik in virtuellen Umgebungen: Taxonomie, Forschungsstatus und Herausforderungen. *Computer & Grafik* 21, 4 (1997), 393–404.
- Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz und Markus Lappe. 2010. Schätzung der Erkennungsschwellen für umgeleitete Gehechniken. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 16, 1 (2010), 17–27.
- Frank Steinicke, Yon Visell, Jennifer Campos und Anatole Lécuyer. 2013. *Menschliches Gehen in virtuellen Umgebungen: Percept-Technologie und Anwendungen*. Springer, New York, NY.
- Evan A. Suma, Mahdi Azmandian, Timofey Grechkin, Thai Phan und Mark Bolas. 2015. Kleine Räume fühlen sich groß an: Unendliches Gehen in der virtuellen Realität. Im *ACM SIGGRAPH 2015 Neue Technologien*. ACM, Los Angeles, CA, 16.
- Evan A. Suma, Gerd Bruder, Frank Steinicke, David M. Krum und Mark Bolas. 2012. Eine Taxonomie für die Bereitstellung der Umleitung Techniken in immersiven virtuellen Umgebungen. Im *2012 IEEE Virtual Reality Short Papers and Poster (VRW'12)*. IEEE, Costa Mesa, CA, 43–46.

- Evan A. Suma, Seth Clark, Samantha Finkelstein, Zachary Warte, David Krum und M. Bolas. 2011a. Veränderung nutzen Blindheit für die Umleitung in virtuellen Umgebungen. Im *2011 IEEE Virtual Reality Konferenz (VR'11)*. IEEE, 159–166. Evan A. Suma, David M. Krum und Mark Bolas. 2011b. Umleitung auf Mixed-Reality-Lauflächen. Im *IEEE VRWorkshop über Wahrnehmungsimulationen in virtuellen Umgebungen (PIVE'11)*. IEEE, 33–35.
- Evan A. Suma, David M. Krum und Mark Bolas. 2013. Umgeleitetes Gehen in Mixed-Reality-Trainingsanwendungen. Im *Mensch Gehen in virtuellen Umgebungen*. Springer, New York, NY, 319–331.
- Evan A. Suma, Belinda Lange, Albert S. Rizzo, David M. Krum und Mark Bolas. 2011. Faast: Die flexible Aktion und Artikulation Lated Skeleton Toolkit. Im *2011 IEEE Virtual Reality (VR'11)*. IEEE, 247–248.
- Evan A. Suma, Zachary Lipps, Samantha Finkelstein, David M. Krum und Mark Bolas. 2012. Unmögliche Räume: Maximiz-natürliches Gehen in virtuellen Umgebungen mit sich selbst überlappender Architektur. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik* 18, 4 (2012), 555–564.
- Ivan E. Sutherland. 1965. Die ultimative Anzeige. Im *Tagungsband des IFIP-Kongresses*. Spartan Books, Washington, DC, 506–508. David Swapp, Julian Williams und Anthony Steed. 2010. Die Implementierung einer neuartigen Gehschnittstelle innerhalb eines Immersiven Anzeiges. Im *Vorträge des IEEE-Symposiums 2010 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'10)*. IEEE, 71–74.
- James N. Templeman, Patricia S. Denbrook und Linda E. Sibert. 1999. Virtuelle Fortbewegung: Gehen Sie an Ort und Stelle durch virtuelle Umgebungen. *Gegenwart* 8, 6 (1999), 598–617.
- Leo Terziman, Maud Marchal, Mathieu Emily, Franck Multon, Bruno Arnaldi und Anatole Lécuyer. 2010. Shake-your-head: Überarbeitung der Vor-Ort-Funktion für die virtuelle Desktop-Realität. Im *Vorträge des 17. ACM-Symposiums zu Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST'10)*. ACM, 27–34.
- Sam Tregillus und Eelke Folmer. 2016. Vr-Schritt: Vor-Ort-Gehen mit Trägheitserfassung für die Freisprechnavigation in Mobilgeräten vr Umgebungen. Im *Tagungsband der Konferenz 2016 über Human Factors in Computersystemen (CHI'16)*. ACM, 1250–1255.
- Martin Usoh, Kevin Arthur, Mary C. Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater und Frederick P. Brooks Jr. 1999. Gehen - Gehen an Ort und Stelle - Fliegen in virtuellen Umgebungen. Im *Vorträge der 26. Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken (SIGGRAPH'99)*. ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co., Los Angeles, Kalifornien, 359–364.
- Aleksander Väljamäe. 2009. Auditorisch induzierte illusorische Selbstbewegung: Ein Rückblick. *Gehirnforschung Bewertungen* 61, 2 (2009), 240–255. Khrystyna Vasylevska und Hannes Kaufmann. 2017a. Komprimieren von VR: Anpassen großer virtueller Umgebungen in begrenztem Umfang physikalischer Raum. *IEEE-Computergrafik und -Anwendungen* 37, 5 (2017), 85–91.
- Khrystyna Vasylevska und Hannes Kaufmann. 2017b. Auf dem Weg zu einer effizienten räumlichen Komprimierung in sich selbst überlappenden virtuellen Umgebungen. Im *2017 IEEE-Symposium zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'17)*. IEEE, 12–21.
- Khrystyna Vasylevska, Hannes Kaufmann, Mark Bolas und Evan A. Suma. 2013. Flexible Räume: Dynamische Layoutgenerierung für unendliches Gehen in virtuellen Umgebungen. Im *2013 IEEE-Symposium zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'13)*. IEEE, 39–42.
- Yon Visell, Federico Fontana, Bruno L. Giordano, Rolf Nordahl, Stefania Serafin und Roberto Bresin. 2009. Sounddesign und Wahrnehmung in Interaktionen mit dem Gehen. *Internationale Zeitschrift für Human-Computer-Studien* 67, 11 (2009), 947–959.
- David Waller und Eric Hodgson. 2013. Sensorische Beiträge zum räumlichen Wissen über reale und virtuelle Umgebungen. Im *Menschliches Gehen in virtuellen Umgebungen*, Frank Steinicke, Yon Visell, Jennifer Campos und Anatole Lécuyer (Hrsg.). Springer, New York, 3–26.
- Benjamin Walther-Franks, Dirk Wenig, Jan Smeddinck und Rainer Malaka. 2013. Unterbrochenes Gehen: Eine physische Lokomotive Schnittstelle für die virtuelle Realität. Im *Entertainment Computing (ICEC'13)*. Springer, 185–188. Rik Warren und Alexander H. Wertheim. 1990. *Wahrnehmung und Kontrolle der Selbstbewegung*. Lawrence Erlbaum Associates, London. William H. Warren, Bruce A. Kay, Wendy D. Zosh, Andrew P. Duchon und Stephanie Sahuc. 2001. Optischer Fluss ist gewohnt Kontrolle des menschlichen Gehens. *Naturwissenschaften* 4, 2 (2001), 213–216.
- Jeremy D. Wendt. 2010. *Real-Walking-Modelle verbessern Walking-in-Place-Systeme*. Ph.D. Dissertation. Universität von Nord Carolina in Chapel Hill.
- Jeremy D. Wendt, Mary C. Whitton und Frederick P. Brooks. 2010. GUDWIP: Gangverständnisgesteuertes Gehen an Ort und Stelle. Im *Proceedings der 2010 IEEE Virtual Reality (VR'10)*. IEEE, 51–58. Mary C. Whitton und Sharif Razzaque. 2008. *Fortbewegungsschnittstellen*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 107–146. Betsy Williams, Stephen Bailey, Gayathri Narasimham, Muqun Li und Bobby Bodenheimer. 2011. Bewertung des Gehens Platzieren Sie es auf einem aWii-Balance-Board, um eine virtuelle Umgebung zu erkunden. *Ablauf der ACM Transactions on Applied Perception* 8, 3 (2011), 19.
- Betsy Williams, Gayathri Narasimham, Björn Rump, Timothy P. McNamara, Thomas H. Carr, John Rieser und Bobby Bodenheimer. 2007. Erkunden großer virtueller Umgebungen mit einem HMD, wenn der physische Speicherplatz begrenzt ist. Im *Vorträge des 4. Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung (APGV'07)*. ACM, 41–48.
- Preston Tunnell Wilson, William Kalescky, Ansel MacLaughlin und Betsy Williams. 2016. VR-Fortbewegung: Gehen> Gehen-an Ort und Stelle> Arm schwingen. Im *Vorträge der 15. ACM SIGGRAPH-Konferenz zum Virtual-Reality-Kontinuum und seinen Anwendungen in der Industrie*, Vol. 1. ACM, 243–249.

- Zhixin Yan, Robert W. Lindeman und Arindam Dey. 2016. Lassen Sie Ihre Finger laufen: Ein einheitlicher Ansatz für Effizienz Kurz-, Mittel- und Langstreckenreisen in VR. Im *IEEE-Symposium 2016 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI'16)*. IEEE, 27–30. Paul Zehr und Carlos Haridas.
2003. Modulation der Hautreflexe in den Armmuskeln beim Gehen: Weitere Hinweise von ähnlichen Kontrollmechanismen für rhythmische menschliche Arm- und Beinbewegungen. *Experimentelle Hirnforschung* 149, 2 (2003), 260–266.
- David J. Zielinski, Ryan P. McMahan und Rachael B. Brady. 2011. Shadow Walking: Eine unbelastete Fortbewegungstechnik einzigartig für Systeme mit Unterflurprojektion. Im *2011 IEEE Virtual Reality Konferenz (VR'11)*. IEEE, 167–170.

Eingegangen im April 2017; überarbeitet im Dezember 2017; akzeptiert Dezember 2017