

Tapping-In-Place: Steigerung der Natürlichkeit der immersiven Fortbewegung vor Ort durch neuartige gestische Eingaben

Niels C. Nilsson *

Stefania Serafin†

Morten H. Laursen‡

Kasper S. Pedersen§§

Erik Sikström¶

Rolf Nordahl //

Universität Aalborg Kopenhagen
AC Meyers Vaenge 15, 2450 Kopenhagen, DK

EIN BSTRACT

Walking-In-Place-Techniken (WIP) bieten eine mögliche Lösung für das Problem, das auftritt, wenn eine immersive virtuelle Umgebung (IVE) eine größere Bewegungsfreiheit bietet als die physische Umgebung, in der die Interaktion stattfindet. Solche Techniken sind besonders nützlich, wenn die räumlichen Einschränkungen sehr ausgeprägt sind. Viele frühere WIP-Techniken stützen sich jedoch auf dieselbe Geste für die Eingabe - eine Schrittgeste, die derjenigen ähnelt, die beim Treppensteigen ausgeführt wird. Es scheint möglich, dass diese Geste als körperlich anstrengender empfunden wird als echtes Gehen, was zu einem weniger natürlichen Lauferlebnis führen kann. In diesem Artikel stellen wir zwei neuartige Formen der gestischen Eingabe für die WIP-Fortbewegung vor und beschreiben eine Studie innerhalb der Probanden, in der diese mit der traditionellen Schrittgeste verglichen werden. Die zwei vorgeschlagenen Gesten sind: eine Wischgeste, bei der der Benutzer abwechselnd jedes Knie beugt und ein Unterschenkel nach hinten bewegt, und eine Klopfgeste, bei der der Benutzer wiederum jede Ferse anhebt, ohne den Bodenkontakt zu unterbrechen. Die visuelle Rückmeldung erfolgte über ein am Kopf montiertes Display, und die akustische Rückmeldung erfolgte über ein 24-Kanal-Surround-Sound-System. Die Gesten wurden im Hinblick auf wahrgenommene Natürlichkeit, Präsenz und Positionsdrift in der realen Welt bewertet. Die Klopfgeste war wesentlich natürlicher als die Wischgeste und wurde als wesentlich weniger anstrengend als die beiden anderen Techniken empfunden. Schließlich führte die Klopfgeste zu einer deutlich geringeren Positionsdrift. Die visuelle Rückmeldung erfolgte über ein am Kopf montiertes Display, und die akustische Rückmeldung erfolgte über ein 24-Kanal-Surround-Sound-System. Die Gesten wurden im Hinblick auf wahrgenommene Natürlichkeit, Präsenz und Positionsdrift in der realen Welt bewertet. Die Klopfgeste war wesentlich natürlicher als die Wischgeste und wurde als wesentlich weniger anstrengend als die beiden anderen Techniken empfunden. Schließlich führte die Klopfgeste zu einer deutlich geringeren Positionsdrift. Die visuelle Rückmeldung erfolgte über ein am Kopf montiertes Display, und die akustische Rückmeldung erfolgte über ein 24-Kanal-Surround-Sound-System. Die Gesten wurden im Hinblick auf wahrgenommene Natürlichkeit, Präsenz und Positionsdrift in der realen Welt bewertet. Die Klopfgeste war wesentlich natürlicher als die Wischgeste und wurde als wesentlich weniger anstrengend als die beiden anderen Techniken empfunden. Schließlich führte die Klopfgeste zu einer deutlich geringeren Positionsdrift.

Indexbegriffe: H.5.1 [Informationsschnittstellen und Präsentationssysteme]: Multimedia-Informationssysteme - Künstliche, erweiterte und virtuelle Realität H.5.2 [Informationsschnittstellen und Präsentationssysteme]: Schnittstellen - Eingabegeräte und Strategien I.3.6 [Computergrafik]: Methodik und Techniken - Interaktionstechniken I.3.7 [Computergrafik]: Dreidimensionale Grafik und Realismus - virtuelle Realität;

1 I. EINLEITUNG

Ein besonders problematisches Hindernis für Entwickler von immerwährenden virtuellen Umgebungen (IVEs) ist das Problem inkompatibler Räume. Ein virtueller Raum kann praktisch unendlich groß sein. Somit sollte der Benutzer in der Lage sein, sich frei zu bewegen, soweit die virtuelle Topographie und Architektur dies zulassen. In der realen Welt ist die Bewegung des Benutzers jedoch auf einen begrenzten physischen Raum beschränkt. Solange der virtuelle Raum kleiner ist als oder

Dieselbe Größe wie der physische Raum. Wir können die beiden Räume als kompatibel betrachten. Wenn die virtuelle Umgebung jedoch eine größere Bewegungsfreiheit bietet als die physische Umgebung, tritt die Inkompatibilität auf. Bestenfalls kann die Inkompatibilität die Benutzererfahrung beeinträchtigen. Der Benutzer kann versehentlich die Grenzen des Systems untersuchen, was wiederum die Illusion der Präsenz behindern kann - oft definiert als das Gefühl, in der virtuellen Umgebung „da zu sein“ [31]. Im schlimmsten Fall kann die Inkompatibilität gefährlich sein, da eingetauchte Benutzer die realen Hindernisse möglicherweise nicht kennen.

Innerhalb der akademischen Gemeinschaft wurden zahlreiche verschiedene Lösungen für das Problem inkompatibler Räume in Bezug auf die interaktive Laufs simulation vorgeschlagen. Diese können in mindestens drei Kategorien eingeteilt werden:

1. *Mechanische Neupositionierung:* Aufwändige mechanische Einstellungen

Erleichterung eines relativ natürlichen Gehens, ohne die Position des Benutzers in Bezug auf die physische Umgebung zu verändern [7, 11, 12, 13, 18].

2. *Umgeleitetes Gehen:* Eine Sammlung von Techniken, die macht

Es ist möglich, den Benutzer durch offene oder subtile Manipulation der zur Darstellung der virtuellen Welt verwendeten Reize diskret oder kontinuierlich neu auszurichten oder neu zu positionieren [6, 8, 10, 19, 30, 32].

3. *Walking-In-Place-Techniken (WIP):* Alternative Interaktion

strategien, die es dem Benutzer ermöglichen, sich in der virtuellen Umgebung zu bewegen, indem sie Körperbewegungen ausführen, die dem Gehen in der realen Welt ähneln, während sie stationär bleiben [9, 24, 29, 37, 38].

Alle drei können als mögliche Lösungen für das Problem inkompatibler Räume für sich dienen. Abgesehen davon sind sie nicht gleichermaßen lebensfähig, wenn sie außerhalb eines Labors angewendet werden, in dem die räumlichen und technologischen Einschränkungen noch stärker ausgeprägt sind.

dh im Haushalt eines Durchschnittsverbrauchers. Solche Consumer-IVEs sind alles andere als alltäglich, aber die jüngsten technologischen Entwicklungen wie Microsoft Kinect¹ und der Oculus Rift² lauten eine Zukunft ein, in der IVEs nicht mehr auf die Laboratorien öffentlicher und privater Institutionen beschränkt sein müssen. Der begrenzte Platz, der vielen Verbrauchern zur Verfügung steht, macht Umleitungstechniken jedoch effektiv unwirksam, da diese von einem gewissen Grad an Bewegung im Namen des Benutzers abhängen. In ähnlicher Weise können derzeitige mechanische Einstellungen wie omnidirektionale Laufbänder in absehbarer Zukunft nicht als mögliche Alternative angesehen werden [2]. Derzeit sind WIP-Techniken der vielversprechendste der drei Ansätze.

Während WIP-Techniken in ihrer gegenwärtigen Form in Bezug auf Einfachheit, Unkompliziertheit und Natürlichkeit nicht mit echtem Gehen konkurrieren können [37], deuten Studien darauf hin, dass sie möglicherweise ein stärkeres Gefühl der Präsenz hervorrufen als Techniken, bei denen Benutzer einen Knopf drücken, um sich selbst anzutreiben vorwärts [29]. Insbesondere die Bequemlichkeit und Kosteneffizienz wurden als Faktoren hervorgehoben, die ein geringeres Maß an Kontrolle und Natürlichkeit zu lohnenden Kompromissen machen [9]. Dachdecker,

¹ www.xbox.com/kinect

² www.oculusvr.com

* E-Mail: ncn@create.aau.dk

† E-Mail: sts@create.aau.dk

‡ E-Mail: mhl@create.aau.dk

§§ E-Mail: ksp@create.aau.dk

¶ E-Mail: es@create.aau.dk

// E-Mail: rn@create.aau.dk

Usoh und Steed [28] beschreiben, dass ein Hauptvorteil ihrer ursprünglichen Walking-in-Place-Technik [26] darin besteht, dass die gestische Eingabe propriozeptives Feedback erzeugt, das dem des echten Gehens ähnlich, wenn auch nicht identisch ist. Dies führt wiederum zu einem höheren Übereinstimmungsgrad zwischen Propriozeption und Stimuli in anderen Modalitäten, was auf eine exozentrische Bewegungswahrnehmung hindeutet. Darüber hinaus stellten Williams und Kollegen [39] fest, dass das Gehen auf der Wii genauso effektiv ist wie das physische Gehen in einer einfachen räumlichen Orientierungsaufgabe. Diese potenziellen Vorteile legen die Notwendigkeit nahe, die bestmögliche WIP-Technik zu finden.

Obwohl es Ausnahmen gibt [14, 34, 35], stützen sich viele WIP-Techniken anscheinend auf dieselbe Geste, um eine Verschiebung des Blickwinkels nach vorne auszulösen, nämlich Beinbewegungen, die denen ähneln, die beim Treppensteigen ausgeführt werden. Es scheint, dass diese Geste körperlich anstrengender ist als echtes Gehen. In diesem Artikel beschreiben wir eine Studie, die durchgeführt wurde, um festzustellen, wie sich diese Geste in Bezug auf Natürlichkeit, Präsenz und Positionsdrift in der realen Welt gegen zwei neuartige Formen gestischer Eingaben verhält. Die Bewertung wurde im Wesentlichen durch die Hypothese motiviert, dass eine bessere Übereinstimmung zwischen der wahrgenommenen körperlichen Anstrengung beim Gehen an Ort und Stelle und dem tatsächlichen Gehen zu einer Erfahrung einer natürlicheren WIP-Fortbewegung führen würde. Das Papier ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 stellen wir frühere Versuche vor, das virtuelle Reisen mithilfe von WIP-Techniken zu erleichtern. In Abschnitt 3 diskutieren wir die Diskrepanzen zwischen der Biomechanik des realen Gehens und der Geste, die am häufigsten für die WIP-Fortbewegung verwendet wird, und stellen dann zwei Alternativen zu dieser Geste vor. In Abschnitt 4 wird die Studie detailliert beschrieben, mit der bewertet werden soll, wie sich die beiden alternativen Gesten gegen die vorherrschende Geste und untereinander messen. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse zusammen, die in Abschnitt 6 weiter erörtert werden. Schließlich fasst Abschnitt 7 die vorgestellte Studie zusammen und schließt sie ab, bevor mögliche zukünftige Arbeiten skizziert werden. In Abschnitt 4 wird die Studie detailliert beschrieben, mit der bewertet werden soll, wie sich die beiden alternativen Gesten gegen die vorherrschende Geste und untereinander messen. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse zusammen, die in Abschnitt 6 weiter erörtert werden. Schließlich fasst Abschnitt 7 die vorgestellte Studie zusammen und schließt sie ab, bevor mögliche zukünftige Arbeiten skizziert werden. In Abschnitt 4 wird die Studie detailliert beschrieben, mit der bewertet werden soll, wie sich die beiden alternativen Gesten gegen die vorherrschende Geste messen. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse zusammen, die in Abschnitt 6 weiter erörtert werden.

2 R. BEGEISTERT W. ORK

Nach unserem Kenntnisstand wurden bisher keine Versuche unternommen, die gestischen Eingaben für die WIP-Fortbewegung zu vergleichen. Es wurden jedoch mehrere verschiedene WIP-Techniken implementiert. Auf der allgemeinsten Ebene ist es möglich, zwischen Techniken zu unterscheiden, die auf der Manipulation einer physischen Schnittstelle zur Schritterkennung beruhen, und Techniken, die von verschiedenen Formen der Bewegungsverfolgung abhängen, um zu bestimmen, ob der Benutzer geht oder nicht. Physikalische Schnittstellen führen im Prinzip auch eine primitive Gestenverfolgung in dem Sinne durch, dass die Manipulation der physischen Schnittstelle mit einer bestimmten durchgeführten Ausführung gleichgesetzt wird. Geeignete Verfolgungssysteme beruhen jedoch auf der kontinuierlichen Erfassung von Positionen oder Geschwindigkeiten bestimmter Körperteile.

Zweitens ist es möglich, WIP-Techniken danach zu klassifizieren, ob die Zuordnung zwischen der ausgeführten Geste und der virtuellen Fortbewegung direkt oder indirekt ist [9]. Im ersteren Fall besteht eine direkte Entsprechung zwischen der Bewegung des verfolgten Körperteils und der Blickwinkelverschiebung, und im letzteren Fall besteht keine solche Beziehung. Dies bedeutet insbesondere nicht, dass indirekte Ansätze notwendigerweise eine diskontinuierliche Verschiebung des Blickwinkels mit sich bringen, da eine kontinuierliche Geschwindigkeit aus diskreten Phänomenen wie der Schrittfrequenz bestimmt werden kann.

2.1 Physikalische Schnittstellen

Fast ausnahmslos verwenden die WIP-Techniken, die auf physischen Schnittstellen beruhen, eine indirekte Zuordnung zwischen der Schrittgeste und der Verschiebung des Blickwinkels. Viele von ihnen nutzen die Kräfte, die ausgeübt werden, wenn ein Fuß den Boden berührt, um festzustellen, dass ein Schritt getan wurde. Da dieser Aufprall ein diskretes Ereignis ist, ist es unmöglich, die kontinuierliche Bewegung der Beine direkt auf die Verschiebung des Blickwinkels abzubilden.

Eine solche Schnittstelle ist das Walking Pad [3, 4], das die Schritte des Benutzers durch 60 Eisschaltersensoren erfasst, die auf einer 45 x 45 cm großen Plexiglasoberfläche eingebettet sind. Darüber hinaus Verarbeitung der Binärwerte

Die von den Schaltern bereitgestellten Funktionen ermöglichen es, die Ausrichtung der Füße des Benutzers zu bestimmen, wenn diese den Boden berühren, und basierend auf diesen Informationen wird die Laufrichtung bestimmt.

In ähnlicher Weise beschreiben Bouguila und Kollegen [5] eine Plattform, die die fußbasierte Fortbewegung durch vier eingebettete Lastsensoren erleichtert. Diese Schnittstelle unterscheidet sich insbesondere dadurch, dass sie Benutzer in Richtung einer visuellen Anzeige neu ausrichten kann, da die Plattform auch als mechanischer Drehteller dient. Darüber hinaus kann dieses Gerät über drei unter dem Drehteller montierte Luftzylinder Neigungen und Gefälle der Oberfläche simulieren.

Es ist interessant festzustellen, dass bereits eine im Handel erhältliche physische Schnittstelle verwendet wurde, um die WIP-Lokalisierung zu erleichtern, nämlich das Wii Balance Board von Nintendo. 3 Williams, Bai-Ley, Narasimham, Li und Bodenheimer [39] kombinieren die mit vier Drucksensoren eingebettete Waage mit einem Orientierungssensor. Ihr WIP-Wii-Algorithmus erkennt, wie schnell der Benutzer jede Ecke der Platine belastet, und übersetzt den Blickwinkel entsprechend. Der Orientierungssensor dient zur Bestimmung der Kursrichtung.

Der Wizzdish [34] präsentiert ein Beispiel, bei dem eine direkte Zuordnung zwischen virtueller Fortbewegung und Interaktion mit einer physischen Schnittstelle besteht. Genau genommen ist der Wizzdish keine physische Schnittstelle, da er auf einem Bewegungserfassungssystem basiert, um die Bewegung des Benutzers zu erfassen. Die Interaktion hängt jedoch davon ab, dass die Geste über das Wizzdish selbst ausgeführt wird. Die Oberfläche des Wizzdish ist konkav und fast kugelförmig. Benutzer, die ein Paar reibungsarme Schuhe tragen, können Schritte ausführen, indem sie gleichzeitig einen Fuß nach vorne und den anderen nach hinten schieben, ohne den Kontakt mit der Oberfläche der Schüssel zu unterbrechen. Die Größe der Gehbewegung basiert dann auf der Vorwärtsbewegung der Füße. Dies ist insbesondere eines der Beispiele für eine WIP-Technik, die nicht auf einer Geste des „Treppenaufstiegs“ beruht.

2.2 Bewegungsverfolgung

Slater und Kollegen [26] beschreiben eine der frühesten Implementierungen einer WIP-Technik, die ursprünglich als Virtual Treadmill [29] bezeichnet wurde. Diese Technik beruht nicht explizit auf der Verfolgung von Beinbewegungen. Stattdessen wird erkannt, ob Benutzer über ein neuronales Netzwerk an Ort und Stelle gehen und Muster in der verfolgten Kopfbewegung erkennen. Feasel, Whitton und Wendt [9] beschreiben, dass die für das ursprüngliche virtuelle Laufband verwendete Blickwinkelverschiebung eher diskret als kontinuierlich war. Wenn das neuronale Netzwerk einen Schritt registrierte, sprang der Blickpunkt abrupt eine volle Schrittlänge vorwärts. Darüber hinaus wurde dieser Algorithmus möglicherweise als etwas unnatürlich empfunden, da die Bewegung erst ausgelöst wurde, als vier Schritte an Ort und Stelle erkannt wurden, und er würde die Bewegung ebenfalls nicht beenden, es sei denn, für zwei volle Zyklen wurden keine Schritte erkannt.

Eine weitere Implementierung, die ebenfalls auf Kopfbewegungen beruht, ist die von Terziman et al. Vorgeschlagene sogenannte Shake-Your-Head-Technik. [35]. Anstatt jedoch die Kopfbewegungen zu erfassen, die sich aus dem Gehen an Ort und Stelle ergeben, beruht diese Technik auf expliziteren Kopfgesten wie seitlicher Kopfschwingung beim Gehen und seitlicher Kopfbewegung beim Springen. Eine interessante Implikation davon ist, dass die Technik auch von sitzenden Benutzern verwendet werden kann.

Zielinski, McMahan und Brady [41] präsentieren eine WIP-Technik, bei der mithilfe einer Kamera die Schatten verfolgt werden, die die Füße der Benutzer auf den Boden eines Projektionssystems unter dem Boden in einer sechsseitigen CAVE werfen. Es ermöglicht nicht nur die Vorwärtsbewegung, sondern auch die Möglichkeit des Ausweichens. Während die für die Vorwärtsbewegung verwendete Geste anscheinend der für WIP-Techniken üblicherweise verwendeten entspricht, wird das Ausweichen durch eine Quetschgeste erreicht, die der verwendeten Touchscreen-Vorrichtung ähnlich ist.

Die bisher beschriebenen Motion Tracking-basierten Lösungen verwenden eine diskrete Zuordnung zwischen der WIP-Geste und der Vorwärtsbewegung des Ansichtspunkts. Systeme mit direkten Zuordnungen haben jedoch

3 www.nintendo.com/wii/enhance/#/accessories

wurde vorgeschlagen. Feasel, Whitton und Wendt [9] beschreiben eine Technik, die als Continuous-Motion-Walking-in-Place (LLCM-WIP) mit geringer Latenz bezeichnet wird. Diese Technik steuert die Verschiebung des Blickwinkels basierend auf der Geschwindigkeit der vertikalen Fersenbewegung des Benutzers und verspricht eine geringe Start- und Stopp-Latenz, eine gleichmäßige Bewegung zwischen den Schritten, eine schrittweise Steuerung der Geschwindigkeit und das Drehen vor Ort ohne fehlerhafte Vorwärtsbewegung.

Wendt, Whitton und Brooks 'GUD WIP (Gait-Understanding-Driven Walking-In-Place) [38] nehmen in ähnlicher Weise die vertikale Geschwindigkeit der Ferse als Eingabe. Es unterscheidet sich jedoch von seinen Vorgängern dadurch, dass es durch Gangprinzipien informiert ist und dadurch Gehgeschwindigkeiten erzeugt, die denen des echten Gehens besser entsprechen.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die WIP-Fortbewegung auch mit handelsüblichen Bewegungsverfolgungssystemen wie Microsoft Kinect erreicht wurde, die für die WIP-Fortbewegung in Kombination mit dem Flexible Action und Articulated Skeleton Toolkit (FAAST) verwendet werden können [33]. Interessanterweise haben Kim, Gracanin und Quek [14] die Technik Sensor-Fusion Walking-In-Place (SF-WIP) vorgeschlagen, die sich auf die Beschleunigungs- und Magnetsensoren stützt, die in zwei Smartphones in Kombination mit einem Magneten eingebettet sind, um WIP zu erzeugen Fortbewegung durch jede Gehbewegung, die von stationären Benutzern ausgeführt wird.

3 G. ESTURAL ich NPUT FÜR WIP L. OCOMOTION

Vie vorgeschlagen, scheinen viele der in Abschnitt 2 besprochenen WIP-Techniken für die Eingabe auf derselben Geste zu beruhen. Der Benutzer hebt abwechselnd jedes Bein an, als würde er eine Treppe hinaufsteigen oder an Ort und Stelle marschieren. Von nun an bezeichnen wir diese Geste als *Marschieren*. Während diese Geste beim normalen Gehen den Anschein erweckt, unterscheiden sich die beiden in mehr als einer Hinsicht.

3.1 Biomechanik auf einen Blick

Wir sind im Allgemeinen in der Lage, den Vorgang des Gehens durch wiederholte Gangzyklen zu beschreiben - den Zeitraum vom ersten Kontakt eines Fußes bis zum erneuten Kontakt desselben Fußes. Der Gangzyklus ist normalerweise in zwei Phasen unterteilt: die Standphase (Belastungsreaktion, Mittelstellung, Endstadium und Vorschwung) und die Schwungphase (Anfangsschwung, Mittelschwung und Endschwung) [22].

Das Gehen wird manchmal als kontrolliertes Fallen beschrieben [15]. Dynamische Stabilität wird durch eine Kombination von Stützkraften, Impuls- und Trägheitskräften erreicht, und Energie wird erhalten, indem die kinetische Vorwärtsenergie und die potentielle Gravitationsenergie des Körpermassenschwerpunkts genutzt werden. Nach [1] scheint der wichtigste Faktor im Gangzyklus das Hüftmoment zu sein. Während der Anfangsphase wird dieser Moment hauptsächlich von der Quadrizeps-Muskelgruppe (an der Vorderseite des Oberschenkels) bereitgestellt, während die Endphase von der Oberschenkelgruppe (an der Rückseite des Oberschenkels) dominiert wird [1].

Wie bereits erwähnt, besteht ein Hauptvorteil der Marching-Version darin, dass sie ein propriozeptives Feedback liefert, das dem beim echten Gehen erzeugten ähnlich, aber nicht identisch ist [28]. Wie bei jeder Geste, die als Proxy für das eigentliche Wort dient, ist die Rückmeldung jedoch nicht identisch. Vor allem schwingt der Marschierende die Beine nicht, sondern hebt sie an, als würde er eine Treppe hinaufsteigen. Ein verwandter Bereich, in dem sich die beiden unterscheiden, scheint der Energieverbrauch zu sein. Anders als beim echten Gehen können Schwerkraft und Vorwärtsimpuls nicht dazu verwendet werden, die Arbeit der Muskeln während des Gehens an Ort und Stelle zu reduzieren. Dies führt vermutlich zu einer noch stärkeren Aktivierung der Quadrizeps-Muskelgruppe während der anfänglichen „Schwung“-Phase.

3.2 Alternative Gesten

Unter der Annahme, dass die Marchinggeste tatsächlich körperlich anstrengender ist als das echte Gehen, erscheint es plausibel, dass die WIP-Fortbewegung als natürlicher empfunden werden könnte, wenn sie sich darauf stützt

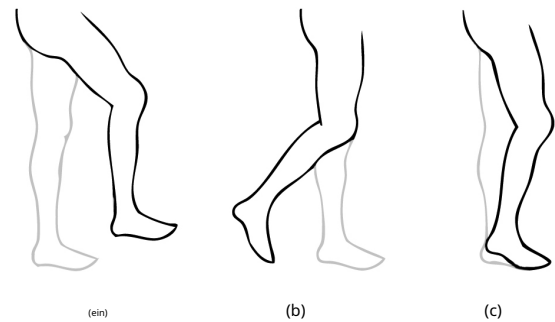


Abbildung 1: Die drei Gesten, die für die Studie an dem Punkt verwendet wurden, der dem Mittelschwung eines normalen Gangzyklus entspricht. (a) Marschieren: Der Benutzer hebt abwechselnd jeden Fuß vom Boden ab, indem er die Oberschenkel vor dem Körper anhebt. (b) Wischen: Der Benutzer beugt seinerseits jedes Knie, während er das Oberschenkel relativ ruhig hält, was zu einer Rückwärtsbewegung der Füße führt. (c) Klopfen: Der Benutzer hebt abwechselnd jede Ferse des Bodens an, während die Zehen in Bodenkontakt bleiben.

auf Gesten, die verschiedene Muskelgruppen aktivieren oder weniger Muskelaktivität fordern. Derzeit haben wir uns zwei solche alternativen Formen der gestischen Eingabe für die WIP-Fortbewegung vorgestellt:

3.2.1 Wischgeste

Die erste der beiden Gesten ähnelt der Bewegung, die beim Abwischen der Füße auf einer Fußmatte ausgeführt wird. Der Benutzer beugt abwechselnd jedes Bein nach hinten, um Bewegung zu erzeugen. Somit wird der anfängliche Schwung ersetzt, indem der Benutzer ein Knie beugt und das Bein nach hinten bewegt, während der Endschwung ersetzt wird, indem der Benutzer das Bein wieder absenkt. Es wird angenommen, dass dies die Oberschenkelmuskelgruppe aktiviert, die normalerweise während des letzten Teils des Gangzyklus aktiviert wird. Während diese Geste einen Teil der Muskelaktivierung des echten Gehens beinhaltet, scheint es möglich, dass sie genauso körperlich anstrengend wahrgenommen wird wie die Marchinggeste. Im Folgenden bezeichnen wir diese Geste als *Abwischen*.

3.2.2 Geste tippen

Die zweite Alternative ist eine Geste, bei der Bewegung erzeugt wird, indem jede Ferse gegen den Boden geklopft wird. Der anfängliche Schwung wird jetzt ersetzt, indem der Benutzer eine Ferse vom Boden abhebt, ohne den Kontakt mit den Zehen zu unterbrechen, und der Endschwung entspricht dem erneuten Absenken der Ferse. Wir bezeichnen diese Geste als *Tippen*. Wie bei der Marching-Geste soll Tapping ein propriozeptives Feedback geben, das dem beim echten Gehen ähnelt, aber nicht identisch ist. Darüber hinaus wird angenommen, dass Tapping die Quadrizeps-Muskelgruppe während der anfänglichen Schwungphase aktiviert, wie dies beim echten Gehen der Fall ist [1]. Klopfen und Marschieren unterscheiden sich jedoch, da erstere weniger Muskelaktivität erfordern. Daher wird angenommen, dass die Entsprechung zwischen dem Energieverbrauch von Klopfen und echtem Gehen höher ist als die von Marschieren und echtem Gehen. Abbildung 1 zeigt die drei Gesten an dem Punkt, der dem Mittelschwung eines Gangzyklus entsprechen würde.

4 S. TUDY D. ESIGN

Die Bewertung wurde mit der Absicht durchgeführt, zu bestimmen, wie sich die beiden neuartigen Formen der gestischen Eingabe für die WIP-Fortbewegung in Bezug auf die wahrgenommene Natürlichkeit mit der vorherrschenden Geste und untereinander vergleichen lassen. Wir führten eine Vergleichsstudie mit einem Innersubjekt-Design durch, das drei Bedingungen umfasste - eine, die jeder der drei Gesten Marschieren, Wischen und Klopfen entsprach. Die Reihenfolge der Bedingungen wurde randomisiert, um mögliche Auswirkungen auf die Reihenfolge zu kontrollieren.



(ein)



(b)

Abbildung 2: (a) Eine Ansicht der Umgebung von oben nach unten. Der Weg, den die Teilnehmer gegangen sind, wurde rot hervorgehoben. (b) Ein Screenshot der Umgebung aus der Sicht des Benutzers.

4.1 Teilnehmer und Ablauf

Insgesamt 27 Teilnehmer (19 Männer, 8 Frauen) nahmen an dem Experiment teil. Sie waren zwischen 19 und 43 Jahre alt ($M = 29,8$ Jahre, $SD = 7,1$) und wurden über eine Mailingliste rekrutiert, die Freiwillige der Universität Aalborg, Kopenhagen, und Abonnenten der dänischen Zeitschrift Ingenieuren (The Engineer) umfasste. Für die Teilnahme wurde keine Entschädigung angeboten. Alle Teilnehmer gaben an, normales oder normales Sehen und Hören zu haben. Keiner von ihnen hatte zuvor versucht, virtuell mit einer WIP-Technik zu reisen. Zunächst wurden die drei Gesten demonstriert und die Teilnehmer über den allgemeinen Zweck des Experiments informiert. Darüber hinaus wurde klargestellt, dass im Rahmen des aktuellen Experiments ein natürliches Lauferlebnis ein Gefühl sein würde, das sich wie echtes Gehen anfühlt. Vor jedem Versuch wurde das System kalibriert, indem die Teilnehmer gebeten wurden, die jeweilige Geste auszuführen, bis sie sich dabei wohl fühlten. Dieser Prozess kalibrierte nicht nur das System für die einzelnen Gesten, sondern stellte auch sicher, dass die Teilnehmer die Gesten verstanden und sich wohl fühlten, sie auszuführen. Während des Spaziergangs beobachtete der Experimentator die Teilnehmer, um sicherzustellen, dass sie die Gesten korrekt ausführten. Nach Beendigung des Spaziergangs wurden die Teilnehmer gebeten, einen elektronischen Fragebogen auszufüllen. Die drei Wanderungen dauerten durchschnittlich 52,9 Sekunden ($SD = 12,4$). Während des Spaziergangs beobachtete der Experimentator die Teilnehmer, um sicherzustellen, dass sie die Gesten korrekt ausführten. Nach Beendigung des Spaziergangs wurden die Teilnehmer gebeten, einen elektronischen Fragebogen auszufüllen. Die drei Wanderungen dauerten durchschnittlich 52,9 Sekunden ($SD = 12,4$). Während des Spaziergangs beobachtete der Experimentator die Teilnehmer, um sicherzustellen, dass sie die Gesten korrekt ausführten. Nach Beendigung des Spaziergangs wurden die Teilnehmer gebeten, einen elektronischen Fragebogen auszufüllen.

4.2 Aufgabe und Umgebung

Unter allen drei Bedingungen wurden die Teilnehmer gebeten, eine einfache Fortbewegungsaufgabe durchzuführen, nämlich von einem Punkt zum anderen zu gehen, indem sie einem deutlich sichtbaren Pfad folgten. Diese relativ einfache Aufgabe wurde gegenüber komplexeren Aufgaben wie Präzisions- oder Wegfindungsaufgaben bevorzugt, da wir wollten, dass das Lauferlebnis ein natürliches Szenario als Ausgangspunkt nimmt. Aus den gleichen Gründen haben wir eine landschaftlich reizvolle, wenn auch nicht besonders großartige ländliche Umgebung als Kulisse für den Spaziergang gewählt. Der Weg war 400 Meter lang.

Die Teilnehmer wurden angewiesen, in einem gleichmäßigen Tempo zu gehen, das sie für angenehm hielten, wenn möglich auf dem Weg bleiben; und nicht anzuhalten oder in die entgegengesetzte Richtung zu gehen. Wir haben bewusst vermieden, einen geraden Weg zu benutzen, da wir sicherstellen wollten, dass die Teilnehmer während des Spaziergangs gezwungen waren, sich nach beiden Seiten zu drehen. Der Pfad und die Umgebung waren für alle drei Bedingungen identisch. Abbildung 2 zeigt eine Ansicht des Pfads von oben nach unten und einen Screenshot der Umgebung aus Sicht des Benutzers.

4.3 Einrichtung

Das IVE wurde unter Verwendung einer angepassten Version der von Nordahl et al. [21], das ursprünglich entwickelt wurde, um Interaktionen auf Gehbasis durch visuelle, auditive und haptische Reize zu simulieren [36].

4.3.1 Hardware

Die Bewegung des Benutzers - die Gehgesten und die Kopfbewegung - wurde durch Verfolgen der Position und Ausrichtung von drei Personen erfasst

Markierungen - eine auf dem Head Mounted Display (HMD) und eine auf jedem Knöchel des Benutzers. Die Markierungen wurden mittels eines Optitrack-Bewegungserfassungssystems mit 16 Kameras verfolgt 4. Die 16 Kameras wurden entlang des Umfangs eines Kreises mit einem Durchmesser von 7 Metern platziert. 12 der Kameras befanden sich in einer Höhe von ungefähr 2,9 Metern und die restlichen 4 in einer Höhe von etwa 1,8 Metern über dem Boden. Die Platzierung der Markierungen an den Knöcheln wurde gewählt, da die Klopfgeste nur eine subtile Bewegung der Fersen beinhaltete. Es wurde daher als vorteilhaft angesehen, den Marker so nah wie möglich an der Ferse zu platzieren. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Platzierung der Markierungen auf der Vorderseite des Unterschenkels zu einem gewissen Grad an Okklusion während der Wischgeste geführt hätte. Visuelle Reize wurden über ein am Kopf montiertes nVisor SX-Display mit einer Auflösung von 1280 x 1024 pro Auge und einem diagonalen Sichtfeld von 60 Grad abgegeben. Ein 24-Kanal-Surround-Sound-System wurde verwendet, um akustische Reize zu liefern. Das System bestand aus zwei RME Fireface 800-Schnittstellen und einem RME ADI-8 DS-Konverter. 16 aktive Dynaudio Bm5A mk II-Monitore wurden in Ohrhöhe gleichmäßig über den vom Bewegungserfassungssystem definierten Kreisumfang verteilt, und weitere 8 Dynaudio Bm5A mk I-Lautsprecher wurden über den Kreis auf dem Boden verteilt.

4.3.2 Software

Die Stimuli der virtuellen Umgebung und der Bewegungsverfolgungsalgorithmus wurden in der Multiplattform-Spielentwicklungsumgebung Unity3D erzeugt 5 Dies erleichtert die stereoskopische Betrachtung durch die Platzierung von zwei Kameras in einer Umgebung. Die Klanglandschaft, die die visuellen Elemente begleitete, bestand aus Umgebungsgeräuschen, wie z. B. Windgeräuschen und Wasserströmen, und wurde mit der Echtzeitsynthesemaschine Max / MSP geliefert. 6 Eine schematische Darstellung des für die aktuelle Studie verwendeten Systems ist in Abbildung 3 zu sehen.

Der gleiche Algorithmus wurde verwendet, um aus allen drei Gesten eine Verschiebung des Blickwinkels nach vorne zu erzeugen. Jede der beiden Markierungen an den Knöcheln des Benutzers ergibt eine dreidimensionale Position und Ausrichtung, mit der die Vorwärtsbewegung des Ansichtspunkts in Unity3D gesteuert wurde. In Verbindung mit der WIP-Fortbewegung wird die Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung häufig durch Schätzen der Schrittfrequenz des Benutzers definiert. Es wurde jedoch eine andere Lösung verwendet, da die drei Gesten deutlich unterschiedliche Schrittfolgen beinhalten können. Die Geschwindigkeit der Blickpunktstransformation kann allgemein mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$\text{Blickwinkelgeschwindigkeit} = \text{Normalgeschwindigkeit} \times \text{Skalierungsfaktor} \quad (1)$$

Da die Höhe positiv mit der Schrittlänge korreliert [38], wurde die normale Geschwindigkeit in Bezug auf die Höhe des Benutzers, die während der Kalibrierung des Systems erfasst wurde, wie folgt definiert:

$$\text{Normalgeschwindigkeit} = \frac{\text{Benutzergroße}}{C} \quad (2)$$

Die Konstante C wurde durch informelle Bewertungen der wahrgenommenen Gehgeschwindigkeit ermittelt, die durch Variation des Divisors erreicht wurde. Es wurde ein geeigneter Wert gefunden $C = 0,45$. Es ist erwähnenswert, dass dies dazu führte, dass der Algorithmus Gehgeschwindigkeiten erzeugte, die denen eines schnellen Läufers näher kamen. Dass diese als natürlicher wahrgenommen wurden, kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass die Bewegungswahrnehmung durch das periphere Sehen beeinflusst wird, wenn Geschwindigkeitsurteile auf dem optischen Fluss beruhen [23]. In diesem Fall wurde das Sichtfeld von der HMD eingeschränkt. Bei allen drei Gesten beeinflusste der Benutzer die virtuelle Geschwindigkeit durch vertikale Bewegung der Füße. Die vertikalen Komponenten (y) der Positionsdaten wurden verwendet, um den Skalierungsfaktor zu definieren und dadurch die Blickwinkelgeschwindigkeit zu beeinflussen. Da jedoch die vertikalen Positionen

4 www.naturalpoint.com/optitrack

5 www.unity3d.com

6 www.cycling74.com

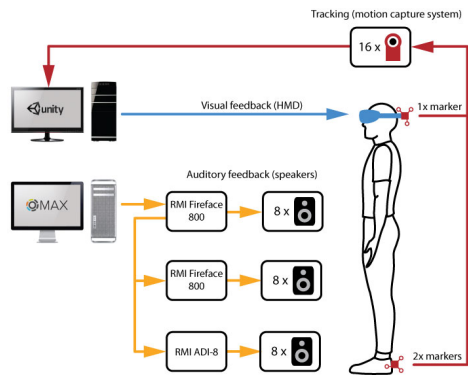


Abbildung 3: Schematische Darstellung des für die Studie verwendeten Aufbaus.

variieren von Geste zu Geste erheblich. Der Skalierungsfaktor wird wie folgt definiert:

$$\text{Skala f. Schauspieler} = \frac{\text{höchste aktuelle Fußposition}}{\text{erwartete Schritthöhe}} \quad (3)$$

Die höchste aktuelle Fußposition wurde als der höchste Wert von y innerhalb der letzten 0,5 Sekunden definiert, und die erwartete Stufenhöhe war die mittlere Stufenhöhe, die während der Kalibrierung vor dem Test erhalten wurde. Unabhängig davon, welche Geste ausgeführt wurde, würde die normale Geschwindigkeit nicht skaliert, wenn sich der Marker auf derselben Höhe wie während der Kalibrierung befand. Wenn der Benutzer stillsteht, wird die normale Geschwindigkeit mit Null multipliziert. Der Skalierungsfaktorwert wurde zwischen 0 und 1,75 geklemmt, was bedeutete, dass die höchstmögliche Geschwindigkeit eine 75% ige Erhöhung der normalen Gehgeschwindigkeit war. Da die von den Teilnehmern ausgeführte Aufgabe eine kontinuierliche Bewegung von Anfang bis Ende beinhaltete, wurden Start- und Stopplatenzen nicht formal gemessen. Es würde jedoch ungefähr einen halben Schrittzzyklus dauern, bis der Benutzer die normale Geschwindigkeit erreicht und Latenzen von mindestens 0 stoppt.

Schließlich ist anzumerken, dass der Blickwinkel nicht entlang der Blickrichtung des Benutzers nach vorne transformiert wurde. Stattdessen wird die Ausrichtung der beiden an den Knöcheln angebrachten Markierungen verwendet, um die Richtung der Füße zu approximieren. Somit ist es möglich, eine Schätzung der Körperorientierung zu erstellen, die wiederum die Richtung des Kurses definiert, indem die zwei Vektoren gemittelt werden, die der Vorwärtsorientierung der Marker entsprechen.

4.4 Maßnahmen

Während der Hauptzweck der Studie darin bestand, zu bestimmen, wie sich die drei Gesten in Bezug auf die Natürlichkeit vergleichen lassen, haben wir beschlossen, zwei zusätzliche Maßnahmen einzubeziehen, nämlich das Gefühl der Präsenz und das Ausmaß der Positionsdrift in der realen Welt, die während des Gehens auftritt. Natürlichkeit und Präsenz wurden mittels eines Fragebogens bewertet und die Positionsdrift anhand von Verhaltensdaten bewertet.

4.5 Subjektive Messungen von Natürlichkeit und Präsenz

Der erlebte Grad an Natürlichkeit wurde anhand von vier Fragebogenpunkten bewertet, bei denen die Teilnehmer ihre Übereinstimmung mit bestimmten Aussagen auf einer Skala von „1“ bis „7“ bewerten mussten („1“ bedeutete starke Meinungsverschiedenheit und „7“ eine starke Übereinstimmung bedeutete). Die vier Punkte bezogen sich auf folgende Themen:

Natürlichkeit: Wie in anderen Fragebögen, die sich auf die Erfahrung mit IVEs beziehen [16, 17, 29, 40], haben wir einen Fragebogen aufgenommen, in dem die Teilnehmer ausdrücklich gefragt wurden, wie natürlich sie die Erfahrung des Gehens im IVE fanden.

Körperliche Belastung: Es ist sehr wahrscheinlich, dass eine WIP-Geste als natürlicher empfunden wird, wenn sie ein ähnliches Maß an Muskelaktivität erfordert wie echtes Gehen. Daher haben wir einen Artikel eingefügt, in dem die

Die Teilnehmer geben an, ob die gegebene Geste körperlich anstrengender war als die Aktion, für die sie als Stellvertreter diente.

Selbstbewegungszwang: Da natürliches Gehen eine exzentrische Bewegungswahrnehmung beinhaltet, haben wir einen Punkt hinzugefügt, in dem die Teilnehmer gefragt werden, ob sie tatsächlich das Gefühl haben, sich während des virtuellen Gehens zu bewegen.

Akklimatisierung: Um festzustellen, wie schnell die Interaktion über die Gesten zur zweiten Natur wurde, enthielt der Fragebogen einen Punkt, in dem die Teilnehmer gefragt wurden, wie schnell sie vergessen hatten, dass sie nicht wirklich gingen.

Darüber hinaus enthielt der Fragebogen drei Punkte, die das Gefühl der Präsenz der Teilnehmer innerhalb des IVE betrafen, nämlich die drei Punkte, die in der Originalversion des Slater-Usuh-Steed-Fragebogens (SUS) enthalten waren [26, 27]. Diese Punkte bewerten das subjektive Gefühl der Präsenz anhand von drei Faktoren: 1) Inwieweit hatten die Teilnehmer das Gefühl, im IVE „da zu sein“. 2) Inwieweit das IVE zur dominierenden Realität wird und als solche wahrgenommen wird. 3) Inwieweit die Exposition gegenüber dem IVE zu einem Gefühl des Betrachtens von Bildern führte, anstatt einen Ort besucht zu haben. Wie der verbleibende Fragebogen wurden diese Punkte auf Bewertungsskalen von „1“ bis „7“ beantwortet, wobei eine hohe Bewertung auf Anwesenheit hinweisen würde.

Schließlich ermutigte ein Punkt im Fragebogen die Teilnehmer, ihre Erfahrungen mit den drei Bedingungen frei zu kommentieren.

4.6 Verhaltensmaß für unbeabsichtigte Positionsdrift

In früheren Benutzerstudien haben wir informell beobachtet, dass sich viele Personen, die beim Gehen ein HMD tragen, physisch in die gleiche Richtung bewegen, in die sie sich in der virtuellen Umgebung bewegen. Wir bezeichnen dieses Phänomen als unbeabsichtigte Positionsdrift (UPD). Wenn eine WIP-Interaktionstechnik als sinnvolle Lösung für das Problem inkompatibler Räume angesehen werden soll, ist es entscheidend, dass der Benutzer stationär bleibt. Daher sollte UPD als entscheidend für die Bewertung einer WIP-Technik angesehen werden, die zur Verwendung in Kombination mit einer HMD vorgesehen ist. Wir haben drei UPD-Maßnahmen angewendet: *maximale Drift* (die größte physische Entfernung, die der Benutzer von dem Punkt zurückgelegt hat, an dem die Fortbewegung begonnen hat), *Gesamtdrift* (die vom Benutzer zurückgelegte physische Gesamtentfernung) und die *Drift- / Reise-Verhältnis* (das Verhältnis, das beschreibt, wie weit der Benutzer in der realen Welt pro zurückgelegte Strecke in der virtuellen Welt gewandert ist). Um diese Maßnahmen zu erstellen, haben wir die reale und virtuelle Position der Teilnehmer zweimal pro Sekunde protokolliert. Die Protokollierung wurde begonnen und beendet, sobald die Teilnehmer zwei zuvor definierte Punkte entlang des Schotterweges überquert hatten.

Um schließlich ein Maß für die Geschwindigkeit der Leistungsdaten der Gesichtspunktransformations in Bezug auf die Fertigstellungszeit und die zurückgelegte Strecke zu erhalten.

5 R. ERGEBNISSE

Ein Fehler im Zusammenhang mit dem elektronischen Fragebogen zwang uns, die Fragebogendaten von zwei Teilnehmern zu eliminieren. Darüber hinaus machte es ein Fehler bei der Protokollierung der realen und virtuellen Positionen unmöglich, die Daten aus drei Versuchen abzurufen. Somit basieren die selbst gemeldeten Maßnahmen und die Maßnahmen der UPD auf 25 bzw. 26 Teilnehmern. Varianzanalysen mit wiederholten Messungen (ANOVAs) wurden verwendet, um die aus allen Messungen erhaltenen Mittelwerte zu vergleichen. Alle ANOVAs wurden mit einem Signifikanzniveau von 0,05 durchgeführt. Anschließend wurden signifikante Messungen mittels gepaarter Probe, zwei T-Tests mit Schwanz, unter Verwendung von Bonferroni-korrigierten Alpha-Werten von 0,017 pro Test analysiert. Die aus diesen Post-hoc-Analysen erhaltenen p-Werte sind in Tabelle 1 dargestellt.

5.1 Wahrgenommene Natürlichkeit

Die Ergebnisse der drei Fragebogenelemente in Bezug auf die wahrgenommene Natürlichkeit sind in Abbildung 4 dargestellt. Es wurden signifikante Unterschiede in Bezug auf das Element festgestellt, nach dem explizit gefragt wurde

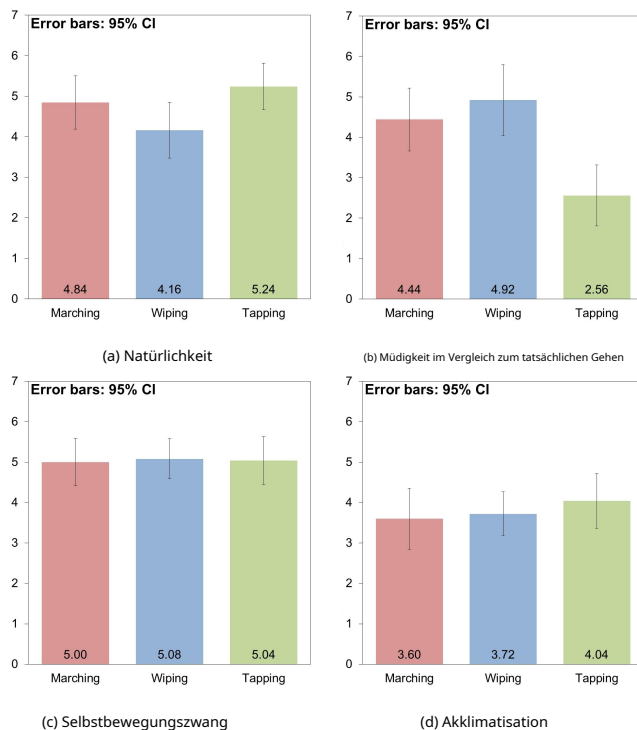


Abbildung 4: Ergebnisse zu den selbst berichteten Messungen der wahrgenommenen Natürlichkeit.

wie natürlich das Lauferlebnis war ($F(2,24) = 5,44, p < .01$) und in Bezug auf den Gegenstand mussten die Teilnehmer bewerten, ob die Geste körperlich anstrengender war als das echte Gehen ($F(2,24) = 22,34, p < .01$). Im ersten Fall ergab die Post-hoc-Analyse einen signifikanten Unterschied zwischen der Wisch- und der Taping-Geste. In Bezug auf die körperliche Belastung unterschied sich Tapping erheblich von Marching und Wiping. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mitteln festgestellt, die aus den Gegenständen im Zusammenhang mit der wahrgenommenen Selbstbewegungszwanghaftigkeit erhalten wurden, und dem Gegenstand, in dem gefragt wurde, wie schnell die Teilnehmer vergessen haben, dass sie nicht wirklich gingen.

5.2 Anwesenheit

Die Mittelwerte für die drei im SUS-Fragebogen aufgeführten Elemente sind in Abbildung 5 zusammen mit dem Mittelwert der drei Elemente - dem SUS-Mittelwert - dargestellt. Der Vergleich mittels der ANOVA mit wiederholten Messungen ergab keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 1: P-Werte, erhalten aus gepaarten Proben, einseitige t-Tests. Werte, die einen signifikanten Unterschied anzeigen, sind fett hervorgehoben ($\alpha = 0,017$). Marschieren = M, Wischen = W und Klopfen = T.

	MW	MT	WT
Natürlichkeit	0,051	0,179	0,007
Müdigkeit im Verhältnis zum realen Gehen	0,247	<0,001	<0,001
Total Drift	0,114	<0,001	<0,001
Maximale Drift	0,048	<0,001	<0,001
Drift / Travel-Verhältnis	0,103	<0,001	<0,001
Virtuelle Geschwindigkeit	0,083	<0,008	<0,409

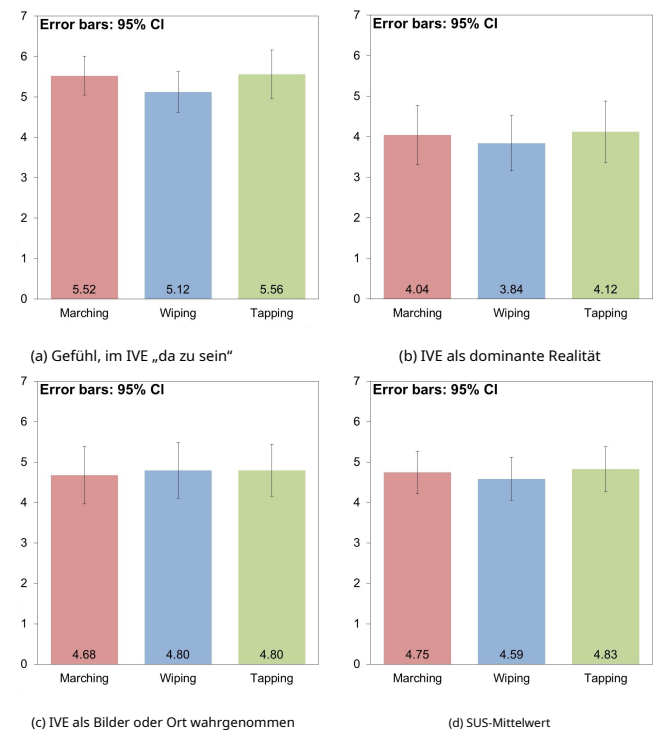


Abbildung 5: Ergebnisse zum selbstberichteten Präsenzmaß.

5.3 Unbeabsichtigte Positionsverschiebung

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse in Bezug auf UPD. Der Vergleich mittels ANOVAs mit wiederholten Messungen ergab signifikante Unterschiede für alle drei UPD-Messungen: Gesamtdrift ($F(2,25) = 19,79, p < .01$), maximale Drift ($F(2,25) = 39,04, p < .01$) und Drift / Travel-Verhältnis ($F(2,25) = 20,42, p < .01$). Die Post-hoc-Analysen zeigten, dass sich Tapping in Bezug auf alle Maßnahmen sowohl von Marching als auch von Wiping signifikant unterschied, während sich die beiden in keinem Fall signifikant voneinander unterschieden. Schließlich ist anzumerken, dass die Analyse der Leistungsdaten ergab, dass es einen signifikanten Unterschied in Bezug auf die mittlere Geschwindigkeit der Blickpunktverschiebung zwischen den drei Bedingungen gab ($F(2,25) = 3,55, p < .04$).

6 D. DISCUSSION

Die Ergebnisse des Fragebogens, in dem die Teilnehmer gebeten wurden, explizit zu bewerten, wie natürlich sie die Erfahrung des Gehens fanden, lieferten einige interessante Informationen. Die Teilnehmer empfanden die Klopfgeste im Durchschnitt als die natürlichste und der Mittelwert für diese Geste war signifikant höher als der der Wischgeste entsprechende. Das Klopfgesicht wurde im Vergleich zu Marschieren und Wischen auch als deutlich weniger anstrengend empfunden, während sich die beiden nicht signifikant voneinander unterschieden. Gemessen an der Durchschnittsbewertung selbst scheint das Klopfen die einzige der drei Gesten zu sein, die im Allgemeinen nicht als körperlich anstrengender angesehen wurde als das echte Gehen. Nachdem dies gesagt wurde, Wir können nicht behaupten, dass wir die Annahme bestätigt haben, dass die Marschgeste körperlich anstrengender ist als das echte Gehen, da keine physiologischen Daten zur Muskelaktivität gesammelt wurden. Während die aktuelle Studie einen solchen Effekt nicht offenbarte, erscheint es plausibel, dass die Aktivierung der Soleusmuskeln (der großen Muskeln in den Waden) während des Klopfens bei längerer Interaktion zu Müdigkeit führen kann. Es scheint jedoch, dass die Tapping-Geste teilweise erfolgreich ist

R. EFERENZEN

- [1] R. Beckett und K. Chang. Eine Bewertung der Gangkinematik durch minimale Energie. *Zeitschrift für Biomechanik*, 1 (2): 147–159, 1968.
- [2] B. Bolte, F. Steinicke und G. Bruder. Die Jumper-Metapher: Eine effektive Navigationstechnik für immersive Display-Setups. 2011.
- [3] L. Bouguila, F. Evequoz, M. Courant und B. Hirsbrunner. Walking-Pad: Eine Step-in-Place-Fortbewegungsschnittstelle für virtuelle Umgebungen. Im *Vorträge der 6. internationalen Konferenz über multimodale Schnittstellen*, Seiten 77–81. ACM, 2004.
- [4] L. Bouguila, E. Florian, M. Courant und B. Hirsbrunner. Aktive Gehschnittstelle für eine virtuelle Umgebung im menschlichen Maßstab. Im *11. Internationale Konferenz über Mensch-Computer-Interaktion, HCI*, Band 5, Seiten 22–27. Citeseer, 2005.
- [5] L. Bouguila, M. Iwashita, B. Hirsbrunner und M. Sato. Virtuelle Kommunikationsschnittstelle mit Bodenoberflächensimulation. Im *Vorträge der Internationalen Konferenz über künstliche Realität und Telexistenz, Tokio, Japan*, 2003.
- [6] G. Bruder, F. Steinicke, K. Hinrichs und M. Lappe. Neuorientierung während Körperumdrehungen. Im *Gemeinsame Virtual Reality-Konferenz von EGVE-ICAT-EuroVR*, Seiten 145–152, 2009.
- [7] R. Darken, W. Cockayne und D. Carmein. Das omnidirektionale Laufband: ein Fortbewegungsgerät für virtuelle Welten. Im *Vorträge des 10. jährlichen ACM-Symposiums zu Software und Technologie für Benutzeroberflächen*, Seiten 213–221. ACM, 1997.
- [8] D. Engel, C. Curio, L. Tcheang, B. Mohler und H. Bülthoff. Eine psychophysisch kalibrierte Steuerung zum Navigieren durch große Umgebungen auf engstem Raum. Im *Berichte des ACM-Symposiums 2008 über Virtual-Reality-Software und -Technologie*, Seiten 157–164. ACM, 2008.
- [9] J. Feasel, M. Whitton und J. Wendt. Llcm-Wip: Niedrige Latenz, kontinuierliche Bewegung an Ort und Stelle. Im *3D-Benutzeroberflächen, 2008. 3DUI 2008. IEEE-Symposium über*, Seiten 97–104. IEEE, 2008.
- [10] V. Interrante, B. Ries und L. Anderson. Sieben Liga-Stiefel: Eine neue Metapher für eine verbesserte Fortbewegung durch mittelgroße immersive virtuelle Umgebungen. Im *3D-Benutzeroberflächen, 2007. 3DUI'07. IEEE-Symposium über*. IEEE, 2007.
- [11] H. Iwata, H. Yano, H. Fukushima und H. Noma. Kreislaufboden [Bewegungsschnittstelle]. *Computergrafik und -anwendungen, IEEE*, 25 (1): 64–67, 2005.
- [12] H. Iwata, H. Yano und M. Tomiyoshi. String Walker. Im *Neue Technologien von ACM SIGGRAPH 2007*, Seite 20. ACM, 2007.
- [13] H. Iwata und Y. Yoshida. Pfadreproduktionstests mit einem Torus-Laufband. *Gegenwart*, 8 (6): 587–597, 1999.
- [14] J. Kim, D. Gracanin und F. Quek. Sensor-Fusion-Walking-in-Place-Interaktionstechnik mit mobilen Geräten. Im *Virtual Reality Workshops (VR), 2012 IEEE*, Seiten 39–42. IEEE, 2012.
- [15] F. Lacquaniti, R. Grasso und M. Zago. Motormuster beim Gehen. *Physiologie*, 14 (4): 168–174, 1999.
- [16] P. Larsson, D. Västfjäll und M. Kleiner. Der Schauspieler-Beobachter-Effekt in Virtual-Reality-Präsentationen. *CyberPsychology & Behavior*, 4 (2): 239–246, 2001.
- [17] J. Lessiter, J. Freeman, E. Keogh und J. Davidoff. Ein medienübergreifender Präsenzfragebogen: Das itc-Sinn für Präsenzinventar. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 10 (3): 282–297, 2001.
- [18] E. Medina, R. Fruland und S. Weghorst. Virtusphere: Gehen in einem Hamsterball in menschlicher Größe. Im *Tagungsband der Human Factors and Ergonomics Society*, Band 52, Seiten 2102–2106. SAGE Publications, 2008.
- [19] C. Neth, J. Souman, D. Engel, U. Kloos, H. Bülthoff und B. Mohler. Geschwindigkeitsabhängiger dynamischer Krümmungsgewinn für umgeleitetes Gehen. Im *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, Seiten 151–158. IEEE, 2011.
- [20] N. Nilsson, S. Serafin und R. Nordahl. Unbeabsichtigte Positionsdrift und ihre möglichen Lösungen. Im *Virtual Reality Workshops (VR), 2013 IEEE*. IEEE, 2013.
- [21] R. Nordahl, S. Serafin, L. Turchet und N. Nilsson. Eine multimodale Architektur zur Simulation des natürlichen interaktiven Gehens in virtuellen Umgebungen. *Psychologie*, 9 (3): 245–268, 2012.
- [22] S. Onpuu. Die Biomechanik des Gehens und Laufens. *Clin Sports Med*, 13 (4): 843–863, 1994.
- [23] P. Pretto, M. Ogier, H. Bülthoff und J. Bresciani. Einfluss der Größe des Sichtfeldes auf die Bewegungswahrnehmung. *Computer & Grafik*, 33 (2): 139–146, 2009.
- [24] S. Razzaque, D. Swapp, M. Slater, M. Whitton und A. Steed. Umgelenktes Gehen an Ort und Stelle. Im *Vorträge des Workshops zu virtuellen Umgebungen 2002*, Seiten 123–130. Eurographics Association, 2002.
- [25] M. Slater. Wie bunt war dein Tag? Warum Fragebögen die Präsenz in virtuellen Umgebungen nicht bewerten können. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 13 (4): 484–493, 2004.
- [26] M. Slater, A. Steed und M. Usoh. Das virtuelle Laufband: Eine naturalistische Metapher für die Navigation in immersiven virtuellen Umgebungen. Im M. Goebel, Herausgeber, *Erster Eurographics Workshop zur virtuellen Realität*, Seiten 71–86, 1993.
- [27] M. Slater, M. Usoh und A. Steed. Präsenztiefe in virtuellen Umgebungen. *Präsenz-Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 3 (2): 130–144, 1994.
- [28] M. Slater, M. Usoh und A. Steed. Stufen und Leitern in der virtuellen Realität. Im *Vorträge der ACM-Konferenz zu Virtual Reality-Software und -Technologie*, Seiten 45–54, 1994.
- [29] M. Slater, M. Usoh und A. Steed. Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Gehttechnik auf die Präsenz in der virtuellen Realität. *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion (TOCHI)*, 2 (3): 201–219, 1995.
- [30] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz und M. Lappe. Schätzung der Erkennungsschwellen für umgeleitete Gehttechniken. *Visualisierung und Computergrafik, IEEE-Transaktionen auf*, 16 (1): 17–27, 2010.
- [31] J. Steuer. Definition der virtuellen Realität: Dimensionen, die die Telepräsenz bestimmen. *Zeitschrift für Kommunikation*, 42 (4): 73–93, 1992.
- [32] E. Suma, G. Bruder, F. Steinicke, D. Krum und M. Bolas. Eine Taxonomie für den Einsatz von Umleitungstechniken in immersiven virtuellen Umgebungen. Im *Virtual Reality Workshops (VR), 2012 IEEE*, Seiten 43–46. IEEE, 2012.
- [33] E. Suma, B. Lange, A. Rizzo, D. Krum und M. Bolas. Faast: Das flexible Action- und Gelenk-Skelett-Toolkit. Im *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, Seiten 247–248. IEEE, 2011.
- [34] D. Swapp, J. Williams und A. Steed. Die Implementierung einer neuartigen Gehschnittstelle in einem immersiven Display. Im *3D User Interfaces (3DUI), 2010 IEEE Symposium on*, Seiten 71–74. IEEE, 2010.
- [35] L. Terziman, M. Marchal, M. Emily, F. Multon, B. Arnaldi und A. Lécyer. Kopfschütteln: Besuchen Sie das Walk-in-Place für die virtuelle Realität auf dem Schreibtisch. Im *Vorträge des 17. ACM-Symposiums zu Virtual Reality-Software und -Technologie*, Seiten 27–34. ACM, 2010.
- [36] L. Turchet, R. Nordahl, S. Serafin, A. Berrezag, S. Dimitrov und V. Hayward. Audio-haptische physikalisch basierte Simulation des Gehens auf verschiedenen Böden. Im *Multimedia Signal Processing (MMSP), 2010 IEEE International Workshop on*, Seiten 269–273. IEEE, 2010.
- [37] M. Usoh, K. Arthur, M. Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater und F. Brooks Jr. Im *Berichte der 26. Jahreskonferenz über Computergrafiken und interaktive Techniken*, Seiten 359–364. ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co., 1999.
- [38] J. Wendt, M. Whitton und F. Brooks. Gud Wip: Gangverständnis-gesteuertes Gehen an Ort und Stelle. Im *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE*, Seiten 51–58. IEEE, 2010.
- [39] B. Williams, S. Bailey, G. Narasimham, M. Li und B. Bodenheimer. Bewertung des Gehens auf einem Wii-Balance-Board zur Erkundung einer virtuellen Umgebung. *ACM-Transaktionen zur angewandten Wahrnehmung (TAP)*, 8 (3): 19, 2011.
- [40] B. Witmer und M. Singer. Präsenz in virtuellen Umgebungen messen: Ein Präsenzfragebogen. *Gegenwart*, 7 (3): 225–240, 1998.
- [41] D. Zielinski, R. McMahan und R. Brady. Shadow Walking: Eine unbeschwerte Fortbewegungstechnik für Systeme mit Unterbodenprojektion. Im *Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE*, Seiten 167–170. IEEE, 2011.