

Selbstbewegungsillusionen in immersiven Umgebungen der virtuellen Realität

Gerd Bruder *, Frank Steinicke †
Forschungsgruppe Visualisierung und Computergrafik
Abteilung für Computerwissenschaften
Universität Münster

Phil Wieland ‡
Abteilung für Psychologie II
Universität Münster

EIN BSTRACT

Die Bewegungswahrnehmung in immersiven Virtual-Reality-Umgebungen unterscheidet sich erheblich von der realen Welt. Zum Beispiel haben frühere Arbeiten gezeigt, dass Benutzer dazu neigen, die Entfernungen in immersiven virtuellen Umgebungen (VEs) zu unterschätzen. Als Lösung für dieses Problem schlagen einige Forscher vor, die abgebildete Bewegung der virtuellen Kamera relativ zur verfolgten Bewegung eines Benutzers in der realen Welt zu skalieren, bis die reale und virtuelle Bewegung übereinstimmen, dh Bewegungen der realen Welt könnten mit a abgebildet werden größerer Gewinn für die VE, um die Unterschätzung auszugleichen. Obwohl dieser Ansatz normalerweise zu genaueren Selbstbewegungsurteilen durch Benutzer führt, kann das Einführen von Diskrepanzen zwischen realer und virtueller Bewegung zu einem Problem werden, insbesondere aufgrund von Fehlausrichtungen beider Welten und verzerrter Raumkognition.

In diesem Artikel beschreiben wir einen anderen Ansatz, der offensichtliche Selbstbewegungsillusionen einführt, indem optische Flussfelder während Bewegungen in VEs manipuliert werden. Diese Manipulationen können die Wahrnehmung von Selbstbewegungen in VEs beeinflussen, lassen jedoch eine quantitative Diskrepanz zwischen realen und virtuellen Bewegungen aus. Wir führen vier Illusionen ein und zeigen in Experimenten, dass die Manipulation des optischen Flusses die Selbstbewegungsurteile der Benutzer erheblich beeinflussen kann. Darüber hinaus zeigen wir, dass mit einer solchen Manipulation von optischen Strömungsfeldern die Unterschätzung von Fahrabständen kompensiert werden kann.

Schlüsselwörter: Selbstbewegungswahrnehmung, visuelle Illusionen, optischer Fluss.

Indexbegriffe: H.5.1 [Informationsschnittstellen und Präsentation]: Multimedia-Informationssysteme - künstliche, erweiterte und virtuelle Realitäten; I.3.7 [Computergrafik]: Dreidimensionale Grafik und Realismus - Virtuelle Realität

1 I. EINLEITUNG

Wenn Menschen sich durch die reale Welt bewegen, erhalten sie eine breite Vielfalt sensorischer Bewegungshinweise, die von unserem Wahrnehmungssystem analysiert und gewichtet werden [4, 12]. Dieser Prozess basiert auf mehreren Schichten von Bewegungsmeldern, die in Umgebungen mit immersiver virtueller Realität (VR) stimuliert werden können. Die Selbstbewegung in der VR unterscheidet sich jedoch normalerweise von der physischen Welt durch eine geringere zeitliche Auflösung, Latenz und andere Faktoren, die in der realen Welt nicht vorhanden sind [4]. Darüber hinaus ist die Bewegungswahrnehmung in immersiven VEs nicht veridisch, sondern basiert auf der Integration und Gewichtung häufig widersprüchlicher und mehrdeutiger Bewegungshinweise aus der realen und virtuellen Welt. Es hat sich gezeigt, dass solche Aspekte immersiver VR-Umgebungen die Wahrnehmung von Entfernungen und räumlichen Beziehungen durch Benutzer in VEs sowie die Wahrnehmung von Selbstbewegungen erheblich beeinflussen [19, 27]. Zum Beispiel, Forscher beobachten häufig eine Unter- oder Überschätzung von Fahrabständen oder Rotationen [15, 27] in VEs, die häufig auf die visuelle Selbstbewegungswahrnehmung zurückgeführt wird [19]. Visuelle Wahrnehmung von Selbstbewegung

in einer Umgebung hängt hauptsächlich mit zwei Aspekten zusammen:

- absolute Orientierungspunkte, dh Merkmale der Umgebung, die während der Bewegung einer Person stabil erscheinen [12], und
- optischer Fluss, dh Extraktion von Bewegungshinweisen wie Kurs- und Geschwindigkeitsinformationen aus Mustern, die durch Unterschiede in der Lichtintensität in einem optischen Array auf der Netzhaut gebildet werden [9].

Verschiedene Forscher konzentrierten sich auf die Manipulation von Orientierungspunkten in immersiven VEs, die nicht wie in der realen Welt wahrheitsgetreu sein müssen. Zum Beispiel haben Suma et al. [28] zeigten, dass Änderungen der Position oder Ausrichtung von Orientierungspunkten, wie z. B. Türen in einem Architekturmodell, von Beobachtern häufig unbemerkt bleiben, wenn der interessierende Orientierungspunkt während der Änderung nicht in der Sicht des Beobachters lag. Solche Veränderungen können auch induziert werden, wenn die visuelle Information während sakkadischer Augenbewegungen oder eines kurzen Intervalls zwischen Stimuli gestört wird [26]. Weniger abrupte Ansätze basieren auf dem Verschieben einer virtuellen Szene oder einzelner Orientierungspunkte relativ zur Bewegung eines Benutzers [24]. Zum Beispiel haben Interrante et al. [14] beschrieben Ansätze zur Hochskalierung von Gehentfernungen in immersiven VEs, um die wahrgenommene Unterschätzung der Fahrstrecken in VR zu kompensieren. In ähnlicher Weise haben Steinicke et al. [27] schlugen Drehwinkel nach oben oder unten vor, um die beobachtete Unter- oder Überschätzung von Drehungen zu kompensieren. Obwohl solche Ansätze angewendet werden können, um die Beurteilung von Selbstbewegungen zu verbessern und das uneingeschränkte Gehen durch VEs zu unterstützen, wenn sie auf einen kleineren Interaktionsraum in der realen Welt beschränkt sind [27], ist der Umfang der Manipulationen, die von Benutzern unbemerkt bleiben, begrenzt. Darüber hinaus kann die Manipulation virtueller Bewegungen einige praktische Probleme verursachen. Da die physischen Bewegungen des Benutzers nicht mit seiner Bewegung in der VE übereinstimmen, kann eine eingeführte Diskrepanz typische Entfernungshinweise beeinflussen, die von Profis ausgenutzt werden. Zum Beispiel ist das Zählen von Schritten als Entfernungsmaß eine einfache Annäherung in den Bereichen Architektur oder Stadtplanung, die verzerrt wäre, wenn die Abbildung zwischen der physischen und der virtuellen Bewegung manipuliert würde. Ein weiterer Nachteil dieser Manipulationen ergibt sich aus den Ergebnissen von Kohli et al. [17] und Bruder et al. [5] im Bereich der passiven Haptik, bei der physische Requisiten, die auf virtuelle Objekte ausgerichtet sind, verwendet werden, um ihren virtuellen Gegenständen passives haptisches Feedback zu geben. Bei manipulierten Zuordnungen zwischen realen Bewegungen und virtuellen Bewegungen ist eine hochkomplexe Vorhersage und Planung erforderlich, um virtuelle Objekte und physische Requisiten auszurichten, wenn Benutzer sie berühren möchten. Ein Grund, der die Verwendung allgemein anwendbarer passiver Haptik behindert. Bei manipulierten Zuordnungen zwischen realen Bewegungen und virtuellen Bewegungen ist eine hochkomplexe Vorhersage und Planung erforderlich, um virtuelle Objekte und physische Requisiten auszurichten, wenn Benutzer sie berühren möchten. Ein Grund, der die Verwendung allgemein anwendbarer passiver Haptik behindert.

Das Skalieren der Benutzerbewegung in VEs wirkt sich nicht nur auf Orientierungspunkte aus, sondern ändert auch die wahrgenommene Geschwindigkeit von Informationen zur Bewegung des optischen Flusses. Die Manipulation solcher optischer Fluss hinweise wurde als der Faktor für die Beeinflussung der Selbstbewegungswahrnehmung angesehen. Das Potenzial solcher Manipulationen des optischen Flusses zur Verbesserung der Selbstbewegungswahrnehmung in VEs, z. B. über *ersichtlich* oder *illusorisch* Bewegung, wurden selten in VR-Umgebungen untersucht.

Scheinbare Bewegung kann durch direkte Stimulierung des Wahrnehmungsprozesses des optischen Flusses induziert werden, z. B. durch transparente Überlagerung stationärer Szenen mit dreidimensionalen Partikelflussfeldern oder Sinusgittern [10] oder durch Modulation lokaler Merkmale im visuellen Bereich Szene, wie z. B. geschlungene, zeitlich veränderliche Verschiebungen von Objektkonturen [8]. Bis

* E-Mail: gerd.bruder@uni-muenster.de
† E-Mail: fsteini@math.uni-muenster.de
‡ E-Mail: p_wiel02@uni-muenster.de

Das Potenzial, die wahrgenommene Selbstbewegung in immersiven VR-Umgebungen durch die Integration von tatsächlichen und scheinbaren Bewegungsempfindungen des optischen Flusses zu beeinflussen, wurde bisher nicht berücksichtigt.

In diesem Artikel schlagen wir Techniken für solche Selbstbewegungsillusionen des optischen Flusses in immersiven VEs vor. Im Vergleich zu früheren Ansätzen manipulieren diese Techniken weder Landmarken in der VE [28] noch führen sie zu Diskrepanzen zwischen realen und virtuellen Bewegungen [27]. In psychophysischen Experimenten analysieren wir, ob und inwieweit diese Ansätze die Selbstbewegungswahrnehmung in VEs verbessern können.

Das Papier ist wie folgt aufgebaut. Abschnitt 2 enthält Hintergrundinformationen zur Wahrnehmung des optischen Flusses. In Abschnitt 3 werden vier verschiedene Techniken zur Manipulation wahrgenommener Bewegungen in immersiven VEs vorgestellt. Abschnitt 4 beschreibt das Experiment, das wir durchgeführt haben, um das Potenzial der beschriebenen Techniken zu analysieren. In Abschnitt 5 werden die Ergebnisse der Experimente erörtert. Abschnitt 6 schließt das Papier ab und gibt einen Überblick über zukünftige Arbeiten.

2 B. ACKGROUND

2.1 Visuelle Bewegungswahrnehmung

Wenn sich menschliche Beobachter durch die Umgebung bewegen, erhalten sie bestimmte Lichtmuster, die sich über ihre Netzhaut bewegen. Zum Beispiel sieht ein Beobachter, der geradeaus durch eine statische Umgebung geht, Teile der Umgebung allmählich näher kommen. Ohne Berücksichtigung semantischer Informationen scheinen die Lichtunterschiede kontinuierlich nach außen zu wandern und entstehen an dem Punkt auf der Netzhaut, der in Richtung des Betrachters zeigt. Wie zuerst von J.J. Gibson [9] beobachtet, *optische Arrays* reagiert auf Schwankungen des Lichtflusses auf der Netzhaut und *optischer Fluss* Hinweise, dh Muster, die aus Unterschieden in der optischen Anordnung stammen, die durch die Selbstbewegung einer Person verursacht werden, werden vom menschlichen Wahrnehmungssystem verwendet, um die aktuelle Selbstbewegung einer Person durch die Umgebung abzuschätzen [18]. Es werden zwei Arten von optischen Strömungsmustern unterschieden:

- expansional, aus translationalen Bewegungen stammend, mit einem Punkt namens *Expansionsschwerpunkt* (FOE) in oder außerhalb der Netzhaut in der aktuellen Richtung (siehe Abbildung 1) und
- gerichtet, verursacht durch Drehbewegungen.

Die Forscher näherten sich einem besseren Verständnis der Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplungen im Zusammenhang mit der Bewegungswahrnehmung über optische Strömung und extraretinale Signale sowie der Fortbewegung durch die Umwelt. Wenn visuelle, vestibuläre und propriozeptive sensorische Signale, die normalerweise die Wahrnehmung von Selbstbewegung unterstützen, in Konflikt stehen, kann der optische Fluss extraretinale Signale dominieren, die die Wahrnehmung des Bewegungspaths und der zurückgelegten Entfernung in der Umgebung beeinflussen und sogar zu einer Neukalibrierung führen können der aktiven Motorsteuerung für das Reisen, z. B. Beeinflussung der Schrittlänge von Gehern oder des Energieverbrauchs des Körpers [11]. Darüber hinaus können optische Strömungsfelder, die Bewegungsmustern ähneln, die normalerweise während einer realen Selbstbewegung auftreten, eine Vektion auslösen [4]. Es wurde berichtet, dass solche Effekte stark vom Sichtfeld abhängen, das von der Anzeigevorrichtung bereitgestellt wird.

2.2 Visuelle Bewegungswahrnehmung

Lokale Geschwindigkeiten der Lichtintensitäten in der optischen Anordnung codieren wichtige Informationen über die Bewegung einer Person in der Umgebung, enthalten jedoch eine erhebliche Menge an Rauschen, das vom Wahrnehmungssystem gefiltert werden muss, bevor eine globale Wahrnehmung geschätzt wird. Wie von Hermush und Yeshurun [13] diskutiert, kann eine kleine Lücke in einer Kontur vom Wahrnehmungssystem als Rauschen oder als wichtige Information interpretiert werden, dh die globale Wahrnehmung basiert hauptsächlich auf lokalen Informationen, aber auf der globalen Wahrnehmung Definiert, ob die Lücke ein Signal oder ein Rauschen ist. Die Wechselbeziehung und Vernetzung zwischen lokal und

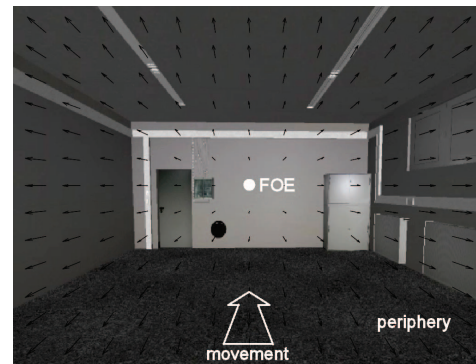


Abbildung 1: Expansionsoptische Flussmuster mit FOE für Translationsbewegungen und Randbereich.

Globale Phänomene in der visuellen Bewegungswahrnehmung sind noch nicht vollständig verstanden, daher basieren Modelle der visuellen Wahrnehmung normalerweise auf Beobachtungen von visuellen Bewegungswahrnehmungen, die durch angepasste lokale Bewegungsstimuli induziert werden, in die das Wahrnehmungssystem getäuscht werden kann falsche Schätzungen der globalen Bewegung [1, 8].

In den letzten Jahrhunderten wurden verschiedene visuelle Bewegungswahrnehmungen beschrieben und Modelle vorgestellt, die diese Phänomene teilweise erklären. Zum Beispiel, *scheinbare Bewegung* [1, 10] beschreibt die Wahrnehmung von Szenen- oder Objektbewegungen, die auftreten, wenn ein Reiz an diskreten Orten präsentiert und zeitlich getrennt wird, dh einer räumlich und zeitlich kontinuierlichen Bewegung nicht ähnelt. Zum Beispiel, wenn eine Folge von zwei statischen Bildern mit lokalen Musterverschiebungen vom Bild *EIN* vorstellen *B*. abwechselnd dargestellt werden [21], nimmt ein Betrachter abwechselnd globale Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen wahr. Diese bidirektionale Bewegung wird lokalen Bewegungsmeldern zugeschrieben, die während des Übergangs eine Vorwärtsbewegung erfassen *EIN* \rightarrow *B*, und Rückwärtsbewegung *B* \rightarrow *EIN*. Wenn die Stimuli jedoch auf eine begrenzte oder inverse Stimulation [21, 22] von Bewegungsmeldern während des Übergangs abgestimmt sind *B* \rightarrow *EIN*, Ein Betrachter kann eine unidirektionale, kontinuierliche Bewegung wahrnehmen *EIN* \rightarrow *B*.

In diesem Artikel betrachten wir vier Techniken, um Selbstbewegungsillusionen in immersiver VR zu induzieren:

1. *geschichtete Bewegung* [7], basierend auf der Beobachtung, dass mehrere Laien-Strömungsfelder, die sich in verschiedene Richtungen oder mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen, können die globale Bewegungswahrnehmung beeinflussen [10].
2. *Konturfilterung* [8] unter Ausnutzung von Approximationen menschlicher Lo-Verarbeitung von Merkmalen in der visuellen Bewegungswahrnehmung [1].
3. *Blindheit ändern* [26], basierend auf dem kurzen Ausblenden der Ansicht mit Intervallen zwischen Stimuli, die möglicherweise eine Kontrastinversion des Nachbils hervorrufen [21], und
4. *Kontrastinversion* [2, 22], basierend auf der Beobachtung, dass der umgekehrte Bildkontrast die Ausgabe lokaler Bewegungsdetektoren beeinflusst.

3 V. IRTUELL S. ELF- M. OTION ICH LLUSIONEN

In diesem Abschnitt beschreiben wir vier Ansätze für illusorische Bewegungen in VEs und setzen diese in Beziehung zur virtuellen Selbstbewegung.

3.1 Virtuelle Selbstbewegung

In immersiven VR-Umgebungen mit Kopfverfolgung werden Benutzerbewegungen normalerweise eins zu eins auf Bewegungen der virtuellen Kamera abgebildet. Für jedes Bild wird die vom Tracking-System gemessene Änderung der Position und Ausrichtung verwendet, um den Status der virtuellen Kamera zu aktualisieren

3.4 Blindheit ändern

Änderungsblindheit beschreibt das Phänomen, dass ein Benutzer, dem eine visuelle Szene präsentiert wird, bei kurzen visuellen Störungen möglicherweise keine signifikanten Änderungen in der Szene erkennt. Obwohl sich normalerweise Blindheitsphänomene ändern, werden sie mit Sehstörungen untersucht, indem der Bildschirm für 60 ausgeblendet wird -- 100 ms [25, 26] können Änderungen an der Szene mit gemessenen Blinzeln oder Bewegungen der Augen eines Betrachters [25] synchronisiert werden, z. B. aufgrund von Sakkadenunterdrückung. Angenommen, eine Rate von etwa 4 Sakkaden und 0,2 -- 0,25 Blinkzeichen pro Sekunde für einen gesunden Beobachter [6]. Dies bietet die Möglichkeit, die Szene in Bezug auf Übersetzungen oder Rotationen der Szene ungefähr alle 250 ms zu ändern.

Wir untersuchen illusorische Bewegungen basierend auf Veränderungsblindheit, indem wir kurzfristige Graustufen als Inter-Stimulus-Intervalle (ISI) einführen. Wir manipulieren die Eins-zu-Eins-Zuordnung zu Bewegungen der virtuellen Kamera direkt mit Gewinnen $G \tau_{ij} \in \mathbb{R}$. und $G \tau_{ij} \in \mathbb{R}$, wie für transla-
In Abschnitt 3.1 führen wir einen Versatz zur tatsächlichen Kameraposition und -ausrichtung ein, der sich seit dem letzten ISI angesammelt hat und bei Einführung des nächsten ISI auf Null zurückgesetzt wird. Wir wenden einen ISI von 100 ms Dauer für die Rückwärtsbewegung an (siehe Abbildung 2 (e)). Diese Illusion unterscheidet sich von den vorherigen Illusionen, da es sich nicht um eine Bildschirmraumoperation handelt, sondern auf Manipulationen der virtuellen Szene basiert, bevor ein ISI die eingeführten Änderungen insbesondere vom Betrachter unmerklich rückgängig macht, ohne visuelle Bewegungsmelder während des Rückwärtsfahrens zu stimulieren Bewegung.

3.5 Kontrastinversion

Marther et al. [22] beschrieben eine Illusion, die auf zwei leicht unterschiedlichen Bildern (plus entsprechenden Bildern mit umgekehrtem Kontrast) basiert, die das Gefühl einer Richtungsbewegung vom ersten zum zweiten Bild induzieren könnten, ohne visuelle Bewegungsmelder während der Rückwärtsbewegung zu stimulieren [2]. Daher die Bilder EIN und B , sowie die kontrastumgekehrten Bilder EIN_c und B_c wurden dem Betrachter in der folgenden Schleifenfolge angezeigt: $EIN \rightarrow B \rightarrow EIN_c \rightarrow B_c$. Aufgrund der Umkehrung des Kontrasts wurden Bewegungsmelder nur getauscht, um Bewegungen in der Richtung zu erfassen $EIN \rightarrow B$.

Wir untersuchen die Illusion mit der gleichen Manipulation von virtuell Kamerabewegungen mit Gewinnen $G \tau_{ij} \in \mathbb{R}$. und $G \tau_{ij} \in \mathbb{R}$, wie verwendet für die Illusion der Veränderungsblindheit in Abschnitt 3.4. Anstatt jedoch einen grauen Bildschirm als ISI anzuwenden, werden zwei kontrastumgekehrte Bilder mit derselben Dauer angezeigt: $B \rightarrow EIN_c \rightarrow B_c \rightarrow EIN$, mit B , das zuletzt gerenderte Bild, das dem Benutzer vor der Rückwärtsbewegung präsentiert wurde, und EIN Das Bild wird gerendert, nachdem der Kamerastatus auf die tatsächliche Kameraposition und -ausrichtung zurückgesetzt wurde. Diese Illusion steht in engem Zusammenhang mit Effekten, die insbesondere bei Experimenten zur Veränderung der Blindheit festgestellt wurden, da bestimmte ISIs eine Kontrastinversion des Nachbilds des Auges induzieren können [21]. Da die Hauptanwendung der Änderungsblindheit jedoch während gemessener Sakkaden liegt und Kontrastinversionsstimuli erfordern, dass der Benutzer die kontrastumgekehrten Bilder sieht, die möglicherweise weniger ablenken als das Ausblenden der gesamten Ansicht, untersuchen wir beide Illusionen getrennt. Kontrastumgekehrte Stimuli scheinen auch nicht auf die minimale Anzeigedauer von 60 beschränkt zu sein -- 100 ms für Change Blindness Stimuli [25]. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 (f) dargestellt.

3.6 Periphere Mischung

Wenn visuelle Illusionen in immersiven VEs angewendet werden, induzieren diese normalerweise eine Art visuelle Modulation, die den Benutzer ablenken kann, insbesondere wenn sie in dem Bereich der virtuellen Szene auftritt, auf den sich der Benutzer konzentriert. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, wenden wir optische Flussillusionen nur in den peripheren Bereichen der Augen des Benutzers an, dh in den Bereichen außerhalb der Fovea, die mit dem vom visuellen Anzeigegerät bereitgestellten Sichtfeld noch stimuliert werden können. Wie in Abschnitt 2 erwähnt, ist das foveale Sehen auf einen kleinen Bereich um die optische Sichtlinie beschränkt. Um dem Benutzer eine genaue Sicht mit höchster Sehschärfe in dieser Region zu bieten, wenden wir die beschriebenen Illusionen an

nur in der Peripherie der Augen des Benutzers. Daher wenden wir eine einfache Alpha-Mischung auf die Anzeigebefläche an. Wir rendern Pixel im fovealen Bereich, wobei der Kamerastatus durch Eins-zu-Eins oder Eins-zu-Eins definiert ist. n Mapping (vgl. Abschnitt 3.1) und verwenden Sie einen illusorischen Bewegungsalgorithmus nur für den peripheren Bereich. Potenzielle visuelle Verzerrungen stören daher nicht die fovealen Informationen von Szenenobjekten, auf die sich der Benutzer konzentriert. In unseren Studien haben wir feste Blickrichtungen sichergestellt. Die Blickrichtung eines Benutzers konnte jedoch in Echtzeit mit einem Eye-Tracker gemessen oder durch Analyse der hervorstechenden Merkmale in der virtuellen Ansicht vorbestimmt werden.

Hypothese

Visuelle Illusionen werden normalerweise unter der Annahme eines stationären Betrachters angewendet und wurden für einen sich bewegenden Benutzer in einer immersiven VR-Umgebung nicht gründlich untersucht. Daher ist noch weitgehend unbekannt, wie das visuelle System visuelle Selbstbewegungsinformationen mit hoher Genauigkeit in einer strukturierten virtuellen Szene interpretiert, wenn sie illusorischen Bewegungsstimuli ausgesetzt sind. Wir nehmen an, dass illusorische Bewegungshinweise dies können

(H1) führen zu einer Integration von Selbstbewegung und illusorischer Bewegung, was somit dazu führen würde, dass die Umgebung stabil erscheint, dh die Wahrnehmung der Selbstbewegung beeinflussen,

verglichen mit der Nullhypothese, dass das Wahrnehmungssystem zwischen Selbstbewegung und illusorischer Bewegung unterscheiden und die illusorische Komponente als relativ zur Umgebung interpretieren könnte, was zu einer nicht betroffenen Wahrnehmung von Selbstbewegung führt. Wenn die Hypothese (H1) für eine Illusion gilt, ist immer noch nicht klar, wie die Wahrnehmung der Selbstbewegung durch ein gewisses Maß an illusorischer Bewegung beeinflusst wird, für die wir die Hypothese aufstellen, dass eine illusorische Bewegung nicht in vollem Umfang simuliert wird Übersetzungen und Rotationen aufgrund der nichtlinearen Mischungsgleichungen und der peripheren Stimulation. In den folgenden Abschnitten werden diese Fragen behandelt.

4 P. SYCHOPHYSIKALISCH E. XPERIMENTS

In diesem Abschnitt beschreiben wir vier Experimente, die wir durchgeführt haben, um die präsentierten visuellen Illusionen auf das Potenzial zu analysieren, die wahrgenommene Selbstbewegung in einem VE zu beeinflussen bzw. zu verbessern:

- Exp. E1: Schichtbewegung,
- Exp. E2: Konturfilterung,
- Exp. E3: Blindheit ändern und
- Exp. E4: Kontrastinversion.

Daher analysierten wir die Einschätzung der Probanden, ob eine physikalische Übersetzung kleiner oder größer als eine simulierte virtuelle Übersetzung war, während wir die Parameter der Illusionsalgorithmen variierten.

4.1 Versuchsaufbau

Wir haben die Experimente in 10m durchgeführt \times 7 m abgedunkelter Laborraum.

Die Probanden trugen ein HMD (ProView SR80, 1280 x 1024 bei 60 Hz, 80° diagonales Sichtfeld) für die Reizdarstellung. Auf dem HMD wurde eine Infrarot-LED befestigt, die wir im Labor mit einem aktiven optischen Tracking-System (PPT X4 von WorldViz) verfolgten, das eine Genauigkeit von Submillimetern und eine Genauigkeit von Subzentimetern bei einer Aktualisierungsrate von 60 Hz bietet. Die Ausrichtung des HMD wurde mit einem Trägheitsorientierungssensor mit drei Freiheitsgraden (InertiaCube 3 von InterSense) mit einer Aktualisierungsrate von 180 Hz verfolgt. Für die visuelle Anzeige, Systemsteuerung und Protokollierung verwendeten wir einen Intel-Computer mit Core i7-Prozessoren, 6 GB Hauptspeicher und n Nvidia Quadro FX 4800.

Um die Probanden auf die Aufgaben zu konzentrieren, wurde während des Experiments keine Kommunikation zwischen Experimentator und Proband durchgeführt. Alle Anweisungen wurden auf Folien in der VE angezeigt, und die Probanden beurteilten ihre wahrgenommenen Bewegungen per Tastendruck auf einer Nintendo Wii-Fernbedienung. Der visuelle Reiz bestand aus virtuellen Szenen, die mit der CityEngine von Procedural (siehe Abbildung 3) erstellt und mit der IrrLight-Engine sowie unserer eigenen Software gerendert wurden.



Abbildung 3: Foto eines Benutzers während der Experimente. Der Einschub zeigt den visuellen Reiz ohne Manipulation des optischen Flusses.

4.1.1 Teilnehmer

8 Männer und 2 Frauen (Alter 26-31, σ : 27.7) Probanden nahmen an der Studie teil. Alle Fächer waren Studenten der Informatik, Mathematik oder Psychologie. Alle hatten normale oder auf normale Sicht korrigierte. 3 hatten keine Spielerfahrung, 1 hatte einige und 6 hatten viel Spielerfahrung. 8 der Probanden hatten Erfahrung mit dem Gehen in einem HMD-Setup. Alle Probanden waren den experimentellen Bedingungen nicht gewachsen. Die Gesamtzeit pro Proband einschließlich Vorfragebogen, Anweisungen, Schulung, Experimenten, Pausen und Nachbesprechung betrug 3 Stunden. Die Probanden durften jederzeit Pausen einlegen.

4.1.2 Materialien

Wir haben die Probanden angewiesen, eine Strecke von 2 m mit einer angemessenen Geschwindigkeit in der realen Welt zu gehen. Zur virtuellen Übersetzung wenden wir uns an vier verschiedene Übersetzungsgewinne G_T , dh identische Zuordnung $G_T = 1,0$ von Übersetzungen von der physischen in die virtuelle Welt, die dazugewinnen $G_T = 1,07$, bei denen Probanden in den Experimenten von Steinicke et al. [27] beurteilten physische und virtuelle Bewegungen als gleich, ebenso wie die Schwellenwerte $G_T = 0,86$ und $G_T = 1,26$ bei denen Probanden nur eine Diskrepanz zwischen physischen und virtuellen Bewegungen feststellen konnten. Für alle Übersetzungsgewinne haben wir Parameter getestet $G_T \in \{-1,0, 1,0\}$ in Schritten von 0,3 für illusorische Bewegungen, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Wir haben die unabhängigen Variablen über alle Versuche hinweg randomisiert und jeweils viermal getestet.

Zu Beginn jedes Versuchs wurde die virtuelle Szene auf dem HMD zusammen mit der schriftlichen Anweisung präsentiert, die Augen auf ein kleines Fadenkreuz in Augenhöhe zu fokussieren und vorwärts zu gehen, bis das Fadenkreuz rot wird. Das Fadenkreuz stellte sicher, dass die Probanden in die Mitte des in Abschnitt 3.6 beschriebenen peripheren Mischbereichs blickten. Die Probanden zeigten das Ende des Spaziergangs mit einem Tastendruck auf dem Wii-Controller an (siehe Abbildung 3). Anschließend mussten die Probanden entscheiden, ob die simulierte virtuelle Übersetzung kleiner (Abwärts-Taste) oder größer (Aufwärts-Taste) als die physische Übersetzung war. Die Probanden wurden über zwei Markierungen auf einem weißen Bildschirm zur Startposition zurückgeführt.

4.1.3 Methoden

Für die Experimente verwendeten wir ein innerhalb des Subjekts liegendes Design mit der Methode der konstanten Reize in a *Zwei-Alternativen-Zwangswahl* (2AFC) Aufgabe. Bei der Methode der konstanten Stimuli werden die angewendeten Gewinne nicht von einem Versuch zum nächsten in Beziehung gesetzt, sondern zufällig und gleichmäßig verteilt dargestellt. Das Thema wählt zwischen einer von zwei möglichen Antworten, z. B. „War die virtuelle Bewegung kleiner oder

größer als die körperliche Bewegung?“. Antworten wie „Ich kann es nicht sagen.“ ist nicht gestattet. Wenn die Testperson das Signal nicht erkennen kann, muss sie raten und wird in 50% der Versuche im Durchschnitt korrekt sein.

Der Gewinn, mit dem das Subjekt in der Hälfte der Versuche „kleiner“ reagiert, wird als der angenommen *Punkt der subjektiven Gleichheit* (PSE), bei der das Subjekt die physische und die virtuelle Bewegung als identisch wahrnimmt. Wenn die Verstärkung von diesem Wert abnimmt oder zunimmt, nimmt die Fähigkeit des Subjekts zu, den Unterschied zwischen physischer und virtueller Bewegung zu erkennen, was zu einer psychometrischen Kurve für die Diskriminierungsleistung führt. Die über alle Probanden zusammengefasste Diskriminierungsleistung wird normalerweise über eine psychometrische Funktion dargestellt

der Form $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(a(x-b))}}$ mit angepassten reellen Zahlen a und b . Die PSEs geben Hinweise, wie die Illusion wie z

dass virtuelle Bewegungen für Benutzer natürlich erscheinen.

Wir haben den Einfluss der Illusionen auf das Präsenzgefühl der Probanden mit dem SUS-Fragebogen [29] und die Simulatorkrankheit mit Kennedys SSQ vor und nach jedem Experiment gemessen. Zusätzlich haben wir die Probanden gebeten, die Illusionen anhand von 10 allgemeinen Usability-Fragen zu visueller Qualität, Wahrnehmbarkeit und Ablenkung zu beurteilen und zu vergleichen. Materialien und Methoden waren für alle vier durchgeführten Experimente gleich. Die Reihenfolge der Experimente wurde randomisiert.

4.2 Experiment E1: Schichtbewegung

Wir analysierten die Auswirkungen der dreischichtigen Bewegungstechniken T1, T2 und T3 in Abschnitt 3.2 mit unabhängiger Variable beschrieben $G_T \in \{-1, -0,6, -0,3, 0, 0,3, 0,6, 1\}$ auf Selbstbewegungswahrnehmung.

4.2.1 Ergebnisse

Die 4 (a) - (d) zeigen die gepoolten Ergebnisse für die Gewinne $G_T \in \{0,86, 1,0, 1,07, 1,26\}$ mit dem Standardfehler über alle Probanden. Das x -Achse zeigt den Parameter $G_T \in \{-1, -0,6, -0,3, 0, 0,3, 0,6, 1\}$, die y -Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer physikalischen Übersetzung als größer als die virtuelle Übersetzung. Die hellgraue psychometrische Funktion zeigt die Ergebnisse für Technik T1, die mittelgraue Funktion für Technik T2 und die Schwarzfunktion für Technik T3. Aus den psychometrischen Funktionen für Technik T3 haben wir ermittelt PSEs bei $G_T \in \{0,6325$ für $G_T = 0,86$, $G_T \in \{0,4361$ für $G_T = 1,0$, $G_T \in \{0,2329$ für $G_T = 1,07$ und $G_T \in \{-0,1678$ für $G_T = 1,26$.

4.2.2 Diskussion

Zum $G_T = 0$ Die Ergebnisse für die drei Techniken und vier getesteten Übersetzungsgewinne ergeben ungefähre Ergebnisse, die von Steinicke et al. [27]. Das heißt, die Probanden haben die Übersetzungen in der VE im Fall einer Eins-zu-Eins-Zuordnung leicht unterschätzt. Die Ergebnisse sind in den 4 (a) - (d) aufgetragen. zeigen einen signifikanten Einfluss von Parametern G_T zur Bewegungswahrnehmung nur für Technik T3. Die Techniken T1 und T2 hatten keine signifikante Bedeutung Der Einfluss auf die Beurteilung der Entfernungen durch die Probanden, dh die durch die Rendering-Techniken induzierten Bewegungshinweise, könnte vom visuellen System eher als externe Bewegung in der Szene als als Selbstbewegung interpretiert werden. Wie von Johnston et al. [16] Dieses Ergebnis kann durch die Interpretation des visuellen Systems mehrerer Schichten von Bewegungsinformationen erklärt werden, insbesondere aufgrund der Dominanz von Bewegungsinformationen zweiter Ordnung, wie z. B. Übersetzungen in einer strukturierten Szene, die durch die beeinflusst werden können strukturierte Bewegungsschicht in Technik T3.

4.3 Experiment E2: Konturfilterung

Wir haben die Auswirkungen der beschriebenen Konturfilter-Illusion analysiert in Abschnitt 3.3 mit unabhängiger Variable $G_T \in \{-1, -0,6, -0,3, 0, 0,3, 0,6, 1\}$ auf Selbstbewegungswahrnehmung.

4.3.1 Ergebnisse

Die 4 (e) - (h) zeigen die gepoolten Ergebnisse für die vier getesteten Gewinne $G_T \in \{0,86, 1,0, 1,07, 1,26\}$ mit dem Standardfehler über alle Probanden für die getesteten Parameter $G_T \in \{-1, -0,6, -0,3, 0, 0,3, 0,6, 1\}$.

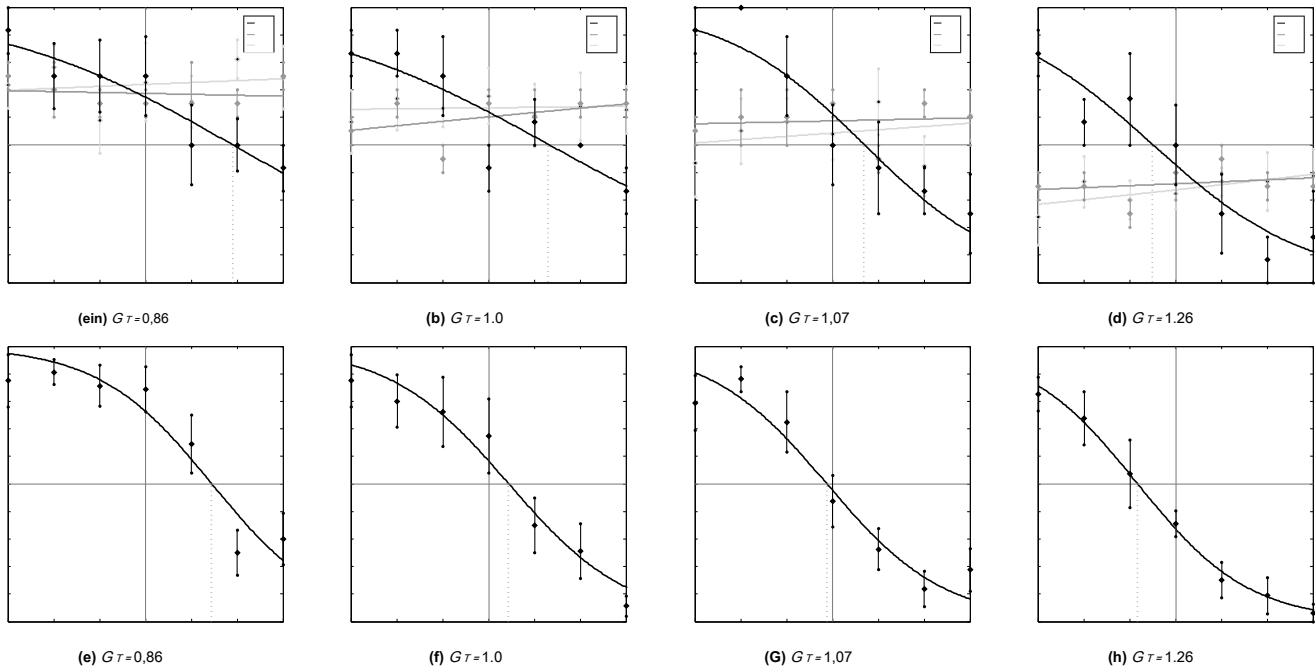


Abbildung 4: Zusammengefasste Ergebnisse der Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen Übersetzungen. Das x- Achse zeigt den angewendeten Parameter $G_T/|l|$. Das y- Die Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit, die virtuelle Bewegung als kleiner als die physische Bewegung zu schätzen. Die Diagramme (a) - (d) zeigen Ergebnisse aus Experiment E1 für Die getesteten Translationsgewinne (e) - (h) zeigen die Ergebnisse aus Experiment E2.

Das x- Achse zeigt den Parameter $G_T/|l|$, das y- Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer physischen Translation als größer als die Vir- tatsächliche Übersetzung. Aus den psychometrischen Funktionen haben wir ermittelt PSEs bei $G_T/|l| = 0,4844$ für $G_T = 0,86$, $G_T/|l| = 0,2033$ für $G_T = 1,0$, $G_T/|l| = -0,0398$ für $G_T = 1,07$ und $G_T/|l| = -0,2777$ für $G_T = 1,26$.

4.3.2 Diskussion

Ähnlich den Ergebnissen aus Versuch E1 (vgl. Abschnitt 4.2), z $G_T/|l| = 0$ Die Ergebnisse für die vier getesteten Übersetzungen erhalten ungefähre Ergebnisse von Steinicke et al. [27]. Für alle Übersetzungsgewinne Die in den 4 (e) - (h) dargestellten Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss von Parameter $G_T/|l|$ zur Bewegungswahrnehmung mit einer höheren Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer größeren virtuellen Übersetzung, wenn ein größerer Parameter angewendet wird und umgekehrt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Illusion die Beurteilung der Fahrstrecken durch die Probanden erfolgreich beeinflussen kann, indem die Bewegungsgeschwindigkeit durch Transformation lokaler Merkmale in der Peripherie erhöht oder verringert wird.

Die PSEs zeigen, dass bei einer Übersetzungsgeschwindigkeit von + 48% in der Peripherie im Fall von a -- 14% verringerten die Bewegungsgeschwindigkeit in der Fovea (($G_T = 0,86$) Die Probanden bewerteten reale und virtuelle Übersetzungen als identisch bzw. + 20% für die Eins-zu-Eins-Zuordnung ($G_T = 1,0$), -- 4% für + 7% ($G_T = 1,07$) und -- 28% für + 26% ($G_T = 1,26$). Die PSEs motivieren dazu, illusorische Bewegungen über die lokale Konturfilterung anzuwenden Ansatz kann Übersetzungsentfernungsurteile mit zurückgelegten Entfernungen übereinstimmen lassen.

4.4 Experiment E3: Blindheit ändern

Wir haben die Auswirkungen der Veränderungsblindheit (siehe Abschnitt 3.4) mit einer unabhängigen Variablen analysiert $G_T/|l|$ auf Selbstbewegungswahrnehmung.

4.4.1 Ergebnisse

Die 5 (a) - (d) zeigen die gepoolten Ergebnisse für die vier getesteten Gewinne $G_T \in \{0,86, 1,0, 1,07, 1,26\}$ mit dem Standardfehler über alle Probanden für die getesteten Parameter $G_T/|l| \in \{-1, -0,6, -0,3, 0, 0,3, 0,6, 1\}$.

Das x- Achse zeigt den Parameter $G_T/|l|$, das y- Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer physischen Translation als größer als die Vir- tatsächliche Übersetzung. Aus den psychometrischen Funktionen haben wir ermittelt PSEs bei $G_T/|l| = 0,4236$ für $G_T = 0,86$, $G_T/|l| = 0,2015$ für $G_T = 1,0$, $G_T/|l| = 0,0372$ für $G_T = 1,07$ und $G_T/|l| = -0,0485$ für $G_T = 1,26$.

4.4.2 Diskussion

Für den Fall, dass keine illusorische Bewegung mit angewendet wurde $G_T/|l| = 0$ Die Ergebnisse für die vier getesteten Übersetzungen erhalten ungefähre Ergebnisse von Steinicke et al. [27]. Für alle Übersetzungsgewinne werden die Ergebnisse aufgezeichnet in 5 (a) - (d) zeigen einen signifikanten Einfluss des Parameters $G_T/|l|$ auf Bewegungswahrnehmung, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer größeren virtuellen Übersetzung, wenn ein größerer Parameter angewendet wird und umgekehrt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Illusion die Beurteilung der Fahrstrecken durch die Probanden erfolgreich beeinflussen kann, indem die Bewegungsgeschwindigkeit in der Peripherie erhöht oder verringert wird.

Die PSEs zeigen, dass bei einer Übersetzungsgeschwindigkeit von + 42% in der Peripherie im Fall von a -- 14% verringerten die Bewegungsgeschwindigkeit in der Fovea (($G_T = 0,86$) Die Probanden bewerteten reale und virtuelle Übersetzungen als identisch bzw. + 20% für die Eins-zu-Eins-Zuordnung ($G_T = 1,0$), + 3% für + 7% ($G_T = 1,07$) und -- 5% für + 26% ($G_T = 1,26$). Die Ergebnisse zeigen, dass foveale und periphere Bewegungshinweise von Bedeutung sind eher gerieben als ausschließlich von fovealen oder peripheren Informationen dominiert. Die PSEs motivieren dazu, dass durch Anwenden einer illusorischen Bewegung über den Change-Blindness-Ansatz die Beurteilung der Übersetzungsentfernung mit den zurückgelegten Entfernungen übereinstimmt, dh sie kann erfolgreich angewendet werden, um die Beurteilung der wahrgenommenen Übersetzungen im Falle einer Eins-zu-Eins-Abbildung zu verbessern Kompensation von Wahrnehmungsunterschieden, die durch skaliertes Gehen hervorgerufen werden [14].

4.5 Experiment E4: Kontrastinversion

Wir haben den Einfluss der Kontrastinversion (siehe Abschnitt 3.5) mit einer unabhängigen Variablen analysiert $G_T/|l|$ auf Selbstbewegungswahrnehmung.

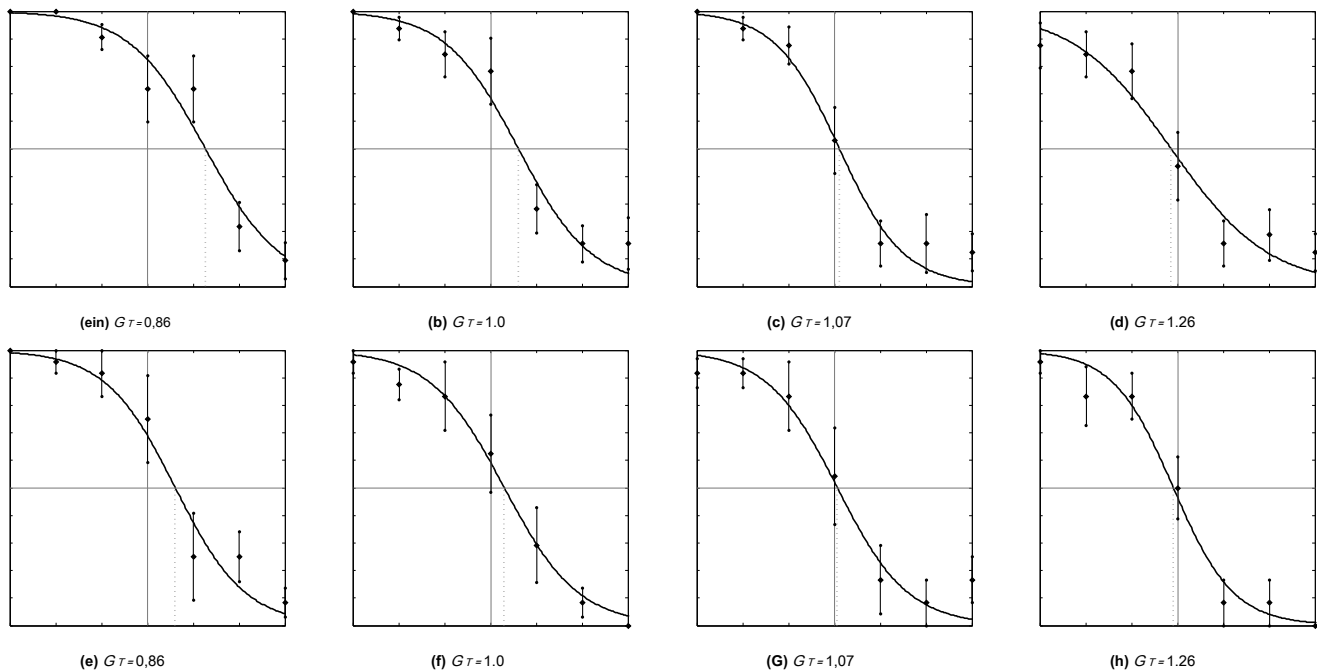


Abbildung 5: Zusammengefasste Ergebnisse der Unterscheidung zwischen virtuellen und physischen Übersetzungen. Das x-Achse zeigt den angewendeten Parameter GT . Die y-Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit, die virtuelle Bewegung als kleiner als die physische Bewegung zu schätzen. Die Diagramme (a) - (d) zeigen Ergebnisse aus Experiment E3 für die getesteten Translationsgewinne (e) - (h) zeigen die Ergebnisse aus Experiment E4.

4.5.1 Ergebnisse

Die 5 (e) - (h) zeigen die gepoolten Ergebnisse für die Gewinne $GT \in \{0,86, 1,0, 1,07, 1,26\}$ mit dem Standardfehler über alle Probanden. Das x-Achse zeigt den Parameter $GT \in \{-1, -0,6, -0,3, 0,0, 3,0, 6, 1\}$, die y-Achse zeigt die Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer physikalischen Übersetzung als größer als die virtuelle Übersetzung. Aus der psychometrischen Funktionen, bei denen wir PSEs bestimmt haben $GT = 0,2047$ für $GT = 0,86$, $GT = 0,0991$ für $GT = 1,0$, $GT = 0,0234$ für $GT = 1,07$ und $GT = -0,0315$ für $GT = 1,26$.

4.5.2 Diskussion

Ähnlich den Ergebnissen aus Versuch E3 (vgl. Abschnitt 4.4), z $GT = 0$ Die Ergebnisse für die vier getesteten Übersetzungen erhalten ungefähre Ergebnisse von Steinicke et al. [27] und die Ergebnisse in Abb.

Die Abbildungen 5 (e) - (h) zeigen einen signifikanten Einfluss der Parameter GT auf Bewegungswahrnehmung, was zu einer höheren Wahrscheinlichkeit für die Schätzung einer größeren führt virtuelle Übersetzung, wenn ein größerer Parameter angewendet wird und umgekehrt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kontrastinversionsillusion die Beurteilung der Fahrstrecken durch die Probanden erfolgreich beeinflussen kann, indem die Bewegungsgeschwindigkeit in der Peripherie erhöht oder verringert wird.

Die PSEs zeigen, dass bei einer Übersetzungsgeschwindigkeit von + 20% in der Peripherie im Fall von a - 14% verringerten die Bewegungsgeschwindigkeit in der Fovea ($GT = 0,86$) Die Probanden bewerteten reale und virtuelle Übersetzungen als identisch bzw. + 10% für die Eins-zu-Eins-Zuordnung ($GT = 1,0$), + 2% für + 7% ($GT = 1,07$) und - 3% für + 26% ($GT = 1,26$). Die Ergebnisse stimmen mit den in Experiment E3 gefundenen Qualitätsergebnissen überein, unterscheiden sich jedoch in Anzahl der angewendeten Parameter GT . Dies kann auf die derzeit noch weitgehend unbekannten Reaktionen des visuellen Systems auf Inter-Reizintervalle über graue Bildschirme bzw. Kontrastumkehr.

5 G. ENERAL D. ISCUSSION

In den vier Experimenten analysierten wir die Selbstbewegungsurteile der Probanden und zeigten, dass der Lenkungsparameter der Illusionen GT

beeinflusste die Ergebnisse in den Experimenten E2-E4 signifikant, beeinflusste jedoch nur die Ergebnisse für Technik T3 in Experiment E1. Wir haben mit Experiment E1 gezeigt, dass es nicht ausreicht, Szenenbewegungen mit irgendwelchen Flussinformationen, z. B. Partikeln oder Sinusgittern, zu überlagern, um die Selbstbewegungswahrnehmung in immersiven VEs zu beeinflussen, sondern den geschichteten Bewegungssstimulus zu benötigen, um das Aussehen von zu spiegeln die Szene. Experimentelles E2 motiviert, dass das Einführen einer schnelleren oder langsameren lokalen Konturbewegung in die Ansicht die globale Selbstbewegungswahrnehmung beeinflussen kann, obwohl nicht vollständig verstanden ist, wie globale und lokale Konturbewegung in einer virtuellen Szene vom Wahrnehmungssystem integriert werden. Die Experimente E3 und E4 zeigen, dass bei kurzzeitiger Blindheit ISIs oder kontrastumgekehrte Bildsequenzen, die die abgebildete Bewegung der virtuellen Kamera, dh Verschiebungen aufgrund von skaliertem Gehen, können auf ein Minimum beschränkt werden.

Die PSEs geben Hinweise, wie diese Illusionen angewendet werden können, damit die Urteile der Benutzer über Selbstbewegungen in immersiven VEs ihren Bewegungen in der realen Welt entsprechen. Für eine Eins-zu-Eins-Abbildung physischer Benutzerbewegungen haben die Probanden in allen Experimenten ihre virtuelle Selbstbewegung unterschätzt. Leicht erhöhte illusorische optische Fluss Hinweise führen dazu, dass die Probanden die virtuelle Bewegung als mit ihren realen Bewegungen übereinstimmend wahrnehmen, ein Effekt, der ansonsten eine Hochskalierung erforderlich machte

von virtuellen Übersetzungen mit dem Gewinn $GT = 1,07$ (siehe Abschnitt 4.1.2), was zu einer Nichtübereinstimmung zwischen realer und virtueller Welt führt. Für die Erkennung Schwellenwerte $GT = 0,86$ und $GT = 1,26$ bestimmt von Steinicke et al. [27], bei denen Probanden nur eine Manipulation von Viren erkennen konnten

Bei tatsächlichen Bewegungen haben wir gezeigt, dass entsprechende PSEs für illusorische Bewegungshinweise die hoch- oder verkleinerte Szenenbewegung kompensieren können. In diesem Fall schätzten die Probanden virtuelle Bewegungen als mit ihren realen Bewegungen übereinstimmend. Die Ergebnisse motivieren dazu, dass illusorische Bewegungen angewendet werden können, um den Bereich nicht wahrnehmbarer skaliert Gehgewinne zu vergrößern.

In den Experimenten erwies sich eine andere Stimulation von Bewegungsmeldern in der Peripherie der Probanden als in der Region des fovealen Zentrums als anwendbar. Informelle Nachuntersuchungen ohne periphere Vermischung in Experiment E1 ergaben, dass dies nicht die Hauptursache für Unbeeinträchtigung war

Vor und nach den Experimenten haben wir die Probanden gebeten, ihren Grad an Simulatorkrankheit und Präsenzgefühl zu beurteilen und die Illusionen zu vergleichen, indem sie in 10 Fragen Unterschiede in der visuellen Qualität und verwandten Faktoren beurteilten. Für die Simulatorkrankheit haben wir keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Experimenten gefunden, mit einem durchschnittlichen Anstieg der mittleren SSQ-Werte von 8,6, was mit früheren Ergebnissen bei Verwendung von HMDs über die Zeit des Experiments übereinstimmt. Wir haben keinen signifikanten Einfluss der Illusionen auf die mittleren SUS-Präsenzwerte mit einem durchschnittlichen SUS-Wert von 4,2 gefunden, was niedrige, aber typische Ergebnisse widerspiegelt. Die Probanden schätzten die Schwierigkeit der Aufgabe auf einer 5-Punkte-Likert-Skala (0 sehr einfach, 4 sehr schwierig) mit 3,1 (T1), 2,8 (T2), 1,8 (T3) in E1, 1,5 in E2, 0,3 in E3 und 0,4 in E4. Auf vergleichbaren Likert-Skalen schätzten die Probanden die wahrgenommenen Hinweise auf ihre Position im Labor während der Experimente aufgrund von Audio-Hinweisen auf 0,5 und visuellen Hinweisen auf 0,0. Über die informellen Usability-Fragen beurteilten die meisten Probanden die visuelle Qualität in Experiment E1 als am stärksten beeinträchtigt, gefolgt von E2, E4 und E3. Die Probanden beurteilten, dass visuelle Veränderungen, die in allen Illusionen hervorgerufen wurden, bemerkt werden konnten. Die Probanden schätzten jedoch, dass nur Schichtbewegungen und Konturfilter das Potenzial hatten, einen Benutzer von einer virtuellen Aufgabe abzulenken. Bei der Frage, ob die „zutreffendsten“ Illusionen informiert geschätzt werden sollen, schätzten die Probanden die Änderung von Blindheit und Kontrastinversion als gleichermaßen zutreffend ein, wobei Schichtbewegungen und Konturfilterung weniger zutreffend sind. Über die informellen Usability-Fragen beurteilten die meisten Probanden die visuelle Qualität in Experiment E1 als am stärksten beeinträchtigt, gefolgt von E2, E4 und E3. Die Probanden beurteilten, dass visuelle Veränderungen, die in allen Illusionen hervorgerufen wurden, bemerkt werden konnten. Die Probanden schätzten jedoch, dass nur Schichtbewegungen und Konturfilter das Potenzial hatten, einen Benutzer von einer virtuellen Aufgabe abzulenken. Bei der Frage, ob die „zutreffendsten“ Illusionen informiert geschätzt werden sollen, schätzten die Probanden die Änderung von Blindheit und Kontrastinversion als gleichermaßen zutreffend ein, wobei Schichtbewegungen und Konturfilterung weniger zutreffend sind.

In diesem Artikel haben wir vier visuelle Selbstbewegungsillusionen für immersive VR-Umgebungen vorgestellt. In einem psychophysischen Experiment haben wir gezeigt, dass die Illusionen die Beurteilung der Fahrstrecke in VEs beeinflussen können. Insbesondere haben wir gezeigt, dass die bei einer Eins-zu-Eins-Abbildung von realen zu virtuellen Bewegungen eines Benutzers beobachtete Unterschätzung der Verfahrrwege durch Anwenden einer illusorischen Bewegung mit den in den Experimenten bestimmten PSEs kompensiert werden kann. Wir haben auch das Potenzial der vorgestellten Illusionen zur Verbesserung der Anwendbarkeit des skalierten Gehens bewertet, indem wir der erhöhten oder verringerten virtuellen Fahrgeschwindigkeit eines Benutzers durch induzierte illusorische Bewegung entgegengewirkt haben. Unsere Ergebnisse zeigen, dass für veränderte PSE-Probanten solche realen und virtuellen Bewegungen als gleich beurteilt wurden.

Diese Arbeit wurde teilweise durch Stipendien der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

- [1] E. Adelson und J. Bergen. Raum-zeitliche Energiemodelle zur Wahrnehmung von Bewegung. *der Optischen Gesellschaft von Amerika A*, 2 (2): 284–299, 1985.
- [2] S. Anstis und B. Rogers. Illusorische kontinuierliche Bewegung durch oszillierende positiv-negative Muster: Implikationen für die Bewegungswahrnehmung. *Wahrnehmung*, 15: 627–640, 1986.
- [3] L. Antonov und R. Raskar. Implementierung von Bewegung ohne Bewegung auf realen 3D-Objekten. Technischer Bericht TR-04-02, Computer Science, Virginia Tech, 2002.
- [4] A. Berthoz. *Das Bewegungsgefühl des Gehirns*. Harvard Universität Press, Cambridge, Massachusetts, 2000.