

Vergleich der Leistung von natürlich, naturnah und nicht natürlich Fortbewegungstechniken in der virtuellen Realität

Mahdi Nabiyouni, Ayshwarya Saktheeswaran, Doug A. Bowman und Ambika Karanth

Zentrum für Mensch-Computer-Interaktion und Institut für Informatik, Virginia Tech

EIN BSTRACT

Eines der Ziele vieler VR-Forschungen (Virtual Reality) ist die Steigerung des Realismus. Insbesondere versuchen viele Techniken zur Fortbewegung in der VR, sich dem Gehen in der realen Welt anzunähern. Es ist jedoch noch nicht vollständig geklärt, wie sich das Design realistischer Fortbewegungstechniken auf die Leistung von Benutzeraufgaben auswirkt. Wir haben ein Experiment durchgeführt, um eine naturnahe Fortbewegungstechnik (basierend auf dem Virtusphere-Gerät) mit einer traditionellen, nicht natürlichen Technik (echtes Gehen) zu vergleichen. Wir fanden heraus, dass die Virtusphere-Technik signifikant langsamer und weniger genau war als die beiden anderen Techniken. Basierend auf diesem Ergebnis und anderen in der Literatur, Wir spekulieren, dass Fortbewegungstechniken mit mäßiger Interaktionstreue häufig eine Leistung aufweisen, die sowohl High-Fidelity-Techniken als auch gut konzipierten Low-Fidelity-Techniken unterlegen ist. Wir argumentieren, dass unsere experimentellen Ergebnisse ein Effekt der Interaktionstreue sind, und führen eine detaillierte Analyse der Genauigkeit der drei Fortbewegungstechniken durch, um dieses Argument zu stützen.

positive Effekte einer Erhöhung der Wiedergabetreue auf verschiedene Effektivitätsparameter [2,23]. Die Auswirkungen der Interaktionstreue sind jedoch nicht so klar.

Interaktionstreue ist definiert als der objektive Genauigkeitsgrad, mit dem ein System reale Interaktionen reproduziert [18]. Es wurde gezeigt, dass eine Erhöhung der Interaktionstreue in einigen Fällen die Leistung erhöht [9, 17, 19]. Beispielsweise übertrafen Manipulationstechniken, die auf Eingabegeräten mit sechs Freiheitsgraden basierten, Techniken, die auf Mäusen mit zwei Freiheitsgraden basierten [9]. Es gibt jedoch auch Studien mit dem gegenteiligen Ergebnis, in denen Techniken mit niedrigerer Wiedergabetreue für Reisen oder Fortbewegung die Techniken mit höherer Wiedergabetreue übertrafen [16, 17]. Beispielsweise waren „natürliche“ Interaktionstechniken zum Fahren eines Fahrzeugs in einem Rennspiel signifikant weniger effektiv als solche mit niedriger Wiedergabetreue [16]. Um diese scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse besser zu verstehen, haben wir drei Fortbewegungsschnittstellen mit unterschiedlichen Wiedergabetreuen getestet. Unsere Studie vergleicht reales Gehen mit hoher Wiedergabetreue mit einer Gamepad-Technik mit niedriger Wiedergabetreue und der Virtusphere-Fortbewegungsschnittstelle mit mittlerer Wiedergabetreue [12]. Die Ergebnisse tragen zu einem besseren Verständnis der Leistung von Fortbewegungstechniken bei unterschiedlichen Interaktionsgenauigkeiten bei. Wir diskutieren diese Ergebnisse und ihre Auswirkungen auf das VR-Interaktionsdesign.

Schlüsselwörter: Interaktionstreue, Effektivität, Fortbewegungsinteraktion, Virtusphere.

Indexbegriffe: I.3.6 [Methodik und Techniken]: Interaktionstechniken; H.5.2 [Benutzeroberflächen]: Eingabegeräte und Strategien.

1 I. EINLEITUNG

In der virtuellen Realität (VR) wurde ein erheblicher Teil der Forschung auf die Verbesserung des Realismus oder der Wiedergabetreue konzentriert. Es wird oft angenommen, dass mehr Realismus besser ist und zu einer größeren Effektivität führt (dh Leistung, Benutzerfreundlichkeit oder Zufriedenheit). Insbesondere konzentrieren sich viele VR-Technologien auf die Verbesserung der Natürlichkeit der Fortbewegung durch Annäherung an das menschliche Gehen.

In den meisten virtuellen Umgebungen (VEs) ist ein reales Gehen über den gesamten Raum aufgrund der begrenzten Größe des verfolgten Raums nicht möglich. Geräte wie omnidirektionale Laufbänder [4] und Techniken wie "In-Place-Walking" [5] und "Redirected Walking" [22] simulieren das Gehen in der realen Welt in unterschiedlichem Maße, mit der Idee, dass Benutzer es nutzen können ihre realen Erfahrungen und Fähigkeiten, um sich effektiv durch ein VE zu bewegen. Fortbewegung mit hohem Realismus kann dem Benutzer bessere propriozeptive Hinweise geben, die Beurteilung der Entfernung verbessern und das Gefühl der Präsenz erhöhen [10], impliziert jedoch typischerweise höhere Kosten. Daher ist das Verständnis der vergleichenden Wirksamkeitsniveaus und der subjektiven Präferenz für Fortbewegungsschnittstellen mit unterschiedlichen Wiedergabetreue ein wichtiges Forschungsthema in der VR. Wie von Gerathewohl [7] definiert, *Treue* ist der Grad, in dem ein System eine reale Erfahrung und ihre Auswirkungen genau wiedergibt. Die Wiedergabetreue hat verschiedene Aspekte, einschließlich der Wiedergabetreue und der Interaktionstreue [1]. *Wiedergabetreue anzeigen* ist definiert als der objektive Genauigkeitsgrad, mit dem ein System reale sensorische Reize reproduziert [18]. Forscher haben berichtet

2 R. BEGEISTERT W. ORK

Eine Fortbewegungsschnittstelle ist ein System oder Gerät, das Benutzern ein Gefühl des Gehens vermittelt und es ihnen ermöglicht, in einem VE zu übersetzen und zu drehen. Eine High-Fidelity-Fortbewegungsschnittstelle schafft eine Erfahrung des physischen Gehens beim Erkunden eines großen VE, während der Benutzer an den Grenzen der physischen Umgebung bleibt [25]. Um die Übereinstimmung zwischen propriozeptiven Hinweisen und visuellem Feedback zu verbessern, wurden natürlichere Schnittstellen und Geräte wie Laufgeräte [5], Laufbänder in alle Richtungen [4], die Virtusphäre [12] und umgeleitetes Gehen [22] verwendet vorgeschlagen.

Die Virtusphere, ein solches Gerät, ist eine große Hohlkugel, die auf Rollen montiert ist und in der ein Benutzer, der ein am Kopf montiertes Display (HMD) trägt, in jede Richtung gehen kann, um sich durch ein VE jeder Größe zu bewegen. Skopp et al. [24] untersuchten das Vorhandensein, die allgemeine Beteiligung / Kontrolle und die Krankheit in der Virtusphere im Vergleich zu einer Gamepad-Technik. Obwohl die Mittelwerte dieser Metriken für das Gamepad besser waren als für die Virtusphere, beobachteten sie keinen signifikanten Unterschied. Marsh et al. [13] führten eine Studie zur Effektivität des Trainings in Bezug auf Leistung und kognitiven Ressourcenbedarf in der Virtusphäre durch. Sie beobachteten einen positiven Effekt des Trainings auf die Bewegungsfähigkeit und Leistung. Leistung, Simulatorkrankheit und Zufriedenheit wurden unter dem Gesichtspunkt der ersten und dritten Person in der Virtusphäre untersucht [15].

Während es viele Studien gab, in denen rein virtuelle Reisetechniken verglichen wurden, haben relativ wenige Studien die Leistung von zwei oder mehr Fortbewegungsschnittstellen mit höherer Wiedergabetreue direkt verglichen. Feasel et al. [22] verglichen fünf Fortbewegungsschnittstellen, indem sie die Leistung von Fortbewegungsaufgaben in Bezug auf Zeit und Länge der Kopftrajektorie maßen. Drei dieser Schnittstellen verwendeten das Gehen in der realen Welt, was die beiden anderen Techniken übertraf, einschließlich einer Walk-in-Place-Technik mit geringer Latenz und eines Joysticks

* E-Mail: {nabiyoun, sagt h15, Bogenschütze, ambik89}@vt.edu

Technik. Zusätzlich haben Griffiths et al. [8] entwickelten eine Reihe von VE-Aufgaben und -Tests, um die Leistung der Navigation und Objektmanipulation zu untersuchen. Es ist jedoch nicht klar, ob eine höhere Wiedergabetreue zu einer besseren Leistung führt. Bevor wir diese Frage beantworten, müssen wir wissen, wie der Effekt der Wiedergabetreue für verschiedene Schnittstellen bewertet werden kann.

2.1 Auswirkungen der Interaktionstreue

Um die Wiedergabetreue zu bewerten, haben einige VR-Forscher reguläre Desktop-Systeme mit niedriger Wiedergabetreue mit VR-Systemen mit hoher Wiedergabetreue für verschiedene Aspekte des Realismus verglichen. Chance et al. [3] verglichen drei Fortbewegungsinteraktionstechniken und stellten fest, dass die natürlicheren Techniken bei den Benutzern eine größere räumliche Orientierung erzeugten als die weniger natürlichen. Techniken, die mehr integrierte Freiheitsgrade (DOFs) für die Aufgabe der 3D-Objektmanipulation [9] und -rotation [19] bieten, waren effektiver. McMahan et al. [17,18] zeigten, dass das direkte Zeigen auf ein Ziel effektiver ist als das Verwenden einer Maus zum Zielen. Pausch et al. [19] zeigten, dass eine Kopfverfolgung mit höherer Wiedergabetreue die Benutzerleistung im Vergleich zur handbasierten Ansichtspunktleitung für eine Suchaufgabe steigern kann.

Andere Ergebnisse zeigen Nachteile einer höheren Interaktionstreue. McMahan et al. [17] stellten fest, dass eine naturnahe Technik (menschlicher Joystick) in einem 3D-Spiel aus der ersten Person von einer nicht natürlichen Technik (Maus und Tastatur) übertroffen wurde. Die in der Einleitung erwähnte Rennspielstudie [16] ist ein weiteres Beispiel. Diese Experimente verglichen Techniken mit höherer und niedrigerer Wiedergabetreue, aber es ist unklar, ob diese Ergebnisse verallgemeinerbar sind.

McMahan et al. [17] stellten fest, dass das Gesamtniveau der Interaktionstreue von einer Kombination von Systemmerkmalen abhängt. Sie wiesen darauf hin, dass jedes Element einer Schnittstelle an einer anderen Stelle im Interaktionsgenauigkeitsspektrum liegen kann. Diese Idee führte zum Framework für Interaction Fidelity Analysis (FIFA) [18]. Die FIFA vergleicht Interaktionstechniken in mehreren Dimensionen mit ihren realen Gegenstücken.

2.2 Wirksamkeit der Fortbewegungsinteraktion

Fortbewegungstechniken mit unterschiedlichen Wiedergabetreuen wurden hinsichtlich ihrer Leistung verglichen. Peck et al. [20] verglichen eine groß angelegte reale Fortbewegungsschnittstelle namens Redirected Free Exploration with Distractors (RFED) mit Walking-in-Place- und Joystick-Techniken für die kognitive Leistung bei Navigation und Wegfindung.

Die RFED-Technik war signifikant besser.

Ähnliche Ergebnisse wurden von Feasel et al. [5] zum Vergleich von High-Fidelity-Techniken wie Real Walking und VRWalk mit LLCM-WIP-Techniken (Low-Latency, Continuous-Motion-Walking-in-Place) und Joystick-Techniken. Whitton et al. [26] verglichen drei High-Fidelity-Geotechniken, eine Low-Fidelity-Flugtechnik mit einem Joystick und eine Medium-Fidelity-Technik des In-Place-Gehens. Bei der Leistungsmetrik der endgültigen Entfernung zum Ziel wurde die Technik des Gehens an Ort und Stelle von der Joystick-Technik übertroffen, während bei anderen Maßnahmen wie der Spitzengeschwindigkeit das Gehen an Ort und Stelle besser war als die Joystick-Technik.

Eine Studie über kognitive Implikationen naturnaher Fortbewegungsschnittstellen wurde von Marsh et al. [14]. Sie verglichen eine Gamepad-Schnittstelle (am wenigsten natürlich), die Position-zu-Geschwindigkeit-Schnittstelle (P2V) (etwas natürlicher) und echtes Gehen (völlig natürliche Grundlinie). Sie beobachteten, dass Gamepad und Real Walking deutlich besser abschnitten als die P2V-Schnittstelle, während sie keinen signifikanten Unterschied zwischen Gamepad und Real Walking beobachteten. Darüber hinaus war die kognitive Belastung beim echten Gehen signifikant geringer als bei P2V und der Gamepad-Oberfläche.

3 E. XPERIMENT

3.1 Ziele und Hypothesen

Um unser Verständnis der Leistung von Fortbewegungstechniken bei unterschiedlichen Wiedergabetreuen zu vertiefen, haben wir eine entwickelt

Experimentieren Sie, um eine naturnahe Fortbewegungstechnik direkt mit einer nichtnatürlichen Technik und einer vollständig natürlichen Technik zu vergleichen. Wir verwendeten eine Gamepad-Technik basierend auf einem Gamecontroller für die nicht natürliche Schnittstelle, eine echte Gehtechnik in einem verfolgten Bereich für die natürliche Schnittstelle und das Virtusphere-Gerät [12] als naturnahe Schnittstelle. Die Studie testete die Leistung der drei Schnittstellen bei grundlegenden Gehaufgaben auf Zeit- und Genauigkeitsmessungen sowie auf subjektive Messungen. Unsere Hypothese war, dass sowohl die Gamepad-Technik als auch die echte Gehtechnik eine Leistung zeigen würden, die der Virtusphere überlegen ist. Wir glauben, dass nicht natürliche Techniken, die angemessen entwickelt wurden, eine gute Leistung bringen können. Ebenso ist die echte Gehtechnik sehr natürlich und bedarf keiner Anpassung durch den Benutzer. Auf der anderen Seite,

Wir haben ein Einzelfaktor-Experiment innerhalb der Probanden entworfen, um diese Hypothese zu untersuchen. Die unabhängige Variable war die Fortbewegungsschnittstelle mit drei Ebenen (siehe Abschnitt 3.3). Die abhängigen Variablen waren die Zeit für die Erledigung der Aufgabe, die Pfadabweichung und die Meinung der Teilnehmer zu den Schnittstellen (siehe Abschnitt 3.5).

3.2 Gerät

Unter allen drei Bedingungen wurde das VE den Benutzern mit einem Sensics zSight HMD mit einem Sichtfeld von 60 °, einer Auflösung von 1280 x 1024 und einem stereoskopischen Rendering angezeigt. Die Gamepad-Technik verwendete einen Sony DualShock 3-Gamecontroller mit zwei Daumenstiften, die zur Fortbewegung verwendet wurden. Bei der Real-Walking-Technik wurden 16 OptiTrack Flex 3-Kameras mit einer Auflösung von jeweils 0,3 MP und einer Bildrate von 100 Bildern pro Sekunde verwendet, um das HMD mithilfe eines starren Körpers reflektierender Marker zu verfolgen. Die Abmessungen des verfolgten Raums, in dem der Benutzer physisch gehen konnte, betragen etwa 12 x 12 Fuß. Bei der Virtusphere-Technik wurde die Ausrichtung des HMD mithilfe der Trägheitssensoren in einem am Display angebrachten Sony Move-Controller verfolgt (Abbildung 1). Wir haben die Anwendung „Move.me“ auf einer Sony PlayStation 3 verwendet, um die Orientierungsverfolgung mit dem Sony Move-Controller durchzuführen. Die Rotation der Virtusphere wurde mit einem eigenen optischen Tracker verfolgt. Wir haben den Vizard 4.0 von WorldViz verwendet, um eine Schnittstelle zur Hardware herzustellen. Die Anwendungssoftware hat die VE gerendert, den Versuchsfluss verwaltet und Benutzerdaten protokolliert.

3.3 Fortbewegungsschnittstellen

Die Gamepad-Technik wurde ähnlich einer Standard-Gaming-Oberfläche entwickelt, bei der die Übersetzung (vorwärts / rückwärts und links / rechts) einen von der dominanten Hand gesteuerten Daumenstiel verwendete, während die Rotation (Gieren und Neigen) den anderen von der nicht dominanten Hand gesteuerten Daumenstift verwendete. Die VE wurde angezeigt



Abbildung 1 - Die in dieser Studie verwendete Virtusphäre

Der Benutzer mit dem HMD und dem Blickwinkel wurde vom Joystick gesteuert. Der Benutzer wurde für diese Technik nicht mit dem Kopf verfolgt (wie es in einer Desktop-Gaming-Einstellung typisch wäre), und die Blickrichtung und die Bewegungsrichtung wurden gekoppelt. Die maximale Bewegungsgeschwindigkeit mit dem Gamepad wurde so gesteuert, dass sie der durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit in der realen Gehtechnik entspricht.

Bei der Virtusphere-Technik (Abbildung 1) wurde das Gehen des Benutzers in der Virtusphere direkt (Richtung und Skalierung) auf die Ansichtspunktkübersetzung in der VE abgebildet. Die Blickrichtung und die Laufrichtung wurden entkoppelt. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Virtusphäre wurde so eingestellt, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit der durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit in der realen Gehtechnik entsprach. Für die echte Gehtechnik gingen die Benutzer physisch in einem verfolgten Raum, während sie ein verfolgtes HMD trugen. Die Position und Ausrichtung des Benutzers wurden ohne Skalierung direkt auf das VE abgebildet.

3.4 Aufgaben

Eine standardisierte Trainingsaufgabe bestand darin, entlang einer geraden Linie zu gehen, um das Ziel zu erreichen. Die Teilnehmer wurden angewiesen, genau auf der Linie zu gehen, um das Ziel zu erreichen. Die Trainingsaufgabe wurde in einer anderen 3D-Umgebung als die anderen Aufgaben durchgeführt und sollte es den Teilnehmern ermöglichen, sich mit allen drei Fortbewegungsschnittstellen vertraut zu machen.

In der experimentellen Aufgabe wurden die Teilnehmer gebeten, zwei Gehaufgaben auszuführen: gerade und mehrsegmentige Linien. Bei der Aufgabe der geraden Linie gingen die Teilnehmer auf einer angegebenen geraden Linie, um ein auf dem Boden platziertes Ziel (Abbildung 2A) in einer 3D-Kunstgalerie zu erreichen. In der Mehrsegmentaufgabe enthielten die zum Ziel führenden Linien senkrechte Windungen (Fig. 2B). Die Teilnehmer wurden gebeten, so schnell wie möglich genau auf der Linie zu zwölf einzelnen Zielen zu gehen. Audio- und visuelles Feedback teilte den Teilnehmern mit, wann jedes Ziel erreicht wurde. Nach Erreichen jedes Ziels verschwanden das Ziel und die Anzeigelinie und das nächste Ziel wurde aufgedeckt. Alle Benutzer wurden gebeten, für jede Schnittstelle zwei Kurse für jede Aufgabe (insgesamt 48 Ziele) durchzuführen, die sich nur in der Reihenfolge unterscheiden, in der die Ziellinien angezeigt wurden.

3.5 Maßnahmen

Wir haben die Pfadabweichung als Maß für die Genauigkeit verwendet. Wir haben die Pfadabweichung als den senkrechten Abstand zwischen der Position des Benutzers in der VE und der angegebenen Linie definiert. Wir haben den senkrechten Abstand alle 50 ms aufgezeichnet und die Fläche zwischen der angegebenen Linie und dem Gehweg berechnet. Zusätzlich haben wir die Fertigstellungszeit gemessen, die die Summe aller genommenen Zeiten war.

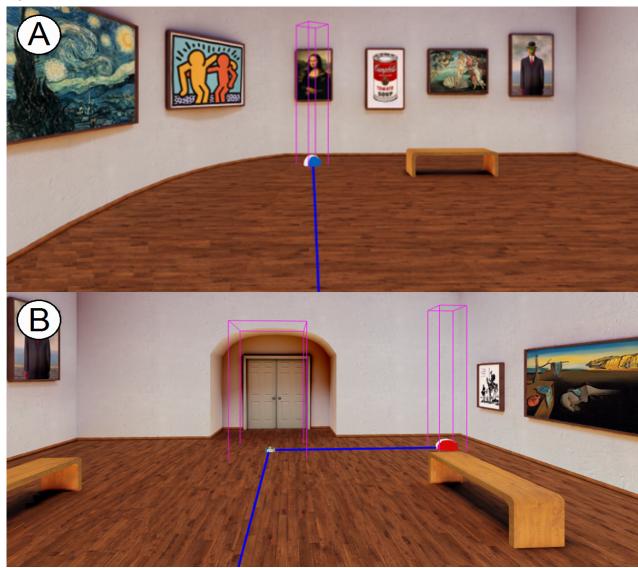


Abbildung 2 - Benutzeransicht der Aufgabe "Gerade" (A) und "Mehrsegmentlinie" (B).

Der Ball auf dem Boden repräsentiert das Ziel.

in einer Aufgabe zu den 12 Zielen gehen. Die Kalibrierungszeit wurde von der Fertigstellungszeit ausgeschlossen. In einem Post-Fragebogen wurden subjektive Bewertungen zu den drei Fortbewegungsschnittstellen gesammelt.

3.6 Teilnehmer

12 Teilnehmer (10 Männer und 2 Frauen) aus der Grund- und Hochschulbevölkerung der Universität wurden auf freiwilliger Basis für unsere Studie rekrutiert. Die Teilnehmer waren zwischen 18 und 35 Jahre alt. Wir haben Probanden unter 18 Jahren und Personen mit einem Gewicht über 190 Pfund (die Gewichtsgrenze der Virtusphäre) ausgeschlossen. Keiner der Teilnehmer hatte vor dem Experiment Erfahrung mit der Virtusphere.

3.7 Vorgehensweise

Wir haben die Genehmigung des Institutional Review Board der Universität für unsere Studie erhalten. Bei der Ankunft wurden die Teilnehmer gebeten, ein Einverständniserklärung zu lesen und zu unterschreiben. Als nächstes füllten sie einen Hintergrundfragebogen aus, in dem sie nach Alter, Geschlecht, Beruf, Sehvermögen und Erfahrung beim Spielen von Videospielen gefragt wurden. Danach erhielten sie eine Einführung in unseren experimentellen Hintergrund, die zu verwendenden Einrichtungen, die Untersuchungsverfahren und die Fortbewegungsschnittstellen. Die Teilnehmer hatten vor der Verwendung jeder Fortbewegungsschnittstelle eine kurze Schulungssitzung, in der sie in die 3D-Umgebung eingeführt und aufgefordert wurden, eine einfache geradlinige Fortbewegungsaufgabe auszuführen.

Für jede Fortbewegungsschnittstelle wurden die Teilnehmer nach Abschluss der Schulungssitzung gebeten, drei Aufgaben über ein virtuelles 3D-Modell einer Kunstsammlung auszuführen. Die ersten beiden Aufgaben waren geradlinige Aufgaben und die letzte war eine mehrsegmentige Linienaufgabe. Die gleichen Aufgaben wurden in allen drei Fortbewegungsschnittstellen ausgeführt, um die Konsistenz aufrechtzuerhalten. Wir haben die 12 Teilnehmer in drei Gruppen eingeteilt, und jede Gruppe verwendete eine andere Reihenfolge der Fortbewegungsschnittstellen, basierend auf einem lateinischen Quadrat. Nach Abschluss der Aufgaben mit jeder Fortbewegungsschnittstelle füllten die Teilnehmer einen Schnittstellenfragebogen aus, in dem sie anhand einer Sieben-Punkte-Likert-Skala ihre Meinung zu Müdigkeit, Leichtigkeit des Gehens, Leichtigkeit des Lernens, Natürlichkeit, Spaß und Präzision messen konnten. Auf jeden Schnittstellenfragebogen folgte ein Fragebogen zur Krankheit des Simulators.

4 R. ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden statistisch signifikante Ergebnisse unserer Studie angegeben. Die Abweichungs- und Zeitmetriken in unserer Studie waren numerische kontinuierliche Typen, während alle anderen subjektiv abhängigen Variablen in den Fragebögen numerische Ordnungszahlen waren. Unsere primären Analysen waren Einweg-Varianzanalysen (ANOVAs) für die Zeitmetrik und die Abweichungsmetrik.

4.1 Abweichung

Wir haben das Abweichungsmaß verwendet, um die Genauigkeit der Aufgabenleistung zu bewerten. Wir beobachteten einen signifikanten Effekt der Fortbewegungsschnittstelle auf die Leistungsgenauigkeit sowohl für die geradlinige Aufgabe ($F_{2,60} = 35,10; p < 0,0001$) und die Mehrsegment-Leitungsaufgabe ($F_{2,33} = 12,17; p < 0,0001$), wie in Abbildung 3 gezeigt. Paarweise Vergleiche mit dem Student-t-Test zeigten, dass die Teilnehmer mit der Virtusphere im Vergleich zu echten Geh- und Gamepad-Techniken signifikant weniger genau abschnitten ($p < 0,0001$ in beiden Fällen). Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den realen Geh- und Gamepad-Techniken beobachtet. Zusätzlich zum Gesamtabweichungsmaß haben wir die durchschnittliche und maximale Abweichung von der angegebenen Linie und der Gesamtfahrstrecke gemessen. Die statistischen Analyseergebnisse waren die gleichen wie für das Gesamtabweichungsmaß.

4.2 Fertigstellungszeit

Wir fanden auch einen signifikanten Effekt der Fortbewegungsschnittstelle auf die Geschwindigkeit der geradlinigen Aufgabe ($F_{2,60} = 77,41; p < 0,0001$) und die

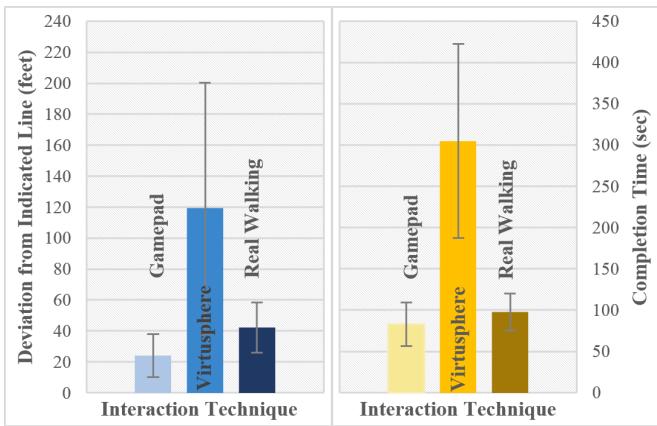


Abbildung 3 - Leistungsmessungen für die drei Fortbewegungstechniken. A) Gesamtabweichung und B) Gesamtabchlusszeit für die geradlinige Aufgabe. Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung. Mehrsegment-Leitungsaufgabe ($F_{2,33} = 23,24, p < 0,0001$), wie in Abbildung 3 gezeigt. Paarweise Vergleiche mit einem Student-T-Test zeigen, dass die Teilnehmer mit den realen Geh- und Gamepad-Techniken im Vergleich zur Virtusphere signifikant schneller abschnitten ($p < 0,0001$ in allen Fällen). Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen realen Geh- und Gamepad-Schnittstellen beobachtet.

4.3 Ergebnisse des Fragebogens

Wir haben eine Chi-Quadrat-Analyse durchgeführt, um die subjektiven Bewertungen im Post-Fragebogen zu vergleichen. Die Teilnehmer waren der Meinung, dass sowohl das Gamepad ($\chi^2 = 15,59; p = 0,02$) und echte Geotechniken ($\chi^2 = 17,45; p = 0,01$) waren signifikant leichter zu lernen als die Virtusphäre. In ähnlicher Weise empfanden Benutzer die Virtusphere als wesentlich ermüdender als echtes Gehen ($\chi^2 = 15,99; p < 0,01$) und Gamepad ($\chi^2 = 21,22; p = 0,01$) Techniken. Die Mittelwerte sind in Abbildung 4 dargestellt. Wir haben die Benutzer auch nach ihrer subjektiven Meinung gefragt, dass jede Technik Spaß macht, und obwohl die Virtusphere eine höhere Durchschnittsbewertung als die Gamepad-Technik aufweist, haben wir bei dieser Frage keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Die Benutzer waren der Meinung, dass die Virtusphere wesentlich natürlicher ist als die Gamepad-Technik ($\chi^2 = 13,36; p = 0,04$) und weniger natürlich als die echte Geotechnik ($\chi^2 = 15,99; p = 0,01$). Benutzer nahmen das Gamepad wahr, um ein leichteres Gehen zu ermöglichen ($\chi^2 = 12,68; p < 0,05$), Initiierung ($\chi^2 = 19,35; p < 0,01$) und Beendigung ($\chi^2 = 19,95; p < 0,01$) als die Virtusphäre. Die wahrgenommene Präzision und Leichtigkeit des Gehens unterschieden sich jedoch nicht signifikant, wenn das reale Gehen und die Virtusphere für das „stationäre“ Gehen verglichen wurden (dh sobald das Gehen begonnen hat, nehmen Benutzer die Virtusphere nicht als wesentlich weniger präzise oder schwerer zu bedienen wahr). Diese Ergebnisse spiegeln sich in unserer Analyse der Interaktionstreue wider (Abschnitt 5).

4.4 Bewegungsmuster

Neben Geschwindigkeit und Genauigkeit sollte eine Fortbewegungsschnittstelle mit höherer Wiedergabetreue zu realistischeren Laufmustern führen [8]. Wir haben aufgenommen

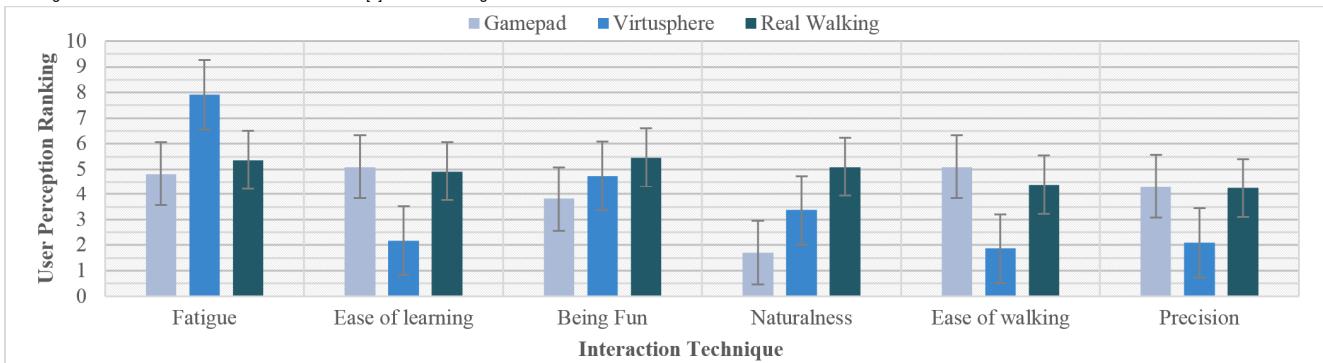


Abbildung 4 - Mittelwerte für die subjektiven Bewertungen der Benutzer. Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung.

Die Position jedes Teilnehmers in der VE während der Ausführung der Aufgaben und die Verwendung dieser Daten zur Veranschaulichung von Bewegungsmustern, wie in Abbildung 5 dargestellt. Für jede Schnittstelle wird ein repräsentatives Muster durch eine rot gepunktete Linie angezeigt. Als die Teilnehmer ein Ziel in VE erreichten, drehten sie sich um und suchten nach dem nächsten Ziel. Mit der echten Geotechnik begannen die Teilnehmer normalerweise zu laufen, als sie nach dem nächsten Ziel suchten. Wie in 5 zu sehen ist, ist das Bewegungsmuster daher zu Beginn des Gehens stärker abweichend. Der Benutzer kann seine Bewegung allmählich korrigieren, während er auf das Ziel zugeht.

Die Bewegungsmuster bei der Gamepad-Technik ähneln der echten Geotechnik, obwohl es einige Besonderheiten gibt. Mit der Gamepad-Technik ist es einfach, sich in einer geraden Linie zu bewegen. Wenn die gerade Linie jedoch nicht genau in die richtige Richtung verläuft, korrigiert der Benutzer seine Richtung, wodurch ein gezacktes Bewegungsmuster entsteht. Trotzdem kann der Benutzer immer noch in der Nähe seines gewünschten Pfades bleiben. Die Bewegungsmuster mit der Virtusphere sind nichts anderes als die Bewegungsmuster beim Gehen in der realen Welt. Der Benutzer war oft nicht in der Lage, den Spaziergang in die bevorzugte Richtung einzuleiten. Außerdem konnten einige Teilnehmer das Ziel zunächst nicht treffen und gingen stattdessen um es herum.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie wir vermuteten, wurde die Virtusphere sowohl vom Gamepad als auch von den realen Laufflächen deutlich übertrffen, was darauf hinweist, dass sie langsamer, weniger präzise, schwerer zu bedienen, ermüdender und schwieriger zu kontrollieren ist. Aber warum ist das so? Ist die Virtusphere einfach zu neu und den Benutzern unbekannt, oder gibt es grundlegendere Probleme mit dieser und anderen ähnlichen Fortbewegungstechniken? Um diese Frage zu beantworten, haben wir eine detaillierte Analyse der Unterschiede zwischen den drei Techniken durchgeführt.

5 A. ANALYSE VON Locomotion Techniques

McMahan führte das Framework für Interaction Fidelity Analysis (FIFA) ein [18]. Mit der FIFA können wir Interaktionstechniken vergleichen und feststellen, wo sie in das Wiedergabebreite-Spektrum fallen. Wir setzen die FIFA ein, um die Unterschiede zwischen den drei Fortbewegungsschnittstellen in unserer Studie besser zu verstehen. Die FIFA beschreibt die Interaktionstreue mit drei Hauptfaktoren.

Biomechanisch Symmetrie beschreibt das Grad von Entsprechung zwischen den in der Interaktionstechnik verwendeten Körperbewegungen und den Körperbewegungen, die bei der Ausführung derselben Aufgabe in der realen Welt verwendet werden. Unterkomponenten der biomechanischen Symmetrie sind kinematische, kinetische und anthropometrische Symmetrie. Die Kinematik befasst sich mit Körperbewegungen oder Flugbahnen; Kinetik bezieht sich auf die Kräfte, die angewendet werden, um Körperbewegungen zu verursachen; und Anthropometrie berücksichtigt, welche Körperteile verwendet werden.

Kontrollsymmetrie beschreibt, wie die durch die Interaktionstechnik bereitgestellte Steuerung mit der Steuerung in der realen Aufgabe verglichen wird. Es hat auch drei Unterkomponenten: Dimension, Übertragungsfunktion und Terminierungssymmetrie. Dimensionssymmetrie

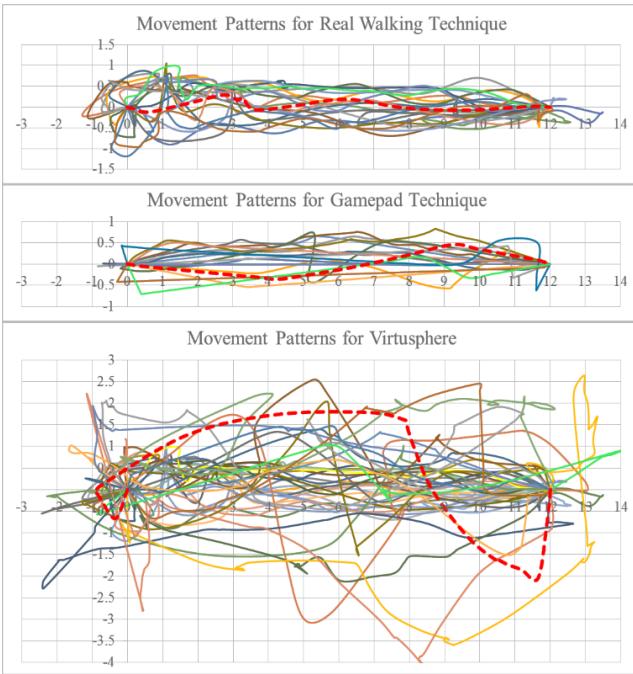


Abbildung 5 - Laufmuster für mehrere Gehauffaben unter Verwendung von realen Geh-, Virtusphere- und Gamepad-Schnittstellen. Ein repräsentatives Muster ist mit einer rot gepunkteten Linie gekennzeichnet. Einheiten sind in Fuß.

berücksichtigt die Ähnlichkeit zwischen den Steuerungsdimensionen in einer realen Aufgabe und denen in einer Interaktionstechnik. Die Übertragungsfunktionssymmetrie bezieht sich darauf, wie Interaktionstechniken Eingabedaten interpretieren und in einen Ausgabeeffekt umwandeln. Die Abbruch-Symmetrie befasst sich damit, wie die Interaktion gestoppt wird (obwohl sie nicht in der ursprünglichen FIFA-Veröffentlichung enthalten ist, betrachten wir auch die Initierung - wie die Interaktion begonnen wird).

Angemessenheit des Systems charakterisiert die Eignung des Systems zur Durchführung eines bestimmten Aspekts der Interaktion und umfasst vier Faktoren: Eingabegenaugigkeit, Eingabegenaugigkeit, Latenz und Formfaktor.

In den folgenden Abschnitten wird eine FIFA-Analyse der drei Techniken vorgestellt, beginnend mit einer Beschreibung der Basislinie, mit der die Techniken verglichen werden: natürliches Gehen.

5.1 Natürliches menschliches Gehen

Die häufigste Kraft, die beim Gehen auf den menschlichen Körper ausgeübt wird, ist die Bodenreaktionskraft. Diese Kraft ist ein dreidimensionaler Vektor, der eine vertikale Komponente und zwei Scherkomponenten umfasst. Die beiden Scherkomponenten wirken in anterior-posteriorer und medial-lateraler Richtung auf die Bodenoberfläche [27], wie in Abbildung 6A und B gezeigt.

Der menschliche Gangzyklus besteht aus zwei Hauptphasen: der Standphase (60% der Gesamtzeit), in der der Fuß den Boden berührt, und der Schwungphase (40% der Gesamtzeit), in der sich der Fuß vorwärts bewegt die Luft. Während der Standphase tauscht der Fuß Kräfte mit dem Boden aus. Die Standphase ist unterteilt in Fersenschlag, Fußabdruck und Zehenabstoßung [25]. Beim Fersenaufprall berührt der menschliche Fuß (H) den Boden und übt zwei Kraftelemente in Vorwärtsrichtung (H_x) und Abwärtsrichtung (H_y) in den Boden aus (6B). Der Boden reagiert mit der gleichen Kraft in die entgegengesetzte Richtung (G_x, G_y) zum Fuß. Der Fersenschlag setzt sich mit einem flachen Fuß fort, bei dem die gesamte Sohle auf den Boden trifft und Kräfte nach hinten ausübt. Fuß flach verwandelt sich in Abstoßung, bei dem der Fuß die größte Rückwärtskraft im Gang ausübt, um den Körper nach vorne zu verschieben (Fig. 6A). Der Boden reagiert mit der gleichen Kraft in die entgegengesetzte Richtung.

5.2 Analyse der realen Gehtechnik

Mithilfe einer echten Interaktionstechnik beim Gehen können Benutzer in einem verfolgten physischen Raum übersetzen und drehen, während sie das VE durch ein verfolgtes HMD betrachten. Bei dieser Technik sind alle Translations- und Rotationsskalen die gleichen wie in der realen Welt, und es werden keine Gewinne auf die Bewegungen des Benutzers angewendet.

Die eigentliche Gehtechnik ist eine extrem hohe Wiedergabeteue. Während der Einleitung, Fortsetzung und Beendigung des Gehens sind alle Aspekte der biomechanischen Symmetrie und Kontrollsymmetrie genau so wie beim natürlichen Gehen. Der einzige bemerkenswerte Unterschied zwischen unserer echten Gehtechnik und dem natürlichen Gehen besteht darin, dass die Benutzer beim Tragen des HMD ihren eigenen Körper, ihre Beine und Füße nicht beobachten kann. Dies kann zu einem geringeren Vertrauen in das Gehen führen und zu einer langsameren Gehgeschwindigkeit führen.

5.3 Analyse der Virtusphärentechnik

5.3.1 Initiierung

Beim natürlichen Gehen leiten wir den Gang mit der Abstoßphase ein. Aufgrund der Trägheit und der statischen Reibung der Virtusphäre kann die Virtusphäre beim ersten oder zweiten Schritt des Benutzers stationär bleiben (Abbildung 6C) und mit der gleichen Kraft in entgegengesetzter Richtung zum Benutzer (GV) reagieren. Wenn sich der Benutzer aufgrund der gekrümmten Innenfläche vorwärts bewegt, nimmt die Abwärtskraft des Benutzers zu und überwindet die statische Reibung und Trägheit der Virtusphäre. Sobald sich die Virtusphäre zu drehen beginnt (Abbildung 6D), verwandelt sich die Haftreibung in dynamische Reibung, die geringer ist als die Haftreibung. Diese Abnahme der Reibungskraft verringert den Widerstand gegen die von den Füßen des Benutzers ausgeübte Kraft. Ein Element dieser Kraft wirkt, um die dynamische Reibung zu überwinden, während der Rest den Impuls der Virtusphäre erhöht. Erzeugen von zwei Kraftelementen in Rückwärts- und Abwärtsrichtung an den Füßen des Benutzers (V_x und V_y in 6D). Dies verringert die Bodenreaktionskraft der Virtusphäre in Vorwärtsrichtung (GVx) und Abwärtsrichtung (GVy). Folglich beginnt der Benutzer plötzlich, sich in der Virtusphäre rückwärts zu bewegen.

Benutzer, die sich nicht an die Virtusphäre gewöhnt haben, haben zwei typische Reaktionen auf die plötzliche Rückwärtsbewegung. Im ersten Szenario wird der Benutzer versuchen, seine Position zu halten, während er die Gehgeschwindigkeit erhöht, wodurch die Geschwindigkeit und der Impuls der Virtusphäre erhöht werden. Dann versucht der Benutzer, langsamer zu werden, aber die Rückwärtskräfte der Virtusphäre werden sie weiter rückwärts verschieben. Dies kann zu einem Zyklus führen, bei dem der Benutzer das Gleichgewicht verliert. Im zweiten Szenario versucht der Benutzer, anstatt zu rennen, die Virtusphäre zu verlangsamen. Unerfahrene Benutzer beenden möglicherweise das Drehen von Virtusphäre und versuchen, erneut zu beginnen. Um diese beiden ineffektiven Ansätze zu vermeiden, muss der Benutzer die Virtusphäre nach dem Drehen der Virtusphäre vorsichtig verlangsamen und mit einer geeigneten Geschwindigkeit drehen lassen.

Dieser große Unterschied in den vertikalen und scherenden Bodenkräften in der Gehinitiationsphase führt zu einer geringen kinetischen Symmetrie zwischen der Virtusphäre und dem natürlichen Gehen. Dies führt zu einer Abweichung vom angegebenen Pfad und macht die Virtusphäre ermüdender und ungenauer.

5.3.2 Gehen

Wie in 6B gezeigt, übt sein Impuls, während der Benutzer in der Virtusphäre geht, Rückwärts- und Abwärtskräfte auf die Füße aus. Während der Fersenschlagphase erhöht diese Kraft die Reaktionskraft in Vorwärtsrichtung. Das Aufrechterhalten einer konstanten Geschwindigkeit beim Gehen in Vorwärtsrichtung schafft ein Gleichgewicht zwischen menschlichen Kräften und Reaktionskräften. Dieses Gleichgewicht macht das lineare Gehen in der Virtusphäre fast natürlich. Aufgrund der gekrümmten Oberfläche der Virtusphäre kann der Benutzer bei großen Schritten den Höhenunterschied bemerken. Wenn Sie kleinere Schritte ausführen, bleiben nicht nur beide Füße auf der gleichen Höhe, sondern auch

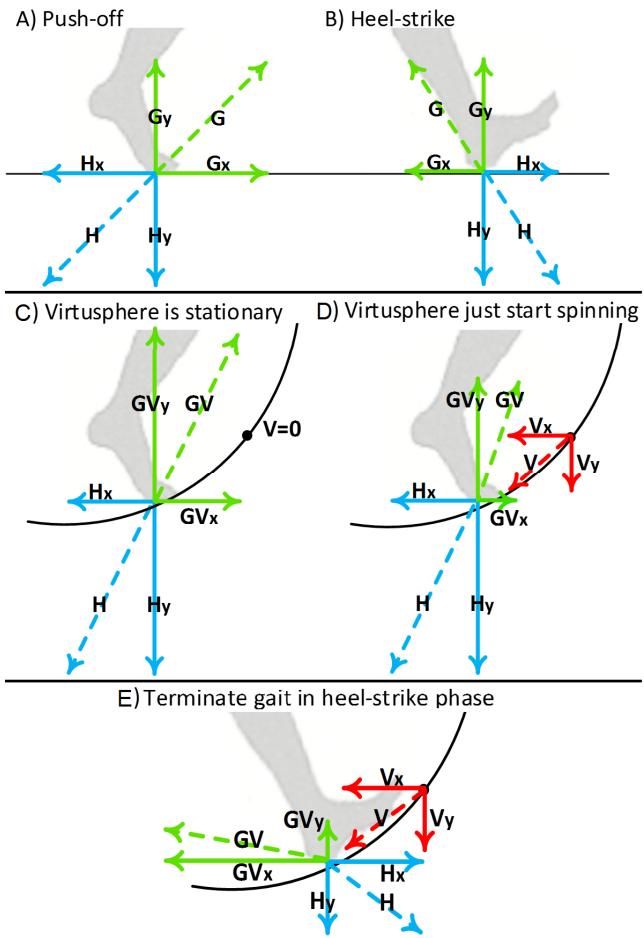


Abbildung 6 - Menschliche Fußkräfte (H) in Blau, Bodenreaktionskräfte (G) in Grün, Virtusphärenkräfte (V) in Rot.

Verringern Sie das Abwärtskraftelement (Hy), um den Schwung der Virtusphäre unter Kontrolle zu halten. Die präzisen Eingangssensoren können kleinere Bewegungen erkennen und haben eine minimale Latenz. Infolgedessen geben die Teilnehmer an, dass die Virtusphäre im Vergleich zur Gamepad-Technik unterhaltsamer und natürlicher ist.

5.3.3 Kündigung

Beim natürlichen Gehen beenden wir den Gang in der Fersenschlagphase. Wenn die Benutzerin versucht, die Virtusphäre anzuhalten, muss sie den Schwung der Virtusphäre überwinden, indem sie in der Fersenschlagphase eine größere Vorwärtskraft ausübt. Unerfahrene Benutzer haben möglicherweise zwei Szenarien für die Beendigung des Gehens. Im ersten Szenario übt der Benutzer in der Fersenstoßphase eine größere Vorwärtskraft aus, während er in der Abstoßphase die Rückwärtskraft verringert, ähnlich wie beim natürlichen Gehen. In diesem Fall übersetzt der Impuls der Virtusphäre den Benutzer auf seiner inneren Kurve nach hinten und oben. Anschließend erhöht der Benutzer die Abstoßkraft, um vorwärts zu gehen, um seine Position zu halten und sein Gleichgewicht zu kontrollieren. Dies kann dazu führen, dass sich der Benutzer mehrmals vorwärts und rückwärts bewegt und schließlich das Gleichgewicht verliert.

Im zweiten Szenario übt der Benutzer eine Fersenstoß-Vorwärtskraft aus, die erheblich größer ist als die des natürlichen Gehens, um den Impuls der Virtusphäre zu überwinden (Abbildung 6E). Das Gewicht der Virtusphäre (550 lbs [12]) kann einen großen Impuls erzeugen. Aufgrund seines Impulses ist die Reaktionskraft von der Virtusphäre auf den Fuß des Benutzers relativ groß und die Muskeln des Benutzers können diese Reaktionskraft möglicherweise nicht überwinden (GVx, Abbildung 6E). Dies kann auch dazu führen, dass der Benutzer das Gleichgewicht verliert. Erfahrene Benutzer erhöhen schrittweise die Vorwärtskraft in der Fersenstoßphase, während sie die Rückwärtskraft in der Abstoßphase schrittweise auf reduzieren

Gang beenden und Gleichgewicht halten. Auch in diesem Fall unterscheidet sich die Beendigung erheblich vom natürlichen Gehen. Daher sind kinetische Symmetrie und Terminationssymmetrie in der Virtusphäre Low-Fidelity. Diese Aktionen verbrauchen eine beträchtliche Menge an Energie, wenn sie über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, was dazu beiträgt, die in unserer Studie deutlich höhere Müdigkeit mit der Virtusphäre zu erklären.

5.4 Analyse der Gamepad-Technik

Bei der Gamepad-Technik wird das Gehen durch Vorwärtsschieben des Translations-Joysticks eingeleitet, wodurch die VE fast sofort vorwärts bewegt wird. Der Benutzer kann in VE weitergehen, indem er den Übersetzungs-Joystick weiter nach vorne drückt, während er sich strecken kann, indem er den Übersetzungs-Joystick nach rechts und links drückt. Der Benutzer kann die Übersetzung mit hoher Genauigkeit und Präzision steuern. Zum Beenden des Gehens muss lediglich der Joystick losgelassen werden. Die Gamepad-Technik weist eine hohe Genauigkeit und Präzision, eine geringe Latenz und eine hohe dimensionale Symmetrie auf. In Bezug auf die Interaktionstreue sind die biomechanische Symmetrie und die Kontrollsymmetrie sehr gering. Es werden verschiedene Körperteile verwendet und Bewegungen und Kräfte sind völlig unterschiedlich. Die Übertragungsfunktionssymmetrie ist gering, da das Kippen eines Joysticks auf die Geschwindigkeit im VE abgebildet wird. Terminierung und Formfaktor sind ebenfalls Low-Fidelity.

Die mangelnde Interaktionsgenauigkeit ist für Techniken dieser Art kein Problem, da diese Technik nicht darauf ausgelegt ist, das tatsächliche Gehen in irgendeiner Weise anzunähern.

5.5 Analysezusammenfassung

Wir können sehen, dass die echte Gehtechnik eine hohe Interaktionstreue aufweist, da sie alle drei Symmetrieverbedingungen für eine hohe Wiedergabetreue erfüllt. Umgekehrt weist die Gamepad-Technik eine sehr geringe biomechanische Symmetrie, Übertragungsfunktion und Terminierungssymmetrie sowie einen sehr unterschiedlichen Formfaktor auf. Daher befindet sich die Gamepad-Technik in der Nähe des unteren Extrems des Interaktionsgenauigkeitsspektrums. Die Virtusphäre verfügt über eine Kombination aus High-Fidelity- und Low-Fidelity-Eigenschaften. In Anbetracht dessen klassifizieren wir die Virtusphäre als eine Technik mit mittlerer Wiedergabetreue. Diese Analyse hilft auch, die Ergebnisse unserer Studie zu erklären.

6 DISCUSSION

6.1 Dieses Experiment

In unserem Experiment hatte die Virtusphäre eine deutlich schlechtere Leistung als das Gamepad und echte Gehtechniken, was darauf hinweist, dass es schwierig ist, sie zu erlernen und anzuwenden. Die oben beschriebene Analyse hilft uns, die Ursache dieser Usability-Probleme zu verstehen. Die Virtusphäre präsentiert sich als „natürliche Gehoberfläche“, die den Benutzern impliziert, dass sie ihre realen Gehfähigkeiten und -erfahrungen nutzen können, um das Gerät zu verwenden. Es stellt sich jedoch heraus, dass das Einleiten und Beenden des Gehens (ganz zu schweigen von der Richtungsänderung) in der Virtusphäre in Bezug auf Bewegungen und Kräfte erheblich anders ist als beim echten Gehen. Diese Unterschiede führen dazu, dass Benutzer Schwierigkeiten haben, die Virtusphäre zu kontrollieren, und nicht in der Lage sind, den gewünschten Pfad in der VE effizient zu beschreiten. Die Virtusphäre hat in unserer Studie nicht nur eine schlechtere Leistung erbracht,

Im Gegensatz dazu weist die echte Gehtechnik keines dieser Probleme auf. Benutzer können all ihre realen Lauferfahrungen und -fähigkeiten direkt auf die Benutzeroberfläche übertragen, was zu einer hervorragenden Leistung führt.

Aber wenn die Virtusphäre aufgrund ihrer mangelnden Wiedergabetreue eine schlechtere Leistung aufweist, warum ist die Gamepad-Technik mit niedriger Wiedergabetreue nicht noch schlechter? Es ist klar, dass Benutzer der Gamepad-Technik nicht erwarten, dass die Technik dem Gehen in der realen Welt ähnelt, und daher sind die Low-Fidelity-Aspekte der Benutzeroberfläche keine

Hindernis für eine gute Leistung. Da die Gamepad-Technik gut konzipiert ist und eine leicht verständliche Zuordnung zwischen Joystick-Bewegungen und Translations- / Rotationsgeschwindigkeit aufweist, kann die Leistung zumindest für die Geschwindigkeits- und Genauigkeitsmetriken bei einer geradlinigen Gehaufgabe auf dem Niveau des tatsächlichen Gehens liegen. Ein weiterer Vorteil der Gamepad-Technik ist die Vertrautheit. Viele Benutzer haben diese Art von Benutzeroberfläche häufig in Spielen und anderen Kontexten gesehen und verwendet. Vertrautheit hat sicherlich einen Einfluss auf die Leistung. Aber war es ein Hauptfaktor für die Ergebnisse unseres Experiments?

Drei unserer Teilnehmer gaben an, dass sie weniger als eine Stunde pro Woche Videospiele spielten und Geräte verwendeten, die sich stark von Gamepads (z. B. Smartphones) unterschieden. Somit waren diese Teilnehmer Anfänger in der Verwendung von Techniken, die der Gamepad-Navigationstechnik ähnlich sind. Ihre mittlere Fertigstellungszeit war 105,3 Sekunden mit dem Gamepad im Vergleich zu 262,0 Sekunden mit der Virtusphere. Die Abweichung mit der Gamepad-Technik für diese Gruppe von Teilnehmern betrug 19,1 Fuß, während sie bei Verwendung der Virtusphere 82,0 Fuß betrug. Daher konnten selbst Teilnehmer, die ein geringes Maß an Fachwissen mit Gamepad-ähnlichen Techniken beanspruchten, mit dem Gamepad viel schneller und genauer navigieren als mit der Virtusphere. Dies deutet darauf hin, dass die von uns verwendete Gamepad-Technik sehr einfach zu erlernen und anzuwenden war, sodass Benutzer auch ohne vorherige Schulung oder ein hohes Maß an Fachwissen mit einem solchen Gerät eine hervorragende Aufgabenleistung erzielen konnten.

Man könnte auch behaupten, dass die Wahl der experimentellen Aufgabe die Ergebnisse beeinflusst hat. Nach unserer Erfahrung bietet das Gehen in einer geraden Linie der Virtusphere die besten Erfolgsschancen. Aufgrund der Dynamik der Virtusphäre ist das Gehen auf gekrümmten Wegen schwieriger. Zwar ist die Gamepad-Technik für nicht geradlinige Bewegungen möglicherweise weniger optimal, sie übertrifft jedoch die Virtusphere erheblich. In unserem Experiment schließen wir daher, dass:

1. Die hohe Interaktionstreue der realen Gehtechnik führte zu einem hohen Leistungsniveau.
2. Die mittlere Wiedergabetreue der Virtusphere-Technik (dh ihre Mängel in Bezug auf die Wiedergabetreue im Vergleich zum Gehen in der realen Welt) führte in Kombination mit den Erwartungen der Benutzer, dass sie das natürliche Gehen unterstützen würde, zu einer erheblich schlechteren Leistung. Die geringe Interaktionstreue der
3. Gamepad-Technik war aufgrund ihres leicht zu erlernenden und benutzerfreundlichen Designs nicht nachteilig für die Leistung.

Natürlich konnten wir in dieser Studie nur drei spezifische Fortbewegungstechniken bewerten. Wir müssen uns fragen, ob diese Ergebnisse verallgemeinerbar sind.

6.2 Implikationen

McMahon et al. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass Fortbewegungstechniken mit hoher und niedriger Wiedergabetreue häufig eine bessere Leistung erbringen als Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue [17, 18]. Mit anderen Worten, er argumentierte, dass die Beziehung zwischen Interaktionstreue und Leistung wie eine U-förmige Kurve aussehen könnte, mit höherer Leistung an den beiden Extremen und geringerer Leistung in der Mitte. Unsere Ergebnisse stützen diese Hypothese. Wir beobachteten, dass die Erhöhung der Wiedergabetreue von einer Standardtechnik mit niedriger Wiedergabetreue (Gamepad) zu einer Technik mit mittlerer Wiedergabetreue (Virtusphere) die Leistung verringerte und dass die Erhöhung von mittlerer Wiedergabetreue zu sehr natürlichem (echtem Gehen) positiv zur Leistung beitrug.

Diese Hypothese ist sinnvoll, da Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue Interaktionen mit hoher Wiedergabetreue ähnlich erscheinen. Daher versuchen Benutzer, sie auf ähnliche Weise wie hochnatürliche Techniken einzusetzen. Aufgrund ihrer Unterschiede zu realen Aktionen müssen Benutzer bei Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue die Art und Weise ändern, in der sie auf natürliche Weise interagieren. Das Gehirn muss sich an die nicht natürlichen Teile der Medium-Fidelity-Technik anpassen.

Trotz aller Bemühungen, natürlichere Fortbewegungsschnittstellen zu entwickeln (wie z. B. Laufbänder in alle Richtungen, Gehen an Ort und Stelle und Roboter-Steppsysteme), liegen diese und die meisten anderen praktischen Fortbewegungsschnittstellen in der Mitte des Wiedergabetreue-Spektrums. Daher ist es wichtig, die potenzielle Leistung dieser Kategorie von Fortbewegungsschnittstellen zu verstehen.

Man könnte argumentieren, dass die Ergebnisse unserer Studie hauptsächlich auf die von uns gewählte Schnittstelle mit mittlerer Wiedergabetreue (die Virtusphere) zurückzuführen sein könnten. Obwohl wir anerkennen, dass die Virtusphere einige deutliche Mängel aufweist (insbesondere ihr Gewicht und ihre gekrümmte Form), nehmen wir an, dass diese Ergebnisse bis zu einem gewissen Grad für die meisten Fortbewegungstechniken mit mittlerer Wiedergabetreue gültig sind. Diese Schlussfolgerung mag neben der Fortbewegung auch für andere Interaktionsaufgaben zutreffen, es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

Unsere Ergebnisse stimmen mit anderen Studien überein, die die schlechtere Leistung naturnaher Grenzflächen in der Literatur zeigen [14, 16, 17] (eine Beschreibung dieser Studien finden Sie in Abschnitt 2).

Auf der anderen Seite haben einige Studien gezeigt, dass bestimmte naturnahe Techniken wie umgeleitetes Gehen [21] oder Sieben-Liga-Stiefel [11] ein hohes Leistungsniveau aufweisen. Basierend auf einer Analyse ähnlich der in Abschnitt 5 können wir sehen, dass diese Techniken in Bezug auf die Muskelgruppen und Kräfte, die sie verwenden, tatsächlich eine ziemlich hohe Wiedergabetreue aufweisen. Somit haben sie eine hohe biomechanische Symmetrie. Die Übertragungsfunktion für beide Techniken unterscheidet sich geringfügig vom natürlichen Gehen. Beim umgeleiteten Gehen bemerkt der Benutzer möglicherweise nicht einmal den Unterschied zum echten Gehen. Der Gewinn, der in Sieben-Liga-Stiefeln verwendet wird, kann für den Benutzer spürbar sein, wirkt sich jedoch positiv auf die Navigationsgeschwindigkeit und -leistung aus. Daher sind solche Techniken im Interaktionsgenauigkeitsspektrum nahe am hohen Extrem,

Die Auswirkungen der Vertrautheit sind nicht unabhängig von den Auswirkungen der Interaktionstreue. Per Definition ist eine Technik mit hoher Interaktionstreue sehr vertraut, da eine Technik mit hoher Wiedergabetreue den in der realen Welt verwendeten Aktionen sehr ähnlich (vertraut) ist. Auch per Definition ist eine Technik mit geringer Interaktionstreue völlig unbekannt, bis Benutzer damit trainiert oder sie für eine Weile verwendet haben. Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue sind per Definition etwas vertraut.

Dies ist jedoch das Hauptproblem bei der Virtusphere: Da sie sich als *natürlich* Bei der Gehtechnik gehen die Benutzer davon aus, dass regelmäßige Gehbewegungen und -fähigkeiten darauf angewendet werden. Wenn sie versuchen, regelmäßig in der Virtusphäre zu gehen, haben sie große Probleme. Deshalb, *Vertrautheit* ist eigentlich ein Nachteil der Virtusphäre, und ihre Nähe zum natürlichen Gehen ist für den Benutzer eher eine Ablenkung als ein Vorteil.

Der Hauptgrund, warum Low-Fidelity-Techniken *kann* gut abschneiden ist keine Vertrautheit: Es ist so, dass sie unter Verwendung etablierter Prinzipien der Mensch-Computer-Interaktion gut gestaltet werden können. Da diese Techniken nicht auf realen Aktionen basieren, können Designer Techniken erfinden, die eine gute Leistung erbringen. Bestimmt, *niedrige Wiedergabetreue garantiert keine gute Leistung*, Gut konzipierte Low-Fidelity-Techniken können jedoch eine hervorragende Leistung erzielen.

Die Leistung der Benutzer mit Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue muss nicht immer niedrig bleiben. Es ist möglich, die Leistung durch Schulung der Benutzer zu verbessern [13]. Wenn eine Schnittstelle jedoch umfangreiche Schulungen erfordert, um verwendet werden zu können, ist sie wahrscheinlich nicht für viele potenzielle Anwendungen geeignet. Darüber hinaus widerspricht der Bedarf an einem signifikanten Training mit einer Technik der Idee einer „natürlichen“ Interaktion. Wie viel und wie schnell die Leistung von Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue verbessert werden kann, ist ein Thema für die zukünftige Arbeit.

Zusammenfassend schlagen wir auf der Grundlage der Literatur, unserer Ergebnisse und unserer eingehenden Analyse von Interaktionstechniken vor, dass McMahans Hypothese zumindest für grundlegende Aufgabenleistungsmessungen mit Fortbewegungstechniken von Nutzen ist. Das heißt, Fortbewegungstechniken mit hoher Wiedergabetreue und gut konzipierte Fortbewegungstechniken mit niedriger Wiedergabetreue

werden oft ihre Gegenstücke mit mittlerer Wiedergabetreue übertreffen. Weitere Studien können diese Prämissen bestätigen.

7 C. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND F. UTURE W. ORK

Trotz der allgemeinen Überzeugung, dass mehr Realismus in VR-Systemen immer besser ist, haben wir gezeigt, dass die Beziehung zwischen Interaktionstreue und Effektivität komplizierter ist. Durch die Analyse und Bewertung von drei Fortbewegungsschnittstellen an verschiedenen Punkten des Interaktionsgenauigkeitsspektrums haben wir zu einem tieferen Verständnis der Auswirkungen der Interaktionstreue auf die Effektivität beigetragen.

Basierend auf der Literatur [14, 16-18] und unseren Ergebnissen und Analysen schlagen wir vor, dass High-Fidelity-Fortbewegungstechniken und gut konzipierte Low-Fidelity-Techniken die Fortbewegungsschnittstellen mit mittlerer Wiedergabetreue übertreffen können. Unsere Ergebnisse stützen McMahan's Hypothese [17,18] über die Beziehung zwischen Interaktionstreue und Leistung. Weitere Studien sind erforderlich, um diese Hypothese mit anderen Fortbewegungsschnittstellen und -techniken mit mittlerer Wiedergabetreue für andere Aufgaben zu stärken.

In Zukunft können wir diese Forschung erweitern, um die Form der Interaktions-Wiedergabetreue-Leistungskurve weiter zu untersuchen. Weitere Interaktionstechniken können untersucht werden, um die Frage zu beantworten, wie viel Wiedergabetreue erforderlich ist, um eine Leistung ähnlich der realen Welt zu erzielen, oder welche Komponenten der Interaktionstreue auf hohem Niveau am wichtigsten sind.

Wir planen auch, weiter zu untersuchen, wie der Effektivitätsgrad von VR-Techniken mit mittlerer Wiedergabetreue verbessert werden kann. Mit der Virtusphere könnte man beispielsweise die Masse verringern, die Haftereibung verringern, ein angemesseneres Maß an dynamischer Reibung (möglichlicherweise mit mechanischer Unterstützung) bereitstellen und Benutzer in einfachen Strategien schulen, um das Gerät effizienter zu führen.

EIN ANERKENNUNG

Diese Arbeit wurde vom Immersive Sciences-Programm im Office of Naval Research unterstützt.

R. EFERENZEN

- [1] DA Bowman und RP McMahan und E / D. Ragan. "Naturalismus in 3D-Benutzeroberflächen in Frage stellen." *Mitteilungen des ACM* 55, Nein. 9 (2012): 78 & ndash; 88.
- [2] DA Bowman und RP McMahan. "Virtuelle Realität: Wie viel Eintauchen ist genug?" *Computer* 40, Nein. 7 (2007): 36 & ndash; 43.
- [3] S. Chance, F. Gaunet, A. Beall und JM. Loomis. "Der Fortbewegungsmodus beeinflusst die Aktualisierung von Objekten, die während der Reise angetroffen werden: Der Beitrag von vestibulären und propriozeptiven Eingaben zur Pfadintegration." *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen* 7, Nein. 2 (1998): 168 & ndash; 178.
- [4] RP Darken, WR Cockayne und D. Carmein. "Das omnidirektionale Laufband: ein Fortbewegungsgerät für virtuelle Welten." In den *Proceedings des 10. jährlichen ACM-Symposiums zu Software und Technologie für Benutzeroberflächen*, S. 213-221. ACM, 1997.
- [5] J. Feasel, MC Whitton und JD Wendt. "LLCM-WIP: Laufende Ortung mit geringer Latenz und kontinuierlicher Bewegung." In *3D Benutzer Interfaces, 2008. 3DUI 2008. IEEE-Symposium über*, S. 97-104. IEEE, 2008.
- [6] L. Gamberini, A. Spagnolli, L. Prontu, S. Furlan, F. Martino, BR Solaz, M. Alcañiz und JA Lozano. "Wie natürlich ist eine natürliche Schnittstelle? Ein Bewertungsverfahren, das auf Aktionszusammenbrüchen basiert." *Persönliches und allgegenwärtiges Computing* 17, Nr. 1 (2013): 69-79.
- [7] SJ Gerathewohl. "Genauigkeit der Simulation und Übertragung des Trainings: eine Überprüfung des Problems". Verkehrsministerium, Federal Aviation Administration, Amt für Luftfahrtmedizin, 1969.
- [8] G. Griffiths und JR Wilson. "Leistung neuer Teilnehmer in virtuellen Umgebungen: Das Nottingham-Tool zur Bewertung von
- [9] K. Hinckley, J. Tullio, R. Pausch, D. Proffitt und N. Kassell. "Usability-Analyse von 3D-Rotationstechniken." Im *Vorträge des 10. jährlichen ACM-Symposiums zu Software und Technologie für Benutzeroberflächen*, S. 1-10. ACM, 1997.
- [10] JM Hollerbach. "Fortbewegungsschnittstellen." Handbuch der virtuellen Umgebungen: Design, Implementierung und Anwendungen (2002): 239-254.
- [11] V. Interrante, B. Ries und L. Anderson. "Sieben Liga-Stiefel: Eine neue Metapher für eine verbesserte Fortbewegung durch mittelgroße immersive virtuelle Umgebungen." *3D-Benutzeroberflächen, 2007. 3DUI'07. IEEE-Symposium über*. IEEE, 2007.
- [12] NN Latypov. "Die Virtusphäre." URL: <http://www.virtusphere.com> (2006).
- [13] WE Marsh., T. Hantel, C. Zetsche und K. Schill. "Ist der Benutzer geschult? Bewertung der Leistung und der Anforderungen an kognitive Ressourcen in der VirtuSphere." Im *3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, 2013 IEEE Symposium on, S. 15-22. IEEE, 2013.
- [14] Wir Marsh, M. Putnam, JW Kelly, VJ Dark und JH Oliver. "Die kognitiven Implikationen der naturnahen virtuellen Fortbewegung." In *Virtual Reality Short Papers und Postern (VRW), 2012 IEEE*, S. 47-50. IEEE, 2012.
- [15] E. Medina, R. Fruland und S. Weghorst. "Virtusphere: Gehen in einem VR-Hamsterball in Menschengröße." *Tagungsband der Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 52, nein. 27, S. 2102-2106. SAGE Publications, 2008.
- [16] RP McMahan, AJD Alon, S. Lazem, RJ Beaton, D. Machaj, M. Schäfer, MG Silva, A. Leal, R. Hagan und DA Bowman. "Bewertung natürlicher Interaktionstechniken in Videospielen." Im *3D-Benutzeroberflächen (3DUI), IEEE-Symposium über*, S. 11-14, 2010.
- [17] RP McMahan, DA Bowman, DJ Zielinski und RB Brady. "Bewertung der Wiedergabetreue und der Interaktionstreue in einem Virtual-Reality-Spiel." *Visualisierung und Computergrafik, IEEE-Transaktionen auf* 18, Nein. 4 (2012): 626 & ndash; 633.
- [18] RP McMahan. "Untersuchung der Auswirkungen von High-Fidelity-Anzeige und Interaktion für Virtual-Reality-Spiele." Dissertation, Virginia Polytechnic Institute und State University, 2011.
- [19] R. Pausch, D. Proffitt, G. Williams. "Quantifizierung des Eintauchens in die virtuelle Realität." Im *Vorträge der 24. Jahrestagung über Computergrafik und interaktive Techniken*, S. 13-18. ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [20] TC Peck, H. Fuchs und MC Whitton. "Das Design und die Evaluierung einer großflächigen realen Bewegungsschnittstelle." *Visualisierung und Computergrafik, IEEE-Transaktionen am 18.7. (2012): 1053.*
- [21] TC Peck, H. Fuchs und MC Whitton. "Verbesserte Umleitung mit Distraktoren: Eine großflächige, real laufende Fortbewegungsschnittstelle und ihre Auswirkungen auf die Navigation in virtuellen Umgebungen." *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE*. IEEE, 2010.
- [22] S. Razzaque, Z. Kohn und MC Whitton. "Umgeleitetes Gehen." Im *Verfahren von EUROGRAPHICS*, vol. 9, S. 105-106. 2001.
- [23] RA Riddle , SJ Payne, DM Jones. "Navigieren in großen virtuellen Umgebungen: Welche Unterschiede treten zwischen am Helm montierten Displays und Desktop-Displays auf?" *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen* 8, Nein. 2 (1999): 157 & ndash; 168.
- [24] NA Skopp, DJ Smolenski, MJ Metzger-Abamukong, AA Rizzo und GM Reger. "Eine Pilotstudie der VirtuSphere als Verbesserung der virtuellen Realität." *Internationale Zeitschrift für Mensch-Computer-Interaktion* 30, Nr. 1 (2014): 24-31.
- [25] F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos und A. Lécuyer. „*Menschliches Gehen in virtuellen Umgebungen*“. Springer, 2013.
- [26] MC Whitton, JV Cohn, J. Feasel, P. Zimmons, S. Razzaque, SJ Poulton, B. McLeod und FP Brooks Jr. In *Virtual Reality, 2005. Verfahren. VR 2005. IEEE*, S. 123-130. IEEE, 2005.
- [27] DA Winter, "Biomechanik und Motorik der menschlichen Bewegung." John Wiley & Sons, 2009.