

Vergleich von Leaning-basierten Motion Cueing-Schnittstellen für die virtuelle Realität

Fortbewegung

Alexandra Kitson *
Simon Fraser Universität
Surrey, BC, Kanada

Abraham M.
Hashemian **
Simon Fraser Universität
Surrey, BC, Kanada

Ekaterina R.
Stepanova ***
Simon Fraser Universität
Surrey, BC, Kanada

Ernst Kruijff †
Universität Bonn-Rhein-Sieg Simon-Fraser-Universität
für Angewandte Wissenschaften
Surrey, BC, Kanada
Deutschland

EIN BSTRACT

In diesem Artikel beschreiben wir eine Benutzerstudie, in der fünf verschiedene Fortbewegungsschnittstellen für die Fortbewegung in der virtuellen Realität verglichen werden. Wir haben eine Standard-Nicht-Motion-Cueing-Schnittstelle verglichen. **Joystick** (Xbox) mit vier Motion-Cueing-Schnittstellen, **NaviChair** (Hocker mit Federn), **MuvMan** (aktiver Stuhl sitzen / stehen), **Head-Directed** (Oculus Rift DK2) und **Drehstuhl** (alltäglicher Bürostuhl mit Lehnfähigkeit). Jede Schnittstelle hatte zwei Freiheitsgrade, um sich vorwärts / rückwärts zu bewegen und sich unter Verwendung der Geschwindigkeits- (Raten-) Steuerung zu drehen. Das Ziel dieser Studie mit gemischten Methoden war es, relevante User Experience-Faktoren besser zu verstehen und das Design zukünftiger Fortbewegungsschnittstellen zu steuern. In dieser Studie wurden Methoden von HCI verwendet, um zu verstehen, warum sich Benutzer bei der Verwendung der Benutzeroberfläche auf bestimmte Weise verhalten, und um neue Probleme mit dem Design aufzudecken. Die Teilnehmer wurden beauftragt, nach Objekten in einer virtuellen Stadt zu suchen, während sie lautes Feedback gaben und wir ihr Verhalten protokollierten. Anschließend füllten sie einen postexperimentellen Fragebogen zu ihren Erfahrungen aus. Wir fanden heraus, dass die qualitativen Themen Kontrolle, Benutzerfreundlichkeit und Erfahrung die Ergebnisse des Fragebogens widerspiegeln und interne Validität gewährleisten. Die quantitativen Messungen ergaben, dass der Joystick wesentlich komfortabler und präziser ist als die Motion-Cueing-Schnittstellen. Das qualitative Feedback und die Interviews zeigten jedoch, dass dies auf die verminderte wahrgenommene Steuerbarkeit und Sicherheit der Motion-Cueing-Schnittstellen zurückzuführen ist. Entwickler dieser Schnittstellen sollten die Verwendung einer Rückenlehne in Betracht ziehen, wenn Benutzer sich nach hinten lehnen und bei Verwendung von HMDs die Geschwindigkeitsregelung für Rotationen vermeiden müssen.

Schlüsselwörter

Aktive Fortbewegung; Motion Cueing; natürliche Benutzeroberfläche; virtuelle Realität; virtuelle Fortbewegung

Indexbegriffe: H.5.1 [Informationsschnittstellen und Präsentation]: Multimedia-Informationssysteme - *Künstlich, erweitert und virtuelle Realitäten*

1. Ich EINLEITUNG

Trotz der jüngsten Fortschritte in der VR-Technologie (Virtual Reality) besteht ein Bedarf an effektiven und benutzerfreundlichen Fortbewegungsschnittstellen [1]. Insbesondere angesichts der zunehmenden Verbreitung erschwinglicher Head-Mounted-Displays (HMDs) wie HTC Vive, Oculus Rift und Samsung GearVR ist die Erforschung verkörperter Navigationssysteme und -techniken angesichts des Interesses der Verbraucher an diesen hochgradig immersiven Erlebnissen von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus wird die Verwendung von VR-Hardware mit mehr verfügbaren Konsumgütern, mehr generierten Inhalten und günstigeren Systemen immer einfacher. Trotz der neuesten HMDs, die mit Tracking-Systemen ausgestattet sind, die kleine Gehbereiche ermöglichen, bewegen sie sich

durch größere virtuelle Umgebungen bleibt ein Problem. Eine allgegenwärtige Herausforderung bei der VR ist außerdem die Reisekrankheit, die zu Reizungen, Angstzuständen und Beschwerden führen kann und letztendlich die Leistung und die Akzeptanz beim Benutzer verringert [2].

Eine mögliche Lösung, um sowohl die Bewegungsfreiheit zu erhöhen als auch die Reisekrankheit zu lindern, ist das benutzergesteuerte Bewegungs-Cueing - kleine, physische Bewegungen, die darauf hinweisen, dass Bewegung vorliegt, ohne die gesamte Strecke tatsächlich zurücklegen zu müssen, z. B. durch Lehnen im Sitzen oder Stehen [3] - [6]. Benutzergesteuertes Motion Cueing kann dazu beitragen, ein einfaches und relativ kostengünstiges Fortbewegungssystem zu erstellen, während der klassische Ansatz der Verwendung computergesteuerter und motorisierter Plattformen große und teure Setups erfordert, um Bewegungen zu erzeugen, die der realen Bewegung ähneln. Darüber hinaus können Schnittstellen, die benutzergesteuertes Motion Cueing verwenden, weniger gefährlich und technisch komplex sein als große motorisierte Plattformen, für die häufig Sicherheitsgurte erforderlich sind [7]. [8] weil sie einfache Wahrnehmungstäuschungen verwenden, anstatt Benutzer physisch zu bewegen, um ihnen das Gefühl von Bewegung zu geben. Zum Beispiel entwickelten Beckhaus und Riecke beide sitzende Schnittstellen mit aktivem Bewegungs-Cueing, damit Benutzer in 3D-Umgebungen navigieren können, ohne den Platzbedarf eines größeren physischen Systems oder wenn das Gehen nicht möglich war [9] - [12].

Unser Ziel ist es, fünf verschiedene Fortbewegungsschnittstellen zu evaluieren, um die wichtigsten Faktoren für die Verbesserung der bodengestützten Fortbewegung in VR besser zu verstehen und damit das Design flexibler Schnittstellenparadigmen zur Unterstützung der natürlichen räumlichen Orientierung und Navigation des Menschen in einer Vielzahl von Szenarien zu unterstützen sowohl für den professionellen Gebrauch als auch für Laien. Wir verwenden qualitative Methoden der halbstrukturierten Befragung und Beobachtung, um das Verständnis unseres quantitativen Fragebogens zu ergänzen und zu vertiefen. Durch das Sammeln und Analysieren der vom Benutzer selbst gemeldeten Erfahrungen können wir Themen und einen umfangreicher Datensatz generieren, der Einblick in relevante Faktoren gibt, die die bodengestützte Fortbewegung beeinflussen, und letztendlich zukünftige Entwurfssitzungen steuert. Dies ist wichtig, da in vielen früheren Schnittstellenstudien nur Verhaltensmaßstäbe zur Bewertung der Benutzerfreundlichkeit verwendet wurden [13]. Aufgrund der Komplexität dieser Systeme sind die Ergebnisse jedoch häufig entweder unbedeutend oder nicht schlüssig [10] [14] [15]. Ein qualitativer Ansatz zur Benutzererfahrung ermöglicht es Forschern, auf einer tieferen Ebene zu verstehen, warum ein bestimmtes Verhalten auftritt und wie die Verhaltensergebnisse durch die Gefühle des Benutzers gegenüber einem Produkt beeinflusst werden können, dh durch die erfahrungsmäßigen, affektiven, bedeutungsvollen und wertvollen Aspekte der Produktnutzung [16].

2. R. BEGEISTERT W. ORK

2.1 Räumliche Aktualisierung und Selbstbewegung

Viele Forscher [17] - [20] argumentieren, dass die Wahrnehmungs- und Leistungsunterschiede zwischen realer und virtueller Bewegung auf das Fehlen physischer Fortbewegungshinweise wie vestibulärer und propriozeptiver / kinästhetischer Hinweise zurückzuführen sind. Diese Hinweise ermöglichen eine räumliche Aktualisierung - den weitgehend automatisierten kognitiven Prozess, der die räumliche Beziehung zwischen einer Person und ihrer Umgebung halbautomatisch berechnet, wenn sie sich basierend darauf bewegt

* E-Mail: akitson@sfu.ca
** E-Mail: hashimia@sfu.ca
*** E-Mail: erstepan@sfu.ca

† E-Mail: ernst.kruijff@h-brs.de
‡ E-Mail: ber1@sfu.ca

Wahrnehmungsinformationen über ihre eigenen Bewegungen [17] - [20]. Schnittstellen, die räumliche Aktualisierung verwenden, auch bekannt als *physische Navigationsschnittstellen*, Es wurde gezeigt, dass sie die Benutzerfreundlichkeit und räumliche Orientierung verbessern [21] - [23]. In Bezug auf die Selbstbewegung stellten Forscher, die die Integration von visuellen und vestibulären sensorischen Hinweisen untersuchten, fest, dass visuelle und nicht visuelle Hinweise für sich allein ausreichend sind, aber zusammen die Selbstbewegung stärker signalisieren [24] [25]. Darüber hinaus stellten die Forscher fest, dass vestibuläre und propriozeptive Signale eng miteinander verbunden waren, wobei die Wechselwirkung zwischen Bewegungserkennung und Richtungsänderungsänderung eine Schlüsselrolle bei der Bewegungswahrnehmung spielte [26] - [28]. Es wurde auch festgestellt, dass akustische Hinweise, insbesondere bei Annäherung und Rückzug von Schallobjekten [29] [30], sowie taktile und biomechanische Hinweise, die in einem Matrixmuster um den Oberkörper angeordnet sind [31], Selbstbewegungillusionen stimulieren.

2.2 Motion Cueing

Motion Cueing wurde häufig für Fahr- und Flugsimulationen [32] [33] sowie zur Steigerung des Selbstbewegungs- oder Vektionsgefühls des Benutzers [6] [11] [12] [34] verwendet. Motion Cueing wurde ebenfalls umfassend untersucht und zeigt, dass es die allgemeine Benutzerfreundlichkeit und Benutzererfahrung verbessern kann [21] - [23], die räumliche Wahrnehmung und Orientierung verbessern [22] und die Reisekrankheit reduzieren kann [35]. Harris und Kollegen [34] stellten fest, dass passive physische Bewegung, dh inaktiv bleibt, während die Simulation den Benutzer bewegt, ein verstärktes Bewegungsgefühl hervorruft, aber auch andere Hinweise dominiert; und sie fanden heraus, dass eine vollständige Übereinstimmung zwischen visuellen und vestibulären Hinweisen nicht erforderlich war, um die Selbstbewegung zu induzieren. In einer anderen Studie [12] wurde ein modifizierter Rollstuhl mit Krafrückmeldung, bei dem Benutzer den Rollstuhl leicht bewegen, um eine geschwindigkeitsgesteuerte virtuelle Bewegung einzuleiten, zeigten eine deutliche Verbesserung der wahrgenommenen Selbstbewegung im Gegensatz zu einer Maus oder einem Joystick. Groen und Bles [36] variierten systematisch die Tonhöhenamplitude, um die minimale und maximale Neigungsamplitude zu bestimmen, die zur Erzeugung einer linearen Selbstbewegung erforderlich ist, und stellten fest, dass die Simulation der linearen Selbstbewegung mit der Anwendung der Ganzkörperneigung realistischer war.

2.3 Leaning Based Interfaces

Jüngste Entwicklungen bei 3D-Navigationsoberflächen haben begonnen, die Kraft körperzentrierter physikalischer Signale zu nutzen [3] - [5], [11], [37], [38]. Beckhaus und Kollegen [5] entwarfen eine stuhlbasierte Schnittstelle namens ChairIO, eine stuhlbasierte Computerschnittstelle, die 3D-Bewegungen unterstützt - sowohl in Richtung als auch in Rotation. ChairIO basiert auf einem handelsüblichen Hocker, dem Swopper™. ChairIO ermöglicht die Steuerung entlang vier Achsen: nach links / rechts kippen, nach vorne / hinten kippen, nach oben / unten bewegen und nach links / rechts drehen. Um ChairIO zu bedienen, setzen sich Benutzer auf das Gerät und verlagern ihr Körpergewicht, um den Stuhl in eine beliebige Richtung zu kippen und zu drehen. Diese physische Bewegung wird auf die Blickwinkel- / Richtungsbewegung in der virtuellen Umgebung abgebildet. Benutzer haben festgestellt, dass ChairIO bei Navigationsaufgaben erfolgreich ist, eine schnelle Lernkurve hat, Spaß macht und natürlich zu bedienen ist. Eine andere von De Haan und Kollegen [37] entwickelte Motion-Cueing-Schnittstelle verwendete ein Wii Balance Board™ als Virtual-Reality-Navigationseingabegerät, bei dem sich Benutzer nach vorne / hinten und seitwärts nach links / rechts lehnen, um sich in diese Richtung zu bewegen, und auf Zehen und Fersen der gegenüberliegenden Füße drücken, um sich zu drehen. Sie fanden das Wii Balance Board™ für die Navigation als kontinuierliches Eingabegerät geeignet sein. LaViola und Kollegen verfolgten einen ähnlichen Ansatz und entwickelten eine Benutzeroberfläche, bei der sich Benutzer an der Taille zur Seite lehnen können, um sich für eine kleine bis mittlere Strecke in diese Richtung zu bewegen. Diese wurde mit einer Fuß-Gesten-Schnittstelle kombiniert, um größere Entfernungen zurückzulegen [39]. .

Kruifjff und Kollegen [38] verwendeten einen hochauflösenden Neigungssensor, um den Neigungswinkel des Benutzers ihres Oberkörpers im Sitzen zu messen, und stellten fest, dass statisches Neigen, dh eine konstante Neigung des Oberkörpers nach vorne, das Gefühl der Selbstbewegung erhöhte.

Geschwindigkeit, aber nicht Vektion an sich. Das dynamische Lehnen im Sitzen mithilfe einer „menschlichen Joystick“-Metapher verbesserte jedoch die lineare Vorwärtsrichtung sowie die Beteiligung, das Engagement und den Genuss des Benutzers im Vergleich zu einer Joystick-Steuerung. Das passive Kippen sitzender Benutzer in einem Simulator mit beweglicher Basis kann auch die Wahrnehmung von Selbstbewegungen verbessern [36]. Es wurde auch gezeigt, dass aktives Lehnen beim Stehen auf einer Kraftplatte (Wii-Balance-Board) die Selbstbewegungswahrnehmung für lineare und krummlinige Pfade verbessert, obwohl die Füße der Teilnehmer stationär bleiben [6]. Zielasko und Kollegen [40] entwickelten und bewerteten fünf verschiedene freihändige Navigationsmethoden im Sitzen und stellten fest, dass eine auf Neigung basierende Metapher in Kombination mit einem Gaspedal am besten für die Navigation in einem großen 3D-Diagramm geeignet ist. In einer anderen Studie verwendeten Riecke und Feureissen [11] einen modifizierten Gyroxus-Gaming-Stuhl, wo nach vorne und zur Seite gelehnt simulierte Übersetzungen und Rotationen respektvoll gesteuert wurden. Gyroxus ist ein eigenständiger Gaming-Stuhl, auf dem Benutzer mit ausgestreckten Beinen in einem Plastikstuhl sitzen und einen Joystick zwischen den Beinen haben. Beim Vergleich der aktiven Fortbewegung mit der passiven Fortbewegung stellten diese Forscher fest, dass die Intensität der Selbstbewegung mit der aktiven Fortbewegung zunahm, obwohl die einsetzenden Latzen der Selbstbewegung zunahmen. In einer anderen Studie stellten Forscher, die eine Benutzeroberfläche mit Bewegungssteuerung (dh NaviChair, ähnlich dem ChairIO [10], [41]) verwendeten, fest, dass Benutzer Probleme mit dem Fehlen einer Rückenlehne hatten, keine klar definierte Vorwärtsrichtung, Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeit und Finden des mittleren Nullpunkts des Stuhls, um die Bewegung zu stoppen. Gyroxus ist ein eigenständiger Gaming-Stuhl, auf dem Benutzer mit ausgestreckten Beinen in einem Plastikstuhl sitzen und einen Joystick zwischen den Beinen haben. Beim Vergleich der aktiven Fortbewegung mit der passiven Fortbewegung stellten diese Forscher fest, dass die Intensität der Selbstbewegung mit der aktiven Fortbewegung zunahm, obwohl die einsetzenden Latzen der Selbstbewegung zunahmen. In einer anderen Studie stellten Forscher, die eine Benutzeroberfläche mit Bewegungssteuerung (dh NaviChair, ähnlich dem ChairIO [10], [41]) verwendeten, fest, dass Benutzer Probleme mit dem Fehlen einer Rückenlehne hatten, keine klar definierte Vorwärtsrichtung, Vorwärts- und Rückwärtsgeschwindigkeit und Finden des mittleren Nullpunkts des Stuhls, um die Bewegung zu stoppen.

2.4 Unser Designansatz

Um die oben genannten Designprobleme von NaviChair und ChairIO zu lösen, haben wir eine ähnliche Benutzeroberfläche evaluiert, dh MuvMan, einen größeren Hocker mit einer leichten Rückenlehne und einer klareren Neigung und Neigung des Kippens (siehe **Figur 2**). Wir haben auch beschlossen, seitliche (dh strafe) Bewegungen auszuschließen, da ein Pilottest gezeigt hat, dass diese Art von Bewegung in Verbindung mit den anderen Freiheitsgraden verwirrend sein kann und weniger genau ist. Darüber hinaus unterstützt unsere andere stuhlbasierte Benutzeroberfläche, der Drehstuhl, kein Strafing. Daher haben wir die Freiheitsgrade auch für die anderen Schnittstellen reduziert, um einen fairen Vergleich zwischen allen fünf Schnittstellen zu ermöglichen. Der Drehstuhl ist jedoch günstiger und auf Komfort und Langlebigkeit ausgelegt. Wir haben eine kopfgesteuerte Navigationsschnittstelle hinzugefügt, um zu prüfen, ob diese Art von kopfbasierter und nicht torsobasierter Fortbewegungsschnittstelle realisierbar ist. Hier wird die Kopf- oder HMD-Ausrichtung des Benutzers verfolgt. Benutzer neigen ihren Kopf nach vorne / hinten und drehen ihren Kopf nach links / rechts, um sich in die entsprechenden Richtungen zu bewegen. Die Vertrautheit der Joystick-Oberfläche kann sich auf die Ergebnisse direkter Vergleiche zwischen Schnittstellen auswirken. Wir beabsichtigen jedoch, den Joystick als „Goldstandard“ zu verwenden, da die Benutzer damit vertraut sind. Daher werden wir die anderen vier Schnittstellen mit dem Joystick vergleichen und diese Einschränkung bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen.

Wir haben Motion Cueing für die Rotation verwendet (dh Geschwindigkeitssteuerung, ähnlich einem Joystick), im Gegensatz zur Positionssteuerung aus mehreren Gründen: Erstens, um unsere Schnittstellen zu vergleichen und auf stationäre Bildschirme und Displays anzuwenden, die immer noch weitaus häufiger verwendet werden als HMDs und Mehrbenutzeranwendungen zulassen; Zweitens, um einen einfachen Aufbau zu entwerfen, ohne dass sich Kabel nach längeren Umdrehungen verwickeln. Drittens, um ein einfacheres Verfolgungssystem zu implementieren, das mit Geschwindigkeitsregelung arbeitet - im Gegensatz zum Oculus Rift DK2, der keine Kopfverfolgung für 360 °-Drehungen unterstützt.

3. S. STUDY M. ÄTHODIK

Das Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, welche Faktoren für die bodengestützte VR-Fortbewegung am relevantesten sind, indem fünf verschiedene Arten von kostengünstigen Fortbewegungsschnittstellen in Bezug auf den Benutzer bewertet werden

Erfahrung (dh Komfort, Eintauchen, Reisekrankheit, Kontrollierbarkeit, Benutzerfreundlichkeit, Langlebigkeit der Verwendung, Selbstbewegung und allgemeiner Genuss) und Feedback für die nächste Phase der Entwurfsiterationen. Zu diesem Zweck haben wir uns stark auf qualitative und introspektive Daten konzentriert, da wir ein besseres Verständnis der spezifischen Faktoren anstreben, die die Benutzerfreundlichkeit und das Benutzererlebnis für VR-Fortbewegungsschnittstellen beeinflussen - ein Aspekt, den viele der eher verhaltensbezogenen und quantitativen Studien manchmal vernachlässigen. Diese Arbeit zielte darauf ab zu bestimmen, welche Arten von Fortbewegungsschnittstellen für die bodengestützte Navigation in VR geeignet sind, und alle Entwurfsprobleme mit den Schnittstellen zu verstehen, bevor mit Verhaltensaufgaben fortgefahren wird.

3.1 Hypothesen

Basierend auf früheren Studien stellten wir die Hypothese auf, dass die Motion-Cueing-Schnittstellen größere Vorteile gegenüber einer Nicht-Motion-Cueing-Schnittstelle wie einem Joystick für Illusionen von Selbstbewegung [6], [11], räumlicher Wahrnehmung und Orientierung [3] bieten würden. [4], Freude und Engagement [3], [4], [6] sowie Eintauchen und Präsenz [3], [10], [41]. Umgekehrt haben wir vorausgesagt, dass die Joystick-Steuerung eine höhere Genauigkeit, Steuerbarkeit und Benutzerfreundlichkeit bietet und weniger ermüdend ist als die Motion-Cueing-Schnittstellen [3] [6] [10] [41]. Diese früheren Studien lieferten jedoch keinen umfassenden Bericht darüber, warum der Joystick in diesen Kategorien eine bessere Leistung als Motion-Cueing-Schnittstellen erbrachte. Daher versuchten wir, durch qualitatives Feedback, Verhaltensbeobachtungen und halbstrukturierte postexperimentelle Interviews Einblicke zu gewinnen .

3.2 Teilnehmer

Wir haben 16 (sechs weibliche) Doktoranden aus den Fakultäten für Ingenieurwissenschaften und interaktive Kunst und Technologie mit einem Durchschnittsalter von 26,7 Jahren rekrutiert ($SD = 2,83$). Diese Teilnehmer hatten bereits Erfahrung mit VR, aber keine Erfahrung mit Motion-Cueing-Schnittstellen. Die Teilnehmer hatten ein normales oder auf normales Sehvermögen korrigiertes Sehvermögen und wurden auf das potenzielle Risiko einer Reisekrankheit aufmerksam gemacht. Die lokale Ethikkommission genehmigte diese Forschung.

3.3 Umwelt

Die VE war eine 19th Jahrhundert Stadt aus dem Unity Asset Store wie in dargestellt **Abbildung 1**, und wurde modifiziert, damit die Teilnehmer nicht in engen Ecken oder Gassen stecken bleiben. Fünf rote Kugeln wurden für die Teilnehmer in etwa gleichem Abstand voneinander platziert und als Anreiz verwendet, sich in der Umgebung zu bewegen.

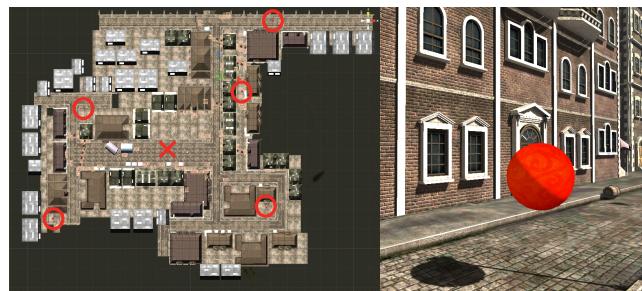


Abbildung 1: 19th Jahrhundertstadt in Einheit gebaut. Die Teilnehmer haben die Aufgabe, fünf rote Kugeln mithilfe von fünf verschiedenen Fortbewegungsschnittstellen zu finden, eine Kugel für jede Schnittstelle. Links: Ansicht von oben nach unten, wobei Kreise die Positionen der Kugel darstellen und das X der Ausgangspunkt ist.

3.4 Versuchsaufbau, Stimulus, Apparat

In allen fünf Fortbewegungsschnittstellen (siehe **Figur 2**), die simulierte Bewegung wurde auf zwei Freiheitsgrade beschränkt, um Vergleichbarkeit zu ermöglichen: Gierrotation und Vorwärts-/ Rückwärtsbewegung. Die Teilnehmer konnten sich gleichzeitig drehen und vorwärts / rückwärts bewegen, was zu krummlinigen Pfaden führte. Sowohl bei Rotationen als auch bei Translationen wurde die Geschwindigkeitsregelung (Geschwindigkeitssteuerung) verwendet, wie dies bei Joysticks üblich ist.

Grenzflächen und simulierte Geschwindigkeiten waren linear mit den Auslenkungen der jeweiligen Grenzfläche verbunden. Das heißt, je weiter der Teilnehmer die Schnittstelle vom Nullpunkt (dh dem Punkt in der Mitte der Schnittstelle, an dem keine Bewegung in der x- oder y-Ebene stattfindet) in Vorwärts- / Rückwärtsrichtung wegbewegt hat, desto schneller sind sie nach oben gefahren bis zu einer Höchstgeschwindigkeit von 1 m / s. Es wurde ein „Nullbereich“ pilotiert, aber es gab Probleme, zu wissen, wo sich das Zentrum befand, und wir waren durch die Einschränkungen des Sichtfelds des TrackIR: PRO-Sensors eingeschränkt. Je weiter der Teilnehmer die Schnittstelle für die Drehung von der Standardausrichtung nach links / rechts abwendet, desto schneller dreht er sich bis zu einer maximalen Drehzahl von 15 ° pro Sekunde. Diese Werte wurden basierend auf Pilotversuchen ausgewählt, die über Schnittstellen mit den gleichen minimalen und maximalen Geschwindigkeiten vereinheitlicht wurden.

Wir haben einen Ansatz mit gemischten Methoden verwendet, um jede Fortbewegungsschnittstelle zu bewerten. Wir haben uns entschieden, qualitative Daten durch halbstrukturierte Interviews und Beobachtungen zu sammeln, um eine „dicke Beschreibung“ der Benutzererfahrungen zu erhalten - eine validierte Methode, die nicht nur das menschliche Verhalten, sondern auch seinen Kontext betrachtet und den Ergebnissen externe Validität verleiht [42]. - [44]. Wir haben ein Innersubjekt-Design mit fünf experimentellen Bedingungen angewendet, die durch die fünf Fortbewegungsschnittstellen definiert sind (siehe **Abbildung 2**): (1) **Joystick** 1 - Xbox-Controller, während der Teilnehmer auf einem vierbeinigen Bürostuhl sitzt, der sich nicht dreht (im Video nicht abgebildet). Da der Joystick der am weitesten verbreitete und bekannteste Controller ist, haben wir diese Schnittstelle als Steuerelement oder „Goldstandard“ verwendet, um sie mit den anderen Schnittstellen zu vergleichen, auch wenn ihre Vertrautheit die Ergebnisse beeinflussen könnte.

(2) **NaviChair** 2 - ein benutzerbetriebener Hocker namens Swopper™, dessen Sitz ist auf Federn montiert. Dieser Stuhl fungiert als Eingabegerät, bei dem der Benutzer den Sitz vorwärts / rückwärts kippt, indem er sein Gewicht verlagert, um sich in die gewünschte Richtung zu bewegen. Der Benutzer steuert simulierte Gierdrehungen, indem er den Stuhl leicht nach links / rechts von der Standardvorwärtsrichtung weg dreht. Der Grad der Stuhlnieigung wurde unter Verwendung einer Geschwindigkeits- (Geschwindigkeits-) Steuerung auf die simulierte Bewegung abgebildet. Das heißt, die simulierte Drehzahl war proportional zum Ausmaß der Stuhldrehung weg von der Standardvorwärtsausrichtung. Diese Schnittstelle wurde zuerst auf ChairIO [6] eingeführt, und wir haben sie ausgewählt, um sie zu replizieren und mit einer anderen Studie zu vergleichen, in der NaviChair verwendet wurde [10]. ((3) **MuvMan** 3 - Ein anderer benutzerbetriebener Hockerstuhl (ähnlich wie NaviChair), mit der Ausnahme, dass der Stuhl selbst steifer ist, eine kleine Rückenlehne hat und standardmäßig nach vorne geneigt ist, sodass der Benutzer aufrecht sitzen und die Bewegung des Stuhls mit weniger Bewegung steuern kann. MuvMan wurde im Modus mit niedriger Höhe anstelle des normalen Modus mit hohem Stuhl positioniert, da sich die Teilnehmer der Pilotversuche im Modus mit hohem Stuhl nicht sicher fühlten und weniger Kontrolle hatten, wenn der Stuhlsitz nach hinten gedrückt wurde. Obwohl es die gleiche Höhe wie das NaviChair hat, gibt es einen grundlegenden Unterschied in der Präzision und Laufruhe des MuvMan und das allgemeine Gefühl des MuvMan, von dem wir glauben, dass es diese beiden Stühle immer noch als unterschiedliche Schnittstellen für die Fortbewegung rechtfertigt, die untersucht werden sollten. Wir haben uns für diese Schnittstelle entschieden, weil sie das Problem der Steuerbarkeit der präzisen Bewegung zu lösen schien, das mit dem NaviChair gefunden wurde [10]. ((4) **Head-Directed Interface** 4 - Verwenden der Kopfbewegung des am Kopf montierten Displays (HMD) zur Steuerung

1 Video für den Joystick (<https://youtu.be/fjYgVeQNo4k>)

2 Video für NaviChair (<https://youtu.be/dZ7w9v4w0nQ>)

3 Video für MuvMan (<https://youtu.be/msn6uc5IU98>)

4 Video für Head-Directed (<https://youtu.be/vDBM1jGMg3Y>)



Abbildung 2: Die fünf in dieser Benutzerstudie getesteten Schnittstellen. Von links nach rechts: Joystick, NaviChair, MuvMan, Head-Directed und Swivel Chair.

Bewegung, dh Kopf nach vorne / hinten neigen, um vorwärts / rückwärts zu verschieben, und Kopf um die Gierachse drehen, um sich zu drehen. Wir haben diese Schnittstelle gewählt, um eine Alternative zur torsobasierten Fortbewegung zu untersuchen, da Benutzer in früheren Studien berichteten, dass zwischen Kopf- und Rumpfrichtung eine desorientierende Nichtübereinstimmung bestand. ((5) **Drehstuhl** 5 - Ein alltäglicher Bürostuhl, bei dem Benutzer den Stuhl nach vorne / hinten kippen, um sich in diese Richtung zu bewegen, und den Stuhl drehen, um ihn zu drehen. Wir haben uns für diese Schnittstelle entschieden, weil sie sehr gut zugänglich ist, dh bereits am Arbeitsplatz, günstiger als NaviChair und MuvMan ist und sich mit einer hohen Rückenlehne sehr sicher und komfortabel anfühlt.

Die Teilnehmer betrachteten die virtuelle Umgebung mit dem Oculus Rift DK2, der eine Auflösung von 960 x 1080 pro Auge, eine Aktualisierungs- und feste Aktualisierungsrate von 75 Hz und ein diagonales Sichtfeld von 100 ° (nominal) aufweist. Für den NaviChair-, MuvMan- und Drehstuhl verwendeten wir ein TrackIR 4: PRO-Tracking-System, ein kostengünstiges und genaues optisches Bewegungsverfolgungssystem, um zwei Freiheitsgrade um einen zentralen Drehpunkt an der Basis jeder Stuhlschnittstelle zu messen. Änderungen des Gierens und der Steigung wurden vom Sensor an der Basis der Schnittstelle über einen 3-Punkt-Reflektor abgelesen, der direkt über dem Stuhlsitz angebracht war. Für den Joystick wurde die Bewegung mit einem Xbox-Controller verfolgt. Die kopfgerichtete Schnittstelle wurde mit den im HMD eingebauten Trägheitssensoren verfolgt.

3.5 Vorgehensweise

Vor der Studie wurden die Teilnehmer über die Verfahren informiert und unterzeichneten eine Einverständniserklärung. Der Experimentator demonstrierte dann, wie man das HMD anlegt und wie man die erste Schnittstelle bedient. Jeder Teilnehmer verwendete alle fünf verschiedenen Schnittstellen in fünf separaten Blöcken, wobei die Reihenfolge der Schnittstellen pseudoausgeglichen war, um Lern- oder Übertragungseffekte zu berücksichtigen. Der Experimentator demonstrierte, wie jede Schnittstelle zwischen Bedingungen verwendet wird. Die Teilnehmer saßen dann auf der ersten von fünf verschiedenen Schnittstellen und wurden über die Aufgabe informiert, die sie mit dem HMD zu erfüllen hatten. Vor dem Auffinden der Kugel hatten die Teilnehmer jedoch 1-2 Minuten Zeit, die Benutzeroberfläche zu testen, um sich mit den Steuerelementen vertraut zu machen. Die Aufgabe der Teilnehmer war es, im 19. eine rote Kugel zu finden Jahrhundert Stadt. Diese Kugeln wurden an verschiedenen Stellen platziert, die von der Startposition des Benutzers gleich weit entfernt waren. Während der Navigation durch die virtuelle Umgebung wurden die Teilnehmer angewiesen, lautes Feedback zu geben. Das heißt, die Teilnehmer wurden gebeten zu äußern, was sie erlebten, was sie von der Schnittstelle hielten und wie die Schnittstelle im Vergleich zu den anderen Schnittstellen war. Die Teilnehmer wurden ferner mit Fragen zur Kontrollierbarkeit und Bewegung aufgefordert. Der Experimentator versuchte jedoch, die Teilnehmer zuzulassen

⁵ Video für Drehstuhl (<https://youtu.be/xEhYU8JcDI8>)

der Raum, um ohne Aufforderung zu antworten, um ihre Antworten nicht zu verzerrn. Nachdem wir die Navigationsaufgabe abgeschlossen und das HMD entfernt hatten, starteten wir ein offenes Interview mit der Frage „Was denkst du?“. und transkribierte ihre Antworten. Offene Fragen in halbstrukturierten Interviews sollen eine vollständige, aussagekräftige Antwort mit den eigenen Worten des Teilnehmers fördern, ohne dass der Experimentator seine eigenen Überzeugungen oder Vorurteile auferlegt [45]. Weitere Aufforderungen wurden gegeben, wenn der Teilnehmer kein Feedback gab. Diese vom Experimentator gemachten Interviewdaten und Verhaltensbeobachtungen wurden vom Experimentator im Handumdrehen über ein Word-Dokument in Text transkribiert und später mit NVivo durch offene und axiale Codierung analysiert, wobei Kernkonzepte, Themen und Ideen identifiziert wurden.

Anschließend füllten die Teilnehmer einen zehnminütigen Online-Fragebogen aus, um Folgendes für jede Benutzeroberfläche zu bewerten: Komfort, Benutzerfreundlichkeit, Eintauchen, präzise Steuerung, räumliche Ausrichtung, Präsenz, Freude, Probleme, Langlebigkeit der Verwendung, Gefühl der Selbstbewegung, allgemeine Benutzerfreundlichkeit Reisekrankheit und Präferenzenreihenfolge der Schnittstellen. Der Online-Fragebogen verwendete eine 11-Punkte-Likert-Skala, in der die Teilnehmer gebeten wurden, jede Frage auf einer Skala von -5 = stimme überhaupt nicht zu, 0 = stimme weder zu noch nicht zu bis 5 = stimme voll zu. Basierend auf einigen Usability-Problemen, die in früheren Studien unter Verwendung ähnlicher Motion-Cueing-Schnittstellen (z. B. [11], [41], [46]) berichtet wurden, haben wir einen detaillierteren Fragebogen entworfen, um zu bewerten, wie die verschiedenen vorgeschlagenen Motion-Cueing-Designs im Vergleich zu bestimmten Aspekten der Usability sind und Benutzererfahrung, und wie sie sich mit der bekannten Joystick-Oberfläche vergleichen lassen. Die Gültigkeit dieses Fragebogens wurde nicht bewertet. Die Gesamtzeit zum Abschluss der Studie betrug ungefähr eine Stunde.

4. R. ERGEBNISSE UND D. DISCUSSION

4.1 Qualitative Daten

Zunächst haben zwei Forscher die transkribierten Interviews und Beobachtungen unabhängig voneinander offen codiert. Als nächstes codierten die Forscher die offenen Themen axial und es entstanden drei große Kategorien: Kontrolle, Benutzerfreundlichkeit und Benutzererfahrung (siehe Abbildung 3). Die Unterkategorien unter **Steuerung** waren Steuerbarkeit, Rotation, gleichzeitiges Schauen und Gehen, Nullpunkt, Geschwindigkeit und Empfindlichkeit sowie Rückwärts und Straf (siehe 4.1.1 für Definitionen). Die Unterkategorien unter **Benutzerfreundlichkeit** waren Vergleich mit anderen Schnittstellen, Intuitivität und Natürlichkeit, Komfort und Stabilität, Vertrautheit und physikalische Eigenschaften. Die Unterkategorien unter **Benutzererfahrung** wurden Schwindel, Übelkeit und Reisekrankheit; experimentell; virtuelle Umgebung. Die beiden Forscher verglichen Codes und gruppierten die offenen Codes neu, um eine höhere Reihenfolge der Themen zu schaffen. Nachdem die Kategorien vereinbart worden waren, codierten die Forscher die Daten selektiv, indem sie die Anführungszeichen fanden, die die erzeugten Axialcodes (Kategorien) am besten veranschaulichten. Diese drei Hauptkategorien (dh Kontrolle,

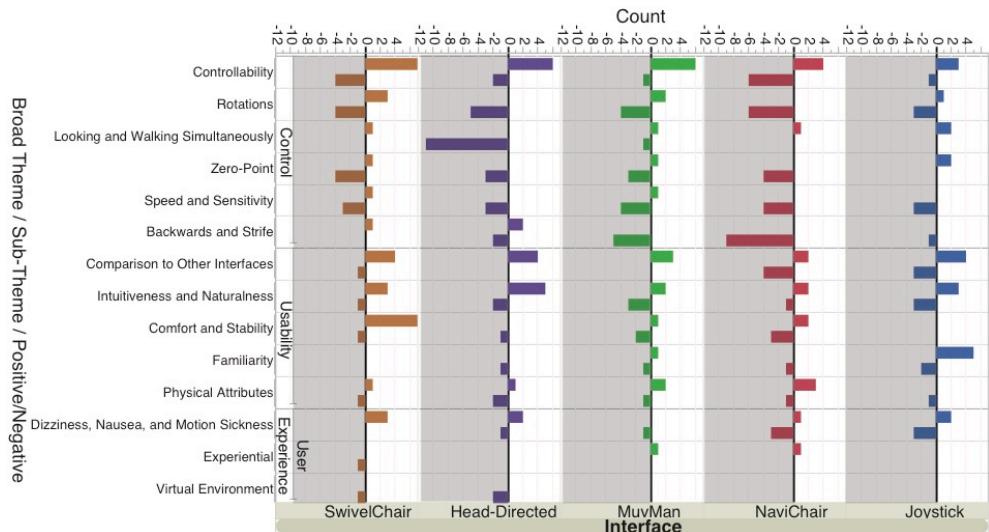


Abbildung 3: Visuelle Darstellung der qualitativen Themen und Unterthemen, wobei angegeben wird, wie oft jede Schnittstelle für ein bestimmtes Thema entweder positiv (positive Werte) oder negativ (grau schattiert, als negative Werte dargestellt) codiert wurde.

Benutzerfreundlichkeit und Benutzererfahrung) und ihre Unterthemen werden unten diskutiert und in zusammengefasst **Figur 3**. Teilnehmerzitate sind repräsentative Aussagen, die auf den Notizen der Experimentatoren basieren und dazu dienen, die Gültigkeit der Ergebnisse zu erhöhen [45]. "Px" bezeichnet die einem Angebot zugeordnete Teilnehmernummer, dh P1 bedeutet Teilnehmer

1. Direkte Anführungszeichen werden verwendet, um die Gültigkeit zu erhöhen und die Erfahrungen der Teilnehmer genauer darzustellen, ohne dass Forscher ihre eigenen Vorurteile auferlegen. Bei der Berichterstattung über die verschiedenen Schnittstellen beziehen wir uns auf die Bewertung der Schnittstellen durch den Teilnehmer und nicht auf die Schnittstellen selbst.

4.1.1 Kontrolle

Kontrollierbarkeit: Die Teilnehmer berichteten, dass die Joystick- und MuvMan-Schnittstellen insgesamt eine gute Steuerbarkeit aufwiesen, weil sie "Hatte keine lose Kontrolle" [P9]. Die Schnittstellen NaviChair, Head-Directed und Swivel Chair waren alle schwer zu steuern, da Sie sind "Nicht sehr genau" [P3 & P14] war es "Schwer zu kontrollierende Geschwindigkeit" [P15] und es war „Schwer zu kontrollierende Bewegung in Richtung Ziel, auf das Sie abgezielt haben“ [P5]. Motion-Cueing-Schnittstellen mit geringerer Steuerbarkeit über den Joystick stimmen mit der früheren Literatur überein [3] [10] [41].

Drehung: Die Teilnehmer berichteten, dass die Rotation des Joysticks war "zu schnell" [P2], obwohl die Drehzahl mit einer Geschwindigkeit von 15 ° pro Sekunde bereits recht langsam war - ein Wert, der aus Pilotversuchen ermittelt wurde. Die Schnittstellen NaviChair, Head-Directed und MuvMan waren "nicht sehr präzise oder genau in ihrer Rotation" [P5, P6, P7, P8, P13 & P15]. Die Head-Directed-Schnittstelle war auch "zu langsam" [P3 & P7]. Bei den stuhlbasierten Schnittstellen berichteten einige Teilnehmer von Verwirrung, wenn sie ihren Körper in eine Richtung und mit einer Geschwindigkeit drehten, die nicht mit ihrer Kopfdrehgeschwindigkeit und -richtung übereinstimmte. Das heißt, es gab eine Nichtübereinstimmung zwischen der wahrgenommenen Rotation und der tatsächlichen Rotation.

Gleichzeitiges Schauen und Gehen: Alle Teilnehmer berichteten, dass die Head-Directed-Oberfläche ein Problem hatte, bei dem sie sich nicht gleichzeitig bewegen und umsehen konnten.

Null Punkte: Die Teilnehmer hatten Probleme mit allen Schnittstellen außer dem Joystick, als sie den Nullpunkt fanden, dh die Mittelposition des Stuhls, der keiner Bewegung zugeordnet ist: "Ich kämpfe, weil ich nicht weiß, wo mein Nullpunkt ist, also weiß ich nicht, wie weit ich mich drehen oder bewegen soll" [P14].

Geschwindigkeit und Empfindlichkeit: Bei allen Schnittstellen äußerten die Teilnehmer den Wunsch, schneller zu reisen. Das NaviChair wurde als mehr gemeldet

empfindlicher als die Schnittstellen Swivel Chair, MuvMan und Joystick, obwohl alle Schnittstellen mit denselben Parametern programmiert wurden. Die Teilnehmer haben es gemeldet "Fühlt sich schneller an" [P3 & P15], obwohl alle Geschwindigkeiten mit maximal 1 m / s programmiert wurden. Der MuvMan "Muss sensibler sein" [P3] weil es weniger Bewegungsfreiheit gab.

Rückwärts und Strafe: Es wurde berichtet, dass die Drehstuhlschnittstelle eine einfach zu bedienende Rückwärtsbewegung aufweist. Die Head-Directed-Oberfläche hatte gemischte Rückmeldungen - die Teilnehmer berichteten, dass sie sich komisch anfühlten, aber sie war besser als die MuvMan- oder Joystick-Schnittstellen: „Es ist wie mit einem Hubschrauber, rückwärts zu fliegen. Das ist besser, weil du das Problem nicht wie das andere hast (Kopf-Körper-Konflikt).“ [P7]. Die Teilnehmer mochten es nicht, mit den NaviChair- oder MuvMan-Schnittstellen rückwärts zu gehen, da sie sich instabil anfühlten und mehr Aufwand erforderten. Es gab keine Rückenlehne für das NaviChair und eine sehr kleine Rückenlehne für MuvMan, sodass die Teilnehmer Probleme hatten zu wissen, wie weit sie sich mit dem HMD zurücklehnten. und einige berichteten, besorgt darüber zu sein, rückwärts zu fallen.

4.1.2 Benutzerfreundlichkeit

Vergleich mit anderen Schnittstellen: Die Teilnehmer berichteten am meisten negative Kommentare mit dem NaviChair, gefolgt vom Joystick. Die Head-Directed-Oberfläche hatte die positivsten Kommentare, gefolgt von den Swivel Chair- und MuvMan-Schnittstellen. „Ich mag Stuhlschnittstellen besser, weil sich mein Körper mit meinen virtuellen Bewegungen bewegt.“ [P5].

Intuitivität und Natürlichkeit: Allgemeine Antworten über die Intuitivität und Natürlichkeit der Schnittstellen waren eher gemischt, und bei allen Schnittstellen gaben einige Teilnehmer an, dass sie natürlich und intuitiv waren, und einige Teilnehmer gaben an, dies nicht zu tun. Insgesamt gab es jedoch positivere Kommentare für die Schnittstellen Head-Directed, NaviChair und Swivel Chair:

"Die virtuelle Bewegung [des Drehstuhls] spiegelt die reale Bewegung wider" [P14]; „[Der NaviChair] ist etwas intuitiver als die Schnittstellen von Joystick und Drehstuhl, weil ich meinen Körper nach vorne drücke, um mich vorwärts zu bewegen. [Der MuvMan] fühlt sich nicht wie im richtigen Leben an, weil man sich niemals rückwärts lehnt, wenn man sich rückwärts bewegt.“ [P15].

Komfort und Stabilität: Der Drehstuhl wurde bei weitem als die komfortabelste Schnittstelle eingestuft: „Ich bevorzuge Swivel, weil es bequem ist. Es gibt eine Rückenlehne, damit Sie besser ausbalancieren können. Andere Stühle, von denen ich das Gefühl habe, dass ich herunterfallen“ [P1]. Der MuvMan und

Die NaviChair-Schnittstellen fühlten sich für die Teilnehmer instabil an, da keine große Rückenlehne vorhanden war: „*Es fühlt sich an, als würde ich abfallen, besonders rückwärts. Ich kann nicht sehen, wo ich wirklich in der Außenwelt bin, also mache ich mir Sorgen, dass ich fallen könnte.*“ [P5].

Vertrautheit: Der Joystick war allen Teilnehmern vertraut, so dass sie sich leicht bewegen konnten. Die Teilnehmer hatten die Erwartung, dass der Joystick die gleichen Vorteile wie bei beliebten Videospielen haben würde. Die Drehstuhloberfläche ist den Teilnehmern auch bekannt, da sie ein alltäglicher Bürostuhl ist und zum Komfort der Teilnehmer beiträgt. Die anderen Schnittstellen sind für alle Teilnehmer neu.

Physikalische Eigenschaften: Das NaviChair wurde als zu groß und schwer und damit umständlich beschrieben, um den gesamten Stuhl physisch zu bewegen, obwohl die Teilnehmer seine Flexibilität mögen: „*Es ist aktiver als die anderen, weil ich mich mehr bewege*“ [P2]. Die MuvMan-Oberfläche fühlte sich an „Zu groß und instabil“ [P3]. Der Drehstuhl wurde nicht vollständig genutzt, da die Teilnehmer die Geschwindigkeit für die gesamte Dauer des Versuchs maximierten. Daher ist es schwierig, die Steuerbarkeit zu bestätigen.

4.1.3 Erfahrung

Schwindel, Übelkeit und Reisekrankheit: Bewegungskrankheit aufgetreten mit dem Joystick, NaviChair und Drehstuhl:

„*Wenn ich mich nach links / rechts bewege, werde ich ein bisschen krank. Ich versuche meine Augen zu schließen, wenn ich mich drehe, damit mir nicht schlecht wird.*“ [P2]. „*Wenn ich aufhören will, drehe ich mich immer noch und es macht mich schwindelig*“ [P10]. Ein Teilnehmer berichtete über Reisekrankheit mit der MuvMan-Schnittstelle, und es gab keine Berichte über Reisekrankheit mit der Head-Directed-Schnittstelle. Überraschenderweise äußerten zwei Teilnehmer, dass die Head-Directed-Oberfläche sie weniger schwindelig machte: „*Es gibt mir mehr Kontrolle und macht mich weniger schwindelig*“ [P13].

Erfahrung: Insgesamt berichteten die Teilnehmer über positive Erfahrungen mit allen Schnittstellen und beschrieben die Erfahrung als interessant, unterhaltsam und eine neuartige Art, sich zu bewegen: “[Der MuvMan] fühlt sich gut an, als würde ich schweben“ [P12]; „*Es macht Spaß, mit diesem [NaviChair] für kurze Zeit zu interagieren*“ [P5]. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit früherer Literatur, in der festgestellt wurde, dass Motion-Cueing-Schnittstellen ansprechender und unterhaltsamer sind als die Verwendung eines Joysticks [3], [4], [6]. Ein Teilnehmer berichtete, dass die virtuelle Umgebung „*Fühlt sich sehr real an*“ [P14]. Ein negativer Kommentar wurde von [P6] geäußert, der fühlte „*Verwirrt wegen des Unterschieds zwischen natürlicher und virtueller Umgebung. Es ist zuviel für mich*“.

Virtuelle Umgebung: Das VE selbst hatte einige Probleme mit Kollisionen und dem Abstand zum Rendern von Texturen. Die Teilnehmer berichteten, dass „*Das Textur-Rendering war zu eng*“ [P2 & P7] und nahm ihnen das Gefühl, in die virtuelle Welt eingetaucht zu sein. Das Auftreffen auf Kollider zwang den virtuellen Beobachter, von ihnen abzuprallen, was zu einem Gefühl der Orientierungslosigkeit führte. Ein Problem trat bei Pilottests nicht auf.

4.2 Quantitative Daten

Hier präsentieren wir die Ergebnisse der Bewertungen für die Fragebogenelemente, wie in zusammengefasst Abbildungen 4-8. Friedman-Tests wurden durchgeführt, weil Annahmen über keine signifikanten Ausreißer, Normalverteilung und Homogenität der Varianzen verletzt wurden. Die unabhängige Variable war die Schnittstelle und die abhängigen Variablen waren die einzelnen Fragen aus dem Fragebogen (siehe

Unterabschnitt 2.3). Zuerst haben wir jede der fünf Schnittstellen für jedes Fragebogenelement miteinander verglichen und dann einen zweiten Test zwischen zwei Gruppen durchgeführt: den Joystick (dh Nicht-Bewegungs-Cueing) im Vergleich zu den verbleibenden vier Schnittstellen, die zusammen gruppiert sind (dh Bewegungs-Cueing) unter Verwendung wiederholter Messungen Wilcoxon signierte Rangprüfungen (nicht parametrische T-Tests mit wiederholten Messungen).

4.2.1 Komfort

Ein Friedman-Test zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied in der Komfortbewertung zwischen den verschiedenen Schnittstellen, $\chi^2(4) = 11,676, p = .020$, mit einem mittleren Rangkomfortwert von 3,84 für Joystick, 3,47 für Drehstuhl, 2,91 für kopfgesteuert, 2,34 für NaviChair und 2,44 für MuvMan. Eine Post-hoc-Analyse mit von Wilcoxon unterzeichneten Rangprüfungen ergab, dass der Joystick wesentlich komfortabler war als der MuvMan ($Z = -2,024, p = .043$) (siehe Abbildung 4). Beim Vergleich aller Motion-Cueing-Schnittstellen mit dem Joystick ergab ein von Wilcoxon signierter Rangtest mit verwandten Stichproben, dass der Komfort für den Joystick (mittlerer Rangwert = 8,17) höher bewertet wurde als für Motion-Cueing-Schnittstellen (mittlerer Rangwert = 8,58). $Z = -2,250, p = 0,024$ (siehe Abbildung 4). Diese Ergebnisse ahmen die qualitativen Ergebnisse nach. Der Head-Directed, der Drehstuhl und der Joystick verwendeten alle denselben Bürostuhl, so dass es vielleicht nicht verwunderlich ist, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen ihnen für den Komfort gab. Viele Teilnehmer gaben an, dass der Joystick vertrauter ist, was möglicherweise zu seinem zusätzlichen Komfort beigetragen hat. Den qualitativen Antworten zufolge schien die Rückenlehne des Bürostuhls einen wichtigen Beitrag zum Komfortniveau der Schnittstellen zu leisten. Sowohl die NaviChair- als auch die MuvMan-Benutzeroberfläche verfügen nicht über eine funktionierende Rückenlehne, was die Teilnehmer dazu zwingt, ihre Bewegung und Haltung aktiv zu steuern. Studien, die sich mit der Neigung des Oberkörpers befasst haben, haben gezeigt, dass dieses Engagement hilfreich sein kann, um die Wahrnehmung von Selbstbewegungen zu erleichtern [36] [38]. Zukünftige Studien werden die Auswirkungen des Lehnens untersuchen.

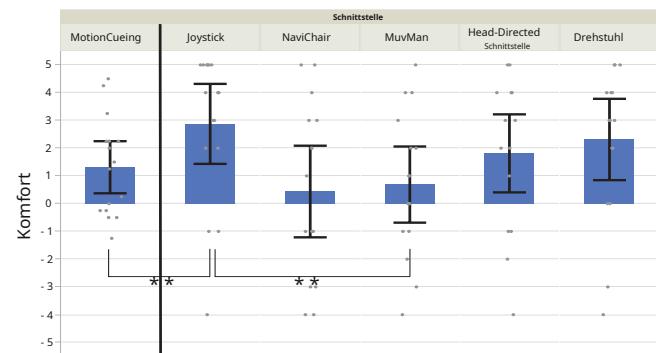


Abbildung 4: Auf einer Skala von -5 (absolut nicht einverstanden) bis 5 (absolut einverstanden) bewerteten die Teilnehmer „Die Verwendung der [Schnittstelle] war komfortabel“. Motion Cueing repräsentiert alle kombinierten Motion Cueing Interfaces (MCIs). Fehlerbalken wurden unter Verwendung von 95%-Konfidenzintervallen des Mittelwerts erstellt, und Datenpunkte repräsentieren jeden Teilnehmer (wahr für die Abbildungen 4-10).

4.2.2 Benutzerfreundlichkeit

Es gab keine signifikanten Unterschiede in der gemeldeten Benutzerfreundlichkeit zwischen den Schnittstellen. Beim Vergleich aller Motion-Cueing-Schnittstellen mit dem Joystick wurde die Benutzerfreundlichkeit für den Joystick (mittlerer Rang = 8,17) höher bewertet als für die Motion-Cueing-Schnittstellen (mittlerer Rang = 7,96). $Z = -2,022, p = 0,040$ (siehe Abbildung 5). Dies spiegelt die frühere Literatur wider [3], [10], [41]. Diese Ergebnisse spiegeln die qualitativen Antworten wider, die in Bezug auf positive und negative Kommentare zu jeder der Schnittstellen gemischt waren. Eine mögliche Erklärung für dieses gemischte Ergebnis ist, dass die Motion-Cueing-Schnittstellen (dh NaviChair, MuvMan, Swivel Chair und Head-Directed) für die Teilnehmer relativ neue Schnittstellen sind, während die Verwendung des Joysticks sehr vertraut ist. Es blieb auch nicht viel Zeit, um mit jeder Schnittstelle zu üben, bevor Feedback gegeben wurde, was möglicherweise dazu beitrug, dass der Joystick einfacher zu bedienen war. In Zukunft wollen wir den Teilnehmern mehr Zeit geben

Machen Sie sich mit den einzelnen Benutzeroberflächen vertraut, bevor Sie einen Vergleich mit einer vertrauten Plattform wie dem Joystick anstellen.

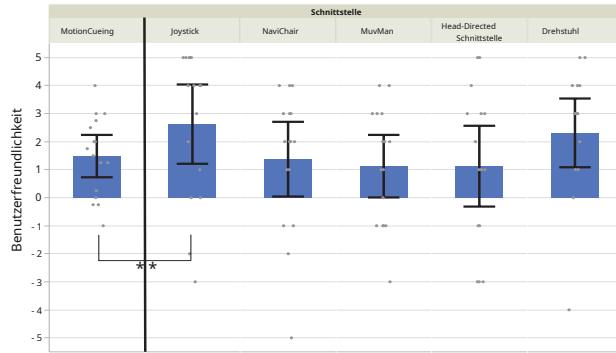


Abbildung 5: Auf einer Skala von -5 (stimme überhaupt nicht zu) bis 5 (stimme voll zu) bewerteten die Teilnehmer „Ich dachte, die [Schnittstelle] sei einfach zu bedienen“.

4.2.3 Präzise Kontrolle

Es gab einen statistisch signifikanten Unterschied in der Genauigkeit der Bewegungsbewertung zwischen den verschiedenen Schnittstellen, $\chi^2(4) = 16,041, p = 0,003$, mit einer mittleren Ranggenauigkeit von 4,25 für Joystick, 3,00 für Drehstuhl, 2,97 für Head-Directed, 2,44 für NaviChair und 2,34 für MuvMan. Post-hoc-Analyse ergab, dass der Joystick signifikant genauer war als beide MuvMan ($Z = -2,766, p = .006$) und NaviChair ($Z = -2,998, p = .003$) (siehe Abbildung 6). Beim Vergleich aller Motion-Cueing-Schnittstellen mit dem Joystick wurde die Bewegungsgenauigkeit für den Joystick (mittlerer Rang = 7,75) höher bewertet als für Motion-Cueing-Schnittstellen (mittlerer Rang = 8,61). $Z = -2,718, p = 0,007$ (siehe Abbildung 6).

Diese Ergebnisse stimmen mit der Literatur überein, die zeigt, dass der Joystick mit höherer Präzision über Motion-Cueing-Schnittstellen bewertet wird [3] [10] [41]. Obwohl Pilottests durchgeführt wurden, traten immer noch einige Probleme mit der Kontrolle und Präzision auf, die nach den qualitativen Ergebnissen durch die vom Benutzer wahrgenommene verminderte Sicherheit, den Komfort und die Stabilität der Motion-Cueing-Schnittstellen beeinträchtigt werden könnten. Sowohl NaviChair als auch MuvMan wurden als nicht sehr präzise bewertet, was die qualitativen Ergebnisse widerspiegelt. Einige Teilnehmer berichteten, dass sich das NaviChair zu wackelig anfühlte und es schwierig war zu wissen, wo sich der Nullpunkt befand. Es wurde berichtet, dass MuvMan auch kein gutes Feedback darüber hatte, wo sich der Nullpunkt befand. Darüber hinaus erfordert ein Joystick, dass sich der Benutzer nur auf seine Fingerposition konzentriert.

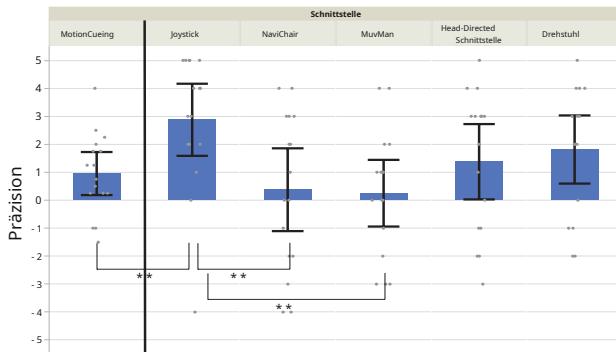


Abbildung 6: Auf einer Skala von -5 (absolut nicht einverstanden) bis 5 (absolut einverstanden) bewerteten die Teilnehmer „Ich konnte die Selbstbewegung mit der [Schnittstelle] genau steuern“.

4.2.4 Raumorientierung

Es gab einen statistisch signifikanten Unterschied in der räumlichen Orientierungsbewertung zwischen den verschiedenen Schnittstellen, $\chi^2(4) = 10,629, p = 0,031$, mit einer mittleren räumlichen Orientierungsbewertung von 3,84 für Joystick, 3,44 für Drehstuhl, 2,59 für kopfgesteuert, 2,66 für NaviChair und 2,47 für MuvMan. Post-hoc-Analyse ergab, dass der Joystick die Wahrnehmung der räumlichen Orientierung signifikant besser unterstützt als MuvMan ($Z = -2,353, p = 0,019$) und NaviChair ($Z = -2,064, p = .039$) (siehe Abbildung 7). Beim Vergleich des Joysticks mit allen anderen Schnittstellen (Motion-Cueing-Schnittstellen) wurde die räumliche Orientierungsbewertung für den Joystick (mittlere Rangbewertung = 6,88) höher bewertet als für Motion-Cueing-Schnittstellen (mittlere Rangbewertung = 9,04). $Z = -2,096, p = 0,036$ (siehe Abbildung 7).

Es ist überraschend, dass die Nicht-Bewegungs-Cueing-Schnittstelle (dh Joystick) als besser räumlich orientiert eingestuft wurde als die Bewegungs-Cueing-Schnittstellen, da die Literatur vorschlägt, Ihren Körper physisch zu bewegen, um virtuelle Bewegungen aufzurufen, wodurch die räumliche Orientierung erhöht wird [3] [4], [34], [47]. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Zuordnung der Bewegungs-Cueing-Schnittstellen mehr Verwirrung als Orientierungshilfe verursachte, insbesondere angesichts der Tatsache, dass wir für Rotationen eine Geschwindigkeits- (Raten-) Steuerung anstelle einer Positionssteuerung (Eins-zu-Eins-Zuordnung) verwendeten. Das heißt, obwohl die Stühle um 360 Grad gedreht werden konnten, wurde dies in der aktuellen Studie nicht verwendet, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Es ist wichtig anzumerken, dass sich diese Studie nur mit Selbstberichtsmaßen der räumlichen Orientierung befasst. Jedoch, Kozlowski und Bryant haben gezeigt, dass Selbstberichte des Orientierungssinns als verbaler Ausdruck ihrer Einschätzung ihrer eigenen räumlichen Orientierungsfähigkeit ihre tatsächliche räumliche Orientierungsfähigkeit widerspiegeln [48]. Es besteht daher Grund zu der Annahme, dass Verhaltensmessungen der räumlichen Orientierung ähnliche Ergebnisse liefern, die wir in der nächsten Iteration dieser Studie untersuchen wollen.

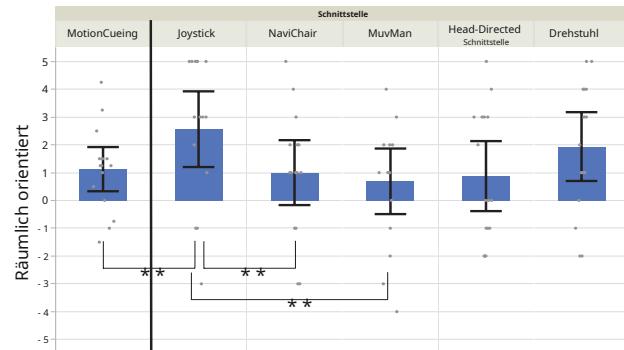


Abbildung 7: Auf einer Skala von -5 (stimme überhaupt nicht zu) bis 5 (stimme voll zu) bewerteten die Teilnehmer „Es war einfach, mit der [Schnittstelle] räumlich orientiert zu bleiben“.

4.2.5 Selbstbewegungsgefühl

Es gab keine signifikanten Unterschiede in den Selbstbewegungsempfindungen zwischen den Schnittstellen. Es gab einen leichten Trend, dass die Motion-Cueing-Schnittstellen beim Vergleich aller Schnittstellen besser Selbstbewegungen induzieren als der Joystick. Beim Vergleich des Joysticks mit allen anderen zusammengeschlossenen Schnittstellen (Motion-Cueing-Schnittstellen) wurde das Gefühl der Selbstbewegung für Motion-Cueing-Schnittstellen (mittlerer Rang = 9,50) höher bewertet als für den Joystick (mittlerer Rang = 6,30). $Z = -1,892, p = 0,058$, erreichte jedoch nicht ganz statistische Signifikanz.

Der beobachtete Trend stimmt mit der Literatur darin überein, dass Motion Cueing häufig die Wahrnehmung von Selbstbewegung verbessern kann [7] [11] [12] [25] [29] [46]. Das Fehlen eines signifikanten Vorteils der Bewegung

Ein Hinweis auf die Wahrnehmung von Selbstbewegungen in der aktuellen Studie legt nahe, dass diese prototypähnlichen Schnittstellen weiterentwickelt werden müssen. Eine formellere und kontrolliertere Vektionsstudie (z. B. mit besser kontrollierten Stimuli, Bewegungsgeschwindigkeiten und Anweisungen zur Vektionsbewertung) könnte auch dazu beitragen, das Rauschen in den Daten zu reduzieren und klarere Auswirkungen des benutzergesteuerten Bewegungs-Cueing zu zeigen [6] [11]. , [12].

4.2.6 Probleme bei der Verwendung der Schnittstelle

Es gab keine signifikanten Unterschiede bei den gemeldeten Problemen zwischen allen fünf Schnittstellen. Beim Vergleich des Joysticks mit allen anderen Schnittstellen (Motion-Cueing-Schnittstellen) wurden Probleme bei der Verwendung der Schnittstellenbewertung für den Joystick (mittlere Rangbewertung = 8,42) höher bewertet als für Motion-Cueing-Schnittstellen (mittlere Rangbewertung = 8,83), $Z = -2,148$, $p = 0,032$.

Den qualitativen Ergebnissen zufolge waren die meisten Probleme für die Motion-Cueing-Schnittstellen mit der Steuerbarkeit verbunden. Viele Teilnehmer blieben in Ecken stecken oder konnten ihre virtuelle Bewegung mit den Motion-Cueing-Schnittstellen nicht sehr genau steuern. Darüber hinaus berichteten die Teilnehmer, dass sie Probleme hatten, den Nullpunkt zu finden, sich rückwärts zu bewegen und zu straffen und ihre Geschwindigkeit zu kontrollieren. Diese Probleme traten auch in anderen Studien mit einer ähnlichen Schnittstelle auf [10] [41]. Daher sind mehr Entwurfsiterationen erforderlich, damit sich diese Motion-Cueing-Schnittstellen auf einem ähnlichen Niveau befinden wie ein sehr bekanntes und weitgehend verwendetes Gerät wie der Joystick.

4.2.7 Eintauchen, Präsenz, Genuss, Langlebigkeit, allgemeine Benutzerfreundlichkeit und Reisekrankheit

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schnittstellen für die verbleibenden Variablen. Es gibt einen leichten Trend, dass die Teilnehmer mehr Probleme mit dem NaviChair und am wenigsten mit der Joystick- und Head-gesteuerten Oberfläche hätten. Es gab auch einen nicht signifikanten Trend, dass der Joystick und der Drehstuhl (die beide eine bequeme Rückenlehne verwendeten) besser für eine längerfristige Verwendung geeignet waren. Diese Ergebnisse spiegeln die qualitativen Aussagen zum Komfort wider, bei denen der Drehstuhl als am bequemsten und NaviChair und MuvMan als am wenigsten bequem eingestuft wurden. In Bezug auf die Reisekrankheit hatten alle Schnittstellen einen Mittelwert von nahezu null Berichten über Reisekrankheit oder Übelkeit. Zusammen mit den qualitativen Ergebnissen scheint es, dass einzelne Faktoren eine Rolle bei der Reisekrankheit spielen, weil im Durchschnitt Benutzer waren nicht krank, obwohl es einige Ausreißer gab, die an Reisekrankheit litten. Eine Folgestudie legt nahe, dass der Joystick tatsächlich mehr Reisekrankheit erzeugt als lehnbasierte Schnittstellen [49]. Daher scheint die Verfolgung von Stuhlbewegungen nicht das Problem der Reisekrankheit zu sein, obwohl weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Unsere Ergebnisse stützen keine frühere Literatur, in der das Eintauchen und Vorhandensein für Bewegungs-Cueing-Schnittstellen über dem Joystick höher bewertet wurde und die Langlebigkeit und die allgemeine Verwendbarkeit für die Joystick-über-Bewegungs-Cueing-Schnittstellen höher bewertet wurden [3] [10] [41]. Es ist möglich, dass die Teilnehmer nicht verstanden haben, was Eintauchen oder Präsenz bedeutet. Daher planen wir, diese Konzepte in zukünftigen Iterationen klarer zu gestalten. Außerdem haben die Teilnehmer diese Schnittstellen über einen längeren Zeitraum nicht verwendet, sodass ihre Berichte zur Langlebigkeit möglicherweise nicht korrekt sind. Es ist jedoch viersprechend, dass die Teilnehmer für alle Schnittstellen im Allgemeinen eine hohe Freude hatten ($M = 2,00$, $SD = 3,14$) und Benutzerfreundlichkeit ($M = 1,94$, $SD = 3,21$) und geringe Probleme ($M = -1,56$, $SD = 3,12$) und Reisekrankheit ($M = -1,56$, $SD = 3,46$).

4.2.8 Reihenfolge der Präferenzen

Jeder Teilnehmer stufte die fünf Schnittstellen in der Reihenfolge ihrer Präferenz ein (dh von 1 = am meisten bevorzugt bis 5 = am wenigsten bevorzugt) (Siehe Abbildung

8). Die Schnittstelle mit der niedrigsten mittleren Rangfolge und damit der insgesamt am meisten bevorzugten Schnittstelle war der Joystick (2,25), gefolgt vom Drehstuhl (2,69), NaviChair (3,31) sowie Head-Directed und MuvMan (3,37).

Die Teilnehmer bevorzugten in erster Linie die Joystick-Oberfläche, da sie vertraut, benutzerfreundlich und komfortabel ist. Der Drehstuhl wurde jedoch als die bequemste Schnittstelle bezeichnet. Das Design des Drehstuhls enthält einen alltäglichen Bürostuhl, sodass die Teilnehmer es vielleicht als vertraut empfanden, und es war auch der einzige Stuhl mit hoher Rückenlehne. Umgekehrt waren die NaviChair- und MuvMan-Schnittstellen sehr unbekannt und wurden ursprünglich entwickelt, um die Benutzer im Sitzen aktiv einzubringen. Engagement kann gut sein, um die Körperhaltung zu korrigieren und den Fokus und die Beteiligung zu erhöhen. Es kann jedoch auch anstrengend sein und sich instabil und potenziell gefährlich anfühlen, insbesondere beim Tragen eines HMD. Das heißt, NaviChair und MuvMan und / oder ihre Geschwindigkeitskartierung müssten wahrscheinlich modifiziert werden, um ihren Komfort und die wahrgenommene Stabilität und Sicherheit zu erhöhen. Hinweis, Allerdings stand bei einigen Teilnehmern jede der Schnittstellen an erster Stelle. Dies deutet auf ziemlich unterschiedliche Vorlieben und Wünsche hin und darauf, dass es möglicherweise keine einzige Schnittstelle gibt, die für alle oder sogar die Mehrheit der Benutzer optimal ist.

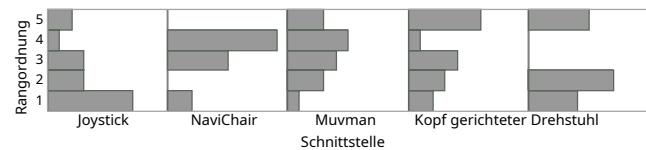


Abbildung 8: Die Präferenzrangfolge jeder Schnittstelle, wobei jeder Teilnehmer die Schnittstellen von eins bis fünf bewertet, wobei eine die höchste und fünf die niedrigste Präferenz ist.

5. C. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse stützen nicht die Vorhersagen der Literatur, dass die Motion-Cueing-Schnittstellen bieten größere Vorteile gegenüber einer Nicht-Motion-Cueing-Schnittstelle wie dem Joystick, z. Illusionen der Selbstbewegung [6], [11], räumliche Wahrnehmung und Orientierung [3], [41], Freude und Engagement [3], [4], [6] sowie Eintauchen und Präsenz [3], [10], [41]. Stattdessen gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schnittstellen, außer im Fall der räumlichen Ausrichtung, bei der der gegenteilige Effekt festgestellt wurde. Dies könnte daran liegen, dass die Zuordnung der Bewegungs-Cueing-Schnittstellen mehr Verwirrung als Orientierungshilfe verursachte, insbesondere angesichts der Tatsache, dass wir für Rotationen, die wir derzeit untersuchen, die Geschwindigkeits- (Raten-) Steuerung anstelle der Positionssteuerung (Eins-zu-Eins-Zuordnung) verwendeten [49]. Andererseits unsere Vorhersagen, dass die Joystick-Steuerung höhere Ergebnisse erzielen würde Genauigkeit, Steuerbarkeit, und Benutzerfreundlichkeit [3], [6], [10], [41] wurden durch die Ergebnisse gestützt. Es wurde jedoch kein signifikanter Unterschied festgestellt, dass der Joystick war weniger ermüdet

als die Motion-Cueing-Schnittstellen.

Die quantitativen Ergebnisse zeigten, dass Joystick, Swivel Chair, Head-Directed, NaviChair und MuvMan die Reihenfolge für die komfortabelste und präziseste Benutzeroberfläche waren, obwohl die Daten und individuellen Präferenzen sehr unterschiedlich waren. Beim Vergleich der vier Motion-Cueing-Schnittstellen mit dem Joystick wurde der Joystick so bewertet, dass er eine einfachere und präzisere Steuerung bietet, komfortabler ist und den Teilnehmern hilft, sich räumlicher zu fühlen. Die vier Motion-Cueing-Schnittstellen zeigten jedoch einen Trend zu einem stärkeren Gefühl der Selbstbewegung. Unsere Ergebnisse zeigten, dass der Joystick eine hohe Vertrautheit hatte, so dass ein Trainingseffekt für seine hohe Präferenz verantwortlich sein könnte. Darüber hinaus befinden sich die anderen Schnittstellen nur in Prototypenstadien und müssen noch optimiert werden. Angesichts dieser Einschränkung

Sie waren lustig, engagiert, realistischer und hatten das natürliche Gefühl, sich zu bewegen. Diese Präferenz für eine stärker verkörpernde Schnittstelle steht im Einklang mit verwandten Schnittstellen wie ChairIO [5], Gyroxus Gaming Chair [11] oder Leaning-Interfaces wie Joyman [3], Wii Balance Board-basierten Steh-Leaning-Interfaces [4]. [6], [37], [50] oder Schnittstellen, an denen Benutzer lediglich ihren Oberkörper lehnen, während sie auf einem stabilen Stuhl sitzen [38]. Um die Vertrautheit zu erhöhen, empfehlen wir vor systematischen Experimenten oder Tests eine ausreichend lange Trainingsphase für unbekannte Motion-Cueing-Schnittstellen. Der Drehstuhl wurde von den Motion-Cueing-Schnittstellen am meisten bevorzugt, da er bequem war, sich sicher und stabil anfühlte und die präziseste Steuerung bot. Insbesondere die Rückenlehne erhöhte die wahrgenommene Sicherheit und den Komfort erheblich.

Die Steuerbarkeit war ein Problem für die Motion-Cueing-Schnittstellen. Während die Vorwärtsbewegung reibungslos und leicht zu erlernen war, fühlte es sich für die Teilnehmer unangenehm und unnatürlich an, durch Zurücklehnen rückwärts zu gehen. Das Erlernen und Anpassen der Geschwindigkeitssteuerung zum Drehen anstelle einer vollständigen 360 ° -Drehung mit Positionssteuerung (Eins-zu-Eins-Zuordnung) dauerte einige Zeit. Es war schwierig anzuhalten oder zum Nullpunkt zurückzukehren. Eine weitere Herausforderung für die Rotation bestand darin, dass die Teilnehmer nicht wussten, wohin ihr Körper oder ihre Vorwärtsbahn zeigt, und dass das Drehen des Kopfes bei gleichzeitigem Drehen des Körpers (der Kamera) Verwirrung stiftete.

Wir vergleichen derzeit die Geschwindigkeits- (Raten-) Steuerung mit der Positionssteuerung (Eins-zu-Eins-Zuordnung), bei der sich die Teilnehmer um 360 ° drehen können und die Richtung, in die sie in der realen Welt blicken, der gleichen in der VE entspricht. Ein 360 ° -Ansatz funktioniert jedoch nur für HMDs und nicht für Projektionswände. Wir haben die meisten unserer Schnittstellen ohne 360 ° -Mapping entworfen, weil wir die Möglichkeit haben wollten, stationäre (nicht am Kopf montierte) Displays und Mehrbenutzer-Displays zu verwenden und Probleme mit Kabelsalat zu vermeiden. Wir wollten auch eine vergleichbare Rotation und Translation ermöglichen, die beide eine Geschwindigkeitsabbildung verwenden und eine Mischung aus Geschwindigkeits- und Positionssteuerung vermeiden. Wie die Ergebnisse zeigen, sind Rotationsschnittstellen mit Geschwindigkeitsregelung möglicherweise nicht gut für HMDs geeignet.

Insgesamt möchten die Teilnehmer die Motion-Cueing-Schnittstellen im Allgemeinen, waren jedoch der Ansicht, dass die Schnittstellen geändert werden mussten, bevor sie von der Verwendung eines Joysticks wechseln konnten. Insbesondere die wahrgenommene Sicherheit war ein Hauptanliegen, und wir empfehlen die Verwendung einer Rückenlehne, wenn Benutzer sich rückwärts bewegen müssen, um Komfort und Sicherheit zu erhöhen. Wir werden auch unser Kontroll-Mapping verbessern, das Bewusstsein für die Vorwärtssrichtung schärfen und eine stabile Schnittstelle für MuveMan und NaviChair schaffen. Obwohl wir die Steuerbarkeit vor dem Ausführen dieser Benutzerstudie iteriert und getestet haben, traten immer noch Probleme auf. Durch den Einsatz qualitativer Methoden und die daraus gewonnenen umfangreichen Daten konnten wir jedoch auf einer tiefen Ebene verstehen, was Benutzer über die verschiedenen Schnittstellen denken, was in den nächsten Phasen der Entwurfsiterationen von unschätzbarem Wert ist. Diese Benutzerstudie zur bodengestützten Fortbewegungsschnittstelle weist einige Einschränkungen auf, die wir in zukünftigen Experimenten ansprechen werden. Zum Beispiel wurden die Zeit zum Finden jedes Ziels und die Pfade des Teilnehmers nicht aufgezeichnet oder analysiert, da sich diese Studie eher auf die Benutzererfahrung als auf Verhaltensmaßnahmen konzentrierte. Es ist wichtig, dass wir zuerst umfangreiche qualitative Daten gesammelt haben, um die nächsten Entwurfsiterationen besser zu informieren und unsere zukünftigen Verhaltensstudien zu begründen, in denen Navigation und Orientierung in virtuellen Umgebungen aufgezeichnet und analysiert werden.

EIN WISSEN

Unser Dank geht an Archiact VR für die Partnerschaft bei diesem Projekt. Diese Forschung wurde durch NSERC Engage Grant finanziert.

R. REFERENZEN

- [1] BE Riecke und J. Schulte-Pelkum, „Ein integrativer Ansatz zur Präsenz- und Selbstbewegungswahrnehmungsforschung“, in *Eingebettet in Medien*, M. Lombard, F. Biocca, J. Freeman, W. IJsselsteijn und R. J. Schaevitz, Hrsg. Springer International Publishing, 2015, S. 187–235.
- [2] MA Gresty, S. Waters, A. Bray, K. Bundy und JF Golding, „Beeinträchtigung der räumlichen kognitiven Funktion unter Wahrung der verbalen Leistung bei räumlicher Desorientierung“. *Curr. Biol.*, vol. 13, nein. 21, S. R829 - R830, Okt. 2003.
- [3] M. Marchal, J. Pettre und A. Lecuyer, „Joyman: Ein Joystick im menschlichen Maßstab zum Navigieren in virtuellen Welten“, in *Tagungsband des IEEE-Symposiums 2011 zu 3D-Benutzeroberflächen*, Washington, DC, USA, 2011, S. 19–26.
- [4] A. Harris, K. Nguyen, PT Wilson, M. Jackoski und B. Williams, „Human Joystick: Wii-Neigung zum Übersetzen in großen virtuellen Umgebungen“, in *VRCAI '14*, New York, NY, USA, 2014, S. 231–234.
- [5] S. Beckhaus, KJ Blom und M. Haringer, „Ein neues Spielgerät und eine neue Interaktionsmethode für einen Ego-Shooter“. *Proc. Comput. Sci. Magie*, vol. 2005, 2005.
- [6] E. Krijff *et al.*, „Auf deinen Füßen! Verbesserung der Selbstbewegungswahrnehmung in lehnbasierter Schnittstellen durch multisensorische Stimuli“, vorgestellt auf dem ACM-Symposium zur räumlichen Benutzerinteraktion (SUI '16), Tokio, Japan, 2016, S. 149–158.
- [7] AE Minetti, L. Boldrini, L. Brusamolin, P. Zamparo und T. McKee, „Ein rückkopplungsgesteuertes Laufband (Laufband nach Bedarf) und die spontane Geschwindigkeit des Gehens und Laufens beim Menschen“. *J. Appl. Physiol.*, vol. 95, nein. 2, S. 838–843, August 2003.
- [8] L. Lichtenstein, J. Barabas, RL Woods und E. Peli, „Eine rückkopplungsgesteuerte Schnittstelle für die Fortbewegung von Laufbändern in virtuellen Umgebungen“. *ACM Trans Appl Percept*, vol. 4, nein. 1. Januar 2007.
- [9] S. Beckhaus, KJ Blom und M. Haringer, „Intuitive Freisprech-Reiseschnittstellen für virtuelle Umgebungen“, in *Neue Wege in 3D-Benutzeroberflächen Workshop von IEEE VR 2005*, 2005, S. 57–60.
- [10] A. Kitson, BE Riecke, AM Hashemian und C. Neustaeder, „NaviChair: Evaluieren einer verkörperten Schnittstelle mithilfe einer Zeigeraufgabe zum Navigieren in der virtuellen Realität“, in *Vorträge des 3. ACM-Symposiums zur räumlichen Benutzerinteraktion*, New York, NY, USA, 2015, S. 123–126.
- [11] BE Riecke und D. Feuereissen, „Bewegen oder nicht bewegen: Kann aktive Steuerung und benutzergesteuertes Motion Cueing die Selbstbewegungswahrnehmung ('vection') in der virtuellen Realität verbessern?“ In *Vorträge des ACM-Symposiums zur angewandten Wahrnehmung*, New York, NY, USA, 2012, S. 17–24.
- [12] BE Riecke, „Einfaches benutzergeneriertes Motion Cueing kann die Wahrnehmung von Selbstbewegungen (vection) in der virtuellen Realität verbessern“, in *Vorträge des ACM-Symposiums zu Virtual-Reality-Software und -Technologie*, Limassol, Zypern, 2006, S. 104–107.
- [13] JA Bargas-Avila und K. Hornb \ a ek, „Alter Wein in neuen Flaschen oder neue Herausforderungen: Eine kritische Analyse empirischer Studien zur Benutzererfahrung“, in *Vorträge der SIGCHI-Konferenz über Human Factors in Computersystemen*, New York, NY, USA, 2011, S. 2689–2698.
- [14] TY Grechkin und BE Riecke, „Neubewertung der Vorteile körperbasierter Rotationsmerkmale für die Aufrechterhaltung der Orientierung in virtuellen Umgebungen: Männer profitieren von realen Rotationen, Frauen nicht“, in *Vorträge des ACM-Symposiums zur angewandten Wahrnehmung*, New York, NY, USA, 2014, S. 99–102.
- [fünfzehn] E. Guy, P. Punpongsanon, D. Iwai, K. Sato und T. Boubekeur, „LazyNav: 3D-Bodennavigation mit unkritischen Körperteilen“, in *IEEE-Symposium 2015 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, 2015, S. 43–50.
- [16] AP Vermeeren, EL-C. Law, V. Roto, M. Obrist, J. Hoonhout und K. Väänänen-Vainio-Mattila, „Methoden zur Bewertung der Benutzererfahrung: aktueller Stand und Entwicklungsbedarf“, in *Vorträge der 6. Nordischen Konferenz über Mensch-Computer-Interaktion: Grenzen erweitern*, 2010, S. 521–530.
- [17] RL Klatzky, JM Loomis, AC Beall, SS Chance und RG Golledge, „Räumliche Aktualisierung von Selbstposition und Orientierung

- Während der realen, imaginären und virtuellen Fortbewegung " *Psychol. Sci.*, vol. 9, nein. 4, S. 293–298, 1998.
- [18] JJ Rieser, „Zugang zu Wissen über räumliche Strukturen an neuartigen Punkten der Beobachtung.“ *J. Exp. Psychol. Lernen. Mem. Cogn.*, vol. 15, nein. 6, S. 1157–1165, 1989.
- [19] RA Ruddle und S. Lessells, „Für eine effiziente Navigationssuche, Menschen benötigen volle körperliche Bewegung, aber keine reichhaltige visuelle Szene.“ *Psychol. Sci.*, vol. 17, nein. 6, S. 460–465, Juni 2006.
- [20] RF Wang, „Zwischen Realität und Vorstellungskraft: Wann ist räumlich? automatische Aktualisierung?“ *Wahrnehmen. Psychophys.*, vol. 66, nein. 1, S. 68–76, Januar 2004.
- [21] D. Bowman, D. Koller und L. Hodges, „Eine Methodik für die Bewertung von Reisetechniken für immersive virtuelle Umgebungen“ *Virtual Real.*, vol. 3, nein. 2, S. 120–131, Jun. 1998.
- [22] DA Bowman, E. Kruijff, JJL Jr. und I. Poupyrev, *3D-Benutzer Schnittstellen: Theorie und Praxis*. Addison-Wesley, 2004.
- [23] BE Riecke, B. Bodenheimer, TP McNamara, B. Williams, P. Peng und D. Feureisen: „Müssen wir für eine effektive Virtual-Reality-Navigation gehen? physische Rotationen allein können ausreichen“, in *Räumliche Erkenntnis VII*, Springer, 2010, S. 234–247.
- [24] GC DeAngelis und DE Angelaki, „Visual-Vestibular Integration für die Selbstbewegungswahrnehmung“ in *Die neuronalen Grundlagen multisensorischer Prozesse*, MM Murray und MT Wallace, Eds. Boca Raton (FL): CRC Press, 2012.
- [25] LR Harris, M. Jenkin und DC Zikovitz, „Visuell und nicht visuell Hinweise auf die Wahrnehmung linearer Selbstbewegung“ *Exp. Brain Res.*, vol. 135, no. 1, S. 12–21, November 2000.
- [26] L. Harris, M. Jenkin und DC Zikovitz, „Vestibular Cues and virtuelle Umgebungen: Auswahl der Größe des vestibulären Hinweises“ in, *IEEE Virtual Reality, 1999. Verfahren*, 1999, S. 229–236.
- [27] YP Ivanenko, R. Grasso, I. Israël und A. Berthoz, „The Beitrag von Otolithen und halbkreisförmigen Kanälen zur Wahrnehmung zweidimensionaler passiver Ganzkörperbewegungen beim Menschen“ *J. Physiol.*, vol. 502, no. 1, S. 223–233, Juli 1997.
- [28] F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos und A. Lécuyer, Hrsg., *Mensch Gehen in virtuellen Umgebungen*. New York, NY: Springer New York, 2013.
- [29] BE Riecke, A. Välijamäe und J. Schulte-Pelkum, „Moving Sounds Verbessern Sie die visuell induzierte Selbstbewegungswallusion (kreisförmige Vektion) in der virtuellen Realität.“ *ACM Trans Appl Percept*, vol. 6, nein. 2, S. 1–27, 2009.
- [30] A. Välijamäe, P. Larsson, D. Västfjäll und M. Kleiner, „Vibrotactile Verbesserung der auditorisch induzierten Selbstbewegung und räumlichen Präsenz“ *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 54, nein. 10, S. 954–963, Okt. 2006.
- [31] AH Rupert und OI Kolev, „Die Verwendung taktiler Hinweise zur Modifizierung die Wahrnehmung von Selbstbewegung“, Dez. 2008.
- [32] J. Bell und SC Grant, „Auswirkungen von Motion Cueing auf Komponenten of Helicopter Pilot Workload“, in *Verfahren der Interservice / Industrie Schulungs-, Simulations- und Bildungskonferenz*, 2011.
- [33] CH Scanlon, „Effekt von Bewegungshinweisen während komplexer Kurven Anflug- und Landeaufgaben - Eine pilotierte Simulationsstudie“, Dez. 1987.
- [34] LR Harris et al., „Selbstbewegung simulieren I: Hinweise für die Wahrnehmung der Bewegung“, in *in Virtual Reality, Springer-Verlag, Ausgabe 6, Num, 2002*, S. 75–85.
- [35] JE Bos, W. Bles und EL Groen: „Eine Theorie zur visuell induzierten Bewegungskrankheit.“ *Anzeigen*, vol. 29, nein. 2, S. 47–57, März 2008. [36] EL Groen und W. Bles, „Verwendung der Körperneigung für die Simulation von lineare Selbstbewegung“ *J. Vestib. Res.*, vol. 14, nein. 5, S. 375–385, Januar 2004.
- [37] G. de Haan, EJ Griffith und FH Post: „Verwenden der Wii-Waage Tafel™ als kostengünstiges VR-Interaktionsgerät“, in *Berichte des ACM-Symposiums 2008 über Virtual-Reality-Software und -Technologie*, 2008, S. 289–290.
- [38] E. Kruijff, B. Riecke, C. Trekowski und A. Kitson, „Upper Body Das Lehnen kann die Selbstbewegungswahrnehmung in virtuellen Umgebungen beeinflussen“, in *Vorträge des 3. ACM-Symposiums zur räumlichen Benutzerinteraktion*, New York, NY, USA, 2015, S. 103–112.
- [39] JJ LaViola, DA Feliz, DF Keefe und RC Zeleznik, „Hands-kostenlose mehrskalige Navigation in virtuellen Umgebungen“, in *SI3D '01: Vorträge des Symposiums 2001 über interaktive 3D-Grafiken*, New York, NY, USA, 2001, S. 9–15.
- [40] D. Zielasko, S. Horn, S. Freitag, B. Weyers und TW Kuhlen, „Evaluierung von Freisprech-HMD-basierten Navigationstechniken für die immersive Datenanalyse“, in *IEEE-Symposium 2016 zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, 2016, S. 113–119.
- [41] J. Freiberg, „Erfahrung vor dem Bau: Immersive Virtual Reality-Design-Tools für die Architekturpraxis (MSc-Arbeit).“ Simon Fraser University, Surrey, BC, Kanada., 2015.
- [42] C. Geertz, *Die Interpretation von Kulturen: Ausgewählte Essays*. Basic Bücher, 1973.
- [43] G. Ryle, *Das Konzept des Geistes: 60. Jubiläumsausgabe*. Routledge, 2009.
- [44] I. Holloway, *Grundkonzepte für qualitative Forschung*. Wiley, 1997. [45] JW Creswell, *Qualitative Untersuchung und Forschungsdesign: Auswahl Unter fünf Ansätzen*. SAGE Publications, 2012.
- [46] D. Feureisen, „Selbstbewegungswallusionen ('Vektion') in Virtual Umgebungen: Verbessern aktive Steuerung und benutzergeneriertes Bewegungs-Cueing die visuell induzierte Vektion?“ *Kommunikation, Kunst und Technologie: Schule für interaktive Kunst und Technologie*, 2013. [47] F. Steinicke, G. Bruder, K. Hinrichs, J. Jerald, H. Frenz und M. Lappe, „Reales Gehen durch virtuelle Umgebungen durch Umleitungstechniken“ *J. Virtual Real. Übertragung.*, vol. 6, nein. 2, 2009.
- [48] LT Kozlowski und KJ Bryant, „Orientierungssinn, räumlich Orientierung und kognitive Karten“ *J. Exp. Psychol. Summen. Wahrnehmen. Ausführen*, vol. 3, nein. 4, S. 590–598, 1977.
- [49] T. Nguyen, BE Riecke und W. Stuerzlinger, „Moving in a Box: Verbesserung der räumlichen Orientierung in der virtuellen Realität mithilfe simulierte Referenzrahmen“, vorgestellt auf dem IEEE-Symposium für 3D-Benutzeroberflächen 3DUI, 2017.
- [50] J. Wang und RW Lindeman, „Vergleich von isometrisch und elastisch Surfboard-Schnittstellen für lehnbasierter Reisen in virtuellen 3D-Umgebungen“ in *2012 IEEE-Symposium zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, 2012, S. 31–38.