

Kinematische Auswertung virtueller Laufbahnen

Gabriel Cirio, Anne-Hélène Olivier, Maud Marchal und Julien Pettré, *Mitglied, IEEE*

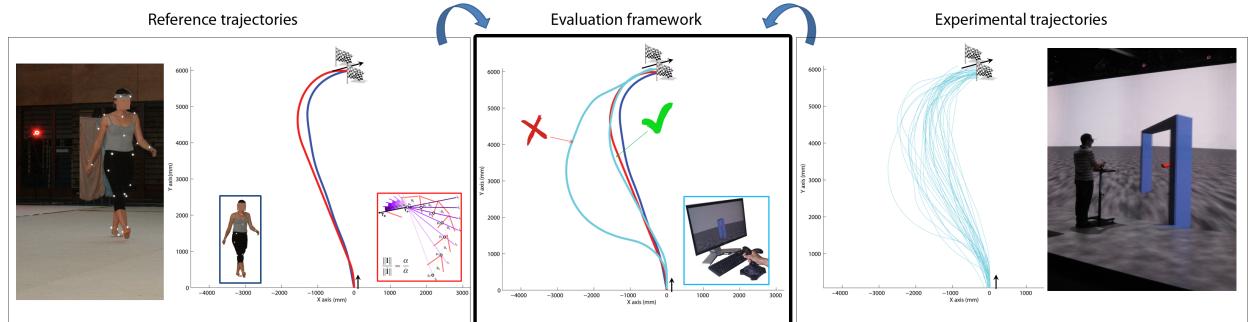


Abb. 1. Das Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene virtuelle Fortbewegungsbedingungen zu bewerten, indem die Referenz mit virtuellen Trajektorien verglichen wird, die während zielgerichteter Fortbewegungsaufgaben gebildet werden. Referenztrajektorien (links) können durch Bewegungserfassung aufgezeichnet oder durch ein numerisches Modell der menschlichen Fortbewegung erzeugt werden. Das Papier demonstriert den Rahmen (Mitte) über eine Reihe von experimentellen Trajektorien (rechts). Zu Demonstrationszwecken werden in diesem Artikel häufig verwendete virtuelle Fortbewegungsbedingungen verglichen.

Abstrakt - Virtuelles Gehen, eine grundlegende Aufgabe in der virtuellen Realität (VR), wird stark von der verwendeten Fortbewegungsschnittstelle, den Spezifikationen der Eingabe- und Ausgabegeräte und der Art und Weise beeinflusst, wie die virtuelle Umgebung dargestellt wird. Unabhängig davon, wie das virtuelle Gehen gesteuert wird, ist die Erzeugung realistischer virtueller Trajektorien für einige Anwendungen unbedingt erforderlich, insbesondere für Anwendungen, die sich mit der Untersuchung des Gehverhaltens in VR, der Navigation durch virtuelle Orte für Architektur, Rehabilitation und Training befassen. Frühere Studien, die sich auf die Bewertung des Realismus von Fortbewegungsbahnen konzentrierten, haben hauptsächlich das Ergebnis der Fortbewegungsaufgabe (Effizienz, Genauigkeit) und ihre subjektive Wahrnehmung (Anwesenheit, Cybersickness) berücksichtigt. Nur wenige konzentrierten sich auf die Fortbewegungsbahn selbst, jedoch in einer Situation mit geometrisch eingeschränkten Aufgaben. In diesem Papier, Wir untersuchen den Realismus von uneingeschränkten Trajektorien, die während des virtuellen Gehens erzeugt werden, indem wir die folgende Frage beantworten: Hat der Benutzer sein Ziel erreicht, indem er virtuell auf einer Trajektorie gelaufen ist, der er unter ähnlichen realen Bedingungen gefolgt wäre? Zu diesem Zweck schlagen wir einen umfassenden Bewertungsrahmen vor, der aus einer Reihe von Trajektorienkriterien und einem Fortbewegungsmodell zur Erzeugung von Referenztrajektorien besteht. Wir betrachten eine einfache Fortbewegungsaufgabe, bei der Benutzer zwischen zwei orientierten Punkten im Raum gehen. Der Fahrweg wird sowohl geometrisch als auch zeitlich im Vergleich zu simulierten Referenztrajektorien analysiert. Darüber hinaus demonstrieren wir das Framework anhand einer Benutzerstudie, in der ein erster Satz gemeinsamer und häufiger virtueller Gehbedingungen berücksichtigt wurde, nämlich verschiedene Eingabegeräte, Ausgabezeigegeräte, Steuergesetze, und Visualisierungsmodalitäten. Die Studie bietet einen Einblick in die relativen Beiträge jeder Bedingung zum Gesamtrealismus der resultierenden virtuellen Trajektorien.

Indexbegriffe - Bewegung, Bewertung, motorische Kontrolle, Vision, Wahrnehmungsaktion

1 I. EINLEITUNG

Das virtuelle Gehen in virtuellen Umgebungen ist eine Grundvoraussetzung für zahlreiche VR-Anwendungen (Virtual Reality). Eine breite Palette von Geräten und Techniken wurde vorgeschlagen, um eine virtuelle Fortbewegung zu erreichen, während eine breite Palette von Visualisierungsmodalitäten die Art und Weise beeinflusst, wie eine virtuelle Fortbewegung durchgeführt wird. In diesem Artikel schlagen wir vor, diesen Satz virtueller Fortbewegungsbedingungen zu bewerten, die die *interaktiver virtueller Fortbewegungsregelkreis*: Ermöglicht es Benutzern, ihre Bewegung in Richtung ihres Ziels zu steuern, indem sie denselben Weg einschlagen, den sie unter ähnlichen realen Bedingungen verfolgt hätten?

Neuere Arbeiten in den Neurowissenschaften haben gezeigt, dass Menschen grundlegende Fortbewegungsaufgaben stereotyp ausführen [14]. In diesem Zusammenhang Stereo-

typy bedeutet, dass unter den unendlich möglichen Flugbahnen *Beitritt A* bis *B* (zwei orientierte Punkte) folgen alle Menschen ähnlichen Bahnen, wenn *Gehen* von *A* nach *B*. Es ist wichtig, virtuelle Fortbewegungsbedingungen vorzuschlagen, die diese spezifische Steuerung beibehalten, dh die Benutzer auf natürliche Weise dazu veranlassen, während der zielgerichteten Fortbewegung Trajektorien zu erzeugen, die den realen entsprechen. Wir glauben insbesondere, dass dies das VR-Feld für die Untersuchung des Fortbewegungsverhaltens öffnen würde. Dies würde es ermöglichen, herausfordernde Fragen zu beantworten, z. B. zu untersuchen, wie Benutzer in der Phase des digitalen Modells wirklich durch ein neues Gebäude navigieren würden, das komplexe Fortbewegungsverhalten zu untersuchen, indem die Verwendung vollständig kontrollierter virtueller Umgebungen genutzt wird, und die Verwendung von motivierter VR für Lern- und Trainingsaufgaben.

• Gabriel Cirio ist bei INRIA Rennes, Frankreich, und bei der Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, Spanien. E-Mail: gabriel.cirio@inria.fr.

• Anne-Hélène Olivier ist bei INRIA Rennes, Frankreich. E-Mail: anne-helene.olivier@inria.fr.

• Maud Marchal ist bei INRIA Rennes, Frankreich, und bei INSA Rennes, Frankreich. E-Mail: maud.marchal@inria.fr.

• Julien Pettré ist bei INRIA Rennes, Frankreich. E-Mail: julien.petre@inria.fr.

Manuskript erhalten am 13. September 2012; akzeptiert 10. Januar 2013; online gestellt am 16. März 2013; verschickt am 16. Mai 2013.

Informationen zum Erhalt von Nachdrucken dieses Artikels erhalten Sie per E-Mail an: tvcg@computer.org.

Menschen steuern ihre Fortbewegung durch eine Kombination sensorischer Eingaben aus visuellen, propriozeptiven und vestibulären Systemen. In der VR besteht die einzige Möglichkeit, kongruente und vollständige sensorische Eingaben zu erhalten, während Sie virtuell durch eine virtuelle Umgebung gehen, darin, den Benutzern das Ausführen eines echten natürlichen Gehens zu ermöglichen. Leider verhindern die physischen Grenzen von VR-Geräten und VR-Displays sowie die begrenzte Verfügbarkeit großer, immerwährender Displays, dass mehr als ein paar Schritte auf natürlichem Gehen ausgeführt werden müssen. Diese Ausgabe erhalten *viele* Aufmerksamkeit und zahlreiche Metaphern und Geräte wurden vorgeschlagen. Betrachtet man beispielweise den Cyberwalk [35] einerseits und eine einfache tastaturbasierte Technik andererseits, so versteht man das *sehr groß* Vielzahl bestehender Lösungen. Da die virtuelle Fortbewegung hauptsächlich auf visuellem Feedback beruht, ist die

Viele Faktoren, die die Wahrnehmung der virtuellen Umgebung beeinflussen, beeinflussen auch die virtuelle Fortbewegung. Zu diesen Faktoren gehören Visualisierungsmodalitäten (Blickwinkel, Sichtfeld, stereoskopisches Sehen, Kontrast usw.) und Ausgabegeräte (Desktop-Bildschirm, Head-Mounted-Displays, CAVE-ähnliche Umgebungen usw.). Wie vergleichen sich die generierten Trajektorien bei unterschiedlichen Bewegungsbedingungen (dh unterschiedlichen Kombinationen von Fortbewegungstechniken, Eingabe- und Ausgabegeräten und Visualisierungsmodalitäten)?

Steuern Benutzer ihre Bewegung wie in der Realität?

Wir argumentieren, dass die Bewertung und der Vergleich verschiedener Fortbewegungsbedingungen in Bezug auf diesen spezifischen Aspekt wichtig ist. Neben einigen grundlegenden und leicht zugänglichen Eigenschaften (Kosten, erforderliches Gerät, Einschränkungen usw.) und subjektiven Fragebögen (Cybersickness, Anwesenheit) wurden mehrere objektive quantitative Kriterien vorgeschlagen, um die Fortbewegungsbedingungen zu vergleichen. Bei der Bewertung vieler VR-Interaktionstechniken wurden einige Leistungs- und Genauigkeitsindikatoren vorgeschlagen, um verschiedene Ansätze entsprechend einzustufen. Insbesondere für das Navigations- und Lokalisierungsverhalten wurden räumliche Beurteilungsaufgaben entwickelt, um die subjektive Wertschätzung der Benutzer zu bewerten [25]. Eine kinematische Analyse von Gehwegen wurde ebenfalls vorgeschlagen [41]. Es wurden jedoch geometrisch beschränkte Fortbewegungsaufgaben berücksichtigt (Gehen in Korridoren): Die Kontrolle der Geschwindigkeit in Bezug auf die Zeit bis zur Kollision konnte analysiert werden. Unser Papier berücksichtigt *ungezwungenes Zielgerichtetes Fortbewegungsaufgaben*: Entspricht die Flugbahn für das virtuelle Gehen von A nach B der Realität?

Unsere Beiträge sind folgende:

1. ein auf Trajektoriographie basierender Ansatz zur Bewertung verschiedener Fortbewegungsbedingungen im Hinblick auf die Konformität der erzeugten Trajektorien mit ihrem realen Gegenstück. Im Gegensatz zu früheren Ansätzen wird in dieser Arbeit untersucht, wie Benutzer ihre Bewegung kontinuierlich steuern.
2. ein vollständiger Rahmen, der offen und für die Community verfügbar ist, damit jeder neue Bewertungen durchführen kann. Das Framework enthält eine Reihe von Metriken zum Vergleichen von experimentellen virtuellen Trajektorien mit Referenztrajektorien, eine Reihe von realen Trajektorien der zielgerichteten Lokalisierung als Referenz und ein Modell zum Generieren neuer Referenztrajektorien. Das Modell ermöglicht die Berücksichtigung neuer Situationen, die nicht durch die Menge der realen Bewegungen erfasst werden. Die vorgeschlagenen Metriken analysieren einige globale Eigenschaften von Trajektorien (z. B. Trajektoriendauer, Länge), einige lokale Merkmale (z. B. Vorhandensein von Stopp, Kollisionen mit dem Ziel usw.) sowie kontinuierliche Variablen (z. B. insgesamt Form, Geschwindigkeitsprofil, Pfadkrümmung usw.).
3. eine Reihe von Experimenten, die zu zwei Zwecken durchgeführt wurden: (1) Veranschaulichung unseres Rahmens durch eine breite Palette experimenteller Daten und (2) Bereitstellung einer ersten Bewertung der Konformität virtueller Trajektorien mit ihrem realen Gegenstück unter einer Reihe häufig verwendeter Bedingungen. Insbesondere kann eine erste Frage beantwortet werden: Unterscheiden sich die Trajektorien der virtuellen Fortbewegung vollständig von den realen, wenn sie unter häufig verwendeten VR-Bedingungen gesteuert werden?

Der Rest des Papiers ist wie folgt organisiert. Abschnitt 2 beschreibt verwandte Arbeiten. Abschnitt 3 beschreibt das Framework mit den verschiedenen Bewertungskriterien und dem Modell zur Generierung von Referenztrajektorien. Abschnitt 4 beschreibt die fünf verschiedenen durchgeführten Experimente und ihre Ergebnisse. Abschließend werden die Ergebnisse in Abschnitt 5 erörtert, bevor sie abgeschlossen werden.

2 R. BEGEISTERT W. ORK

2.1 Fortbewegung des Menschen

2.1.1 Zielgerichtete Fortbewegung

Ein Mensch und seine Umwelt sind ein untrennbares und komplementäres Paar [10]. Zum Beispiel kann das Gehen körperzentriert beschrieben werden, wobei räumlich-zeitliche Merkmale wie Gangart, Stabilität oder Segmentkoordination im Mittelpunkt stehen. Um jedoch effizient navigieren zu können, implementiert der Walker ein adaptives Bewegungsverhalten [28], das von der Wahrnehmung der Eigenschaften der Umgebung (Ziele, Hindernisse usw.) abhängt. Verschiedene sensorische Systeme übermitteln dem Walker die erforderlichen Informationen. Insbesondere das Vestibular und das Propriozeptiv

Systeme liefern absolute und relative Informationen über den internen Zustand des Gehers. Umgekehrt liefert das visuelle System Informationen über die äußere Umgebung, so dass der Wanderer seine Position, seine Selbstbewegung, die Bewegung anderer Elemente in der Umgebung sowie im Voraus genaue Informationen über die Art der Umgebung abschätzen kann [27].

Das visuelle System spielt eine wichtige Rolle in unserem Kontext, in dem die virtuelle Fortbewegung von einer statischen realen Position aus verwendet wird. Die visuell gesteuerte Bewegung hat in der Vergangenheit beträchtliche Aufmerksamkeit erhalten [10, 27, 40,

22, 39, 6] und zwei Hauptstrategien zur Erreichung eines Ziels wurden identifiziert. Der erste, der von Gibson [10] vorgeschlagen wurde, nutzt den optischen Fluss, der durch die scheinbare Bewegung jedes Punkts erzeugt wird und die Bildfolge bildet, die der Wanderer während seiner Bewegung wahnimmt [17]. Die Steuerung in Richtung eines Ziels wird erreicht, indem der Fokus der Ausdehnung des Flusses mit dem zu erreichenden Ziel überlagert wird. Die zweite von Rushton [33] vorgeschlagene Strategie zielt darauf ab, die Bewegungssachse an der wahrgenommenen egozentrischen Richtung des zu erreichenden Ziels auszurichten. Studien haben gezeigt, dass beide Strategien während der Fortbewegungssteuerung angewendet werden [40], wobei die Dominanz je nach Menge der verfügbaren visuellen Informationen unterschiedlich ist [12, 42, 39].

In Bezug auf die Motorsteuerung legen neuere Studien [1, 14] nahe, dass die zielgerichtete Fortbewegungsplanung eher global als lokal (Schritt für Schritt) erfolgt [14]: Menschliche Flugbahnen sind stereotyp, wenn sie im Massenmittelpunkt des Gehers gemessen werden, aber nicht, wenn zu Füßen gemessen. Diese Stereotypie findet sich sowohl in der Flugbahngometrie als auch im Geschwindigkeitsprofil des Gehers, wobei die Geschwindigkeiten vor dem Wendeln abnehmen und die Geschwindigkeiten während des Abbiegens konstant sind, wodurch glatte Flugbahnen erzeugt werden können.

2.1.2 Numerische Modelle der zielgerichteten Fortbewegung

Es wurden mehrere Modelle vorgeschlagen, um globale Fortbewegungsprojektionen zu generieren, wenn ein Ziel erreicht werden soll. Ein erster Ansatz wurde von Reynolds [32] als eine Reihe reaktiver Kontrollen eingeführt. Dieser Ansatz wird von Boulic [4] durch die Berücksichtigung orientierter Ziele verbessert. Brogan und Johnson [5] führen reales menschliches Fortbewegungsverhalten in ihr Modell ein, indem sie die Geschwindigkeit gemäß Beschleunigungs- und Verzögerungsregeln berechnen, die auf Beobachtungen realer Aufzeichnungen basieren.

Ein weiterer Satz zielgerichteter Fortbewegungsmodelle nutzt echte menschliche Fortbewegungsbeobachtungen weiter, indem ihre Parameter mithilfe von Aufzeichnungen optimiert werden. Ein erster Ansatz, der von Fajen und Warren [8] vorgeschlagen wurde, verwendet ein Differentialsystem zweiter Ordnung und einen Attraktor, um den Winkel zwischen der Kursrichtung und der Position-Ziel-Richtung aufzuheben. Die verschiedenen Parameter werden anhand von Daten aus Trajektorien optimiert, die von echten Menschen in einer VR-Umgebung generiert wurden. Die Ziele waren jedoch nicht ausgerichtet und die Geschwindigkeiten waren konstant. In jüngerer Zeit haben Arechavaleta et al. [1] erzeugte Trajektorien durch Optimierung eines Einradmodells mit aufgezeichneten Daten für ein bestimmtes Ziel. Das zugrunde liegende Einradmodell war nicht holonom, dh mit einer Kopplung zwischen der Richtung und der Position des Körpers, die unnatürliche Bewegungen wie Ausweichen verhindert.

Ein letzter Satz zielgerichteter Fortbewegungsmodelle basiert auf einem Ansatz zur Minimierung der Kostenfunktion, um virtuelle Trajektorien zu generieren. Pham et al. [29] vergleichen Sie die Ergebnisse der Minimierung von vier verschiedenen Werten (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Ruck und Eindrücken), während Sie die Anfangs- und Endgeschwindigkeit und -beschleunigung sowie die Gesamtdauer der Flugbahn kennen. Mombaur et al. [26] stellen fest, dass Trajektorien nicht immer nicht-holonom sind und kombiniert daher nicht-holonom und holonom Einschränkungen als optimales Kontrollproblem mit einer zu minimierenden Zielfunktion. Der Hauptnachteil dieser Ansätze ist das Erfordernis der gesamten Flugbahnzeit im Voraus und die gleichzeitige Erzeugung der gesamten Flugbahn, was die Verwendung dynamischer Umgebungen ausschließt.

2.2 Fortbewegung in der virtuellen Realität

2.2.1 Fortbewegungstechniken

Obwohl natürliches Gehen sicherlich der ökologischste Ansatz ist, verhindert die begrenzte Größe von VR-Setups und Eingabegeräten, dass es die meiste Zeit verwendet wird. Daher sind Fortbewegungstechniken erforderlich, bei denen nicht alle an der Fortbewegung beteiligten Sinneskanäle erhalten bleiben können. Dies sind Techniken, die unbemerkt auf die sensorischen Veränderungen einwirken.

nels (umgeleitetes Gehen [31], Blindheit ändern [37]), Techniken, die die Aufgabe ändern, indem sie angehalten werden [44], Techniken, die das Gleichgewicht opfern (Gehen an Ort und Stelle [34]), Techniken, die die Propriozeption opfern [24]] und Techniken, die alle kinästhetischen Kanäle opfern (z. B. Handgeräte). Eine Studie zur Bewertung der Konformität virtueller Trajektorien, die durch natürliches Gehen, Walk-in-Place und Joy-Stick-Fliegen mit realen Trajektorien erzeugt wurden, zeigte, dass nur natürliches Gehen gut mit realen Daten für verschiedene visuelle Bedingungen korreliert [41].

2.2.2 Wahrnehmung der Selbstbewegung

Obwohl die virtuelle Realität eine leistungsstarke Methode zur Durchführung von Verhaltensstudien ist, indem die experimentellen Bedingungen vollständig kontrolliert werden, gibt es viele Variablen, die Wahrnehmungsunterschiede hervorrufen und somit möglicherweise eine Verzerrung in die Studie einführen [9]. Mehrere Studien mit virtuellen Umgebungen und Head-Mounted Displays (HMD) zeigten einen Distanzkompressionseffekt [20, 23, 43], der teilweise durch das reduzierte Sichtfeld und das Gewicht und die vom HMD auf das HMD ausgeübten Drehmomente erklärt wurde Benutzerkopf. In ähnlicher Weise unterscheidet sich die wahrgenommene Geschwindigkeit in einer VR-Umgebung von der tatsächlichen Fortbewegungsgeschwindigkeit [2], was eine zusätzliche Vorspannung einfüht. Andere Faktoren wie der Bildkontrast [13] und der Blickwinkel [25] beeinflussen ebenfalls die Navigationseffizienz in VR. In Ergänzung,

Bei der Untersuchung des menschlichen Bewegungsverhaltens in der VR führen die oben genannten Faktoren möglicherweise zu Abweichungen in den erzeugten Bewegungsabläufen des Bewegungsapparates, wie z. B. früheren Kurven und größeren Pfaden. Diese Abweichungen sind jedoch möglicherweise nicht unbedingt signifikant, und das Bewegungsverhalten in realen und virtuellen Umgebungen kann tatsächlich ziemlich ähnlich sein [9]. Es wurde gezeigt, dass die Distanzkompression nach fünf Minuten kontinuierlicher visueller Rückmeldung deutlich reduziert ist [25]. Darüber hinaus basiert das Bewegungsverhalten möglicherweise nicht immer nur auf Wahrnehmungsmerkmalen, sondern auch auf aufgabenspezifischen Kontrollen, die in einem VR-Kontext unverändert bleiben [9].

2.3 Auswertung virtueller Trajektorien

Viele VR-Studien zu neuartigen Fortbewegungstechniken oder Schnittstellen bewerten virtuelle Trajektorien anhand von Leistungskriterien [21, 7, 18, 35, 45] wie Aufgabenerfüllungszeit, zurückgelegte Strecke, Anzahl der Kollisionen und Pfadgenauigkeit in Bezug auf den idealen Pfad, empirische Beobachtungen von Trajektorienvisualisierungen [45] sowie kognitive, Präsenz- und Cybersickness Fragebögen [45, 41, 36]. Obwohl diese Metriken in ihrem Kontext oft ausreichend sind, können sie den Realismus einer Flugbahn nicht zuverlässig bewerten, da sie ihre zugrunde liegende Form und ihre kinematischen Aspekte nicht berücksichtigen.

In mehreren Studien wurde der mittlere euklidische Punkt-für-Punkt-Abstand zwischen Trajektorien als Entfernungsmetrik verwendet [1, 29, 5]. Durch die Berücksichtigung einer Abtastung zu konstanten Zeitschritten und nicht zu konstanten krummlinigen Positionen berücksichtigt dieser Abstand in gewissem Maße den zeitlichen Aspekt der Flugbahn. Fink et al. [9] verwendeten einen anderen Satz von Metriken, nämlich den mittleren Krümmungsradius entlang des gesamten Pfades, den maximalen euklidischen Abstand von einer geraden Linie zwischen dem Ursprung und dem Ziel und den minimalen euklidischen Abstand zwischen dem Pfad und den Hindernissen von der virtuellen Umgebung. Darüber hinaus nutzen sie ihren Ansatz zur Optimierung der Flugbahn der kleinsten Quadrate wie Fajen und Warren [8], indem sie die mittleren Anpassungswerte als Metrik verwenden, um den Realismus der Flugbahnen zu berücksichtigen. Whitton et al.

Anderer Studien konzentrierten sich auf verschiedene Gangparameter wie Schrittlänge, Schrittweite, Variabilität der Schrittgeschwindigkeit und Variabilität der Schrittbreite, um in virtuellen und realen Umgebungen erzeugte Trajektorien zu vergleichen [16, 35]. Terzman et al. [38] untersuchten auch die Optimalität einer Flugbahn, die beim Gehen durch einen Slalom ohne Bezugnahme auf reale Beispiele durchgeführt wurde.

In dieser Arbeit stützen wir unsere Bewertung im Gegensatz zu früheren Ansätzen auf einen Vergleich von Referenz- und virtuellen Trajektorien

gebildet während zielgerichteter Fortbewegungsaufgaben. Im Vergleich zu früheren kinematischen Studien profitieren wir von den jüngsten Ergebnissen zur Lokalbewegungsstereotypie, um eine Einschränkung der Fortbewegungswege (z. B. mit Wänden) zu vermeiden. Auf diese Weise können wir Kriterien einführen die Form des Pfades in Kombination mit Geschwindigkeitsprofilen. Wir führen auch ein Modell ein, um die Notwendigkeit von Trajektorien, die unter realen Bedingungen durchgeführt werden, zu beseitigen. Durch den im nächsten Abschnitt beschriebenen Rahmen erwarten wir einen umfassenderen und umfassenderen Satz von Kriterien für die Bewertung der Flugbahn.

3 T. RAJECTORY E. BEWERTUNG F. RAMEWORK

In diesem Abschnitt stellen wir unseren Rahmen für die Bewertung der virtuellen Fortbewegungsbedingungen vor. Das Framework berücksichtigt virtuelle Bewegungsbahnen, die unter bestimmten untersuchten Bedingungen durchgeführt werden, wie von Experimentatoren gewünscht. Das Framework überprüft die Konformität mit Referenztrajektorien. Im Rahmen können Referenztrajektorien reale aufgezeichnete Daten sein, sofern verfügbar, oder sie können durch ein numerisches Modell der menschlichen Fortbewegung erzeugt werden.

Infolgedessen sind die drei Hauptkomponenten des Frameworks:

- eine umfassende Reihe von Kriterien zur Bewertung sowohl geometrischer als auch zeitlicher Aspekte der Flugbahnen;
- eine endliche Menge realer Trajektorien, die als Referenztrajektorien verwendet werden
- ein Fortbewegungsmodell, mit dem Referenztrajektorien generiert werden, wenn die entsprechende reale Trajektorie nicht verfügbar ist

In dieser Arbeit bewerten wir Trajektorien, die während erzeugt wurden *Zielorientiert* Fortbewegungsaufgaben in statischen, hindernisfreien Umgebungen. Daher sind die einzigen Objekte, aus denen die virtuellen Umgebungen bestehen, die Anfangs- und die Zielposition mit Orientierungen, die durch Tore materialisiert werden. Die Geometrie der Tore ähnelt [14], und wir verfügen über die in dieser Studie erfassen Trajektorien.

3.1 Bewertungskriterien

Neun Kriterien werden verwendet, um den Realismus eines bestimmten Satzes virtueller Trajektorien zu bewerten. Jedes Kriterium generiert einen Wert pro Trajektorie. Die generierten Daten werden mit verschiedenen Tools analysiert, wie in Abschnitt 4 dargestellt.

Fehler: bewertet, ob eine Trajektorie Fehler enthält, die die Trajektorie grundsätzlich unrealistisch und daher inakzeptabel machen. Diese Fehler erkennen Verhaltensweisen, die unter den oben genannten Aufgaben und Bedingungen in einem realen Kontext niemals auftreten würden. Die Fehlerkriterien sind eindeutig und ohne willkürliche Schwellenwerte. (1) Ein Stopptehler wird ausgelöst, wenn das Subjekt während seiner Flugbahn vollständig angehalten hat. Wird erkannt, wenn die Geschwindigkeit zwischen dem Anfangs- und dem Zielor gleich 0 ist. (2) Ein Kollisionsfehler wird ausgelöst, wenn das Subjekt mit dem Zielor kollidiert ist. Wird erkannt, wenn sich die Position des Gehers innerhalb der Geometrie des Tors befindet. (3) Ein Überschwingerfehler wird ausgelöst, wenn das Subjekt seinen Weg in Bezug auf das Tor überschreitet. Wird erkannt, wenn die Position des Gehers, die auf den Türschwellenvektor projiziert wird, an der Außenseite des Tors vorbeigeht.

Nur fehlerfreie Trajektorien werden nach den folgenden Kriterien behandelt.

Dauer: bewertet die Dauer, Länge und Durchschnittsgeschwindigkeit der Trajektorie relativ zur Referenztrajektorie. Jedes Unterkriterium (Dauer, Länge, Durchschnittsgeschwindigkeit) ist das Verhältnis zwischen dem ausgewerteten Trajektorienwert und dem Referenztrajektorienwert. Ein Verhältnis von 1 bedeutet gleiche Teilkriteriumswerte zwischen Trajektorien.

Tangentialgeschwindigkeitsprofil: bewertet die Ähnlichkeit zwischen dem Tangentialgeschwindigkeitsprofil der experimentellen Trajektorie und dem Tangentialgeschwindigkeitsprofil der Referenztrajektorie. Da virtuelle Umgebungen die Wahrnehmung von Geschwindigkeit beeinflussen können, versuchen wir, die Unterschiede in den Variationen der Geschwindigkeit in der Zeit und nicht die absoluten Unterschiede zu bewerten, ähnlich wie in [29]. Zu diesem Zweck (dh um den Effekt von Absolutwerten zu beseitigen) subtrahieren wir ihre Mittelwerte von jedem Geschwindigkeitsprofil und dividieren sie durch ihre Standardabweichung. Dann wird eine Kreuzkorrelation zwischen den Referenz- und experimentellen standardisierten Profilen berechnet. Ein Wert von 1 bedeutet eine genaue Übereinstimmung.

Winkelgeschwindigkeitsprofil: bewertet die Ähnlichkeit zwischen dem Winkelgeschwindigkeitsprofil der Trajektorie und dem Winkelgeschwindigkeitsprofil einer Referenztrajektorie. Der Ansatz ist der gleiche wie für die *Geschwindigkeitsprofil* Kriterium.

Glätte: bewertet die Glätte der Flugbahn. Dieses Kriterium wurde von Studien inspiriert, die zeigten, dass die Trajektorien des Menschen die Glätte maximierten [29] und dass die Maximierung der Glätte durch Ruckminimierung erreicht werden konnte. Die Glätte wird daher bewertet, indem die mittlere Ruckamplitude der Flugbahn wie in [29] berechnet wird. Kleinere Werte bedeuten glattere Flugbahnen.

gestalten: wertet den mittleren euklidischen Abstand zwischen der Flugbahn und einer Referenzbahn aus. Beide Trajektorien werden zu einem gleichen Satz äquidistanter Proben auf der krummlinigen Achse neu abgetastet, und Abstände zwischen entsprechenden Proben werden gemessen. Die Auswertung erfolgt rein geometrisch, da durch das gleichmäßige Resampling die temporale Komponente entfernt wird.

Formvariabilität: bewertet die Stereotypie, indem die räumliche Ausbreitung verschiedener Wiederholungen untersucht wird. Dieses Kriterium ist direkt von [14] inspiriert, die ein stereotypes Muster realer menschlicher Gehwege zeigten. Sie wird durch die Summe der Abstände zwischen den Abtastpunkten jeder Trajektorie und den Abtastpunkten des Mittelwerts aller Wiederholungen (dh aller experimentellen Trajektorien, die unter identischen Bedingungen durchgeführt wurden) berechnet. Diese Summe wird durch die Länge der mittleren Trajektorien geteilt.

Krümmung: bewertet die relative mittlere Krümmung der Trajektorie im Vergleich zu einer Referenztrajektorie. Das Kriterium ist das Verhältnis zwischen der ausgewerteten Flugbahnkrümmung und der Referenztrajektorienkrümmung. Die Krümmung bei jeder Probe wird wie in [9] berechnet. Ein Verhältnis von 1 bedeutet gleiche mittlere Krümmung zwischen Trajektorien.

Endgültige Orientierung: wertet den Winkel zwischen der endgültigen Ausrichtung der Flugbahn und der Ausrichtung des Ziels aus.

3.2 Fortbewegungsmodell

Wann immer eine Referenztrajektorie für die oben genannten Kriterien erforderlich ist, kann eine reale Trajektorie verwendet werden, vorausgesetzt, sie hat dieselbe Zielposition und Ausrichtung wie die zu bewertende virtuelle Trajektorie. Dies ist der Zweck des Satzes aufgezeichneter Trajektorien, die im Rahmen verfügbar sind. Die Menge der realen Trajektorien umfasst jedoch eine endliche Anzahl von Zielpositionen und -orientierungen. Zusätzlich hat jede reale Flugbahn eine Geschwindigkeitskomponente, die von dem aufgenommenen Motiv abhängt. Wenn eine Referenztrajektorie mit einer Zielposition und -orientierung erforderlich ist, die nicht im realen Satz enthalten ist, oder mit einer anderen Geschwindigkeitskomponente (z. B. einer anderen Komfortgeschwindigkeit), kann die Referenztrajektorie unter Verwendung des Fortbewegungsmodells des Gerüsts erzeugt werden.

Grundsätzlich kann jedes Fortbewegungsmodell verwendet werden, solange: (1) es für zielorientierte Aufgaben mit einer Zielposition und -orientierung ausgelegt ist, (2) es eng mit den geometrischen und zeitlichen Komponenten realer Trajektorien übereinstimmt, (1) 3) Es erfordert nicht die Verfügbarkeit des realen Traktors, den es zu simulieren versucht. Unter den in Abschnitt 2 untersuchten Modellen erzeugen diejenigen, die Parameteroptimierung [8, 1] und Kostenminimierung [29, 26] nutzen, simulierte Trajektorien in der Nähe ihres realen Gegenstands. Das Modell von Fajen und Warren [8] berücksichtigt jedoch keine orientierten Ziele und entspricht nur dem geometrischen Aspekt der realen Flugbahn, da die simulierte Geschwindigkeit über den gesamten Pfad konstant ist. Das Modell von Arechavaleta et. al [1] benötigt die realen Trajektoriendaten, um die simulierte Trajektorie zu erzeugen. Ähnlich,

Da keines der oben genannten Modelle die drei Bedingungen erfüllt, um für unser Framework angemessen zu sein, haben wir unser eigenes zielgerichtetes Fortbewegungsmodell entworfen. Das Modell basiert auf zwei einfachen Beobachtungen. Wenn I ist der 2D-Vektor von der Gehposition zur Zielposition, α ist der Winkel zwischen I und die Zielorientierung, v ist die Gehgeschwindigkeit und θ ist die Gehorientierung, haben wir festgestellt, dass:

1. $\|I\|$ nimmt linear mit ab α während sich der Wanderer entlang der Trajectory Pfad

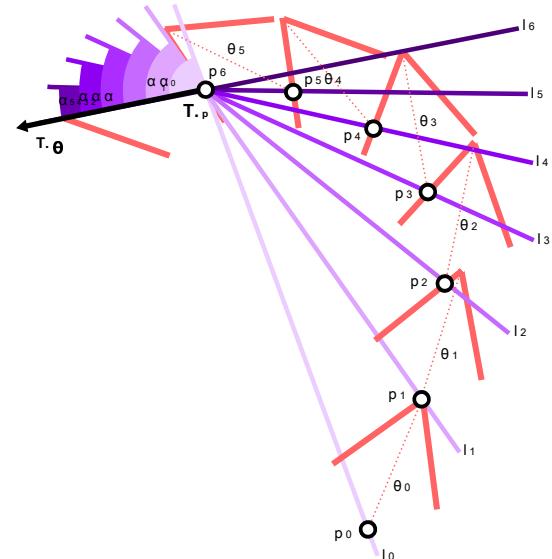


Abb. 2. Abbildung unseres Fortbewegungsmodells. T_p und T_θ sind jeweils die Zielposition und Orientierung. Im Zeitschritt 1, Der Walker hat Position p_1 und Orientierung θ_1 . Der Winkel α_2 wird durch Gl. 1 und explizite Integration, wodurch die Linie definiert wird I_2 vom Wanderer im Zeitschritt zu erreichen 2. Hierzu ist der pfeilförmig erreichbare Raum des Gehers, orientiert an θ_1 , wird verwendet, um die Schnittpunkte mit zu finden I_2 . Der Schnittpunkt am nächsten T_p definiert p_2 , während der neuen Ausrichtung θ_2 ist gegeben durch $p_2 - p_1$. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die Position des Gehers übereinstimmt T_p . Beim T_θ . Die Ausrichtung des Gehers stimmt überein T_θ .

2. v nimmt mit ab θ wenn sich der Geher dreht, wie bereits in beobachtet Vorgängermodelle [5, 1, 26]

In Lichte der Beobachtung (1) sehen wir $\|I\|$ und α mit gleicher Geschwindigkeit abnehmen, dh Menschen bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit auf die Zielposition und die Zielorientierung zu und nehmen an:

$$\frac{\|I\|}{\|I\|} = \frac{\alpha}{\alpha} \quad (1)$$

hat jeder Zeitpunkt des Flugbahnverlaufs eine Beziehung zwischen v und θ . Wir

und ihre entsprechenden Winkelgeschwindigkeitswerte $\dot{\theta}$ zu jedem Zeitschritt aus realen Flugbahndaten extrahiert [14]. Das in Abbildung 3 (links) gezeigte Diagramm weist eine pfeilförmige Kontur auf. Unter Nutzung dieses geometrischen Merkmals haben wir die Beziehung zwischen v und θ als pfeilförmige Kontur, die durch ihre Höhe (maximale Tangentialgeschwindigkeit), ihren Boden (minimale Tangentialgeschwindigkeit) und ihre Breite (maximale Winkelgeschwindigkeit) definiert ist und somit die Berechnung des pfeilförmigen erreichbaren Raums des Gehers ermöglicht. Wie bei bestehenden Parameteroptimierungsmodellen [8, 1] werden die oben genannten Parameter durch Optimierung unter Verwendung eines Satzes von Eingabetrajektorien berechnet.

Der simulierte Walker wird an der Startposition und Ausrichtung mit maximaler Tangentialgeschwindigkeit und Nullwinkelgeschwindigkeit initialisiert. Beim jeder Zeitschritt t , $\|I\|$ und α gemessen werden und $\|I\|$ wird berechnet. Dann, α kann unter Verwendung von Gleichung 1 erhalten werden, die das Berechnen ermöglicht α für Zeitschritt $t + 1$ mit expliziter Euler-Integration. Das neu α definiert eine Linie, die vom pfeilförmigen erreichbaren Raum des Gehers geschnitten werden muss. Wenn die Linie geschnitten wird, definiert die Kreuzung die neue Position des Gehers. Andernfalls wird der Punkt, der der Linie auf dem erreichbaren Bereich am nächsten liegt, als neue Gehposition ausgewählt. Dieser Algorithmus ist in Abbildung 2 dargestellt.

Um das Modell zu validieren, haben wir es an einer Reihe realer Trajektorien kalibriert [14]. Da das Problem der Optimierung der Modellparameter nur dreidimensional ist und die Parameterbereiche eher klein sind (begrenzt durch biomechanische Werte), haben wir einen Brute-Force-Ansatz verwendet. Der Satz von Trajektorien bestand aus 40 Torpositionen im Bereich von -1 m bis 1,1 m.

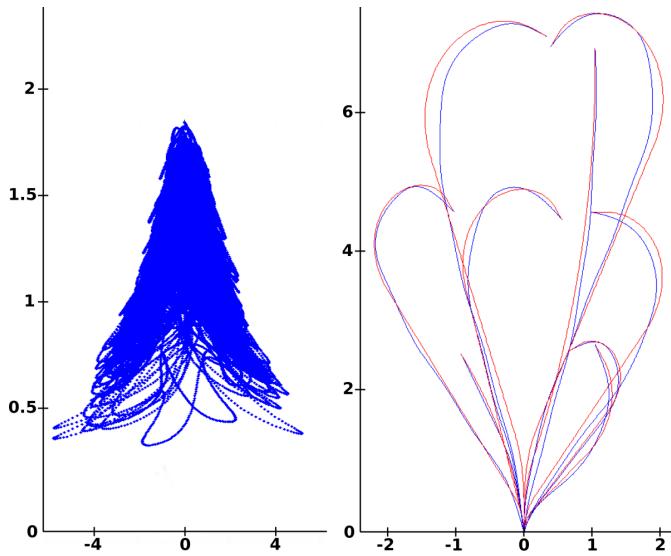


Abb. 3. Links: Darstellung der Beziehung zwischen $\|v\|$ (vertikale Achse, in ms⁻¹) und θ (horizontale Achse, in rad.s⁻¹) aus einer Reihe von realen Trajektorien, die eine pfeilförmige Kontur bilden. Rechts: Darstellung einer Reihe realer Trajektorien (in Blau) und ihrer entsprechenden simulierten Trajektorien (in Rot) unter Verwendung unseres Fortbewegungsmodells. Einheiten in Metern.

in seitlicher Position und von 2 m bis 7 m in vorderer Position und 12 Torausrichtungen, die gleichmäßig im Einheitskreis verteilt sind. Abbildung 3 (rechts) zeigt mehrere reale Trajektorien und ihre entsprechenden simulierten Trajektorien, wobei eine enge Übereinstimmung zwischen den einzelnen Pfaden hervorgehoben wird. Verwendung der *gestalten*

Als Kriterium haben wir den durchschnittlichen Abstand zwischen realen und simulierten Trajektorien berechnet, was zu einem Mittelwert von 12,8 cm führte. Die Ergebnisse ähneln [9] (15,6 cm durchschnittliche Entfernung) und liegen unter der experimentellen Variabilität wie in [29] (15,1 cm) für denselben Satz von Trajektorien. Mit einer ähnlichen Leistung wie die Vorgängermodelle erfüllt unser Modell die drei oben genannten Anforderungen. Darüber hinaus profitiert es von optimierungsisierten Ansätzen, nämlich der Fähigkeit, für verschiedene Fortbewegungsverhalten automatisch konfiguriert zu werden.

4 EXPERIMENTS

In diesem Abschnitt beschreiben wir fünf verschiedene Experimente, die mit zwei Zielen durchgeführt wurden: (1) Veranschaulichung unseres Rahmens durch eine Vielzahl experimenteller Daten und (2) erste Bewertung der Konformität virtueller Trajektorien zu ihrem realen Gegenstück unter einer Reihe von häufig verwendeten Bedingungen.

Alle fünf Experimente bestanden aus derselben Aufgabe: Navigieren von einer Startposition und Orientierung A zu einer Zielposition und Orientierung B, die durch ein orientiertes Tor dargestellt wird (dh ein Tor, dessen Seiten tief genug sind, um die Orientierung klar anzudeuten). Die Anweisungen lauteten, unter dem Zieltor hindurchzugehen und dabei seine Ausrichtung anzupassen.

Wir konzentrieren uns auf fünf verschiedene Kategorien von Bedingungen, die normalerweise zwischen verschiedenen VR-Anwendungen und Domänen variieren (Visualisierung, Durchgänge, Spiele, Training usw.): Eingabesteuergerät, Eingabesteuerungsgesetz, Standpunkt (Kamera), Sichtfeld und Ausgabe Anzeigegerät.

Grundlegende Bedingungen Um Vergleiche zwischen Experimenten zu erleichtern, wird für jede Kategorie eine Grundlinienbedingung (Kontrollbedingung) ausgewählt, was zu einem Grundliniensatz von Bedingungen führt, der über alle Experimente hinweg wiederholt wird. Dieser Basisatz besteht aus einem Joystick als Eingabesteuergerät, einem linearen Ratensteuergesetz, einer subjektiven Kamera, einem 60 °-Sichtfeld und einem Desktop-Bildschirm als Ausgabeanzigegerät. Die Wahl eines Joysticks als Eingabegerät wird durch die größeren Freiheitsgrade bei Verwendung eines großen Sticks im Vergleich zu kleineren Gamepad-Sticks oder der Binäreingabe einer Tastatur gerechtfertigt. Die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung wird von der Vorwärtsachse gesteuert, während die Körperdrehung von der Querachse gesteuert wird. Das Gesetz zur linearen Geschwindigkeitsregelung ist ein klassisches Regelungsgesetz, das in vielen VR-Anwendungen mit häufiger Fortbewegung verwendet wird.

(Spiele, virtuelle Komplettlösungen): Die Ausgänge des Eingabesteuerungsgeräts (- - .. +1) werden linear auf die Tangentialgeschwindigkeit des Benutzers abgebildet - - *maximale Tang-Geschwindigkeit* .. + *maximale Tang-Geschwindigkeit*) und die Winkelgeschwindigkeit des Körpers (- - *maximale Ang-Geschwindigkeit* .. + *maximale Ang-Geschwindigkeit*). Subjektive Kameras (erste Person), 60 °-Feldfelder und Desktop-Bildschirme sind wohl die häufigsten Bedingungen in der Consumer-VR.

Versuchsausrüstung Jedes Experiment konzentriert sich auf eine der oben genannten Kategorien, indem die Beiträge von drei häufig vorkommenden und häufig verwendeten Bedingungen zum Gesamtrealismus virtueller Trajektorien bewertet werden. Die übrigen Bedingungskategorien werden auf ihre jeweiligen Grundbedingungen eingestellt. Daher sind die Experimente wie folgt:

- *Experiment 1:* untersucht den Einfluss des Eingabesteuergeräts durch die Verwendung von a *Joystick* (Grundlinie), a *Tastatur* und ein *Gamepad*. Die Tastatur steuert die Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen mit den Auf- und Ab-Tasten, während das Gamepad die Vorwärtsachse verwendet. Die Tastatur steuert die Körperdrehung mit der linken und rechten Taste, während das Gamepad die seitliche Achse verwendet. Das Eingabesteuerungsgesetz, der Blickwinkel, das Sichtfeld und die Kategorien der Ausgabeanzigegeräte werden auf ihre jeweiligen Grundbedingungen eingestellt.

- *Experiment 2:* untersucht den Einfluss des Eingabekontrollgesetzes durch a *Gesetz zur linearen Geschwindigkeitsregelung* (Grundlinie), an *Trägheitsratenkontrollgesetz*, und das *Joyman-Kontrollgesetz* [24]. Die beiden Nichtreferenz-Kontrollgesetze beeinflussen die Tangentialgeschwindigkeit auf zwei verschiedene Arten, wobei beide biomechanische Beobachtungen des Menschen verwenden. Das Gesetz zur Steuerung der inneren Geschwindigkeit bietet ein allgemeines Gefühle der Trägheit beim Verlangsamten und der Schwere beim Beschleunigen, indem die maximale Tangentialbeschleunigung des linearen Steuerungsgesetzes auf reale Werte begrenzt wird: 0,54 ms⁻². Das Joyman-Steuerungsgesetz koppelt die Winkelgeschwindigkeit mit der Tangentialgeschwindigkeit, wodurch der Benutzer beim Drehen zunehmend langsamer wird (weitere Details zu [24]). Die Kategorien für Eingabesteuergeräte, Ansichtspunkte, Sichtfelder und Ausgabeanzigegeräte werden auf ihre jeweiligen Grundbedingungen eingestellt.

- *Experiment 3:* untersucht den Einfluss des Standpunkts durch die Verwendung von a *subjektive Kamera* (Grundlinie), a *Kamera für Dritte* und ein *feste Kamera*. Die Third-Person-Kamera befindet sich ständig 4 m hinter dem Benutzer-Avatar und 1 m darüber. Der Benutzer-Avatar ist ein blauer Zylinder mit einem Radius von 30 cm und einer Höhe von 1,6 m, der den Körper darstellt. Er wird von einem extrudierten Dreieck mit einer Basis und einer Höhe von 60 cm und einer Dicke von 10 cm gekrönt, das den Kopf darstellt und in Richtung der Sichtlinie zeigt. Die feste Kamera ist eine subjektive Kamera, die ständig auf die Zielposition schaut. Das Eingabesteuergerät, das Eingabesteuerungsgesetz, das Sichtfeld und die Ausgabeanzigegerätekategorien werden auf ihre jeweiligen Grundbedingungen eingestellt, außer wenn die feste Kamerabedingung verwendet wird, bei der die Joystick-Seitenachse für die Seitenbewegung anstelle der Winkelgeschwindigkeit verwendet wird gleiche Grenzgeschwindigkeiten wie für die Tangentialgeschwindigkeit.

- *Experiment 4:* untersucht den Einfluss des Sichtfeldes durch Werte von 60 ° (Grundlinie), 45 ° und 90 °. Die Kategorien für Eingabesteuerungsgeräte, Eingabesteuerungsgesetze, Ansichtspunkte und Ausgabeanzigegeräte werden auf ihre jeweiligen Grundbedingungen eingestellt.

- *Experiment 5:* Untersucht den Einfluss des Ausgabeanzigegeräts über einen Desktop-Bildschirm (Baseline), ein Head-Mounted-Display (HMD) und ein immersives Projektions-Setup (IPS). Das HMD war ein eMagin Z800. Das IPS bestand aus einem 9,6 x 3,1 m großen Boden und einer Vorderwand mit stereoskopischem Display. Ein optisches Verfolgungssystem verfolgte die Position des Kopfes des Benutzers sowohl für das HMD als auch für das immersive Projektionssetup, wodurch es möglich wurde, die Blickrichtung von der Körperorientierung zu trennen. Da der Benutzer bei Verwendung des immersiven Projektionsaufbaus natürlich steht, wurden alle drei Bedingungen im Stehen durchgeführt, um experimentelle Verzerrungen zu vermeiden. Das Eingabesteuergerät, das Eingabesteuerungsgesetz, der Ansichtspunkt und das Feld der Ansichtskategorien werden auf ihre jeweiligen Grundbedingungen eingestellt.

Die in Abbildung 1 unter Desktop- und IPS-Bedingungen gezeigte virtuelle Szene hatte nur minimale visuelle Hinweise und bestand aus zwei Toren, eines am Ursprung und nach vorne ausgerichtet und das andere an der Zielposition mit der Zielausrichtung. Beide Tore waren 1 m breit und 1,8 m hoch. Ein roter Pfeil von 80 cm, der sich in der Mitte des Zieltors befindet und nach außen zeigt, zeigt die Ausrichtung des Zieltors an. Der Boden war eine 30 x 30 m große Ebene, die am Ursprung zentriert war und eine isotrope, verrauschte graue Textur aufwies. Der Himmel war einheitlich hellgrau.

Die möglichen Torpositionen waren (Boden-2D-Koordinaten und mm): (1) (-1000, 2000), (2) (-300, 2000), (3) (1100, 2000), (4) (-1000, 6000), (5) (-300, 6000), (6) (1100, 6000), wodurch kurze und lange Arten von Trajektorien zu beiden Seiten abgedeckt werden. Die möglichen Torausrichtungen waren: (a) 0°, (b) 150°, (c) 270°, wobei 0° eine Ausrichtung auf der rechten Seite ist und sich gegen den Uhrzeigersinn dreht, wodurch drei unterschiedliche Flugbahnbürschriften erzeugt werden. Abbildung 4a) zeigt alle möglichen Gate-Positionen und -Orientierungen sowie die entsprechenden Referenztrajektorien.

Population Jedes Experiment hatte zwölf Teilnehmer: Experiment 1 hatte 1 Frau und 11 Männer im Alter von 22 bis 31 Jahren ($M = 26,18$, $SD = 2,18$); Experiment 2 hatte 2 Frauen und 10 Männer im Alter von 24 bis 30 Jahren ($M = 26,05$, $SD = 2,06$); Experiment 3 und 4 hatten 3 Frauen und 9 Männer im Alter von 24 bis 28 Jahren ($M = 26,20$, $SD = 1,2$); Experiment 5 hatte 2 Frauen und 10 Männer im Alter von 22 bis 33 Jahren ($M = 27,5$, $SD = 2,8$). Einige Probanden nahmen an mehreren Experimenten teil. Keiner hatte bekannte Seh- oder Wahrnehmungsstörungen, die die Wahrnehmung der visuellen Umgebung verändern könnten. Sie waren alle unbezahlte Freiwillige und für den Zweck der Experiments naiv.

Verfahren Vor Beginn eines Experiments wurden dem Probanden die drei variablen Bedingungen mündlich erklärt. Er erhielt die Anweisung, am Ursprung unter dem ersten Tor hindurchzugehen und dann zum Zieltor zu navigieren und die Ausrichtung des Zieltors (und des Pfeils) anzupassen, wenn er darunter vorbeikommt. Vor jedem Versuch wurden Position und Ausrichtung auf 1 m vor dem Ursprung (hinter dem ersten Tor) zurückgesetzt und der Ursprung betrachtet. Vor Verwendung jeder Bedingung wurden dem Probanden sechs verschiedene Trainingsversuche unter Verwendung der Bedingung mit der ausdrücklichen Anweisung zum Üben der Aufgabe gegeben.

Im Experiment haben die Teilnehmer alle drei Bedingungen erfüllt (die Bedingungen hingen von der Versuchsnummer ab), und die Reihenfolge der Bedingungen wurde zwischen den Teilnehmern ausgeglichen. In jeder Bedingung wurden die Teilnehmer in zufälliger Reihenfolge allen 18 Tor-Kombinationen (Positionen 1 bis 6 und Orientierungen a bis c) mit drei Wiederholungen für jede Kombination ausgesetzt. In Experiment 2 bis 5 haben wir die Anzahl der Kombinationen reduziert, um Gates zu entfernen, die keine nützlichen Ergebnisse lieferen, dh Gates, die kleine Trajektorienvariabilitäten erzeugten. Die resultierende Kombination war ein Satz von 10 Toren: (1, a), (1, c), (2, a), (2, c), (3, b), (3, c), (4, a), (4, c), (5, c), (6, c). In Experiment 1 absolvierten die Teilnehmer insgesamt 162 Versuche ($18 \times 3 \times 3$) mit einer durchschnittlichen Dauer von 25 Minuten.

Gesammelte Daten Für jeden Versuch haben wir die virtuelle Position und Ausrichtung des Probanden zu jedem Zeitschritt aufgezeichnet. Für HMD- und IPS-Bedingungen haben wir auch die Head-Tracker-Messwerte (dh Position und Ausrichtung des Kopfes) aufgezeichnet. Diese Daten werden dem Framework zugeführt, um die virtuellen Trajektorien zu analysieren.

Ergebnisse Für alle Daten führten wir Shapiro-Tests durch, bei denen die Normalitätshypothese zur Datenverteilung verworfen wurde (wodurch die Verwendung einer ANOVA ausgeschlossen wurde). Daher haben wir einen nicht parametrischen Friedman-Test für Unterschiede zwischen den Bedingungen gemäß den im Abschnitt definierten Kriterien verwendet

3. Post-hoc-Vergleiche wurden unter Verwendung von Wilcoxon-Signed-Rank-Tests mit einem Signifikanzschwellenwert von 0,05 durchgeführt. Die angegebenen p-Werte werden für mehrere Vergleiche angepasst. Die Daten wurden zuerst mit den verschiedenen in Abschnitt 3 definierten Fehlerkriterien gefiltert. Abbildung 4 zeigt diese statistischen Ergebnisse für die 5 Experimente sowie für jede Bedingung experimentelle Trajektorien und Medianwerte für alle in Abschnitt 3.1 definierten Kriterien. Die meisten Kriterien sind einheitlos (Dauer, Tangential- und Winkelgeschwindigkeitsprofile, Formvariabilität, Krümmung). Die Glättungseinheit ist ms --2. Formeinheit ist m. Die endgültige Orientierungseinheit ist Bogenmaß.

5 D. ISCUSSION

Versuch 1 Wir könnten als erstes wichtiges Ergebnis erwarten, dass diese experimentellen Trajektorien, die im Sitzen und durch eine manuelle Aufgabe erzeugt werden, sich völlig von den realen Trajektorien unterscheiden, die durch natürliches Gehen erzeugt werden. In der Tat verwenden eine manuelle und eine zweibeinige Aufgabe völlig unterschiedliche Elemente mit unterschiedlichen internen Mechaniken, unterschiedlichen kinematischen Einschränkungen, unterschiedlichen Trägheiten usw. Ein kurzer Blick auf die in Abbildung 4 dargestellten resultierenden Trajektorien zeigt jedoch bereits bemerkenswerte Ähnlichkeiten mit Referenztrajektorien, wie in Abbildung 5 gezeigt: glatte und lange Kurven, fortschreitende Neuorientierungen und die besondere Eigenschaft realer Trajektorien, einen Versatz zu einer Seite (z. B. nach rechts) zu erzielen, selbst wenn sich das Ziel bei großen Neuorientierungen auf der anderen Seite (z. B. nach links) befindet sind erforderlich. Bei genauerer Betrachtung anhand der Bewertungskriterien wird die *gestalten* Kriterium zeigt eine durchschnittliche Entfernung von

183,45 mm, mit Durchschnitt *Dauer*, *Länge* und *Geschwindigkeiten* in der Nähe der Referenztrajektorien. Da die visuelle Führung der Fortbewegung stark vom optischen Fluss abhängt [40], könnte eine mögliche Erklärung für diese allgemeine Ähnlichkeit darin bestehen, dass die Probanden darauf abzielen, einen optischen Fluss zu erhalten, der dem ähnlich ist, den sie in einer realen Flugbahn erhalten hätten. Dies würde ähnliche Trajektorien erzeugen, unabhängig von dem verwendeten Eingabegerät und der für seine Manipulation erforderlichen manuellen Bewegung. Trotzdem mit einem durchschnittlichen maximalen Abstand von 312,21 mm und einem Durchschnitt

Geschwindigkeitsprofil Bei einer Übereinstimmung von 0,53 weisen virtuelle Trajektorien einen signifikanten Unterschied zu ihrem realen Gegenstück auf.

Wenn man die drei verschiedenen Bedingungen (Tastatur, Joystick, Gamepad) vergleicht, kann man einen signifikanten Unterschied in den Geschwindigkeitsprofilen erwarten. Die Tastatureingabe ist binär, während das Gamepad im Vergleich zum Joystick einen begrenzten Bewegungsbereich hat. Die höhere Anzahl von *Fehler stoppen* für Tastatur und Gamepad deutet darauf hin, dass eine mögliche Strategie für beide Geräte darin bestand, sich an einen bestimmten Ort zu bewegen, anzuhalten, sich neu zu orientieren und sich wieder zu bewegen, ohne jegliche Ähnlichkeit mit realen Flugbahnen zu haben. Mit dem Joystick auf der anderen Seite gab es viel weniger Stopps (37 gegen 223 bzw. 237), und obwohl der *Geschwindigkeit* Das Kriterium ergab keinen signifikanten Effekt der Bedingung, es zeigte eine signifikant bessere Übereinstimmung des Geschwindigkeitsprofils für den Joystick, wenn nur längere Trajektorien mit großen Neuorientierungen berücksichtigt wurden. Dies deutet darauf hin, dass eine kontinuierlichere Steuerung der Geschwindigkeit bei ausreichender Fortbewegungszeit zu einer höheren Konformität mit realen Trajektorien führen kann.

Experiment 2 In Anbetracht der Ergebnisse von Experiment 1 könnten verschiedene Bedingungen verbessert werden, um virtuelle Trajektorien mit einer höheren Konformität mit ihrem realen Gegenstück zu erzeugen. Während ein realer Walker seine Bewegung direkt steuert, verfügt ein virtueller Walker über einen doppelten Regelkreis: Er steuert das Eingabegerät, das wiederum die Bewegung in der VE steuert. Experiment 1 zeigte, dass die Probanden versuchen, reale Trajektorien zu reproduzieren, aber signifikante Unterschiede bestehen bleiben. Durch das Spielen auf der Art und Weise, wie das Gerät die Bewegung steuert, sind bei jeder realen Fortbewegungsaufgabe biomechanische Verhaltensweisen vorhanden, die durch die Verwendung einer manuellen Schnittstelle verloren gehen, die durch die Verwendung eines bestimmten Steuergesetzes wieder eingebaut werden könnte.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Trägheits- und das Joyman-Kontrollgesetz einen entgegengesetzten Effekt in Bezug auf die geometrische Flugbahn hatten: Das Inertialgesetz ist in der *gestalten* Kriterium sowie die *Krümmung*. Dies kann durch die einfache Tatsache erklärt werden, dass das Trägheitsgesetz schwerer zu kontrollieren ist, da die Trägheitsbewegung in einem virtuellen Kontext vorweggenommen werden muss. Es wurde daher nicht gut verwendet oder verstanden, und die Trägheitsbewegungen führten zu höheren Abweichungen und übertriebenen Flugbahnen. Wir können jedoch auch beobachten, dass sich beide Kontrollgesetze in Bezug auf Dauer / Geschwindigkeit (signifikant langsamere Bewegungen aufgrund niedrigerer Geschwindigkeiten) und Glätte (signifikant niedriger Glättungswert, was eine glattere Flugbahn bedeutet) im Vergleich zum Kontrollgesetz der Grundrate ähnlich verhalten. Wir nehmen an, dass beide Gesetze eine Neuheit für Benutzer sind, die an einfache, aber effektive Geschwindigkeitskontrollgesetze von Spielen und Simulationen gewöhnt sind. Sie erforderten eine höhere kognitive Belastung und daher eine höhere Konzentration, was zu langsameren und kontinuierlicheren Manipulationen führte, und damit glattere Flugbahnen. Der Joyman selbst zeigt eine hervorragende *Krümmung*, und seine Ergebnisse sind insgesamt gut. Mit mehr Training und möglicherweise anderen Parametern könnte das Joyman-Kontrollgesetz seine Langsamkeit überwinden und sich als positiver Einfluss auf die Gesamtkonformität mit realen Flugbahnen erweisen.

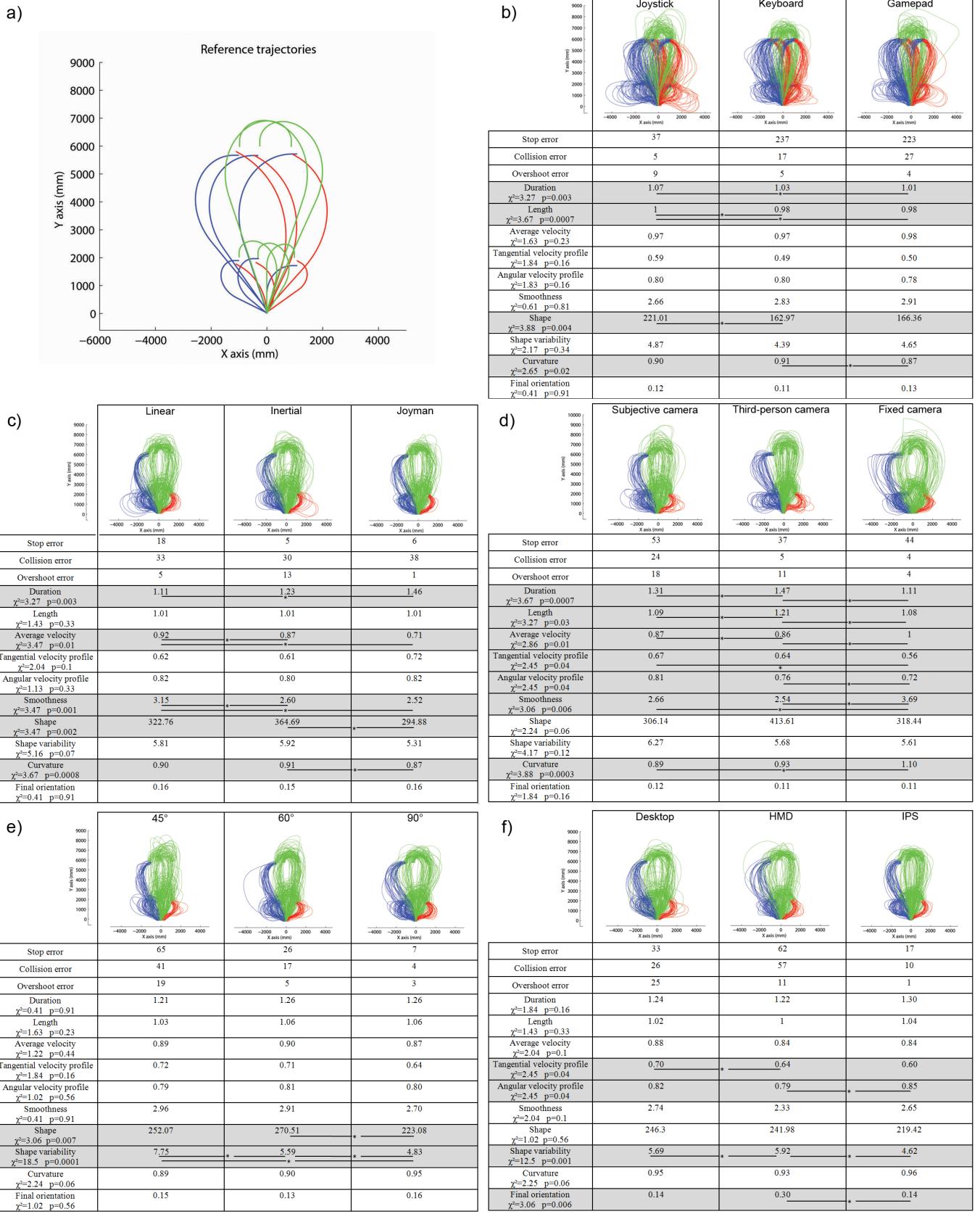


Abb. 4. Versuchsergebnisse. a) Referenztrajektorien für alle möglichen Torpositionen (Torwinkel sind farbcodiert: 0°, 150°, 270°, jeweils in blau, rot und grün dargestellt). b) bis f) Jeweils für Erfahrung 1 bis 5: Jede Tabelle zeigt experimentelle Trajektorien für jeden untersuchten Zustand und gibt Medianwerte für alle in Abschnitt 3.1 definierten Kriterien an. Signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen werden durch eine Linie mit einem Stern dargestellt.

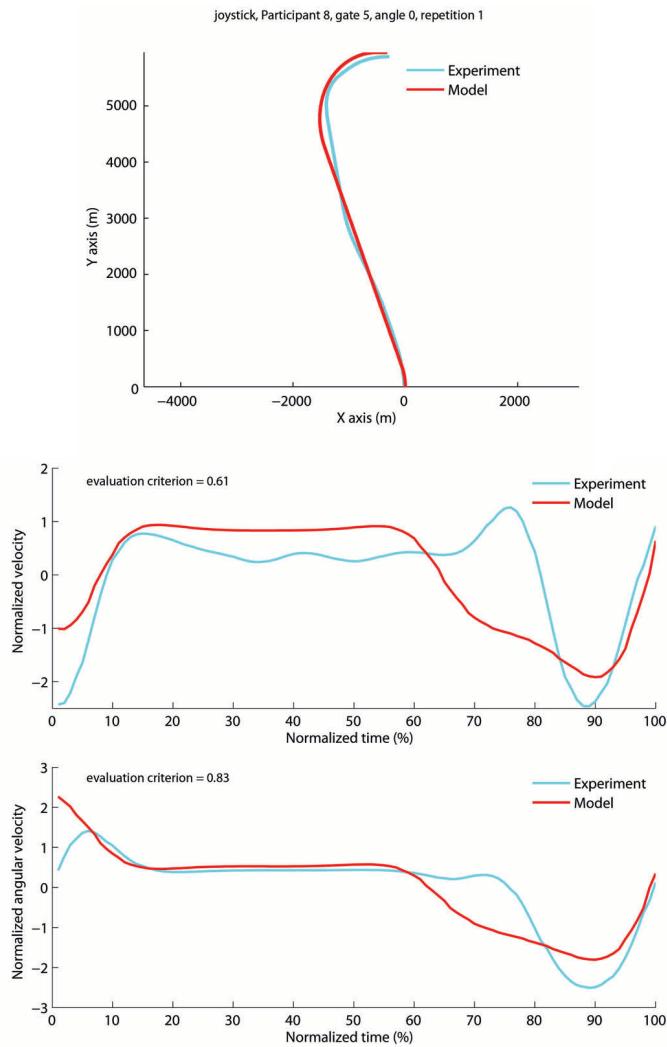


Abb. 5. Darstellung der Trajektorie (oben), des Geschwindigkeitsprofils (mittel) und des Winkelgeschwindigkeitsprofils (unten) eines bestimmten Versuchs der Joystick-Bedingung (in blau) und der entsprechenden Referenztrajektorie, die durch unser Modell berechnet wurde (in rot). Die Ähnlichkeiten sind bemerkenswert, wenn man bedenkt, dass der experimentelle Zustand durch eine manuelle und nicht durch eine zweibeinige Aufgabe erzeugt wurde.

Experiment 3 Frühere Studien haben gezeigt, dass die Blickrichtung und die Kopforientierung die Laufrichtung vorwegnehmen (vor dieser) und dass diese Vorwegnahme eine wichtige Rolle bei der Fortbewegung spielt [11, 30, 15, 14]. In den Experimenten 1 und 2 werden Blickwinkel (Kameras) verwendet, die am Körper des virtuellen Gehers befestigt sind. Für diese Experimente haben wir den Prozentsatz der Gesamtzeit berechnet, in der die *gestalten* Die Entfernung nahm zu (48,2%), der Prozentsatz der Gesamtzeit, in der der Fußgänger nicht auf das Tor schaute (28,3%), und beide (24,2%). Diese Ergebnisse deuten auf eine Zunahme der Flugbahabweichung hin, wenn der Wanderer sein Ziel nicht ansieht. Wenn der Wanderer sein Ziel sieht, kann dies die Konformität der virtuellen Trajektorien verbessern.

Unter unseren Versuchsbedingungen stellte sich heraus, dass es für den Benutzer äußerst komplex war, dem Benutzer mit einer subjektiven Kamera die volle Kontrolle über Kopf und Körper zu geben, was jede plausible Bewegung verhinderte. Daher sind die Kamera der dritten Person und die feste Kamera zwei Möglichkeiten, dem Benutzer die vollständige Sicht auf das Ziel zu geben, ohne seine Steuerung zu erschweren. Zusätzlich ändert die Kamera der dritten Person die Wahrnehmung des VE unter Verwendung eines allozentrischen Gesichtspunkts, dh Position und Orientierung werden in einem globalen Referenzrahmen ausgedrückt [19]. Dies sollte eine bessere Wahrnehmung der relativen Position und Orientierung des Gehers und des Ziels ermöglichen, da diese allozentrische Darstellung erleichtert

mentale Manipulationen und Simulation der Beziehung zwischen Objekten [3].

Die Third-Person-Kamera zeigt deutlich langsamere und längere Trajektorien als die beiden anderen Bedingungen und zeigt einen Einfluss des Blickwinkels auf die Art und Weise, wie die Aufgabe ausgeführt wird. Die Ergebnisse sind jedoch eher enttäuschend, da darüber hinaus keine Schlussfolgerungen gezogen werden können. Wir können nur eine geringere Anzahl von beobachteten *Kollisionen* mit dem Tor als mit der subjektiven Kamera (5-mal weniger), was nicht verwunderlich ist, da das Subjekt beim Erreichen des Ziels das volle Tor und den Körper sehen kann. Andererseits zeigt die feste Kamera deutlich schletere Werte für die *Geschwindigkeitsprofil*, das *Winkelgeschwindigkeitsprofil*, und das *Glätte*. Dies zeigt, dass nicht nur die feste Kamera die Konformität virtueller Trajektorien mit realen nicht verbessert, sondern dass der von ihr verwendete Seitenschritt einen negativen Einfluss hat. Dies ist ein interessantes Ergebnis, da die Einführung eines eindeutig nicht realistischen Fortbewegungsverhaltens (Sidestepping), das in vielen Spielen und Simulationen erfolgreich eingesetzt wird, zu nicht realistischen Verhaltensweisen führt, die von unserem Framework erfolgreich erkannt werden.

Experiment 4 Anstatt die Blickwinkelbedingung so zu ändern, dass das Ziel in Sichtweite ist, besteht ein anderer Ansatz darin, das Sichtfeld des Subjekts so zu ändern, dass es einen größeren Betrachtungsbereich umfasst und das Ziel daher über einen längeren Zeitraum in Sichtweite ist. Natürlich wird erwartet, dass ein breiteres Sichtfeld den Durchschnitt senkt *gestalten* Abstand zu Referenztrajektorien, während ein kleineres Sichtfeld das Gegenteil bewirken soll.

Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen. In der Tat erlaubte ein breiteres Sichtfeld, die *gestalten* Abstand zum Sichtfeld der Grundlinie. Dies unterstreicht die Notwendigkeit von Bewegungsbedingungen, die es dem Benutzer ermöglichen, sein Ziel zu sehen, ohne jedoch andere Faktoren wie in Experiment 3 zu beeinflussen. *Formvariabilität* wurde deutlich reduziert, was darauf hindeutet, dass die Probanden häufig mit unterschiedlichem Glück raten müssen, wo sich das Zieltor befindet, wenn es außer Sichtweite ist. Dies wird durch den deutlichen Anstieg von bestätigt *Formvariabilität* für ein kleines Sichtfeld. Das große Sichtfeld ermöglichte es auch, die Gesamtzahl der Fehler (14) im Vergleich zur Basislinie (49) und den kleinen (102) Sichtfeldern drastisch zu reduzieren.

Experiment 5 Durch die Erkundung intensiverer Einstellungen können wir uns den tatsächlichen Gehbedingungen nähern. Durch das IPS und das HMD steuert das Subjekt seinen Kopf unabhängig und natürlich, während es seinen Körper durch eine manuelle Aufgabe wie in früheren Experimenten kontrolliert. Das stereoskopische Sehen bietet eine bessere Wahrnehmung der Tiefenmarkierungen sowie der relativen Positionen und Entfernung, während das IPS ein realitätsnahe Sichtfeld bietet. Bei der HMD muss der Benutzer jedoch wählen, ob er das Ziel sehen oder den Fokus der Erweiterung des optischen Flusses sehen möchte, die beide für eine Fortbewegungsaufgabe wichtig sind.

Ein erstes überraschendes Ergebnis liegt in der Leistung der IPS-Bedingung. Angesichts der Ähnlichkeit der visuellen Bedingungen zwischen dem IPS und der Realität (Tiefe, Stereo, Sichtfeld, Skalierung, unabhängiger Kopf usw.) erwarteten wir eine signifikante Verbesserung der meisten Kriterien. Dies ist jedoch nicht der Fall: die *gestalten* Entfernung wird reduziert, aber nicht in signifikanter Weise, während die *Formvariabilität* ebenfalls reduziert, aber nur im Vergleich zum HMD-Zustand von Bedeutung. Die Gesamtzahl der Fehler ist beim IPS (17) geringer als beim HMD (62) und beim Desktop-Bildschirm (33). Ein zweites überraschendes Ergebnis ist die besonders geringe Leistung des HMD. Das *Geschwindigkeitsprofil* und *Winkelgeschwindigkeitsprofil* sind signifikant schlechter als die Grundlinien- bzw. die IPS-Bedingungen. Das HMD hat die höhere Anzahl an Gesamtfehlern, doppelt so hoch wie die Basislinie, und eine signifikant höhere Variabilität als die beiden anderen Bedingungen. Nach der Analyse der Kopforientierung im HMD-Zustand stellten wir fest, dass die meisten Benutzer ihren Kopf nicht wie im wirklichen Leben verwendeten, sondern mit dem Oberkörper verschlossen blieben und nach vorne schauten, als ob der Blickwinkel nicht unabhängig wäre. Dieses Verhalten könnte durch das Fehlen eines Expansionsfokus während der Kopfdrehung oder durch die Komplexität des effizienten Navigierens mit dem Joystick erklärt werden, wenn die Ansicht nicht mit der Bewegungsrichtung ausgerichtet war. Diese letztere Hypothese wird von der *endgültige Orientierung* Kriterium, bei dem der Winkel deutlich schlechter ist als unter den beiden anderen Bedingungen, was auf ein Problem bei der Kopf-Navigations-Kopplung hinweist. Am Ende wird der HMD-Zustand auf einen Grundzustand reduziert, jedoch mit einem kleinen physischen Zustand

Sichtfeld und ein weniger komfortables Gerät, was seine geringe Leistung erklären könnte.

6 C. SCHLUSSFOLGERUNG

In diesem Artikel haben wir vorgeschlagen, verschiedene VR-Fortbewegungsbedingungen zu untersuchen, indem wir Referenztrajektorien mit virtuellen Trajektorien vergleichen, die von Benutzern während einer einfachen orientierten Fortbewegungsaufgabe erzeugt wurden (dh von einer orientierten Position zu einer anderen wechseln). Wir unterscheiden uns von der Verwendung traditioneller Kriterien für Natürlichkeit, Wirksamkeit und Präzision, indem wir eine Reihe von Trajektorienkriterien vorschlagen. Durch diesen Ansatz bewerten wir den Einfluss eines bestimmten Satzes virtueller Fortbewegungsbedingungen auf die Erzeugung virtueller Trajektorien, die der realen menschlichen Fortbewegung entsprechen. Dies ist besonders wichtig im Zusammenhang mit VR-Anwendungen, die auf realistischen Trajektorien in virtuellen Umgebungen basieren. Deshalb, Wir schlagen einen umfassenden Bewertungsrahmen vor, der eine Reihe experimenteller virtueller Trajektorien als Eingabe verwendet und diese durch einen Vergleich mit einer Reihe von Referenztrajektorien unter Verwendung verschiedener trajektorografischer Kriterien bewertet. Diese Referenztrajektorien sind entweder reale Trajektorien, die durch eine ähnliche reale Aufgabe erzeugt wurden, oder simulierte Trajektorien, die durch ein zielorientiertes Fortbewegungsmodell erzeugt wurden, wodurch jede Art von Trajektorie unabhängig vom Ziel (Position und Ausrichtung) und der Ausführungsgeschwindigkeit bewertet werden kann.

Darüber hinaus haben wir eine Studie durchgeführt, um eine erste Bewertung der Konformität virtueller Trajektorien mit ihrem realen Gegenstück unter einer Reihe häufig verwendeter Bedingungen zu erhalten: Eingabegeräte, Anzeigegeräte für die Ausgabe, Steuergesetze und Visualisierungsmodalitäten. Unsere wichtigsten Ergebnisse legen nahe, dass die Probanden unabhängig von der Bedingung versuchen, Trajektorien zu generieren, die den realen entsprechen. Dies wird je nach den Bedingungen mehr oder weniger erfolgreich erreicht, aber virtuelle Trajektorien weisen immer einige grundlegende Merkmale der realen Fortbewegung auf. Ein anderes Ergebnis wäre zu erwarten gewesen, da sich virtuelle und reale Trajektorien völlig unterschieden. Es ist schwierig zu bestimmen, was die Probanden dazu bringt, dieses realistische Verhalten zu zeigen, aber es ist ein Ergebnis, das unsere Arbeit bestätigt: Wir müssen dem Benutzer die Mittel geben, um dieses Verhalten zu stärken.

Zukünftige Arbeiten werden sich darauf konzentrieren, das Framework der Community zur Verfügung zu stellen, um es durch zusätzliche Kriterien und neue Modelle zu verbessern. Die überwältigende Anzahl von Eingabegeräten, Ausgabegeräten und Visualisierungsbedingungen verhindert eine zentralisierte Untersuchung und macht die Verfügbarkeit des Frameworks zu einem wichtigen Schritt unserer Arbeit. Bestehende Trajektorgraphical-Bewertungskriterien [41] könnten ebenso wie bestehende und neue Fortbewegungsmodelle einbezogen werden, die die Anwendungen unseres Frameworks erweitern würden, indem sie den Vergleich von Fortbewegungsmodellen zwischen ihnen ermöglichen. Andere Fortbewegungsaufgaben könnten untersucht werden, insbesondere solche, die die Interaktion mit statischen oder dynamischen Objekten der virtuellen Umgebung betreffen. Im Rahmen unserer Forschungsgruppe

EIN BESTÄTIGUNGEN

Diese Arbeit wurde vom europäischen FET-Open-Verbundprojekt „TANGO“ des RP7, Finanzhilfevereinbarung Nr. 249858, unterstützt.

R. EFERENZEN

- [1] G. Arechavaleta, J.-P. Laumond, H. Hicheur und A. Berthoz. Optimierungsprinzipien, die der Form von Trajektorien bei der zielgerichteten Fortbewegung für den Menschen zugrunde liegen. In *IEEE-RAS Int. Conf. auf humanoiden Robotern*, Seiten 131 - 136, 2006.
- [2] T. Banton, J. Stefanucci, F. Durgin, A. Fass und D. Profitt. Die Wahrnehmung der Gehgeschwindigkeit in einer virtuellen Umgebung. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 14 (4): 394–406, 2005.
- [3] A. Berthoz. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris, 1997.
- [4] R. Boulic. Proaktive Steuerung in Richtung orientierter Ziele. In *Proceedings of Eurographics 2005 Kurzpräsentationen*, 2005.
- [5] D. Brogan und N. Johnson. Realistische menschliche Gehwege. In *Int. Conf. über Computeranimation und soziale Agenten*, Seiten 94 - 101, 2003.
- [6] H. Bruggeman, W. Zosh und WH Warren. Der optische Fluss treibt die visuokomotorische Anpassung des Menschen an. *Aktuelle Biologie*, 17 (23): 2035–2040, 2007.
- [7] G. Cirio, P. Vangorp, E. Chapoulie, M. Marchal, A. Lecuyer und G. Drettaki. Gehen in einem Würfel: Neuartige Metaphern zum sicheren Navigieren in großen virtuellen Umgebungen in eingeschränkten realen Arbeitsbereichen. *IEEE Trans. zu Visualisierung und Computergrafik*, 18 (4): 546–554, 2012.
- [8] BR Fajen und WH Warren. Verhaltensdynamik der Lenkung, Vermeidung von Hindernissen und Routenauswahl. *Journal of Experimental Psychology: Menschliche Wahrnehmung und Leistung*, 29 (2): 343–362, 2003.
- [9] PW Fink, PS Foo und WH Warren. Vermeidung von Hindernissen beim Gehen in realen und virtuellen Umgebungen. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4 (1), 2007.
- [10] J. Gibson. *Die Wahrnehmung der visuellen Welt*. Houghton Mifflin, 1950.
- [11] R. Grasso, S. Glasauer, Y. Takei und A. Berthoz. Das prädiktive Gehirn: vorausschauende Kontrolle der Kopfführung zur Steuerung der Fortbewegung. *NeuroReport*, 7 (6): 1170–1174, 1996.
- [12] JM Harris und W. Bonas. Optischer Fluss und Szenenstruktur tragen nicht immer zur Kontrolle des menschlichen Gehens bei. *Visionsforschung*, 42 (13): 1619–1626, 2002. PMID: 12079790.
- [13] SE Hassan, JC Hicks, H. Lei und KA Turano. Was ist das minimale Sichtfeld, das für eine effiziente Navigation erforderlich ist? *Visionsforschung*, 47 (16): 2115–2123, 2007. PMID: 17561227.
- [14] H. Hicheur, Q.-C. Pham, G. Arechavaleta, J.-P. Laumond und A. Berthoz. Die Bildung von Trajektorien während der zielgerichteten Fortbewegung beim Menschen. Ich. ein stereotypes Verhalten. *Die Europäische Zeitschrift für Neurowissenschaften*, 26 (8): 2376–2390, 2007. PMID: 17953625.
- [15] M. Hollands, A. Patla und J. Vickers. Schauen Sie, wohin Sie gehen!: Blickverhalten, das mit dem Beibehalten und Ändern der Bewegungsrichtung verbunden ist. *Experimentelle Hirnforschung*, 143 (2): 221–230, 2002.
- [16] JH Hollman, RH Brey, RA Robb, TJ Bang und KR Kaufman. Raumzeitliche Gangabweichungen in einer Virtual-Reality-Umgebung. *Gang & Haltung*, 23 (4): 441–444, 2006. PMID: 16095905.
- [17] BKP Horn. *Robotervision*. The MIT Press, MIT Press ed Edition, 1986.
- [18] H. Iwata und Y. Yoshida. Pfadreproduktionstests mit einem Torus-Laufband. *Präsenz: Teleoper. Virtuelle Umgebung*, 8 (6): 587–597, 1999.
- [19] R. Klatzky. Allozentrische und egozentrische räumliche Darstellungen: Definitionen, Unterscheidungen und Verbindungen. *Räumliche Wahrnehmung: Ein interdisziplinärer Ansatz zur Darstellung und Verarbeitung von räumlichem Wissen*, Seiten 1–17, 1998.
- [20] DR Lampton, DP McDonald, M. Singer und JP Bliss. Entfernungsschätzung in virtuellen Umgebungen. *Tagungsband der Human Factors and Ergonomics Society*, 39 (20): 1268–1272, 1995.
- [21] JF Lapointe, P. Savard und NG Vinson. Eine vergleichende Studie von vier Eingabegeräten für virtuelle exemplarische Vorgehensweisen für Desktops. *Comput. Summen. Behav.*, 27 (6): 2186–2191, 2011.
- [22] M. Lappe, F. Bremmer und A. van den Berg. Wahrnehmung der Selbstbewegung aus dem visuellen Fluss. *Trends in den kognitiven Wissenschaften*, 3: 329–336, 1999.
- [23] J. Loomis und J. Knapp. Visuelle Wahrnehmung egozentrischer Distanz in realen und virtuellen Umgebungen. In *Virtuelle und adaptive Umgebungen: Anwendungen, Implikationen und menschliche Leistungsprobleme*, Seiten 21–46. L. Erlbaum Ass., 2003.
- [24] M. Marchal, J. Pettre und A. Lecuyer. Joyman: Ein Joystick im menschlichen Maßstab zum Navigieren in virtuellen Welten. In *Proc. des IEEE Symp. auf 3D-Benutzeroberflächen*, 3DUI '11, Seiten 19–26, 2011.
- [25] BJ Mohler, SH Creem-Regehr, WB Thompson und HH Blhoff. Die Auswirkung der Anzeige eines Selbst-Avatars auf Entfernungsbeurteilungen in einer HMD-basierten virtuellen Umgebung. *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, 19 (3): 230–242, 2010.
- [26] K. Mombaur, J.-P. Laumond und E. Yoshida. Ein optimales Kontrollmodell, das holonomes und nicht-holonomes Gehen vereint. In *IEEE-RAS Int. Conf. auf humanoiden Robotern*, 2008., Seiten 646–653, 2008.
- [27] AE Patla. Verständnis der Rolle des Sehens bei der Kontrolle der menschlichen Fortbewegung. *Gang & Haltung*, 5 (1): 54–69, 1997.
- [28] AE Patla, A. Adkin und T. Ballard. Online-Steuerung: Koordination und Kontrolle des Körperschwerpunkts, der Neuorientierung von Kopf und Körper. *Experimentelle Hirnforschung*, 129 (4): 629–634, 1999.
- [29] Q.-C. Pham, H. Hicheur, G. Arechavaleta, J.-P. Laumond und A. Berthoz. Die Bildung von Trajektorien während der zielgerichteten Fortbewegung beim Menschen. II. ein Modell für maximale Glätte. *Die Europäische Zeitschrift für Neurowissenschaften*, 26 (8): 2391–2403, 2007. PMID: 17953626.
- [30] P. Prévost, I. Yuri, G. Renato und A. Berthoz. Räumliche Invarianz im antizipatorischen Orientierungsverhalten während der menschlichen Navigation. *Neurowissenschaftliche Briefe*, 339 (3): 243–247, 2003.
- [31] S. Razzaque, Z. Kohn und MC Whitton. Umgeleitetes Gehen. In *Verfahren der Eurographie*, 2001.

- [32] C. Reynolds. Lenkverhalten für autonome Charaktere. Im *Ergebnisse der Spieleentwicklerkonferenz 1999*, 1999.
- [33] SK Rushton, JM Harris, MR Lloyd und JP Wann. Die Führung der Fortbewegung zu Fuß verwendet eher den wahrgenommenen Zielort als den optischen Fluss. *Aktuelle Biologie*, 8 (21): 1191–1194, 1998.
- [34] M. Slater, M. Usoh und A. Steed. Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Gehtechnik auf die Präsenz in der virtuellen Realität. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interagieren.*, 2 (3): 201–219, 1995.
- [35] JL Souman, PR Giordano, M. Schwaiger, I. Frissen, T. Thümmel, H. Ulrich, AD Luca, SH Büthhoff und MO Ernst. Cyberwalk: Ermöglichen eines uneingeschränkten omnidirektionalen Gehens durch virtuelle Umgebungen. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 8 (4): 25: 1–25: 22, Dezember 2008.
- [36] E. Suma, S. Finkelstein, M. Reid, S. Babu, A. Ulinski und L. Hodges. Bewertung der kognitiven Effekte der Reisetechnik in komplexen realen und virtuellen Umgebungen. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 16 (4): 690–702, Juli-August. 2010.
- [37] EA Suma, DM Krum und M. Bolas. Umleitung auf Mixed-Reality-Laufflächen. Im *IEEE VR Workshop zu Wahrnehmungswirkungen in Virt. Env.*, 2011.
- [38] L. Terziman, M. Marchal, F. Multon, B. Arnaldi und A. Lécuyer. Vergleich virtueller Trajektorien im Slalom mit Walk-in-Place- und Joy-Stick-Techniken. Im *Gemeinsame Virtual Reality-Konferenz EuroVR / EGVE*, Nottingham, Vereinigtes Königreich, 2011. Eurographics.
- [39] KA Turano, D. Yu, L. Hao und JC Hicks. Optik- und egozentrische Richtungsstrategien beim Gehen: zentrales vs. peripheres Sichtfeld. *Visionsforschung*, 45 (25–26): 3117–3132, 2005. PMID: 16084556.
- [40] J. Warren, WH. BA Kay, WD Zosh, AP Duchon und S. Sahuc. Der optische Fluss wird verwendet, um das Gehen des Menschen zu steuern. *Naturneuwissenschaften*, 4 (2): 213–216, 2001. PMID: 11175884.
- [41] M. Whitton, J. Cohn, J. Feasel, P. Zimmons, S. Razzaque, S. Poulton, B. McLeod und J. Brooks, FP Vergleich von VE-Fortbewegungsschnittstellen. Im *IEEE Virtual Reality Proc.*, 2005.
- [42] RM Wilkie und JP Wann. Augenbewegungen unterstützen die Kontrolle der Fortbewegung. *Journal of Vision*, 3 (11), 2003.
- [43] P. Willemsen, MB Colton, SH Creem-Regehr und WB Thompson. Die Auswirkungen der am Kopf montierten Anzeigemechanik auf die Entfernungsbeurteilung in virtuellen Umgebungen. Im *Proc. des Symp. zu Angewandter Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung*, 2004.
- [44] B. Williams, G. Narasimham, B. Rump, TP McNamara, TH Carr, J. Rieser und B. Bodenheimer. Erkunden großer virtueller Umgebungen mit einem HMD, wenn der physische Speicherplatz begrenzt ist. Im *Proc. des ACM symp. zu Angewandter Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung*, 2007.
- [45] C. Zanbaka, B. Lok, S. Babu, A. Ulinski und L. Hodges. Vergleich von Pfadvisualisierungen und kognitiven Maßnahmen in Bezug auf die Reisetechnik in einer virtuellen Umgebung. *IEEE-Transaktionen zu Visualisierung und Computergrafik*, 11 (6): 694–705, Nov.-Dez. 2005.