

Fortbewegung in der virtuellen Realität: Eine vergleichende Bewertung des Joysticks, Teleportieren und lehnen

Fabio Buttussi und Luca Chittaro

Abstrakt- Neuere VR-Head-Mounted-Displays für Verbraucher bieten 3-DOF- oder 6-DOF-Head-Tracking. Die Positionsverfolgung (sofern verfügbar) ist jedoch auf einen kleinen Bereich beschränkt. Darüber hinaus können Benutzer in kleinen oder überfüllten physischen Räumen VR nur dann sicher erleben, wenn sie an Ort und Stelle bleiben, stehen oder sitzen. Es wurden verschiedene Fortbewegungstechniken vorgeschlagen, damit Benutzer virtuelle Umgebungen erkunden können, indem sie an Ort und Stelle bleiben. Zwei in der Literatur und in Verbraucheranwendungen häufig verwendete In-Place-Fortbewegungstechniken basieren auf Joystick und Teleport. Einige Autoren untersuchten das Lehnen mit dem Ziel, eine natürlichere Fortbewegungstechnik vor Ort vorzuschlagen. Es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um die Auswirkungen der drei Techniken zu verstehen, da keine Anwenderstudie sie alle gründlich unter verschiedenen grundlegenden Aspekten miteinander verglichen hat. Deshalb, Dieses Papier enthält eine vergleichende Bewertung mit 75 Benutzern, in der die Auswirkungen der drei Techniken auf Leistung, Krankheit, Anwesenheit, Benutzerfreundlichkeit und verschiedene Aspekte des Komforts bewertet werden. Die Leistung des Teleports war besser als die der anderen Techniken, und die Leistung des Lehns war besser als die des Joysticks. Teleport verursachte auch weniger Übelkeit als die anderen Techniken. Unerwarteterweise wurden keine signifikanten Unterschiede für das Vorhandensein gefunden. Teleport erhielt einen höheren Usability-Score als die anderen Techniken. Schließlich hatten die Techniken unterschiedliche Auswirkungen auf den Komfort, die wir ausführlich diskutieren. Teleport verursachte auch weniger Übelkeit als die anderen Techniken. Unerwarteterweise wurden keine signifikanten Unterschiede für das Vorhandensein gefunden. Teleport erhielt einen höheren Usability-Score als die anderen Techniken. Schließlich hatten die Techniken unterschiedliche Auswirkungen auf den Komfort, die wir ausführlich diskutieren. Teleport verursachte auch weniger Übelkeit als die anderen Techniken. Unerwarteterweise wurden keine signifikanten Unterschiede für das Vorhandensein gefunden. Teleport erhielt einen höheren Usability-Score als die anderen Techniken. Schließlich hatten die Techniken unterschiedliche Auswirkungen auf den Komfort, die wir ausführlich diskutieren.

Indexbegriffe - Immersive virtuelle Realität, Fortbewegungstechniken, Teleport, Joystick, Lehnen, Benutzerstudie, vergleichende Bewertung



1 I. EINLEITUNG

Nach verschiedenen virtuellen Umgebungen (VE) bestehende Prozess der Bestimmung eines Pfades basierend auf visuellen Hinweisen, Kenntnis der Umgebung und Hilfsmitteln wie Karten oder Kompassen [1] und (ii) Reise, dh „die Steuerung der Blickwinkelbewegung des Benutzers in der dreidimensionalen Umgebung“ [1]. Reisen ist „eine der grundlegendsten und universellsten Wechselwirkungen, die in VE-Anwendungen zu finden sind“ [1], weshalb es seit den 90er Jahren [1], [2], [3], [4] große Aufmerksamkeit erhielt. Kürzlich wurden neue VR-Head-Mounted-Displays (HMDs) für Verbraucher veröffentlicht, und verschiedene Autoren haben begonnen, Reisen mit diesen neuen HMDs zu untersuchen [5] [6] [7] [8] [9] [10]. Da alle diese HMDs mindestens eine 3-DOF-Kopfverfolgung aufweisen, kann die Kopforientierung verwendet werden, um die Benutzerorientierung in der VE zu steuern. Die Positionsverfolgung ist stattdessen nur mit HMDs mit 6-DOF-Verfolgung verfügbar und auf einen kleinen Bereich beschränkt. Darüber hinaus können Benutzer in kleinen oder überfüllten Räumen VR nur dann sicher erleben, wenn sie an Ort und Stelle bleiben, stehen oder sitzen.

Virtuell Fortbewegung Techniken sind Interaktionstechniken, die es einem Benutzer ermöglichen, sich in einem VE über große Entfernungen zu bewegen, während er sich an einem relativ kleinen physischen Ort befindet [4]. Es wurden verschiedene Fortbewegungstechniken vorgeschlagen, und einige

von ihnen können an Ort und Stelle verwendet werden. Zwei in der Literatur und in VR-Anwendungen für Verbraucher häufig verwendete In-Place-Fortbewegungstechniken basieren jeweils auf Joystick und Teleport. Im Joystick, Benutzer drücken Richtungstasten, Sticks oder Pads, um den Ansichtspunkt kontinuierlich in die gewählte Richtung zu bewegen. Im teleportieren, Benutzer zeigen auf ein Ziel (z. B. mit einem verfolgten Handheld-Controller) und bestätigen es (z. B. durch Drücken einer Taste), um den Ansichtspunkt sofort dorthin zu verschieben [6], [7], [10], [11]. Einige Autoren untersuchten eine natürlichere Fortbewegungstechnik an Ort und Stelle gelehnt, Benutzer können sich physisch in die gewünschte Bewegungsrichtung lehnen [8], [9], [12]. Andere Autoren untersuchten spezielle Hardware (z. B. spezielle Laufbänder) [13] oder Techniken, bei denen Benutzer an Ort und Stelle [2], [14], [15], [16] oder in einem kleinen Bereich (z. B. umgeleitetes Gehen) gehen müssen. [17], [18]. In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf In-Place-Techniken, die sowohl im Stehen als auch im Sitzen verwendet werden können und von aktuellen HMDs mit 6-DOF-Verfolgung sowohl des Kopfes als auch der Handheld-Controller des Benutzers unterstützt werden. Deshalb haben wir uns auf Joystick, Teleport und Lehnen konzentriert.

Die Autoren arbeiten mit dem Human-Computer Interaction Lab, Fakultät für Mathematik, Informatik und Physik, Universität Udine, Udine 33100, Italien, zusammen. E-Mail: {fabio.butussi, luca.chittaro}@uniud.it.

Manuskript erhalten 14. September 2018; überarbeitet am 26. Juni 2019; akzeptiert 6. Juli 2019. Veröffentlichungsdatum 15. Juli 2019; Datum der aktuellen Version 24. November 2020.

(Korrespondierender Autor: Fabio Buttussi.)

Empfohlen für die Annahme durch JE Swan II.

Digitale Objektkennung Nr. 10.1109 / TVCG.2019.2928304

Nach unserem besten Wissen hat keine Anwenderstudie alle drei Techniken gründlich mit einer Vielzahl von Aspekten verglichen, die eine grundlegende Rolle für die VR-Erfahrung spielen. Während sich mehrere Studien auf die Leistung konzentrierten (z. B. in Bezug auf die Zeit bis zur Erledigung einer bestimmten Reiseaufgabe), wurden andere Aspekte wie Krankheit, Anwesenheit, Benutzerfreundlichkeit und Komfort weniger häufig anhand einer Teilmenge der drei Techniken und mit bewertet eine kleine Auswahl von Benutzern. Daher wird in diesem Artikel eine vergleichende Bewertung der Auswirkungen von Joystick, Teleport und Neigung zu Leistung, Krankheit, Anwesenheit, Benutzerfreundlichkeit und verschiedenen Aspekten des Komforts an einer Stichprobe von 75 Benutzern vorgestellt.

Das Papier ist wie folgt organisiert. Abschnitt 2 fasst frühere Studien zusammen, in denen die Auswirkungen von Joystick, Teleport und Neigen verglichen wurden, sowie diejenigen, in denen sie mit anderen Techniken verglichen wurden, die an Ort und Stelle verwendet werden können. Abschnitt 3 beschreibt, wie die drei betrachteten Techniken in unserer Studie verwendet wurden. Abschnitt 4 beschreibt die Studie, während die Abschnitte 5 und 6 die Ergebnisse berichten und diskutieren. Schließlich schließt Abschnitt 7 das Papier ab, in dem die Zukunftsarbeit umrissen wird.

2 R. BEGEISTERT W. ORK

In mehreren Studien wurden die Auswirkungen von Fortbewegungstechniken auf die immersive VR untersucht. Da der Schwerpunkt dieses Dokuments auf Joystick, Teleport und Lernen mit HMDs liegt, werden in diesem Abschnitt Studien zu diesen Techniken beschrieben, einschließlich solcher, bei denen mindestens eine der drei Techniken mit anderen auf HMDs basierenden In-Place-Techniken verglichen wurde. Daher enthält es keine Studien, in denen keine HMDs verwendet wurden (z. B. Studien, die in einer CAVE wie in [19] durchgeführt wurden), und Studien, in denen verschiedene Fortbewegungstechniken mit unterschiedlicher Hardware getestet wurden (z. B. Studien, in denen einige Techniken mit einer HMD und andere getestet wurden) mit einem Desktop-Monitor in derselben Studie wie in [20], [21]), da die Änderung der Hardware die Ergebnisse beeinflusst haben könnte. Tabelle 1 fasst die betrachteten Studien zusammen und spezifiziert die verglichenen Techniken (nur diejenigen, die sich auf unseren Fokus beziehen), die Stichprobengröße, die durchgeführten Aufgaben,

vorwärts / rückwärts gemäß Kopfnigung und gedreht gemäß Kopfgieren [9], [26].

In keiner Studie wurden alle drei Techniken (Joystick, Teleport und Lehnen) miteinander verglichen. Hashemian und Riecke [8] verglichen zwei Implementierungen von Leaning (LSC und LSS) mit zwei Implementierungen von Joystick (JT & LR und JT & JR). Kitson et al. [9] verglichen vier Implementierungen von Leaning (LSC, zwei Implementierungen von LSS mit unterschiedlichen Stühlen und HT) mit JT & JR. Harris et al. [12] verglichen LSP mit JT & LR und mit dem begehbarer Ort (WIP)-Technik, bei der der Ansichtspunkt nach vorne verschoben wird, wenn Benutzer Schritte an Ort und Stelle ausführen. Tregillus et al. [26] verglichen HT mit JT & LR sowie mit WIP-Tilt (WT), einer Kombination aus HT zur Steuerung der Rotation und WIP zur Steuerung der Translation. McCullough et al. [5] verglichen JT & LR mit einer Variante von WIP namens Arm schwingen (AS), bei dem der Blickwinkel nach vorne verschoben wird, wenn Benutzer die Arme bewegen, um das Gehen zu simulieren. Lee et al. [22] verglichen eine Variante von JT & LR, bei der der Blickwinkel gemäß der Kopfrichtung bewegt wird, wenn Benutzer eine Taste auf dem Joystick drücken, mit drei verschiedenen Techniken: (i) push & go (PS & G), bei dem der Blickwinkel entsprechend der physischen Bewegung eines verfolgten Joysticks bewegt wird, wenn Benutzer einen Knopf drücken, (ii) point & go (PN & G), bei dem sich der Blickwinkel in Richtung des von den Benutzern angegebenen Ziels bewegt, und (iii) greifen & ziehen (G & D), bei dem der VE entsprechend der Bewegung eines verfolgten Joysticks bewegt wird, wenn Benutzer einen Knopf drücken. Bozgeyikli et al. [11] verglichen JT & LR mit P & T und WIP. Eine kürzlich von denselben Autoren durchgeführte Studie [23] fügte dem Vergleich fünf Techniken hinzu. Zwei davon können ohne zusätzliche Hardware verwendet werden: Handflattern

Verschiedene Studien implementierten die Techniken auf unterschiedliche Weise unter Verwendung derselben Namen oder nannten ähnliche Techniken mit unterschiedlichen Namen. Beispielsweise wird bei HMDs und Head Tracking häufig der Joystick verwendet, um nur die Übersetzung zu steuern [5], [8], [10], [12], [22], da die Rotation vom Headtracker erkannt werden kann und Benutzer dies können drehen, während Sie an Ort und Stelle stehen oder auf einem Drehstuhl sitzen. Der Joystick kann jedoch auch zur Steuerung von Translation und Rotation verwendet werden [8] [9], wie dies bei Videospielkonsolen üblich ist. Einige Autoren verwenden den Begriff Joystick, um den ersten Fall anzuzeigen [5], [10], [12], während andere den gleichen Begriff verwenden, um den letzteren anzuzeigen [8], [9]. Um Verwirrung zu vermeiden, verwenden wir Joystick-Übersetzung & echte Rotation (JT & LR), um das erstere anzuzeigen, und Joystick-Übersetzung & Joystick-Rotation (JT & JR), um letzteres anzuzeigen. Der Teleport wird häufig durch Zeigen auf das gewünschte Ziel gesteuert (z. B. mit einem verfolgten Handheld-Controller) und wird daher manchmal aufgerufen Punkt & Teleport (P & T) [11], [23]. In einigen Implementierungen können Benutzer nicht überall zeigen, wo sie möchten, sondern können stattdessen aus einem festen Satz vordefinierter Teleportpunkte auswählen. In diesem Fall wird die Technik manchmal aufgerufen Fixpunkt-Teleport (FPT) [7]. Schließlich können Benutzer vom System auch zu einem vordefinierten Ziel teleportiert werden [3]. Wir bezeichnen diese Implementierung von Teleport als automatischer Teleport (BEIM). Die verschiedenen Implementierungen des Lehnens teilen die Grundidee, dass Benutzer sich nur in die Richtung lehnen sollten, in die sie reisen möchten, und die Bewegungsgeschwindigkeit hängt davon ab, wie stark sie sich lehnen [24]. Die ersten Implementierungen basierend auf Head Tracking [24], [25] und eine Implementierung basierend auf einem Wii Fit Balance Board [12] sind Beispiele dafür aus stehender Position lehnen (LSP). Das Lehnen wurde auch für Benutzer implementiert, die auf einem gemeinsamen Drehstuhl sitzen (auf einen Drehstuhl gelehnt, LSC) [8], [9] oder auf einem speziellen Hocker, der sich drehen und lehnen kann (auf einen speziellen Hocker gestützt, LSS) [8], [9]. Endlich, Kopfnigung (HT) kann als Implementierung einer Neigung betrachtet werden, bei der der Blickwinkel verschoben wird

(HF), bei dem der Blickwinkel nach vorne bewegt wird, wenn Benutzer mit den Händen flattern, und fliegen (FL), bei dem die Vorwärtsbewegung des Blickpunkts durch Anheben einer Hand gestartet und gestoppt wird. Langbehn et al. [10] verglichen JT & RR mit P & T und einer zusätzlichen Technik, die nicht an Ort und Stelle angewendet werden kann (umgeleitetes Gehen). Frommel et al. [7] verglichen JT & LR, P & T, FPT und eine Fortbewegungstechnik, bei der der Blickwinkel automatisch auf ein vordefiniertes Ziel verschoben wird (wir geben es als an Automatikwerk, AM). Christou und Aristidou [6] verglichen P & Twith Hand zeigt (HP), in dem der Blickwinkel in die Richtung bewegt wird, in die Benutzer mit einem verfolgten Handheld-Gerät zeigen, und Kopflenfung (HDS), bei dem der Blickpunkt in die Richtung bewegt wird, in die der Kopf des Benutzers zeigt. Bowman et al. [3] verglichen mit AM.

In Bezug auf die Teilnehmerzahl wurde die größte Stichprobe von Lee et al. [22] (98 Teilnehmer). Tregillus et al. [26], Frommel et al. [7] und Langbehn et al. [10] rekrutierten jeweils 25, 24 und 33 Teilnehmer (von denen 22 an Ort und Stelle Fortbewegungstechniken ausprobierten). Die übrigen Studien umfassten alle kleine Stichproben (16 oder weniger Teilnehmer), so dass der Mangel an statistischer Signifikanz in einigen der Ergebnisse möglicherweise mit der kleinen Stichprobe zusammenhängt.

Die Aufgaben, die die Teilnehmer ausführen mussten, variierten mit den Lernzielen. In Studien, in denen die Fortbewegungsleistung bewertet wurde oder in denen mehrere verschiedene Variablen berücksichtigt wurden, bestand die Aufgabe beispielsweise darin, ein Ziel zu erreichen, möglicherweise nachdem verschiedene Wegpunkte durchlaufen wurden [6] [11] [22] [23]. In Studien, die sich stattdessen auf die räumliche Ausrichtung konzentrierten, wurden die Teilnehmer normalerweise gebeten, sich an die Position einiger Ziele zu erinnern oder durch diese zu navigieren, zu einer neuen Position zu reisen und sich schließlich den Zielen zuzuwenden oder auf sie zu zeigen, ohne sie zu sehen [5] [10] [12].

TABELLE 1
Vergleiche der Fortbewegung an Ort und Stelle Techniken

Reference	Tech-niques*	Sample size	Tasks	Dependent variables	Main findings
Bowman et al. (1997) [3]	AM, AT	10	Locate a target after being moved to a different position	Time to find the target (spatial orientation)	Less time with AM than AT
Lee et al. (2009) [22]	JT&RR, PS&G, PN&G, G&D	98	Reach and touch 10 waypoints within 3 minutes	Travel speed, reach time (time to touch a waypoint after reaching it), path efficiency (users' path / shortest path), overshoot (number of times users reach a waypoint without touching it)	Best travel speed with G&D; worst travel speed with PS&G; best path efficiency with PN&G; better path efficiency with JT&RR than G&D; no significant differences in reach time and overshoot
Harris et al. (2014) [12]	LSP, JT&RR	10	Remember the location of 6 targets, move to a new position, turn towards a target without vision	Time and error in degrees to turn towards the target (spatial orientation)	Larger error with JT&RR; no significant differences in time
Harris et al. (2014) [12]	LSP, WIP	12	Remember the location of 6 targets, move to a new position, turn towards a target without vision	Time and error in degrees to turn towards the target (spatial orientation)	No significant differences in error; less time with WIP than LSP
McCullough et al. (2015) [5]	AS, JT&RR	12	Remember the location of 6 targets, move to a new position, turn towards a target without vision	Time and error in degrees to turn towards the target (spatial orientation)	Larger error with JT&RR than AS; no significant differences in time
Bozgeyikli et al. (2016) [11]	P&T, WIP, JT&RR	16	Reach 10 destinations (6 on a VE without obstacles, 4 in a VE with obstacles)	Time to reach destinations, collisions with obstacles, usability, effort, sickness, presence, ranking of techniques	Less time with JT&RR and P&T than WIP with no obstacles; less time with JT&RR than WIP and P&T with obstacles; less collisions with P&T than WIP and JT&RR; more difficulty to understand with WIP than JT&RR; more effort and tiredness with WIP than JT&RR and P&T; no significant differences in sickness, presence, and preference
Christou and Aristidou (2017) [6]	HDS, HP, P&T	15	Travel from a start position to a destination shown on a map, collecting tokens during the path	Successful trials (trials in which the destination was reached), time to reach destination, collected tokens, sickness	Less successful trials with HP than HDS and P&T; less time with P&T than HDS and HP; more collected tokens with HP and HDS than P&T; more sickness with HP than P&T
Frommel et al. (2017) [7]	P&T, FPT, JT&RR, AM	24	Explore a virtual zoo for 5 minutes	Sickness, presence, enjoyment, valence, arousal, and dominance	Less nausea with P&T than AM; less ocular-motor symptoms with P&T than JT&RR; less overall sickness with P&T than JT&RR; higher presence with P&T than FPT and AM; higher enjoyment with P&T than JT&RR and AM; higher valence with P&T than JT&RR and AM; higher dominance with P&T than AM; no significant differences with the other variables
Hashemian and Riecke (2017) [8]	JT&JR, JT&RR, LSC, LSS	14	Follow an avatar on a curvilinear path	Accuracy, sickness, presence, intuitiveness, precision of control, ease of use, comfort, reported problems, overall usability	Less accuracy with LSS than JT&JR and JT&RR; best precision of control with JT&JR; more comfort, less problems and more overall usability with JT&JR than LSS; no significant differences with the other variables
Kitson et al. (2017) [9]	JT&JR, LSS, HT, LSC	16	Search for objects in a virtual city	Ratings about comfort, ease of use, precision of movement, spatial orientation, sensation of self-motion, problems, presence, enjoyment, overall usability, sickness	More comfort, ease of use, precision of movement, spatial orientation and less reported problems with JT&JR than the other techniques; no significant differences with the other variables
Tregillus et al. (2017) [26]	HT, WT, JT&RR	25	Run through five large virtual corridors without hitting obstacles	Sickness, time to complete the task, number of collisions, ratings about efficiency, learnability, likability, and presence	Less time and less collisions with HT than JT&RR; less time with HT than WT; higher likeability and presence with HT than JT&RR; higher efficiency, learnability, and likeability with HT than WT; no significant differences in sickness
Langbehn et al. (2018) [10]	JT&RR, P&T	22	Navigate through 5 targets in a virtual room, point at the targets without seeing them, estimate room size without vision, draw a map of the room on a piece of paper, arrange objects seen in the room on a paper map	Error in degrees to point at the targets (spatial orientation), error in room size estimation, map drawing score, arranged object distances from correct position, object arrangement score, sickness, presence, liking of the techniques, time to complete the task	Larger error to point at one of the targets with JT&RR than P&T; more sickness with JT&RR than P&T; higher liking with P&T than JT&RR; no significant differences between JT&RR and P&T with the other variables
Bozgeyikli et al. (2019) [23]	WIP, P&T, JT&RR, HF, FL	15	Reach 10 destinations (6 on a VE without obstacles, 4 in a VE with obstacles)	Time to reach destinations, collisions with obstacles, user experience (difficulty in understanding and in operating, feeling of being in control, enjoyment, required effort, tiredness, overwhelmedness, frustration), sickness, presence, preference score	Less time with P&T and JT&RR than WIP, HF and FL, and less time with WIP than FL with no obstacles; less time with JT&RR than WIP, P&T and HF, and less time with FL than WIP, P&T and HF with obstacles; less collisions with P&T than WIP, JT&RR, HF and FL; significant differences for all user experience aspects except overwhelmedness, but no statistical analysis of pairwise comparisons; no significant differences in sickness; overall significant differences in presence, but no statistical analysis of pairwise comparisons; highest preference score for P&T, lowest for HF

AM ¼ Automatikwerk, AS ¼ Arm schwingt, AT ¼ automatischer Teleport, FL ¼ Fliegen, FPT ¼ Fixpunkt-Teleport, G & D ¼ greifen & ziehen, HDS ¼ Kopflenkung, HF ¼ Handflattern, HP ¼ Hand zeigt, HT ¼ Kopfniegung, JT & JR ¼ Joystick-Übersetzung & Joystick-Rotation, JT & LR ¼ Joystick-Übersetzung & echte Rotation, LSC ¼ auf einen Drehstuhl gelehnt, LSP ¼ aus einer stehenden Position gelehnt, LSS ¼ auf einen speziellen Hocker gestützt, P & T. ¼ Punkt & Teleport, PN & G. ¼ point & go, PS & G. ¼ Push & Go, WIP ¼ begehbar.

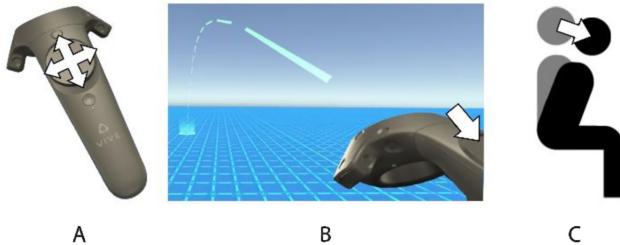


Abb. 1. Die betrachteten Fortbewegungstechniken: A) Joystick, die weißen Pfeile stellen die Hauptinteraktionen mit dem Pad dar, B) teleportieren, der weiße Pfeil zeigt die zu drückende Taste an, der gepunktete Bogen ist der Strahl und der Heiligenschein zeigt die Zielposition an und C) geneigt zeigt der weiße Pfeil den Abstand zwischen der Höchstgeschwindigkeitsposition (in Schwarz) und der Ruheposition (in Grau) an.

Leistungsmetriken (z. B. Zeit zum Erreichen oder Betrachten eines Ziels) wurden in den meisten Studien bewertet [3], [5], [6], [8], [10], [11], [12], [22], [23], [26]. Die Krankheit wurde in [6], [7], [8], [9], [10], [11], [23], [26], Anwesenheit in [7], [8], [9], [10], [11], [23], [26] und einige Aspekte der Benutzerfreundlichkeit und des Komforts in [8], [9], [11], [23], [26].

In Anbetracht der Fortbewegungsleistung war P & T schneller als HP und HDS [6] und JT & RR war schneller als WIP [11], [23] und HF [23]. P & T war schneller als WIP [11], [23], HF [23] und FL [23], wenn es keine Hindernisse in der VE gab, und langsamer als JT & LR [11], [23] und FL [23], wenn es solche gab Hindernisse. Ohne Hindernisse war JT & RR schneller als FL [23]. HT war schneller als JT & LR und WT [26] und verursachte weniger Kollisionen als JT & LR [26]. P & T verursachte weniger Kollisionen als JT & LR [11], [23], WIP [11], [23], HF [23] und FL [23]. In Anbetracht der räumlichen Ausrichtung führte JT & LR zu einem größeren Fehler als LSP, und LSP benötigte mehr Zeit als WIP [12]. JT & LR führten auch zu größeren Fehlern als AS [5] und P & T [10]. Die einzigen signifikanten Ergebnisse für die Krankheit waren, dass P & T weniger Krankheit verursachte als HP [6] und JT & LR [7] [10]. P & T verursachte auch weniger Übelkeit als AM [7] und weniger okulomotorische Symptome als JT & LR [7]. Es wurden keine statistisch signifikanten Ergebnisse für das Vorhandensein gefunden, mit Ausnahme eines insgesamt signifikanten Unterschieds zwischen allen in [23] berücksichtigten Techniken, die keine statistische Analyse paarweiser Vergleiche, ein höheres Vorhandensein mit P & T als FPT und AM in [7] und ein höheres berichteten Präsenz mit HT als JT & LR in [26]. Sowohl JT & LR als auch P & T erforderten weniger Anstrengung und verursachten weniger Müdigkeit als WIP [11]. JT & RR war auch leichter zu verstehen als WIP [11]. Lernfähigkeit, Effizienz und Sympathie waren bei HT höher als bei WT [26]. Der Genuss war bei P & T höher als bei JT & LR und AM [7] und bei FPT höher als bei AM [7]. In [23] gehörten JT & LR und P & T zu denjenigen, die weniger schwer zu verstehen waren und ein höheres Maß an Freude bereitstellten. erforderte weniger Kraftaufwand und verursachte weniger Müdigkeit und Frustration. JT & RR war auch eines der am wenigsten schwierig zu bedienenden und eines der besten, um das Gefühl zu vermitteln, die Kontrolle zu haben. Obwohl die Gesamtunterschiede signifikant waren, wurde keine statistische Analyse paarweiser Vergleiche gemeldet. Schließlich ergab sich aus den Studien, in denen einige zusätzliche Aspekte der Benutzerfreundlichkeit und des Komforts bewertet wurden, ein gewisser Vorteil von JT & JR gegenüber LSC und LSS sowie gegenüber HT [8] [9].

Insgesamt wurden Fortbewegungstechniken in der Literatur umfassend untersucht, aber keine Studie verglich alle drei Techniken (Joystick, Teleport und Lehnen) miteinander. Darüber hinaus betreffen die meisten Studien eine oder zwei der drei beteiligten Techniken

kleine Stichproben, und die Studien ergaben hauptsächlich statistisch signifikante Ergebnisse für Leistungsmaßnahmen, während zusätzliche Studien erforderlich sind, um die Auswirkungen verschiedener Fortbewegungstechniken auf Krankheit, Anwesenheit, Benutzerfreundlichkeit und Komfort besser zu verstehen.

3 C. ÜBERLEGT L. OCOMOTION T. ECHNIKEN

Wie in der Einleitung erwähnt, haben wir uns auf Joystick-, Teleport- und Lehntechniken konzentriert, da keine von ihnen zusätzlich zu einem HMD mit 6DOF-Verfolgung von Kopf- und Handheld-Controllern spezielle Hardware benötigt und alle an Ort und Stelle verwendet werden können stehend und sitzend. Aus Sicherheitsgründen unterstützte die Implementierung der unten beschriebenen Techniken Benutzer, die auf einem Drehstuhl saßen, der eine Drehung um 360 Grad ermöglichte.

Alle drei Techniken ermöglichen es den Benutzern, die Rotation mithilfe des Head Trackers zu steuern, und unterschieden sich nur in der Art und Weise, wie Benutzer die Übersetzung von Blickwinkeln kontrollierten:

1. Joystick stützte sich auf das Touchpad, das auf Handheld-Controllern verfügbar ist. Benutzer können den oberen Bereich des Pads berühren, um sich in Sichtrichtung vorwärts zu bewegen, den unteren Bereich, um sich rückwärts zu bewegen, und den linken und rechten Bereich, um sich zu strecken (Abb. 1A). Wenn Benutzer das Pad auf der Überlappung zweier Bereiche (z. B. oben links) berührten, wurde der Ansichtspunkt diagonal verschoben. Diese Joystick-Technik ist eine Implementierung von JT & RR.
2. Teleport stützte sich auf die 6-DOF-Verfolgung der Handheld-Controller und auf das Touchpad, das als Taste gedrückt werden konnte. Wenn Benutzer die Taste drückten, strahlte ein Strahl vom Handheld-Controller im VE. Der Strahl wurde als gepunkteter Bogen dargestellt und die Position, in der der Strahl auf den Boden traf, wurde mit einem Lichthof hervorgehoben (Fig. 1B). Benutzer können den Handheld-Controller bewegen, um mit dem Strahl eine Position auf dem Boden anzugeben, und die dort zu teleportierende Taste loslassen. Diese Teleport-Technik ist eine Implementierung von P & T. Leaning stützte sich auf die 6-DOF-Verfolgung des Kopfes. Benutzer können ihren Oberkörper nach vorne lehnen, um sich vorwärts zu bewegen, rückwärts, um sich rückwärts zu bewegen, und nach links und rechts, um sich zu bewegen. Wenn sich Benutzer gleichzeitig in zwei Richtungen beugten (z. B. nach links vorne), bewegte sich der Ansichtspunkt diagonal. Die Ruheposition des Kopfes wurde für jeden Benutzer kalibriert, nachdem er aufgefordert wurde, sich mit geradem Rücken und nach vorne gerichtetem Kopf auf den Drehstuhl zu setzen. Je größer der Abstand zwischen der aktuellen Position des Kopfes und seiner Ruheposition ist (Fig. 1C), desto höher ist die Bewegungsgeschwindigkeit. Um unwillkürliche Bewegungen zu vermeiden, stellen wir einen Mindestabstand (5 cm) ein, unter dem der Blickwinkel nicht bewegt wurde. Wir haben auch einen maximalen Abstand (30 cm) festgelegt, über dem sich die Geschwindigkeit nicht erhöht hat, um zu verhindern, dass sich Benutzer übermäßig schnell nach vorne lehnen. Diese Lehntechnik ist eine Implementierung von LSC. Wir haben einen Mindestabstand (5 cm) festgelegt, unter dem der Blickwinkel nicht bewegt wurde. Wir haben auch einen maximalen Abstand (30 cm) festgelegt, über dem sich die Geschwindigkeit nicht erhöht hat, um zu verhindern, dass sich Benutzer übermäßig schnell nach vorne lehnen. Diese Lehntechnik ist eine Implementierung von LSC. Wir haben einen Mindestabstand (5 cm) festgelegt, unter dem der Blickwinkel nicht bewegt wurde. Wir haben auch einen maximalen Abstand (30 cm) festgelegt, über dem sich die Geschwindigkeit nicht erhöht hat, um zu verhindern, dass sich Benutzer übermäßig schnell nach vorne lehnen. Diese Lehntechnik ist eine Implementierung von LSC.

4 U. SER S. TUDY

Um die in Betracht gezogenen Fortbewegungstechniken an Ort und Stelle zu bewerten, haben wir eine Benutzerstudie zwischen Gruppen durchgeführt. Im Folgenden wird auf die Gruppe von Teilnehmern verwiesen, die den Joystick als ausprobiert haben

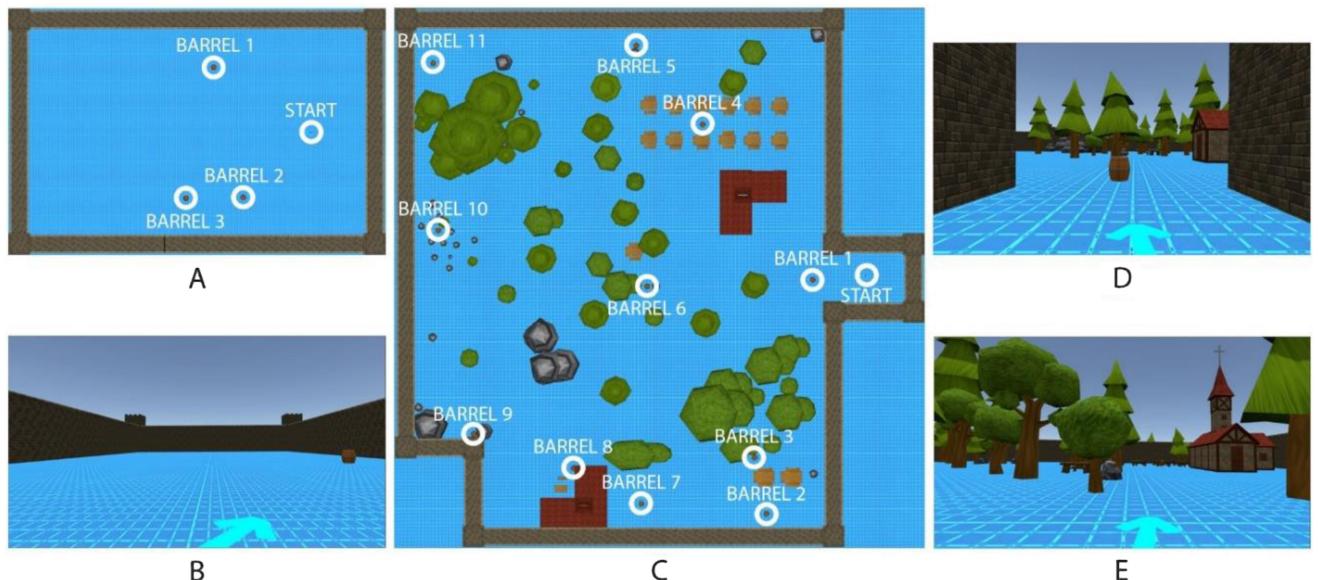


Abb. 2. Die in der Studie verwendeten VEs: A) isometrische Draufsicht des Tutorials VE, B) perspektivische Ansicht des Tutorials VE aus der ersten Person, gesehen von den Teilnehmern zu Beginn des Tutorials, C) isometrische Draufsicht des VE für die Bewertung der Leistung, D) perspektivische Ansicht der VE aus der ersten Person für die Bewertung der Leistung, wie sie von den Teilnehmern zu Beginn der Aufgabe gesehen wurde, und E) perspektivische Ansicht der VE aus der ersten Person für die Bewertung der Leistung wie von den Teilnehmern gesehen, die in Richtung "Fass 4" gehen. Weiße Kreise und Beschriftungen in den isometrischen Draufsichten geben die Startpositionen und die Positionen der Fässer an, die erreicht werden sollen.

Joystick (J)-Gruppe, diejenigen, die versucht haben, sich als Teleport (T)-Gruppe zu teleportieren, und diejenigen, die versucht haben, sich als Leaning (L)-Gruppe zu lehnen.

4.1 Hypothesen

Wir haben folgende Hypothesen formuliert:

1. Die Leistung (in Bezug auf die Zeit, um eine bestimmte Reiseaufgabe zu erledigen) könnte in der Teleport-Gruppe besser sein, da die sofortige Bewegung des Blickwinkels Zeit in Bezug auf die kontinuierliche Bewegung der anderen Techniken sparen kann.
2. Die Krankheit könnte in der Joystick-Gruppe höher sein, da sich der Blickwinkel kontinuierlich bewegt, während der Kopf des Benutzers still ist, und der sensorische Konflikt zwischen visuellen und vestibulären Systemen zu Krankheit führen kann [27]. Der Konflikt ist beim Teleportieren nicht vorhanden, da sich der Ansichtspunkt sofort zum Ziel bewegt und möglicherweise durch Neigen abgeschwächt wird, da Benutzer ihren Kopf in dieselbe Richtung wie der Ansichtspunkt bewegen.
3. Die Präsenz in der Teleport-Gruppe könnte geringer sein, da sich das Teleportieren stark von der realen Erfahrung des Bewegens unterscheidet und dies das Gefühl zerstören könnte, in der VE zu sein. Im Gegenteil, Joystick und Neigen ermöglichen eine kontinuierliche Fortbewegung in der VE, die eher der Art und Weise ähnelt, wie sich Menschen in der realen Welt bewegen.
4. Benutzer könnten lernen, wie man Joysticks einfacher benutzt, da sie bereits mit Joysticks in Videospielen vertraut sind. Die Studie befasste sich stattdessen mit anderen Aspekten der Benutzerfreundlichkeit.
5. Die Leaning-Gruppe könnte mehr körperliche Anstrengung aufwenden und mehr unter Wirbelsäulenmüdigkeit leiden als die beiden anderen Gruppen, da beim Leaning Benutzer ihren Oberkörper beugen müssen. Die Studie befasste sich stattdessen mit anderen Aspekten des Komforts.

4.2 Materialien und Aufgaben

In der Studie wurden zwei VEs verwendet: ein Tutorial-VE, mit dem Benutzer sich mit den Fortbewegungstechniken vertraut machen konnten (Abb. 2A und 2B), und ein VE zur Bewertung der Leistung bei einer Reiseaufgabe (Abb. 2C, 2D und 2E). Das Tutorial VE war ein einfaches rechteckiges ebenes Feld, das durch vier Wände begrenzt ist. Das einzige

Das ursprüngliche Objekt auf dem Feld war ein Fass, das in Fig. 2A mit "Fass 1" gekennzeichnet ist. Die Teilnehmer wurden eingeladen, von der Position „Start“ zu „Fass 1“ und dann zu „Fass 2“ und „Fass 3“ zu reisen, die erst bei Erreichen des vorherigen Fasses angezeigt wurden. Erreichte Fässer wurden automatisch aus dem VE entfernt, sodass zu jedem Zeitpunkt nur ein Fass vorhanden war. Als „Barrel 3“ erreicht war, erschien „Barrel 1“ erneut und die Sequenz wurde neu gestartet.

Das VE für die Bewertung der Leistung war ein größeres und komplexeres ebenes Feld, das durch Wände begrenzt ist. Die VE enthielt Bäume, Bänke, Felsen und Gebäude. In dieser VE erschienen Fässer in elf verschiedenen Positionen ("Fass 1" bis "Fass 11" in Fig. 2C). Die Aufgabe der Teilnehmer bestand darin, von „Start“ zu „Fass 1“ und dann zu den folgenden Fässern zu reisen, von denen jedes erst erschien, wenn das vorherige erreicht wurde. Erreichte Fässer wurden automatisch aus dem VE entfernt. Die Aufgabe endete, als „Barrel 11“ erreicht wurde.

Da der Schwerpunkt dieser Studie auf dem Reisen und nicht auf dem Finden von Wegen lag, wurde die Richtung, in die die Teilnehmer gehen sollten, um das nächste Fass zu erreichen, in beiden VEs durch einen Pfeil angezeigt, wie in den Fig. 1 und 2 gezeigt. 2B, 2D und 2E.

Die VEs wurden mithilfe der Unity 5.6-Game-Engine implementiert und auf einem PC mit einem Intel i74790-Prozessor mit 3,60 GHz, 16 GB RAM und einer Nvidia GTX 970-Grafikkarte ausgeführt. Das HMD war ein HTC Vive mit seinen Handheld-Controllern.

4.3 Teilnehmer

Die Bewertung umfasste eine Stichprobe von 75 Teilnehmern (68M, 7F). Sie waren Studenten der Informatik. Das Alter lag zwischen 20 und 26 Jahren $\bar{x} M. 21:68; SD \frac{1}{4} 1:52$.

Wir haben die Teilnehmer gebeten, ihre Vertrautheit mit dem zu bewerten SD 1/4 0:20). Einweg-ANOVA zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen Joysticks (z. B. Xbox- und Playstation-Controllern) für die Häufigkeit von Krankheitsbewertungen vor dem Test zwischen den drei Gruppen. Spielen von 3D-Videospielen auf einer 7-Punkte-Skala (1/4 keine vertraute-

ich 6 ty, 7/4 hohe Vertrautheit). Die Antworten lagen zwischen 1 und 7

M. 1/4 5:67; SD 1/4 1:66 p. Wir haben die gleiche Skala verwendet, um die Teilnehmer zu befragen.

ipants über ihre Vertrautheit mit Systemen, die Körperbewegungen (z. B. Kinect und Wiimote) in 3D-Videospielen erfassen. Die Antworten lagen zwischen 1 und 7 M. 1/4 3:64; SD 1/4 1:67 p.

Wir fragten die Teilnehmer auch, ob sie jemals HMDs verwendet hätten: 34 Teilnehmer hatten sie verwendet und die restlichen 41 nicht. Teilnehmer, die HMDs verwendet hatten, wurden gefragt, wie viel Zeit sie verwendet hatten. Die eingegangenen Antworten lagen zwischen 10 Minuten und 10 Stunden M. 1/4 1:32 Stunden; SD 1/4 1:79 p. Diese Teilnehmer bewerteten auch ihre Vertrautheit mit Joysticks (z. B. HTC Vive- und Oculus Rift-Controllern) und Systemen, die Körperbewegungen (z. B. HTC Vive- und Oculus Rift-Tracker) in einem immersiven VR-Kontext auf einer 7-Punkte-Skala erfassen (1/4 keine Vertrautheit, 7/4 hohe Vertrautheit). Die Antworten für Joysticks lagen zwischen 1 und 7 M. 1/4 2:09; SD 1/4 1:42 p und von 1 bis 5 für Systeme, die Körperbewegungen erfassen M. 1/4 2:32; SD 1/4 1:49 p.

Die Teilnehmer wurden den drei Gruppen so zugeordnet, dass: (i) jede Gruppe 25 Teilnehmer hatte (23M, 2F in der J- und T-Gruppe; 22M, 3F in der L-Gruppe); (ii) Die drei Gruppen waren hinsichtlich des Alters, der Vertrautheit mit der Verwendung von Joysticks und von Systemen, die Körperbewegungen zum Spielen von 3D-Videospielen erfassen, der Zeit der vorherigen Verwendung von HMDs und der Vertrautheit mit der Verwendung von Joysticks und Systemen, die erkennen, ähnlich Körperbewegungen in einem immersiven VR-Kontext. Jede dieser Variablen wurde einer Einweg-ANOVA unterzogen, die

bestätigte das Fehlen signifikanter Unterschiede zwischen den drei Gruppen.

4.4 Maßnahmen

4.4.1 Leistung

Die Leistung wurde in Bezug auf die Zeit gemessen, um die in Abschnitt 4.2 beschriebene Reiseaufgabe zu erledigen. Genauer gesagt haben wir die Sekunden protokolliert, die von dem Moment an vergangen sind, an dem die Teilnehmer an der Position „Start“ in der VE (Abb. 2C) begonnen haben, bis zu dem Moment, an dem sie „Fass 11“ erreicht haben, nachdem sie die Sequenz aller anderen Fässer durchlaufen haben.

4.4.2 Krankheit

Um die Krankheit bei den Teilnehmern zu beurteilen, haben wir sie gebeten, zu bewerten, wie stark sie von vier Symptomen betroffen waren, nachdem sie die Reiseaufgabe abgeschlossen hatten (Post-Test), und wir haben die Bewertungen, die sie vor der Versuchsbedingung gaben, von denselben Symptomen abgezogen (Pre-Test).. Die Symptome waren vier wesentliche Punkte (1, 3, 4 und 8) des Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [28]: (i) allgemeine Beschwerden, (ii) Kopfschmerzen, (iii) Augenbelastung und (iv) Übelkeit. Die Teilnehmer bewerteten, wie stark jedes Symptom sie zum Zeitpunkt des Ausfüllens des Fragebogens beeinflusste.

auf einer 4-Punkte-Skala 0 1/4 keiner; 2 1/4 leicht; 3 1/4 mäßig;

4 1/4 schwer p. Wir haben die anderen SSQ-Elemente nicht verwendet, weil wir den negativen Einfluss der Kompilierung von SSQ vor dem Test, der die Reaktionen der Teilnehmer auf SSQ nach dem Test beeinflussen könnte, minimieren wollten [29]. Die Bewertungen vor dem Test zeigten, dass die Teilnehmer vor dem experimentellen Zustand nicht oder nur geringfügig unter den verschiedenen Symptomen litten (allgemeine Beschwerden: M. 1/4 1:01; SD 1/4 0:12; Kopfschmerzen: M. 1/4 1:12; SD 1/4

0:33; Überanstrengung der Augen: M. 1/4 1:27; SD 1/4 0:45; Übelkeit: M. 1/4 1:04;

4.4.3 Anwesenheit

Um die Präsenz zu messen, haben wir den Igroup Presence Questionnaire (IPQ) verwaltet [30]. Der IPQ (verfügbar unter <http://www.Igroup.org/pq/ipq/index.php>) ist eine Selbstberichtsskala mit 14 Elementen, die ein allgemeines Element in Bezug auf das Gefühl, dort zu sein, und drei Unterskalen umfasst die die folgenden unabhängigen Dimensionen bewerten: räumliche Präsenz (5 Elemente), Beteiligung (4 Elemente) und erfahrener Realismus (4 Elemente). Jeder IPQ-Artikel kann auf einer 7-Punkte-Skala von 0 bis 6 bewertet werden.

4.4.4 Benutzerfreundlichkeit

Um die Verwendbarkeit der Fortbewegungstechniken zu messen, verwendeten wir die bekannte SystemUsability Scale (SUS) [31]. Die Skala enthält 10 Aussagen, und die Teilnehmer wurden gebeten, den Grad der Übereinstimmung auf einer 5-Punkte-Likert-Skala zu bewerten (1) 1/4 stimme überhaupt nicht zu, 5 1/4 stimme voll zu). Seit ihrer Einführung wurde diese Skala als eindimensional angesehen, und verschiedene Studien berichteten von einem SUS-Gesamtscore im Bereich von 0 bis 100. In jüngerer Zeit ergab eine Faktorenanalyse, dass die Skala zwei Unterskalen aufweist: Lernfähigkeit (Punkte 4 und 10) und Benutzerfreundlichkeit (die restlichen 8 Punkte) [32]. In diesem Artikel werden wir daher jede Subskala sowie den gesamten SUS-Score analysieren.

4.4.5 Komfort

Um den Komfort zu messen, haben wir den Device Assessment Questionnaire (DAQ) angepasst [33]. Der DAQ wurde entwickelt, um Zeigegeräte für Computer zu vergleichen. Er enthält 13 Punkte zu erforderlicher Kraft, Geschmeidigkeit, geistiger und körperlicher Anstrengung, Genauigkeit, Langsamkeit, Ermüdung verschiedener Körperteile, allgemeinem Komfort und allgemeiner Benutzerfreundlichkeit

[33]. Jedes DAQ-Element kann auf einer 5-Punkte-Skala von 1 bis 5 bewertet werden. Wir haben die Elemente 2, 5 und 6 so angepasst, dass sie explizit mit der Reiseaufgabe zusammenhängen (Bewegungsruhe, Schwierigkeiten bei der Genauigkeit der Bewegung und Langsamkeit) in Bewegung und Rotation) und wir fügten einen Punkt hinzu, um die Ermüdung der Wirbelsäule zu messen, da sich das Lehnen auf Bewegungen stützte, die die Teilnehmer mit ihrer Wirbelsäule ausführten.

4.5 Vorgehensweise

Wir sagten den Teilnehmern, dass wir eine Technik testen, um in einem VE zu reisen. Wir haben sie auch darüber informiert, dass VR-Benutzer in seltenen Fällen unter Übelkeit oder Kopfschmerzen leiden können und das Experiment jederzeit und aus irgendeinem Grund nicht fortsetzen können. Der Experimentator erklärte auch, dass er sie bitten würde, einige Fragebögen in anonymisierter Form auszufüllen. Nachdem die Teilnehmer ihre Zustimmung gegeben hatten, füllten sie einen ersten Fragebogen zu den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Informationen und den Fragebogen zur Krankheit (Vortest) aus.

Dann lud der Experimentator die Teilnehmer ein, sich auf einen Drehstuhl zu setzen, half ihnen beim Tragen des HMD und gab ihnen die Controller. Da die Controller in der VE angezeigt wurden und ihre Position und Ausrichtung entsprechend den Bewegungen der Hände der Teilnehmer aktualisiert wurden, gab der Experimentator sie auch den Teilnehmern der Leaning-Gruppe, selbst wenn das Leaning die Controller nicht zum Bewegen verwendete. Dies wurde durchgeführt, um jegliche Auswirkung auf das Vorhandensein des Fehlens von Controllern zu vermeiden

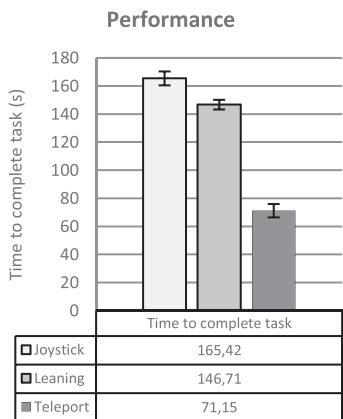


Abb. 3. Zeitmittel für die Erledigung der Reiseaufgabe. Mit einer Kappe versehene vertikale Balken zeigen an SE. Teleport war am schnellsten und Neigen war schneller als Joystick.

hätte verursachen können. Der Experimentator erklärte im Tutorial VE, wie man sich mit der zugewiesenen Fortbewegungstechnik bewegt. Nachdem die Teilnehmer die Technik 30 Sekunden lang ausprobiert hatten, lud der Experimentator sie ein, sich dem Fass zu nähern, und teilte ihnen mit, dass ein neues Fass erscheinen würde, sobald sie eines erreichten. Der Experimentator ließ die Teilnehmer im Tutorial zwei Minuten lang mit Fässern üben. Dann sagte er ihnen, dass die nächste Aufgabe darin bestehe, dieselbe Technik in einem komplexeren VE anzuwenden. Er forderte die Teilnehmer ausdrücklich auf, die Fässer so schnell wie möglich zu erreichen. Der Experimentator startete die VE zur Bewertung und die Teilnehmer führten die Aufgabe aus.

Nach der Versuchsbedingung half der Experimentator den Teilnehmern, die HMD zu entfernen, und lud sie ein, die Fragebögen zu Krankheit (nach dem Test), Anwesenheit, Benutzerfreundlichkeit und Komfort auszufüllen.

5 R. ERGEBNISSE

5.1 Leistung

Die Zeit zur Erledigung der Reiseaufgabe (Abb. 3) wurde einer ANOVA zwischen Probanden unterzogen. Die Analyse ergab einen statistisch signifikanten Unterschied, $F = 2; 72 \rightarrow 126: 80; p < 0: 001$; $h^2 = 0: 78$. Bonferroni paarweiser Vergleich ergab, dass die Unterschiede zwischen der T-Gruppe $\delta M. = 1: 71: 15$; $SD = 23: 78 \rightarrow$

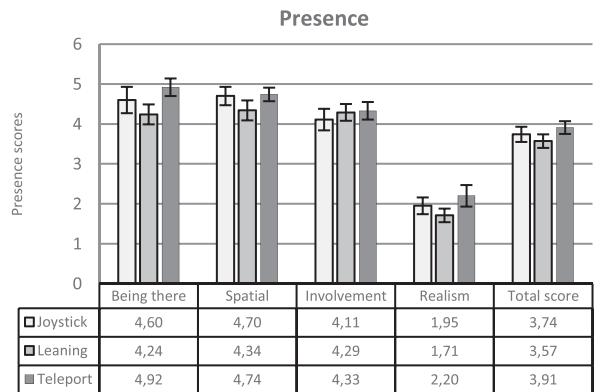


Abb. 5. Mittelwerte für das Vorhandensein und seine Subskalen. Mit einer Kappe versehene vertikale Balken zeigen an SE. Keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Joy-Stock, Neigung und Teleport wurden für Anwesenheit gefunden.

J Gruppe $\delta M. = 1: 65: 42$; $SD = 24: 78 \rightarrow$ sowie zwischen T-Gruppe und L-Gruppe $\delta M. = 1: 46: 71$; $SD = 17: 15 \rightarrow$ waren statistisch signifikant, $p < 0: 001$ für beide. Der Unterschied zwischen der J-Gruppe und der L-Gruppe war ebenfalls signifikant. $p < 0: 05$.

5.2 Krankheit

Nachdem wir die Veränderungen der Krankheitssymptome durch Subtrahieren der Bewertungen vor dem Test von den Bewertungen nach dem Test berechnet hatten (Abb. 4), analysierten wir die Unterschiede mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests. Die Analyse ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede in Bezug auf Krankheit, Kopfschmerzen und Augenbelastung. Unterschiede in der Übelkeit waren stattdessen statistisch signifikant, $X^2 = 2 \rightarrow 12: 23; p < 0: 005$. Der paarweise Vergleich von Dunn-Bonferroni ergab, dass die Unterschiede zwischen der T-Gruppe $\delta M. = 0: 08$; $SD = 0: 28 \rightarrow$

und J Gruppe $\delta M. = 0: 40$; $SD = 0: 71 \rightarrow$ sowie zwischen T-Gruppe und L-Gruppe $\delta M. = 0: 40$; $SD = 0: 58 \rightarrow$ waren statistisch signifikant, $p < 0: 01$ für beide. Es wurde kein signifikanter Unterschied in der Übelkeit zwischen der J-Gruppe und der L-Gruppe festgestellt.

5.3 Präsenz

Unterschiede in der Anwesenheit (Fig. 5) wurden mit einer ANOVA zwischen Probanden analysiert. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede für die IPQ-Gesamtpunktzahl, für den allgemeinen Punkt über das Gefühl „da zu sein“, und für die räumlichen, involvierten und realistischen Subskalen der IPQ gefunden.

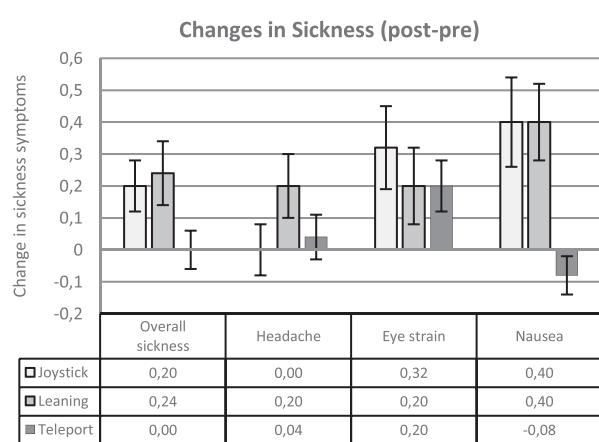


Abb. 4. Mittlere Veränderung der Krankheitssymptome. Mit einer Kappe versehene vertikale Balken zeigen an SE. Positive Werte zeigen eine Zunahme der Krankheitssymptome und negative Werte eine Abnahme an. Die Teilnehmer der Teleport-Gruppe hatten weniger Übelkeit als die Teilnehmer der Joystick- oder Leaning-Gruppe.

5.4 Benutzerfreundlichkeit

SUS-Scores (Fig. 6) wurden einer ANOVA zwischen Subjekten vorgelegt. Die Analyse ergab δ ein statistisch signifikant Unterschied für den gesamten SUS, $F = 2; 72 \rightarrow 8: 93; p < 0: 001; h^2 = 0: 19$. Bonferroni pairwis δ Der Vergleich ergab, dass die Unterschiede δ nce δ zwischen T-Gruppe $\rightarrow M. = 8: 80: 30$; $SD = 9: 15: 15 \rightarrow$ und L-Gruppe $M. = 7: 40: 90$; $SD = 11: 76 \rightarrow$ war statistisch signifikant, $p < 0: 001$. Das δ anders δ zwischen T-Gruppe und J-Gruppe $\delta M. = 8: 00: 10$; $SD = 12: 70 \rightarrow$ war auch von Bedeutung, $p < 0: 05$. Der Unterschied δ die Bedeutung zwischen J-Gruppe und L-Gruppe erreichte keine Signifikanz.

Für die Lernskala wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden. Die Analyse ergab stattdessen einen statistisch signifikanten Unterschied in der Usability-Subskala. $F = 2; 72 \rightarrow 12: 09; p < 0: 001; h^2 = 0: 25$. Bonferroni paarweise Vergleich ergab, dass der Unterschied zwischen T-Gruppe $\delta M. = 7: 70: 60$; $SD = 7: 37 \rightarrow$ und L-Gruppe $\delta M. = 5: 60: 80$; $SD = 11: 08 \rightarrow$ war statistisch signifikant, $p < 0: 001$. Der Unterschied

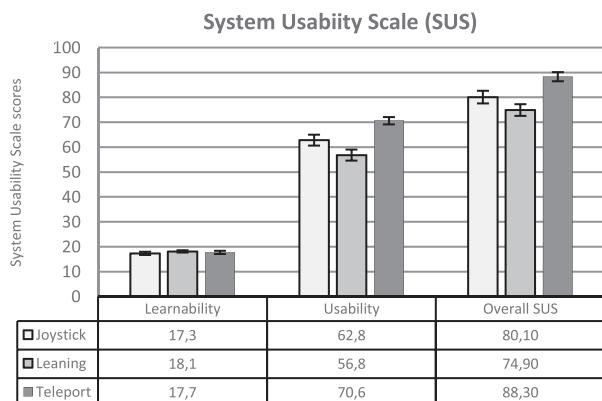


Abb. 6. Mittel zur Lernfähigkeit, Benutzerfreundlichkeit und Gesamt-SUS-Punktzahl. Mit einer Kappe versehene vertikale Balken zeigen an SE. Teleport erhielt eine höhere SUS-Punktzahl als Joystick und lehnen.

zwischen T-Gruppe und J-Gruppe $\delta M. \frac{1}{4} 62:80; SD \frac{1}{4} 10:95$ p war auch von Bedeutung, p <0:05. Der Unterschied zwischen der J-Gruppe und der L-Gruppe erreichte keine Signifikanz.

5.5 Komfort

Unterschiede in den Bewertungen der einzelnen Elemente (Fig. 7) wurden unter Verwendung des Kruskal-Wallis-Tests analysiert. Die Analyse ergab statistisch signifikante Unterschiede für die erforderliche Kraft. $X. 2 \delta 2 p 1/4 13:12; p <0:005$, körperliche Anstrengung, $X. 2 \delta 2 p 1/4 1 \delta 1: p 6 \frac{1}{4} 10:98$ p <0:005, Schwierigkeiten, in Bewegungen genau zu sein, $X. 2 \delta 2 p 0:005$, Langsamkeit in Bewegung und Rotation, $X. 2 \delta 2 p 1/4 11:90; p <0:005$, Fingerermüdung, $X. 2 \delta 2 p 1/4 10:74; p <0:005$, Arm ermüden, $X. 2 \delta 2 p 1/4 9:32; p <0:01$, Nackenermüdung, $X. 2 \delta 2 p 1/4 7:33; p <0:05$, Wirbelsäulenermüdung, $X. 2 \delta 2 p 1/4 33:45; p <0:001$, Allgemeines Komfort, $X. 2 \delta 2 p 1/4 8:10; p <0:05$, und allgemeine Benutzerfreundlichkeit

$X. 2 \delta 2 p 1/4 8:59; p <0:05$. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich Bewegungsruhe, geistiger Anstrengung, Ermüdung des Handgelenks und Ermüdung der Schulter festgestellt. Der paarweise Vergleich von Dunn-Bonferroni ergab, dass die in Tabelle 2 angegebenen Unterschiede statistisch signifikant sind. Die verbleibenden Unterschiede erreichten keine Signifikanz.

6 D. ISCUSSION

Die Ergebnisse bestätigten unsere Hypothese über die Leistung. Durch die Verwendung von sofortiger statt kontinuierlicher Bewegung,

TABELLE 2
DAQ: Statistisch signifikante paarweise Vergleiche

Artikel	Gruppe	Gruppe	p-Wert
Erforderliche Kraft	J. $\delta M. \frac{1}{4} 1:24;$ SD $\frac{1}{4} 0:52$ p	L. $\delta M. \frac{1}{4} 1:68;$ SD $\frac{1}{4} 0:75$ p	p <0:05
Erforderliche Kraft	L. $\delta M. \frac{1}{4} 1:68;$ S. $\delta D. \frac{1}{4}$	T. $\delta M. \frac{1}{4} 1:12;$ SD $\frac{1}{4} 0:74$ p	p <0:005
Körperliche Anstrengung	JM $\frac{1}{4} 14:75$ p	L. $\delta M. \frac{1}{4} 0:33$	p <0:01
Körperliche Anstrengung	SD $\frac{1}{4} 0:77$ p	SD $\frac{1}{4} 2:05:74$ p	
Schwierigkeit zu sein	J. $\delta M. \frac{1}{4} 79$	TM	p <0:005
präzise in Bewegungen	S.D. $\frac{1}{4} 3:0:8$ p 0;	SD $\frac{1}{4} 2:00:81$ p	
Langsamkeit in Bewegung und Rotation	J. $\delta M. \frac{1}{4} 3:5:6$ p 6;	TM	p <0:005
Langsamkeit in Bewegung und Rotation	SD $\frac{1}{4} 0:77$	SD $\frac{1}{4} 2:50:20$	
Fingerermüdung	L. $\delta M. \frac{1}{4}$	T. $\delta M. \frac{1}{4}$	p <0:05
Fingerermüdung	SD $\frac{1}{4} 3:40:6$	SD $\frac{1}{4} 2:98:20$ p	
Armermüdung	J. $\delta M. \frac{1}{4} 1:44;$ SD $\frac{1}{4} 0:$	LM $\frac{1}{4} 1:1:4$ 0 p 4;	p <0:005
Nackenermüdung	L. $\delta M. \frac{1}{4} 58$ p	SD $\frac{1}{4} 0:20:96$ p 0;	p <0:05
Wirbelsäulenermüdung	S.D. $\frac{1}{4} 2:02:96$ p 0;	SD $\frac{1}{4} 1:5:5$ p 2;	
Wirbelsäulenermüdung	J. $\delta M. \frac{1}{4} 1:16;$ SD $\frac{1}{4} 0:37$ p	L. $\delta M. \frac{1}{4} 0:27:48;$ SD $\frac{1}{4} 1:16$ p	p <0:001
Allgemeiner Komfort	WMB $\frac{1}{4} 2:4$ p 8;	TM	p <0:001
Insgesamt einfach zu bedienen	SD $\frac{1}{4} 1:16$	SD $\frac{1}{4} 1:10:42$	
Insgesamt einfach zu bedienen	L. $\delta M. \frac{1}{4} 3:60;$ SD $\frac{1}{4} 0:91$ p	T. $\delta M. \frac{1}{4}$	p <0:05
General comfort	SD $\frac{1}{4} 4:28:54$ p	SD $\frac{1}{4} 4:70:45$	

Durch Teleport konnten die Teilnehmer die Aufgabe in viel kürzerer Zeit als die beiden anderen Gruppen erledigen. Der Vorteil des Teleports gegenüber dem Lehnen erweitert die in [11] und [23] gefundenen Ergebnisse, die eine bessere Leistung des Teleportierens gegenüber begehbarer und Handflattern zeigten, zwei In-Place-Fortbewegungstechniken, die auf Körperbewegung als Neigen beruhen. Interessanterweise wurden die Ergebnisse in [11] und [23] nur gefunden, wenn keine Hindernisse vorhanden waren, während der Teleport langsamer war als der Joystick mit Hindernissen. Im Gegenteil, Teleport war in unserer Studie mit Hindernissen schneller als Joystick. Wenn man die VEs in [11] und [23] betrachtet, kann man feststellen, dass alle Hindernisse hohe identische Säulen waren, die in unserem VE auf einem dichten und regelmäßigen Gitter platziert waren

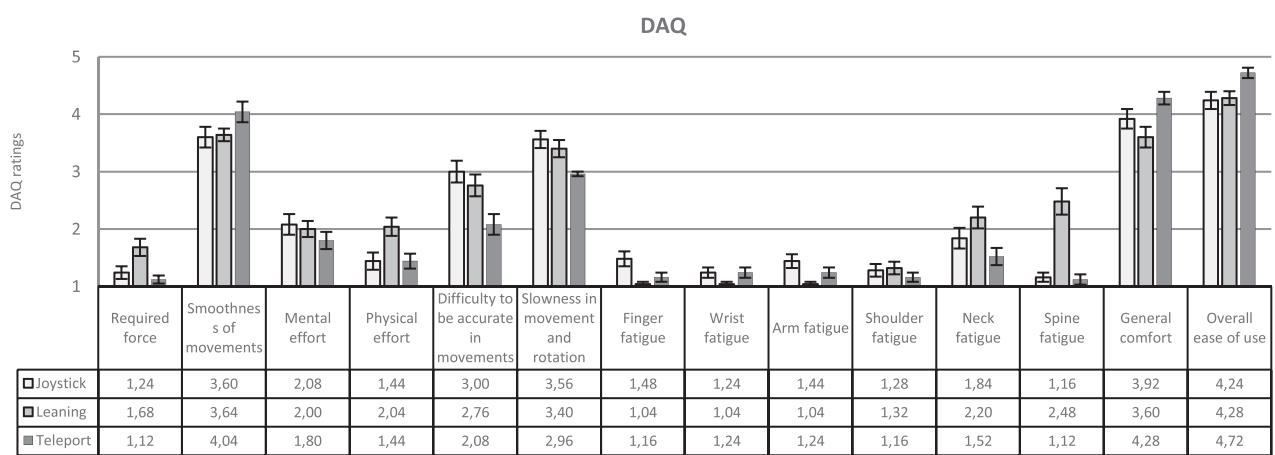


Abb. 7. Mittelwerte der verschiedenen DAQ-Elemente. Mit einer Kappe versehene vertikale Balken zeigen SE an. Es gab keinen Gegenstand, bei dem der Teleport eine statistisch signifikant schlechtere Bewertung erhielt als die anderen Techniken.

Es gab eine Vielzahl von verstreuten Hindernissen mit unterschiedlichen Höhen (z. B. hohe Bäume und niedrige Bänke). Die Tatsache, dass die Hindernisse in unserer VE stärker verstreut waren und einige von ihnen so niedrig waren, dass der Teleport-Strahl über sie hinweggehen konnte, kann den Unterschied in den Ergebnissen teilweise erklären und legt nahe, dass Teleport zu einer besseren Leistung in VEs ohne führen kann Hindernisse oder verstreute und niedrige Hindernisse, während der Joystick zu einer besseren Leistung in VEs mit mehreren großen Hindernissen führen kann. Weitere Studien mit verschiedenen Arten von VE-Strukturen sind erforderlich, um diesen Aspekt eingehender zu untersuchen. Ein weiteres Element, das erklären kann, warum die Teleport-Leistung in unserer Studie besser war als der Joystick, ist das Vorhandensein der Pfeile, die die Wegfindung unterstützen, indem sie auf den nächsten zu erreichen Lauf zeigten, wie in den Abb. 1 und 2 gezeigt. 2D und 2E. Wir haben die Pfeile unter allen experimentellen Bedingungen verwendet, weil wir uns auf das Reisen und nicht auf das Finden auf Reisen konzentriert haben, aber das Teleportieren in [3] mehr Orientierungszeit als die kontinuierliche Bewegung erfordert, so dass die schlechtere Leistung des Teleports in Bezug auf den Joystick in [11] und [23] sein kann aufgrund der Orientierungszeit. Weitere Studien, die sich auf die Suche nach Wegen konzentrieren, sind erforderlich, um festzustellen, ob Teleport zu Orientierungslosigkeit führen und möglicherweise die Zeit für die Suche nach Wegen verlängern kann, wenn keine Unterstützung bereitgestellt wird.

Wir fanden, dass der Joystick langsamer ist als das Lehnen. Dies erweitert die Ergebnisse in [26], wo die Kopfneigung schneller als der Joystick war, und stimmt auch mit den Ergebnissen von [12] überein, wo die Neigung in Bezug auf den Gradfehler besser war als der Joystick, um sich einem Ziel zuzuwenden. Studien, in denen stattdessen die Zeit verglichen wurde, um eine Abfolge von Wegpunkten mit dem Joystick und mit zwei verschiedenen Techniken zu durchlaufen, die auf körperlicher Bewegung basieren (Walk-in-Place [11], [23] und Handklappen [23]), ergaben, dass der Joystick schneller war. Die unterschiedliche Fortbewegungsleistung gegenüber dem Joystick kann durch die Tatsache erklärt werden, dass beim Einlaufen und beim Handklappen die Füße und Hände kontinuierlich bewegt werden müssen, um den Blickpunkt weiter nach vorne zu bewegen, während beim Neigen nur eine geringe Biegung des Rumpfes erforderlich ist, um den Blickpunkt zu bewegen. Im Gegensatz zu Walk-in-Place und Handflattern Das Lehnen hat den Vorteil, dass eine Bewegung in mehrere Richtungen möglich ist (dh es ermöglicht Benutzern, rückwärts zu gehen, sich diagonal zu bewegen und sich im VE zu bewegen, ohne sich zu drehen). Dadurch ähnelt diese Technik dem Joystick, muss jedoch nicht mit einem interagieren Regler. Weitere Studien zum Vergleich von Walk-in-Place- und Handflattern mit multidirektionalen und Nur-Vorwärts-Implementierungen von Leaning und Joystick könnten hilfreich sein, um besser zu verstehen, wie stark sich die Bewegung in mehrere Richtungen auf die Leistung auswirkt.

Die Ergebnisse bestätigten unsere Hypothese, dass Joystick mehr Krankheit verursacht als Teleport. Genauer gesagt verursachte es mehr Übelkeit, während wir keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen für Kopfschmerzen, Augenbelastung und allgemeine Krankheit fanden. Zwei frühere Studien, in denen Krankheit mit Joystick und Teleport verglichen wurde [7] [10], fanden weniger augenmotorische Symptome [7] und weniger Gesamtkrankheit [7] [10] mit Teleport, während andere Studien [11] [23]. fanden keine statistisch signifikanten Unterschiede durch Analyse des Durchschnitts der Scores für die verschiedenen Symptome. Wir fanden stattdessen ein statistisch signifikantes Ergebnis in Bezug auf Übelkeit. Die Übelkeit nahm in der J-Gruppe stärker zu als in der T-Gruppe, wahrscheinlich weil der Kopf bei beiden Techniken still blieb, aber die Augen eine kontinuierliche Bewegung mit dem Joystick wahrnahmen. einen sensorischen Konflikt zwischen visuellen und vestibulären Systemen verursachen [27]. Der sensorische Konflikt betraf den Boden, die Wände, die Bäume und andere Elemente des VE

Menschen betrachten normalerweise stationär. Die Rest-Frame-Hypothese [34] hebt hervor, wie Krankheit durch widersprüchliche sensorische Hinweise auf den Rest-Frame, dh den Teil der Szene, der als stationär betrachtet wird, verursacht werden kann. Da der Teleport es den Benutzern ermöglichte, die Aufgabe in viel kürzerer Zeit zu erledigen, waren die Teilnehmer der T-Gruppe außerdem weniger VR ausgesetzt, und es ist bekannt, dass die Expositionsduer mit augenmotorischen Symptomen zusammenhängt [35]. Dies könnte auch dazu beitragen, zu erklären, warum der Teleport weniger Übelkeit verursachte als das Lehnen. Es ist wichtig zu beachten, dass alle Krankheitssymptome, einschließlich Übelkeit, in unserer Studie unabhängig von der verwendeten Technik sehr schlecht abschnitten (alle durchschnittlichen Bewertungen lagen zwischen „keine“ und „leicht“). Obwohl kein Teilnehmer Übelkeit beim Teleportieren meldete, Sieben (bzw. acht) Teilnehmer berichteten von leichter Übelkeit nach Verwendung des Joysticks (bzw. Lehnen), und zwei (bzw. einer) berichteten von mäßiger Übelkeit. Interessanterweise führte die hypothetische Abschwächung des sensorischen Konflikts nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Krankheit in Bezug auf den Joystick, obwohl das Neigen es den Benutzern ermöglichte, sich in der VE in die gleiche Richtung ihres Kopfes zu bewegen. Möglicherweise gab es immer noch einen sensorischen Konflikt, der Übelkeit beim Neigen verursachte, weil die Bewegung in der VE größer war als die physische Bewegung des Kopfes. Insbesondere wenn sich die Teilnehmer im VE lange Zeit in die gleiche Richtung bewegten, blieb ihr Kopf immer noch in einiger Entfernung von seiner Ruheposition, während ihre Augen eine Bewegung in Bezug auf den Ruhezustand wahrnahmen. Frühere Studien, in denen die Krankheit mit Neigung und Joystick bewertet wurde [8], [9],

Überraschenderweise fanden wir keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Gesamtpräsenzbewertung und ihren Subskalen. Wir haben erwartet, dass Teleportation das Gefühl, in der VE zu sein, mehr brechen könnte als eine kontinuierliche Bewegung, die der Art und Weise, wie sich Menschen in der realen Welt bewegen, ähnlicher ist, aber dies ist nicht geschehen. In allen Gruppen waren die Präsenzwerte hoch (zwischen 4 und 5 auf einer Skala von 0 bis 6), sowohl für das Gefühl, dort zu sein, als auch für die Subskalen für räumliche Präsenz und Beteiligung. Nur die Realismuswerte waren unter den drei Bedingungen niedrig, aber dies war wahrscheinlich auf die VE zurückzuführen, die keine realistischen 3D-Modelle enthielt. Frühere Studien, in denen Joystick und Teleport verglichen wurden, ergaben keine signifikanten Unterschiede in der Anwesenheit [10] [11], ein insgesamt signifikanter Unterschied in Bezug auf die Anwesenheit, auf den keine paarweise Vergleichsanalyse folgte [23]. oder eine höhere Präsenz beim Teleportieren als bei anderen Techniken, jedoch nicht beim Joystick [7]. Frühere Studien, in denen das Vorhandensein mit dem Joystick und dem Lehnen verglichen wurde [8] [9] [26], ergaben keine signifikanten Unterschiede [8] [9] oder ein höheres Vorhandensein mit dem Lehnen [26]. Unsere Studie war die erste, die das Vorhandensein aller drei betrachteten Techniken miteinander verglich, und ergab keine signifikanten Unterschiede im Vorhandensein, wobei eine größere Stichprobe von Teilnehmern als in früheren Studien beteiligt war.

Die SUS-Werte bestätigten unsere Hypothese zur Lernbarkeit nicht, obwohl die Prämissen, auf denen sie basierten, zutrafen. Genauer gesagt bestätigte der erste Fragebogen, dass die Teilnehmer mit Joysticks besser vertraut waren $\bar{x} M. 5.67; SD 1\frac{1}{2}$: 1:66 p als mit Systemen, die Körperbewegungen erfassen $\bar{x} M. 3.64; SD 1\frac{1}{2}$: 1:67 p zum Abspielen von 3D-Videospielen (T-Test mit gepaarten Samples, $p < 0.001$). Trotz der höheren Vertrautheit mit Joysticks in 3D-Videospielen und dem Mangel an Signifikanz

Unterschiede in der Vertrautheit zwischen von ANOVA bestätigten Gruppen, es gab keinen signifikanten Unterschied in der Lernfähigkeit, der in allen Gruppen hoch war (über 17 in einer Skala von 0 bis 20). Die Subskala für die Benutzerfreundlichkeit und die Gesamt-SUS waren ebenfalls in allen Gruppen hoch, aber die statistische Analyse ergab, dass der Teleport signifikant benutzerfreundlicher war als jede der anderen Techniken. In früheren Studien, in denen einige Aspekte der Benutzerfreundlichkeit von Teleport und Joystick verglichen wurden [11] [23], erhielt der Joystick etwas bessere Ergebnisse als der Teleport, es wurden jedoch keine paarweisen Vergleiche berichtet [23] oder sie erreichten keine Signifikanz [11]. Unsere Studie umfasste eine größere Stichprobe von Teilnehmern und verwendete eine bekannte Usability-Skala, wobei festgestellt wurde, dass Teleport besser verwendbar ist als Joystick, und ein solcher Vorteil des Teleports wurde auch gegenüber dem Lehen festgestellt. Wir haben stattdessen keine signifikanten Unterschiede in der Benutzerfreundlichkeit zwischen Lehen und Joystick festgestellt. Eine frühere Studie, in der die Lernfähigkeit von Joystick und Neigen verglichen wurde [26], ergab ebenfalls keinen Unterschied zwischen den beiden Techniken [26]. Interessanterweise war der Joystick benutzerfreundlicher als das Anlehen [8], einfacher zu bedienen als das Anlehen [9] und weniger schwer zu verstehen als eine andere Technik, die auf körperlicher Bewegung (Walk-in-Place) in [11] basiert. Obwohl die Unterschiede in unserer Studie nicht signifikant waren, stimmen die Mittelwerte, die wir für die Usability-Subskala und den Gesamt-SUS gefunden haben, mit diesen Ergebnissen überein. und weniger schwer zu verstehen als eine andere Technik, die auf körperlicher Bewegung (Walk-in-Place) in [11] basiert. Obwohl die Unterschiede in unserer Studie nicht signifikant waren, stimmen die Mittelwerte, die wir für die Usability-Subskala und den Gesamt-SUS gefunden haben, mit diesen Ergebnissen überein. und weniger schwer zu verstehen als eine andere Technik, die auf körperlicher Bewegung (Walk-in-Place) in [11] basiert. Obwohl die Unterschiede in unserer Studie nicht signifikant waren, stimmen die Mittelwerte, die wir für die Usability-Subskala und den Gesamt-SUS gefunden haben, mit diesen Ergebnissen überein.

Die Ergebnisse bestätigten unsere Hypothese, dass das Lehen mehr körperliche Anstrengung erfordert als jede der anderen Techniken. Frühere Studien haben bereits gezeigt, dass Joystick und Teleport weniger Aufwand erfordern als andere Techniken, die auf körperlicher Bewegung beruhen, wie z. B. Walk-in-Place [11] und Handklappen [23]. Obwohl das Lehen nur eine geringe Biegung des Rumpfes anstelle der kontinuierlichen physischen Bewegungen von Walkin-Place und Handlap erfordert, hat unsere Studie gezeigt, dass es immer noch mehr Kraft erfordert als Joystick und Teleport. Das Lehen verursachte erwartungsgemäß auch mehr Ermüdung der Wirbelsäule als die beiden anderen Techniken. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die körperliche Anstrengung selbst beim Lehen als gering und die Ermüdung der Wirbelsäule als moderat bis gering angesehen wurde. Ein signifikanter Unterschied wurde auch für die erforderliche Kraft festgestellt. Die mittlere Punktzahl beim Neigen war die höchste, aber die Mittel waren unter allen Bedingungen sehr niedrig. Die Mittel waren auch für die anderen Aspekte der Ermüdung sehr niedrig. Bei Nackenermüdung war der Mittelwert beim Neigen am höchsten, aber der Unterschied war nur in Bezug auf die Teleportation signifikant. Bei der Ermüdung von Fingern und Armen wurden mit dem Joystick die höchsten Durchschnittswerte ermittelt, die Unterschiede waren jedoch nur in Bezug auf die Neigung signifikant. Das Fehlen von Unterschieden zwischen Joystick und Teleport war wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass beide Gruppen die Handheld-Controller verwendeten. Bei Ermüdung des Handgelenks und der Schulter wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Darüber hinaus fanden wir keinen Unterschied zwischen den Techniken der mentalen Anstrengung, die im Durchschnitt gering waren. Interessanterweise erwies sich die Genauigkeit der Bewegungen mit dem Joystick als schwieriger als das Teleportieren. möglicherweise, weil Teilnehmer, die Teleport verwenden, den Heiligenschein sehen konnten, der die aktuell zeigte Position anzeigt (Fig. 1B) und die Position anpassen konnten, bevor sie die zu teleportierende Taste losließen. In keiner früheren Studie wurden Joystick und Teleport auf diese Schwierigkeit verglichen, aber in zwei Studien wurde festgestellt, dass die wahrgenommene Bewegungsgenauigkeit mit dem Joystick höher ist als die Neigung [8] [9], während wir in diesem Aspekt keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Techniken feststellten. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Fortbewegungsleistung erzielte der Teleport signifikant niedrigere Werte für die Langsamkeit als jeder andere. Während wir in diesem Aspekt keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Techniken fanden. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Fortbewegungsleistung erzielte der Teleport signifikant niedrigere Werte für die Langsamkeit als jeder andere

Techniken. Es wurde kein signifikanter Unterschied für die Laufruhe festgestellt, während der allgemeine Komfort beim Teleportieren höher war als beim Lehen. Der Unterschied zwischen Neigung und Joystick war nicht signifikant, aber die Mittel bestätigten die in [8] und [9] festgestellten Trends. In Übereinstimmung mit SUS war die Benutzerfreundlichkeit in DAQ beim Teleport insgesamt höher als bei den beiden anderen Techniken.

Zusammenfassend zeigte unsere Studie, dass Teleport in Bezug auf die Zeit, um die Aufgabe zu erledigen, Übelkeit und Benutzerfreundlichkeit besser war als die beiden anderen Techniken. Es war auch besser als das Lehen in Bezug auf erforderliche Kraft, körperliche Anstrengung, Ermüdung der Wirbelsäule, Ermüdung des Nackens und allgemeinen Komfort. Schließlich war es in Bezug auf die Schwierigkeit, in Bewegungen genau zu sein, besser als ein Joystick. Wir haben erwartet, dass der Teleport in Bezug auf Präsenz oder Lernfähigkeit schlechter ist als die anderen Techniken, aber es wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden. Darüber hinaus gab es kein Maß, bei dem der Teleport ein statistisch signifikant schlechteres Ergebnis erzielte als die anderen Techniken. Aus diesen Gründen könnte Teleport für eine Vielzahl von VR-Erfahrungen empfohlen werden.

Die Unterschiede zwischen Lehen und Joystick waren begrenzt: Das Lehen war in Bezug auf die Zeit, um die Aufgabe zu erledigen, und die Ermüdung von Fingern und Armen besser als der Joystick, aber schlechter in Bezug auf erforderliche Kraft, körperliche Anstrengung und Ermüdung der Wirbelsäule. Während verschiedene Maßnahmen die Verwendung von Teleport in unterschiedlichen VR-Erfahrungen unterstützen, ist die Wahl zwischen Lehen und Joystick subtil und hängt mehr vom spezifischen Verwendungskontext ab.

Es ist wichtig anzumerken, dass unsere Ergebnisse bei jungen Benutzern gefunden wurden, von denen die meisten mit Videospielen vertraut waren. Obwohl die Stichprobe wahrscheinlich für ein wichtiges Segment von Benutzern repräsentativ ist, bei denen VR mit Consumer-HMDs auftritt, können die Ergebnisse nicht auf andere Benutzergruppen übertragen werden, z. B. ältere Benutzer und / oder Benutzer, die mit Videospielen weniger vertraut sind. Eine weitere Einschränkung der Studie besteht darin, dass es sich um eine von Männern dominierte Stichprobe handelt. Daher sind weitere Studien zu einer geschlechtsausgeglichenen Stichprobe erforderlich.

7 C. SCHLUSSFOLGERUNG

In diesem Artikel haben wir die Auswirkungen von Joystick-, Teleport- und Lehntechniken auf die Fortbewegung mithilfe eines HMD mit 6-DOF-Verfolgung des Kopfes und der Handheld-Controller des Benutzers untersucht. Während frühere Studien eine Teilmenge dieser Techniken mit anderen Techniken verglichen und normalerweise kleine Stichproben von Benutzern umfassten, ist unsere Studie die erste, die alle drei Techniken an einer großen Stichprobe (75 Teilnehmer) gründlich miteinander vergleicht. Zusätzlich zur Fortbewegungsleistung, die in früheren Studien häufig untersucht wurde, haben wir Messungen von Krankheit, Anwesenheit, Benutzerfreundlichkeit und Komfort aufgenommen, die weniger häufig berücksichtigt wurden, jedoch eine wichtige Rolle für die Art und Weise spielen können, wie Benutzer VR erleben. Die Analyse der verschiedenen Variablen ergab, dass Teleport es Benutzern ermöglicht, sich schneller zu bewegen, weniger Übelkeit verursacht und nützlicher ist als die beiden anderen Techniken. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Lernfähigkeit und Präsenz festgestellt. Es wurden nur kleine Unterschiede zwischen den beiden anderen Techniken gefunden. Die Ergebnisse unterstreichen die Rolle des Teleports als gültige Lösung für die Fortbewegung vor Ort.

Die vorliegende Studie konzentrierte sich auf Reisen. In zukünftigen Studien werden wir uns auf das Finden von Wegen konzentrieren, weil Teleport sein könnte

verwirrender als die Techniken, bei denen die Bewegung des Blickwinkels kontinuierlich ist [3]. Dies motiviert zu weiteren Studien mit und ohne unterschiedliche Suchhilfen.

Darüber hinaus zeigt die Tatsache, dass sich einige Leistungsergebnisse früherer Studien von unseren unterscheiden, wenn eine andere Art und Anordnung von Hindernissen in der VE verwendet wurde [11] [23], dass weitere Studien erforderlich sind. Wir werden die Techniken in VEs mit Hindernissen verschiedener Typen (groß gegen niedrig, schmal gegen groß) und VEs mit unterschiedlichen Anordnungen der Hindernisse (reguläres Gitter gegen verstreute Positionen, wenige gegen viele Hindernisse) vergleichen, einschließlich VEs, die es sind komplexer als die, die wir in unserer Studie verwendet haben.

Ein letzter Aspekt, der einer weiteren Bewertung bedarf, ist, inwieweit die multidirektionale Bewegung von Joystick und Neigen ihre Leistung in Bezug auf Techniken beeinflusst, die nur eine Vorwärtsbewegung zulassen (z. B. Walk-in-Place). Dies könnte erreicht werden, indem multidirektionale und vorwärtsgerichtete Implementierungen von Joystick und Neigen sowie verschiedene Nur-Vorwärts-Techniken evaluiert werden.

EIN BESTÄTIGUNGEN

Die Autoren möchten Ludovico Del Stabile für die erste Implementierung von VE und Pilotversuchen sowie Riccardo Sioni für die Unterstützung bei der Benutzerstudie danken.

R. EFERENZEN

- [1] DA Bowman, D. Koller und LF Hodges, „Eine Methode zur Bewertung von Reisetechniken für immersive virtuelle Umgebungen“. *Virtuelle Realität*, vol. 3, S. 120–131, Juni 1998.
- [2] M. Slater, M. Usoh und A. Steed, „Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Geotechnik auf die Präsenz in der virtuellen Realität“. *ACM Trans. Comput. Interagieren.*, vol. 2, nein. 3, S. 201–219, 1995.
- [3] DA Bowman, D. Koller und LF Hodges, „Reisen in immersiven virtuellen Umgebungen: Eine Bewertung der Techniken zur Bewegungssteuerung von Blickwinkeln“, in Proc. IEEE Ann. Int. Symp. *Virtuelle Realität*, 1997, S. 45–52.
- [4] JN Templeman, PS Denbrook und LE Sibert, „Virtuelle Fortbewegung: Durch virtuelle Umgebungen an Ort und Stelle gehen“. *Präsenz Teleoperatoren Virtuelle Umgebung*, vol. 8, nein. 6, S. 598–617, 1999.
- [5] M. McCullough et al
Proc. ACM SIGGRAPH Symp. Appl. Wahrnehmung, 2015, S. 107–113.
- [6] CG Christou und P. Aristidou, „Lenkung versus Teleport-Fortbewegung für am Kopf montierte Displays“, in Proc. Int. Conf. Augmented Reality Virtual Reality Comput. Graph., 2017, vol. LNCS 10325, S. 431–446.
- [7] J. Frommel, S. Sonntag und M. Weber, „Auswirkungen der Controller-basierten Fortbewegung auf das Spielerlebnis in einem Virtual-Reality-Erkundungsspiel“, in Proc. Int. Conf. Gefunden. Ziffer. Spiele, 2017, Art. Nein. 30.
- [8] AM Hashemian und BE Riecke, „Learning-basierte 360-Schnittstellen: Untersuchung von Virtual-Reality-Navigationsschnittstellen mit Learning-basierter Übersetzung und vollständiger Rotation“, in Proc. Int. Conf. Virtuelle Augmented Mixed Reality, 2017, vol. LNCS 10280, S. 15–32.
- [9] A. Kitson, AM Hashemian, ER Stepanova, E. Kruifjff und BE Riecke, „Vergleich von Lean-basierten Motion-Cueing-Schnittstellen für die Fortbewegung in der virtuellen Realität“, in Proc. IEEE Symp. 3D-Benutzeroberflächen, 2017, S. 73–82.
- [10] E. Langbehn, P. Lubos und F. Steinicke, „Bewertung von Fortbewegungstechniken für VR im Raummaßstab: Joystick, Teleportation und umgeleitetes Gehen“, in Proc. ACM Virtual Reality Int. Conf., 2018, Art. Nein. 4.
- [11] E. Bozgeyikli, A. Raji, S. Katkoori und R. Dubey, „Point & Teleport-Fortbewegungstechnik für die virtuelle Realität“, in Proc. Ann. Symp. Comput.-Hum. Int. Abspielen, 2016, S. 205–216.
- [12] A. Harris, K. Nguyen, PT Wilson, M. Jackoski und B. Williams, „Menschlicher Joystick: Wii-Neigung zum Übersetzen in großen virtuellen Umgebungen“, in Proc. 13. ACM SIGGRAPH Int. Conf. Virtual-Reality Continuum Appl. Ind., 2014, S. 231–234.
- [13] JL Souman et al., „CyberWalk“ ACM Trans. Appl. Percept., vol. 8, nein. 4, S. 1–22, November 2011.
- [14] NC Nilsson, S. Serafin und R. Nordahl, „Festlegung des Bereichs wahrnehmbar natürlicher visueller Gehgeschwindigkeiten für die virtuelle Fortbewegung vor Ort“. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 20, nein. 4, S. 569–578, April 2014.
- [15] NC Nilsson, S. Serafin und R. Nordahl, „Die wahrgenommene Natürlichkeit virtueller Fortbewegungsmethoden ohne explizite Beinbewegungen“, in Proc. Bewegungsspiele, 2013, S. 155–164.
- [16] PT Wilson, W. Kalesky, A. MacLaughlin und B. Williams, „VR-Fortbewegung: Gehen> Gehen an Ort und Stelle> Armschwingen“, in Proc. 15. ACM SIGGRAPH Conf. Virtual-Reality Continuum Appl. Ind., 2016, S. 243–249.
- [17] S. Razzaque, Z. Kohn und MC Whitton, „Redirected Walking“, in Proc. EUROGRAPHICS, 2001, S. 289–294.
- [18] E. Hodgson, E. Bachmann und T. Thrash, „Leistung umgeleiteter Gehalgorithmen in einer eingeschränkten virtuellen Welt“, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 20, nein. 4, S. 579–587, April 2014.
- [19] RP McMahan, DA Bowman, DJ Zielinski und RB Brady, „Bewertung der Anzeige- und Interaktionsgenauigkeit in einem Virtual-Reality-Spiel“. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 18, nein. 4, S. 626–633, April 2012.
- [20] RA Ruddle, SJ Payne und DM Jones, „Navigieren in virtuellen Umgebungen in großem Maßstab: Welche Unterschiede treten zwischen Helm- und Desktop-Displays auf?“ *Präsenz: Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 8, nein. 2, S. 157–168, 1999.
- [21] CA Zanbaka, BC Lok, SV Babu, AC Ulinski und LF Hodges, „Vergleich von Pfadvisualisierungen und kognitiven Maßnahmen in Bezug auf Reisetechniken in einer virtuellen Umgebung“. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 11, nein. 6, S. 694–705, September 2005.
- [22] CH Lee, A. Liu und TP Caudell, „Eine Studie über Fortbewegungsparadigmen für immersive medizinische Simulationsumgebungen“. *Vis. Comput.*, vol. 25, nein. 11, S. 1009–1018, November 2009.
- [23] E. Bozgeyikli, A. Raji, S. Katkoori und R. Dubey, „Fortbewegung in der virtuellen Realität für nachverfolgte Bereiche im Raummaßstab“. *Int. J. Hum. Comput. Zucht.*, vol. 122, S. 38–49, Februar 2019.
- [24] KM Fairchild, BH Lee, J. Loo, H. Ng und L. Serra, „Die virtuelle Realität von Himmel und Erde: Entwerfen von Anwendungen für Anfänger“, in Proc. IEEE Virtual Reality Ann. Int. Symp., 1993, S. 47–53.
- [25] JJ LaViola, DA Feliz, DF Keefe und RC Zeleznik, „Freisprech-Multiskalennavigation in virtuellen Umgebungen“, in Proc. Symp. Interaktives 3D-Diagramm., 2001, S. 9–15.
- [26] S. Tregillus, M. Al Zayer und E. Folmer, „Freisprechende omnidirektionale VR-Navigation mit Kopfnutzung“, in Proc. CHI Conf. Summen. Faktoren Comput. Syst., 2017, S. 4063–4068.
- [27] JT Reason und JJ Brand, *Bewegungskrankheit*. Oxford, England: Academic Press, 1975.
- [28] RS Kennedy, NE Lane, KS Berbaum und MG Lilenthal, „Fragebogen zur Simulatorkrankheit: Eine verbesserte Methode zur Quantifizierung der Simulatorkrankheit“. *Int. J. Aviat. Psychol.*, vol. 3, nein. 3, S. 203–220, Juli 1993.
- [29] SD Young, BD Adelstein und SR Ellis, „Nachfrageeigenschaften eines Fragebogens zur Beurteilung der Reisekrankheit in einer virtuellen Umgebung“, in Proc. IEEE Virtual Reality Conf., 2006, S. 97–102.
- [30] T. Schubert, F. Friedmann und H. Regenbrecht, „Die Erfahrung der Präsenz: faktorenanalytische Einsichten“, *Präsenz: Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 10, nein. 3, S. 266–281, 2001.
- [31] J. Brooke, „SUS - Eine schnelle und schmutzige Usability-Skala“, in *Usability-Bewertung in der Industrie*, PW Jordan, B. Thomas, BA Weerdmeester und IL McClelland, Eds. London, UK: Taylor & Francis, 1996, S. 189–194.
- [32] JR Lewis und J. Sauro, „Die Faktorstruktur der System-Usability-Skala“, in Proc. Int. Conf. Summen. Zentrierte Des., 2009, vol. LNCS 5619, S. 94–103.
- [33] SA Douglas, AE Kirkpatrick und IS MacKenzie: „Testen der Leistung von Zeigegeräten und der Benutzerbewertung mit der ISO 9241, Teil 9 Standard“ in Proc. SIGCHI Conf. Summen. Faktoren Comput. Syst., 1999, S. 215–222.
- [34] JD Prothero und DE Parker, „Ein einheitlicher Ansatz für Präsenz und Reisekrankheit“, in *Virtuelle und adaptive Umgebungen: Anwendungen, Implikationen und Probleme mit der menschlichen Leistung*, J. Hettinger und M. Haas, Eds. Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2003, S. 47–66.
- [35] RA Ruddle, „Die Auswirkung von Umgebungsmerkmalen und Benutzerinteraktion auf das Ausmaß der Krankheit der virtuellen Umgebung“, in Proc. IEEE Virtual Reality, 2004, S. 141–145.



Fabio Buttussi promovierte in Informatik an der Universität von Udine. Er ist Postdoktorand am Labor für Mensch-Computer-Interaktion (HCI) am Institut für Mathematik, Informatik und Physik der Universität von Udine, Italien. Seine Forschungsinteressen umfassen Virtual Reality, HCI, Serious Games und deren Anwendung in Gesundheit und Sicherheit.



Luca Chittaro ist ordentlicher Professor für Human Computer Interaction (HCI) am Institut für Mathematik, Informatik und Physik der Universität von Udine, Italien, wo er das HCI Lab (<http://hcilab.uniud.it>) leitet. Er hat mehr als 200 internationale wissenschaftliche Publikationen verfasst oder mitverfasst und ist ein angesehener ACM-Redner. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Virtual Reality, Mobile HCI, Serious Games, überzeugende Technologie und deren Anwendungen in den Bereichen Gesundheit und Sicherheit. Er hat Forschung erhalten

Zuschüsse von einer Vielzahl von Organisationen, darunter der US-amerikanischen Federal Aviation Administration (FAA), der Europäischen Union (EU), dem italienischen Ministerium für Universität und Forschung (MIUR) sowie Unternehmen wie der Benetton Group und der Intesa Sanpaolo Bank Group.

- Weitere Informationen zu diesem oder einem anderen Computerthema finden Sie in unserer digitalen Bibliothek unter www.computer.org/csdn.