Dokumentation Projekt Groupware VR

Betreuung Alexander Kulik, Virtual Reality and Visualization Research Universität Weimar

Benedikt S. Vogler¹

Bauhaus Universität Weimar, Weimar 99425, Germany, benedikt.vogler@uni-weimar.de, WWW home page: http://benediktsvogler.com

Zusammenfassung. Für Mehrbenutzer-Interaktionen gibt es bis jetzt keine geeigneten Quantitativen Maße, sondern nur Heuristiken. Bei gerichteten Bewegungen in 2D oder 3D hat es sich etabliert, Fitts's Law zur quantitativen Evaluierung von Eingabegeräten oder Interfaces zu benutzen. Wir haben Studien betrachtet, die komplexere Bewegungen mit mehr Freiheitsgraden betrachten. Die betrachteten Studien zeigten eine niedrigere Performance bei komplexeren Tasks. Komplexere Bewegungen mit Mehrbenutzersystemen bieten die Möglichkeit für eine höhere Effektivität, die ebenfalls mit Fitts's Law untersucht werden können. Zunächst müssen daher 6-Degree-of-Freedom (DOF) Aktionen in virtueller Realität nach ihrer räumlichen Komplexität erfasst und der Einfluss dieser bewertet werden. Wir fanden Synergieeffekte bei Aufgaben mit allen Freiheitsgraden, welche mithilfe von Fitts's Law quantifizierbar sein könnten.

Schlüsselwörter: Virtual Reality, collaborative working, Augmented Reality, Motorsensorik, Fitts's law

1 Arbeits-/Forschungsansatz

Als geeignetes Quantifizierungs-Metrik bietet sich Fitts's Law [7] an. Dies wurde ursprünglich für gerichtete Bewegungen entwickelt und hat sich als Maß im Interface Design etabliert. Nach Fitts wird jeder Aktion bzw. Aufgabe eine Schwierigkeit (Index of Difficulty) als Informationseinheit in bit gegeben auf Grundlage der Entfernung zum Ziel (A) und der Zielgröße (W).

$$ID = \log_2\left(\frac{2A}{W}\right)$$

Die benötigte Zeit (MT) kann dann nach einer Regressionsanalyse vorhergesagt werden:

$$MT = a + bID$$

Der Index of Performance (IP) oder Throughput (TP) bezeichnet die Leistung, welche in bit/s wie folgt definiert ist:

$$IP = \frac{1}{b}$$

$$TP = \frac{ID}{MT}$$

Fitts's Law ist in seiner Grundaussage eindimensional, da sich A und W entlang einer Achse befinden, und wird meistens im zweidimensionalen euklidischen Raum durch Reduktion auf eine Dimension verwendet. Bevor mehrhändige und Mehrbenutzer-Aktionen quantifiziert werden können, müssen einhändig Aktionen im euklidischen dreidimensionalen Raum quantifiziert werden. Bis jetzt ist dies nur für Pointing-Aufgaben, also das Zeigen auf Stellen im Raum, erfolgt. Fitts's Law sollte seine Gültigkeit behalten, wenn Pointing- und Rotationsaufgaben zusammen gefasst werden, zu sogenannten *Docking*-Aufgaben, bei denen sowohl rotiert, als auch eine Translation durchgeführt werden muss. Die Gültigkeit von Fitts's Law in Abhängigkeit der Freiheitsgrade soll von uns überprüft werden.

2 Verwandte Arbeiten

Für Mehrbenutzer Aktionen kann man bisher nur auf Heuristiken zurückgreifen (z.B. Hornecker [17], Baker [3], Gutwin[14]). Unter Benutzung dieser Heuristiken lässt sich u.U. die Arbeitsgeschwindigkeit und Effizienz verbessern, da man diese zur Evaluierung nutzen kann, quantitativ ist eine Evaluierung damit aber nicht möglich.

Aufbauend auf den Arbeiten von Paul Fitts ([7] und [8]) gab es eine Vielzahl von ähnlichen Studien. Fitts's Law Studien sind Studien, bei denen simple motorische Bewegungen auf ein Ziel durchgeführt werden. In der Regel alterniert man dabei zwischen zwei Zielen.

Nach Mottet et al. [24] lässt sich Fitts's Law nicht nur auf zweihändige Aufgaben übertragen, sondern sogar auf zwei Menschen an der selben Aufgabe. Auffallend ist hierbei, dass ein minimaler Performance-Gewinn beobachtet werden konnte. In dieser Richtung kann vor allem VR mit Mehrbenutzer-Aktionen profitieren. Der Vorteil mehrerer Benutzer liegt nicht nur in einer Parallelisierung durch eine Aufgabenverteilung, sondern auch in der verteilten Informationslage über ein Objekt, bedingt durch die räumliche Positionierung. Gerade die Tasks mit einer niedrigen Performance könnten hiervon am meisten profitieren. Beispiele für die Leistungsverbesserung in virtuellen Welten durch Mehrbenutzer-Interaktionen finden sich bei Mehrspieler Computerspielen, insbesondere Echtzeit-Strategiespiele und Shooter. Eine genauere Betrachtung dieser unter dem Aspekt der Mehrbenutzer-Interaktion und ihre verteilte Informationslage könnte hier fruchtbar sein.

Nieuwenhuizen et al. [27] zeigten, dass gerichtete Bewegung in virtuellen Umgebungen um die Hälfte langsamer sind, als die gleiche Aufgabe in der realen Umgebung. Wir bemerkten einen ähnlichen Effekt über mehrere andere Studien hinweg: Die Leistung in virtuellen Umgebungen scheint signifikant niedriger als in der Realität, unabhängig vom Typ der Aufgabe, zu sein. Die Realität und ihre Gesetze wird in der virtuellen Welt abgebildet, aber Unterschiede zur Realität wie Latenzen, Genauigkeit der Tracking-Systeme oder die Art und Genauigkeit der Anzeige können negativ auf die Benutzbarkeit wirken.

Die Anzeige kann sich Beispielsweise bei einer isomorphen Verknüpfung an einer anderen Stelle als das Eingabegerät befinden (disjunkt, z.B. [34]), näher an der Realität ist die Positionierung an der gleicher Stelle (co-located, z.B. [11], [25], [2]). Eine von uns durchgeführte Meta-Untersuchung früherer Studien ([7], [8], [22], [20], [23], [34], [16], [11], [25], [26], [4], [2], [1], [12], [13], [10], [21], [32], [27], [30], [15], [29], [5]) zeigte, dass der Throughput bei rein virtuellen Tasks im Schnitt etwa 24% niedriger ist als bei erweiterter Realität (augmented reality, AR).

Die von uns festgestellte Differenz von haptischem Feedback bezifferte sich im Schnitt auf etwa 18 %. Dies wurde u.a. speziell von Forlines [9] untersucht. Festfestellt wurde auch, dass das Vorhandensein von taktilem Feedback ebenfalls die Auswahl-Zeit bei einem Fitts's Law Task verkürzt, da die Anforderungen an den visuellen Informationskanal gesenkt werden und ein anderer Informationskanal zusätzlich genutzt wird.

Ähnlich wie das Vorhandensein von taktilem Feedback durch die Umgebung, ist auch die physikalische Einschränkung der Freiheitsgerade durch die Umgebung zu ebtrachten. Eine Ablage, z.B. ein Tisch, bietet durch die Einschränkung der Freiheitsgerade auf zwei Translationsrichtungen das Potential die Geschwindigkeit zu erhöhen. Die Höhe des Einflusses durch die Beschränkung ist unklar.

Eine Bewegung besteht nach einem Modell aus zwei Phasen [27]: Eine ballistische Phase und eine zweite Phase, bei der sich der sensomotorische Feedback-Kreis schließt (auch genannt "closed loop"). In virtuellen Umgebungen ist hauptsächlich in der zweiten Phase der Bewegung der Throughput reduziert[11]. Dies ist fundamental für die Analyse von Studienergebnissen, da sich die Gewichtung der verschieden Einflüsse je nach Phase besser unterscheiden lassen.

Ware [35] isolierte zwei entscheidende Gründe für die Zeit-Diskrepanz bzgl. der Rotation im Virtuellen, die sich aus der mentalen Last ergeben. Der erste Grund ist, dass das Objekt an der physikalischen Position sich mit dem virtuellen übereinstimmend befinden soll und nicht separiert werden sollte (co-location / Disjunktion). Je näher die Rotation im Virtuellen der Rotation im Realen entspricht, desto höher ist die Geschwindigkeit. Das Team von Teather [32] untersuchte die separierten Anzeige des virtuellen Cursors für Translation und fand nur eine sehr geringe Überlegenheit von co-location. Kritisieren kann man an dieser Studie aber, das diese virtuelle Umgebung ohne Head-Tracking nutzen und damit nicht dem gängigen VR-Setup aus Stereoskopischer Anzeige und Head-Tracking entspricht. Nach LaViola [18] wird der Fehler reduziert, wenn head-tracking benutzt wird. Ob die Rotationen repetitiv sind oder nicht, ist ein weiterer Faktor. Repetitive Aufgaben senken zusätzlich die Schwierigkeit.

3 Entwicklungen im Rahmen des Projektes

Für unsere Untersuchungen entwarfen wir eine Testprozedur und zwei Apparate, die im Folgenden präsentiert werden. Die Apparate können die Position eines Objektes verfolgen, sowie ein stereoskopisches 3D-Bild erzeugen. Ursprünglich sollten Aufgaben mit unterschiedlichen IDs und die zugehörige benötigte Zeit

erfasst werden, um daraus die Gültigkeit von Fitts's Law für 6-DOF-Aufgaben zu überprüfen. Wir benutzten dann aufgrund einiger Einschränkungen im Versuchsdesign doch keine vorgegebenen IDs, so dass dies nicht überprüft werden konnte.

3.1 Testapparat

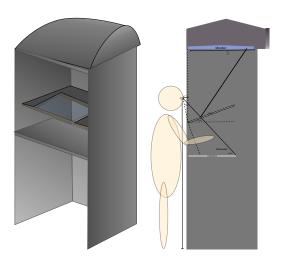


Abb. 1. Nicht maßstabsgetreue Skizze zum entworfenen Testapparat

Es wurde ein Fish-Tank-VR-Apparat konstruiert (Abb. 1), der eine Augmented-Reality erzeugt (vgl. [31]). Die Testperson soll vor diesem Apparat stehend auf einen halb durchlässigen Spiegel blicken. Die spiegelnde Hälfte zeigt in der Reflektion den 3D-Monitor, welcher dort drüber montiert ist. Die durchlässige Hälfte zeigt die Hände der bedienenden Person unter dem Spiegel, so dass beide Bilder, also virtuelles und reales Bild, übereinander gelegt werden können. Nur wenn die Beleuchtung unter dem Spiegel angeschaltet ist, so kann man durch den Spiegel sehen und es handelt sich dann um eine Augmented-Reality-Anwendung. Ist die Beleuchtung abgeschaltet, so ist nur das gespiegelte Bild des Monitors zu sehen. Das virtuelle Objekt, das modifiziert werden soll, wird isomorph mit einem realem Objekt an gleicher Position verbunden. Das erfasste reale Objekt kann von der bedienenden Person an die Stelle des virtuell eingeblendeten Zieles bewegt werden. Verglichen werden sollte auch, wie hoch der Leistungsunterschied zu einem Task mit reiner virtueller Ansicht ist, wo das bewegte Objekt nur virtuell an der Stelle angezeigt wird, wo es sich real befindet, allerdings die reale Hand nicht gesehen werden kann.

Die Benutzung der Tisch-Platte unter den Händen erlaubt es, den Einfluss dieser auf manche Aufgaben zu überprüfen. Ein Teil der Aufgaben wird durch-

geführt, wobei diese benutzt wird, ein anderer Teil findet in der Luft über dieser statt.

Ziel der teilnehmenden Person ist es, eine akkurate Positionierung des virtuellen Objekts in kurzer Zeit zu erledigen. Die Gesamt-Performance bei der Anwendung sollte möglichst hoch sein. Deswegen benutzen wir eine stereoskopische Anzeige via Shutter-Brillen sowie head-tracking zur Verbesserung der Integration der virtuell erweiterten Objekte in die Realität ("Präsenz") (vgl. [18]). Das Tracking wurde mit dem Polhemus Liberty Latus durchgeführt. Es benutzt Elektromagnetismus und benötigt einen Sender, welcher vom System erfasst wird. Der Sender soll sich für das Head-Tracking am Kopf der bedienenden Person, sowie innerhalb des bewegten Objektes befinden.

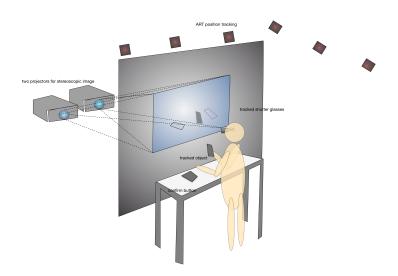


Abb. 2. Nicht maßstabsgetreue Skizze zum benutzten Testapparat

Aufgrund eines Defekts des Tracking-Gerätes wurde das Setup verändert. Statt dem halbdurchlässigen Spiegel befindet sich in dem neuen Setup das Objekt direkt vor der Testperson und es wird optisches Tracking der Firma A.R.T. genutzt (Abb. 2). Hier kann keine erweiterte Realität erzeugt werden, da das virtuelle Bild hinter dem realen Objekt bzw. der Hand liegt. Der Aufbau ist daher nur disjunkt Möglich (vgl. [32]). Aufgrund der ausreichend hohen Präzision werden die Tracking-Daten unbehandelt ausgewertet.

Die Software nutzt avango-guacamole der VR Systems Group der Bauhaus-Universität Weimar als Rendering-Engine. Die speziell von uns entwickelte Software lässt eine Vielzahl von Eingabeparametern bestimmen, aus denen die Aufgaben konfiguriert werden und durchgeführt werden können. Während der Versuche werden wichtige Statistiken erfasst und der gesamte Bewegungspfad des

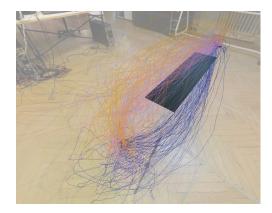


Abb. 3. Screenshot der Visualisierungs-Software mit drei visualisierten Durchläufen

Cursors aufgezeichnet. Eine von mir separat zum Projekt entwickelte Software¹ kann diese Logdateien visualisieren (Abb. 3).

3.2 Versuchsdurchführung

Nach Parsons [28] muss die Wahl der Rotationsachsen bei Rotations-Aufgaben betrachtet werden, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Reaktionszeit und Genauigkeit hat. Rotationen bei denen die Hauptachse des Objekts mit den Achsen der betrachtenden Person übereinstimmt, schneiden besser ab. Würden zu viele unterschiedliche Rotationen benutzt werden, würden weitere Parameter mit einer großem Einfluss die Ergebnisse bestimmen. Die Aufgaben bestehen daher immer aus den zwei gleichen alternierenden Rotationsaufgaben um 108 Grad, um den Parameter der Achsenwahl möglichst zu eliminieren. Durch den gleichbleibenden Wechsel der zwei Zielen wird zudem die mentale Last reduziert. Die beiden Rotationsziele können ohne ein Umgreifen der Hand erreicht werden, wobei dies den Testpersonen nicht verboten wurde. Diese Entscheidung ist durchaus kritisch zu sehen, denn dies kann je nach Person zu einem unterschiedlichen Verhalten führen, wenn manche umgreifen und andere stärker ihre Gelenke dehnen. Die Alternative wäre ein geringer Rotationswinkel gewesen. Der Anteil der ballistischen Phase an der Bewegung würde dann aber vermutlich stark sinken, da die Bewegungsdistanz bei der Rotation an sich schon sehr klein ist. Wie auch die Rotation alterniert die Zielposition. Wir wählten einen Abstand von 35 cm.

Ein Ziel-Zustand beschreibt eine 6-DOF Transformation. Die Testperson sollen das Objekt von Zustand A in den Zustand B bewegen. Von B soll es dann zurück zum Zustand A transformiert werden usw. Der Ziel-Zustand muss von den Testperson möglichst genau angenähert werden und dann durch Tastendruck bestätigt werden. Der Tastendruck wird mit der linken Hand durchgeführt, so dass die Bestätigung durch die Bewegung der rechten Hand nicht die Position verändert.

¹ GitHub Repository: https://github.com/BSVogler/MovementPathVisualizer

In Pilotstudien zeigte sich, dass die Performance bei den Rotations-Aufgaben deutlich unter denen der Translation lag. Wir vermuten die Ursache beim komplexeren mentalen Modell. Zur Reduktion der mentalen Last, probierten wir eine Vorschauanimation der Bewegung aus. Hierbei war problematisch, dass während die Vorschau abgespielt wurde, nicht garantiert ist, dass sich der reale Cursor noch an der Stelle befindet, an der der virtuelle sich zuletzt befunden hat. Eine Fixierung des virtuellen Cursors ist bedingt durch die permanente isomorphe Verknüpfung des realen mit dem virtuellen Objekt nicht möglich. Diese wird aber benötigt, da sich sonst die Startposition des Cursors während der Vorschau verändert. Die Start-Position muss also folglich immer die Endposition vorigen Durchganges sein.

Während der Durchgänge wird die Position, sowie weitere Parameter im Hintergrund geloggt. Alle 20 Durchgänge wird das Logging deaktiviert und durch eine farbliche Veränderung des Hintergrundes der teilnehmenden Person signalisiert. Hier kann dann eine Pause eingelegt werden, so dass Müdigkeitseffekte reduziert werden.

Studienteilnehmer werden in Gruppen eingeteilt, so dass jede Gruppe eine andere Aufgabenreihenfolge bekommt. Die in-between-subject-Lerneffekte, die sich durch die Reihenfolge der Aufgaben ergeben können, sollen so reduziert werden.

Insgesamt macht jede Testperson vier Aufgaben mit jeweils fünf Blöcken mit 20 Bewegungen. Eine Aufgabe besteht nur aus der Translation auf der Tischplatte (r0-t2), eine Translation im Raum (t3-r0), eine Rotationsaufgabe im Raum (r3-0), und eine 6-DOF-"Docking"-Aufgabe (t3-r3), bei der zu der Translation noch rotiert werden muss.

3.3 Entwicklung eines Cursors

Das von der bedienenden Person transformierte virtuelle Objekt wird im Folgenden als 'Cursor' bezeichnet. Um Rotation sowie Translation miteinander vergleichbar zu machen, sollen beide Aufgaben einen gleichartigen Cursor benutzen. Mit diesem sollte man also sowohl ein Pointing-Ziel auswählen können, als auch eine Rotation begreifbar machen. Pointing-Ziele zeigten wir durch einen kugelförmigen Toleranzbereich um einen Punkt an (4).



Abb. 4. Der Zielbereich für die Translation.

Der Cursor ist abhängig vom benutzten Tracking: Wird elektromagnetisches Tracking benutzt, muss sich der etwa wallnussgroße Sender in der Hand der bedienenden Person befinden. Unser erster Entwurf benutzt daher ein hohles 3D-gedrucktes Kunststoffobjekt (5). Bei der Entwicklung orientierten wir uns an einem Bleistift. Für den Vergleich von erweiterter Realität mit der virtuellen Realität waren realer und virtueller Cursor der Gleiche.



Abb. 5. Das erste Cursormodel.

Da bei dem zweiten, veränderten Apparat das Eingabegerät nicht mehr ein hohles Objekt, sondern ein Zeiger mit optischen Reflektoren ist, und die Anforderungen durch die erweiterte Realität entfielen, musste der virtuelle Cursor geändert werden. Wir ahmten erneut die Form des realen Objektes nach, abstrahierten aber mehr (6). Mit jeder Spitze sollte dabei auf einen Bereich gezeigt werden, der die Zielgröße der Rotation anzeigt. Die Positionen der vorderen Zielscheibe geben das Translations-Ziel an.



Abb. 6. Abstrakterer Cursor.

Diesen abstrakten Cursor entwickelten wir zu einem ganz abstrakten dreidimensionalen Kreuz weiter (Abb. 7). Dieses Kreuz hat spitz zulaufende Enden, sowie einen verengten Mittelpunkt, mit dem Pointing-Aufgaben durchgeführt werden können. Die äußeren Enden sind farblich markiert, so dass eine Zuordnung der drei Rotations-Freiheitsgrade über die Farbe erfolgen kann bzw. muss. Vorteil hierbei ist, dass alle Achsen gleich behandelt werden. Die mentale Herausforderung für die Erkennung der Rotation über Farben stellte sich hierbei in

Pilotstudien aber als zu groß heraus. Das Feststellen der Rotation ähnelt dann dem Prozess einer linearen Suche.



Abb. 7. Abstraktes Zielkreuz

Zur Reduktion der mentalen Schwierigkeit verfolgten wir einen neuen Ansatz. Nach Krüger und Ebersbach [19] können Rotationsaufgaben besser gelöst werden, wenn das rotierte Objekt Merkmale eines menschliche Körpers enthält (Stichwort *embodyment*). Das Hinzufügen von Händen, Füßen und einem Gesicht, sollte also die mentale Last senken (vgl. Abb. 8).



Abb. 8. Konzept für den erweiterten Cursor.

In unserer Implementation wählten wir eine komplette Figur eines Menschen zur Unterstützung des Cursors. Dennoch entschieden wir uns, wegen der narrative Ebene der menschlichen Gestalt im Kontext des Versuchsaufgabe, einen Alltagsgegenstand zu nehmen. Das von uns gewählte Objekt ist das Modell eines Mobiltelefons. Bei diesem Modell kann der Rotations-Zielbereich bedingt durch fehlende Zeiger in den drei Rotationsrichtung nicht angezeigt werden. Da der Zielbereich also nicht angezeigt werden kann, muss also zur Bestimmung des Index of Performance auf die Berechnung der effektiven Werte nach Crossman in Welford [36] zurückgegriffen werden. Hierbei wird der ID über die effektive Endposition der Versuchsteilnehmer bestimmt, also die Position an der das Ziel

bestätigt wird.

$$ID_e = log_2(\frac{2A}{W_e})$$

$$TP = \frac{ID_e}{MT}$$

Dies hat zur Folge, dass nicht mehr der Index of Difficulty vorgeben werden, denn wir können nur A vorgeben, aber nicht W_e . Die Gültigkeit von Fitts's Laws für unterschiedliche IDs ist daher nicht so einfach zu überprüfen. Dennoch könnte man über eine Vorgabe der Zeit oder unterschiedliche Amplitude die Gültigkeit des Gesetzes untersuchen, was wir aber an dieser Stelle nicht getan haben.

Die virtuelle Arbeitsfläche sah dann am Ende wie folgt aus (Abb. 9):



Abb. 9. Screenshot des erzeugten Bildes, hier ein Translationstask

4 Ergebnisse

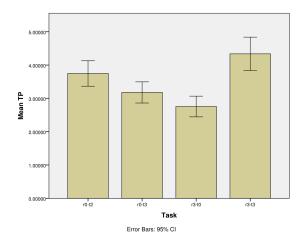
Wir sammelten Ergebnisse von 20 Teilnehmern und Teilnehmerinnen. Statistiken über die Geschlechter wurden von uns nicht erfasst.

Am wichtigsten ist hier der TP nach Task (10). Der mittlere TP beim Translations-Task mit zwei Freiheitsgeraden liegt bei 3.74 bit/s. Nimmt man einen Freiheitsgrad hinzu, sinkt der TP auf 3.17 bit/s. Die Rotation hat den niedrigsten TP mit 2.75 bit/s. Rotation und Translation im Docking Task zusammen ergeben einen mittleren TP von 4.34 bit/s.

Es zeigt sich, dass Rotation und Translation Differenzen aufweisen, obwohl beides gerichtete Bewegungen sind. Beide Bewegungsarten sind nicht gleichartig, denn ihr Throughput unterscheidet sich.

Der Unterschied von der Zielrichtung *links* oder *rechts* zeigt keine signifikanten Änderungen (12). Dies wurde erst vermutet, da sich bei der Rotation die Achsen in ihrer Ausrichtung unterscheiden und eine der beiden Rotationen möglicherweise einfacher zu verstehen ist.

Die Varianz im Throughput zwischen den Usern (between-subject) ist sehr hoch (Abb. 13). Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Wang [33]. Lern- oder Müdigkeitseffekte zwischen den Versuchen (within subject) sind nicht signifikant.



 ${\bf Abb.\,10.}$ Throughput nach Task. r für rotation, t für translation. Die Zahl gibt die Anzahl der Freiheitsgrade an.

Aus den Daten ergeben sich Standardabweichungen des Fehlers, also der Differenz von der ausgewählten Endposition zur optimalen Positionierung. Die Werte der Standardabweichungen: 3-DOF-Rotation mit 1.79° , 2-DOF-Translation mit 1.28 mm, 3-DOF-Translation mit 1.52° , 6-DOF-Docking mit 1.23° und 1.76 mm.

5 Diskussion

Unklar war, in wie weit die Arbeitsfläche einen Einfluss hat, also ob Aufgaben mit 1-DOF-Rotation und 2-DOF-Translation besser frei schwebend im Raum oder auf einem Tisch durchgeführt werden sollten. Es zeigte sich der positiver Einfluss durch die Unterstützung der Tischplatte, da der Throughput ohne diese niedriger ist. Aufgaben, die nicht alle Freiheitsgrade benötigen sollten also, wenn möglich, nicht frei schwebend durchgeführt werden.

Während unserer Arbeiten am Projekt zeigte sich immer wieder, dass der Vergleich der Rotation mit der Translation problematisch ist. Bedeutendster Einfluss scheint hier die mentale Last zu sein, weniger die Motorik, welche nicht bei der Berechnung vom ID berücksichtigt wird. Durch die gleich bleibenden wechselnden Aufgaben konnte dies stark reduziert werden. Fitts's Law als Modell kommt an seine Grenzen, wenn Faktoren wie Latenz, Bildauflösung, Wahl der Achsen bzw. Bewegungs-Richtung [26] etc. Einfluss auf die Performance nehmen. Ähnliche Kritik gab es schon von Heiko Drewes [6], der kritisierte, dass eine Annäherung des Models an die Realität durch das Hinzufügen weiterer Parameter nicht sinnvoll sei. Entfernt man viele genannte Störfaktoren, so wird der Vergleich der Bewegungsarten wieder geeigneter.

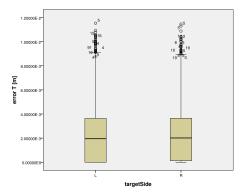


Abb. 11. Translations-Error nach Richtung des Zieles. (Ausreißer bereinigt)

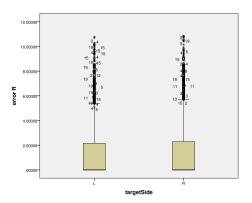


Abb. 12. Rotations-Error nach Richtung des Zieles. (Ausreißer bereinigt)

Eine simple Addition der Throuputs nach dem Modell von Fitts's Law von Translation und Rotation ist nach unseren Ergebnissen nicht möglich. Wir addieren die Schwierigketis-Indizies, aber relativ dazu verhält sich die Zeit, und damit der TP, nicht linear. Zu erwarten wäre ein Leistungsabfall, wenn die schwächere Rotation mit der Translation kombiniert wird. Allerdings gibt es, vermutlich biologisch-mechanisch bedingt, Synergie- bzw. Parallelisierungs-Effekte, die bei einer Addition nicht berücksichtig werden. Dies äußert sich in einem höheren TP.

Es gibt bei der Kombination von Rotation und Translation gleiche oder ähnliche Bewegungsphasen, wie wenn dies einzeln durchgeführt werden, allerdings werden diese zwei Dimensionen vom Körper auf eine Dimension reduziert. Dies ist analog zu Bewegungen im euklidischen zwei-dimensionalen Raum, wo die Schwierigkeit nach Fitts's fälschlicherweise nach der horizontalen und vertikalen berechnet und addiert werden kann, bei der Bewegung aber die Diagonale zurückgelegt wird.

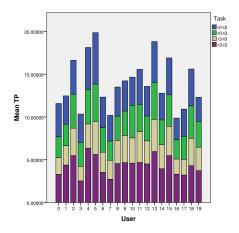


Abb. 13. Throughput nach User.

Die Ergebnisse der Projektarbeit können auch zur Verbesserung computergestützter Eingaben genutzt werden. Arbeitet man mit Lösungen wie z.B. snapping, also einem automatischen Arretieren nahe der Zielposition, so sind die Werte der Standardabweichung möglicherweise ein gutes Maß für einen Grenzoder Schwellwert zur Erkennung einer Eingabe, da sich so ein 96%-Quantil definieren lässt. Mit so einem Schwellwert sollten 96 % der Eingaben korrekt erkannt werden können, bei denen der User die gewünschte Option nur ausreichend angenähert hat. Da sich gezeigt hat, dass die Varianz zwischen den Nutzern sehr hoch ist, kann eine nutzerspezifische Einstellung, ähnlich der Mausgeschwindgkeit, oder das Entwickeln von adaptiven Systemen sinnvoll sein.

6 Weiterführende Arbeiten

Ob Leistungssteigerungen auch bei zwei-händigen Aktionen und Mehrbenutzer-Aktionen auftreten können, muss untersucht werden. Im Vergleich mit der Realität unterliegt VR oder AR im Punkt Bedienbarkeit und Datendurchsatz meistens. Dieses Leistungsdefizit gegenüber der Realität muss mit den Möglichkeiten der Virtualität überwunden bzw. überbrückt werden. Hier kann der von uns gezeigte Synergie-Effekte genutzt werden, um die Bedienung von VR-Software zu verbessern. Komplexe Bewegungen können, wie gezeigt, einen höheren Datendurchsatz haben. Dies wird bislang noch nicht ausreichend genutzt. Zweihändige Aktionen und Mehrbenutzer-Interaktionen bieten das Potential diese Synergie-Effekte stärker zu nutzen. Da Mehrbenutzer-Aktionen neben komplexen Bewegung durch die verteilte Informationslage einen weiteren Faktor haben, der das Potential für höhere Leistungen besitzt, sollte hier überprüft werden, ob sich Fitts's Law auch benutzen lässt und ähnliche Effekte auftreten.

Literatur

- Johnny Accot and Shumin Zhai. Refining fitts' law models for bivariate pointing. CHI, 5(1), 2003.
- 2. Roland Arsenault and Colin Ware. The importance of stereo and eye coupled perspective for eye-hand coordination in fish tank vr. 2004.
- Kevin Baker, Saul Greenberg, and Carl Gutwin. Empirical development of a heuristic evaluation methodology for shared workspace groupware. ACM, 2002.
- 4. Michael Bohan, Mitchell G. Longstaff, Arend W.A. Van Gemmert, Miya K. Rand, and George E. Stelmach. Differential effects of target height and width on 2d pointing movement duration and kinematics. *Motor Control*, 7, 2003.
- 5. Yeonjoo Cha and Rohae Myung. Extended fitts' law for 3d pointing tasks using 3d target arrangements. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2013.
- Heiko Drewes. A lecture on fitts' law. http://www.cip.ifi.lmu.de/~drewes/ science/fitts/ALectureonFittsLaw.pdf, 2013.
- 7. Paul M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *APA Centennial Feature*, 1954.
- 8. Paul M. Fitts. Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, 67(2), 1964.
- 9. Clifton Forlines and Ravin Balakrishnan. Evaluating tactile feedback and direct vs. indirect stylus input in pointing and crossing selection tasks. *CHI*, April 2008.
- Clifton Forlines, Daniel Wigdor, Chia Shen, and Ravin Balakrishnan. Direct-touch vs. mouse input for tabletop displays. CHI, 2007.
- 11. Evan D. Graham. Physical vs virtual pointing. CHI, April, 1996.
- Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. Pointing at trivariate targets in 3d environments. CHI, 2004.
- 13. TOVI GROSSMAN and RAVIN BALAKRISHNAN. A probabilistic approach to modeling two-dimensional pointing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 12(3), September 2005.
- 14. Carl Gutwin and Saul Greenberg. A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware. *Kluwer Academic*, 2002.
- 15. Errol R. Hoffmann, Colin G. Drury, and Carol J. Romanowski. Performance in one-, two- and three-dimensional terminal aiming tasks. *Ergonomics*, November 2011.
- 16. Errol R. Hoffmann and Ilyas H. Sheikh. Effect of varying target height in a fitts' movement task. *Ergonomics*, 36, 1994.
- 17. Eva Hornecker. Getting a grip on tangible interaction: A framework on physical space and social interaction. *CHI*, April 22-27, 2006, April 2006.
- 18. Joseph J. LaViola Jr., Andrew S. Forsberg, John Huffman, and Andrew Bragdon. The influence of head tracking and stereo on user performance with non-isomorphic 3d rotation. *EGVE Symposium*, 2008.
- M. Krueger, M.-A. Amorim, and M. Ebersbach. Mental rotation and the motor system: Embodiment head over heels. Acta Psychologica, 145, 2014.
- I. Scott MacKenzie and William Buxton. Extending fitts' law to two-dimensional tasks. CHI, 1992.
- 21. I. Scott MacKenzie and Poika Isokoski. Fitts' throughput and the speed-accuracy tradeoff. *CHI*, 2008.
- 22. I. Scott MacKenzie, Abigail Sellen, and William Buxton. A comparison of input devices in elemental pointing and dragging tasks. *ACM*, 1991.

- I. Scott macKenzie and Colin Ware. Lag as a determinant of human performance in interactive systems. INTERCHI, 1993.
- Denis Mottet, Yves Guiard, Thierry Ferrand, and Reinour J. Bootsma. Twohanded performance of rhythmical fitts task by individuals and dyads. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(6), 2001.
- 25. Atsuo Murata. Extending effective target width in fitts' law to a two-dimensional pointing task. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1999.
- 26. Atsuo Murata and Hirokazu Iwase. Extending fitts' law to a three-dimensional pointing task. *Human Movement Science*, 20, 2001.
- Karin Nieuwenhuizen, Jean-Bernard Martens, Lei Liu, and Robert van Liere. Insights from dividing 3d goal-directed movements into meaningful phases. *IEEE Computer Society*, 2009.
- 28. Lawrence M. Parsons. Inability to reason about an object's orientation using an axis and angle of rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995.
- 29. Esben Warming Pedersen and Kasper Hornbæk. An experimental comparison of touch interaction on vertical and horizontal surfaces. *NordiCHI*, 2012.
- Farzan Sasangohar, I. Scott MacKenzie, and Stacey D. Scott. Evaluation of mouse and touch input for a tabletop display using fitts' reciprocal tapping task. *Human Factors and Ergonomics Society*, 2009.
- 31. Christopher Schmandt. Spatial input/display correspondence in a stereoscopic computer graphics workstation. *Computer Graphics*, 17(3), 1983.
- 32. Robert J. Teather, Robert S. Allison, and Wolfgang Stuerzlinger. Evaluating visual/motor co-location in fish-tank virtual reality. 2009.
- 33. Yanqing Wang, Christine L. MacKenzie, and Valerie A. Summers. Object manipulation in virtual environments: Human bias, consistency and individual differences. *CHI*, March 1997.
- 34. Colin Ware and Ravin Balakrishnan. Reaching for objects in vr displays: Lag and frame rate. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 1(4):331–356, 1994.
- 35. Colin Ware and Jeff Rose. Rotating virtual objects with real handles. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 6(2):162–180, June 1999.
- A. T. Welford. Fundamentals of Skill. Methuen's manuals of modern psychology. Methuen, 1968.