H. Reiterer & O. Deussen (Hrsg.): Mensch & Computer 2012
München: Oldenbourg Verlag, 2012, S. 313-322

Eine Variante von Fitts' Gesetz zum Vergleich von 2D- und 3D-Interaktion

Ulrich Bröckl, Andreas Harter, Ana Suzana Skrenković

Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik,
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Zusammenfassung

Dieser Beitrag führt zunächst kurz in Fitts' Gesetz zur Modellierung menschlicher Bewegungszeiten ein. Dieses Gesetz wird dann für die rechnerbasierte Interaktion im 2D- und 3D-Interaktionsraum so verallgemeinert, dass es zum direkten Vergleich dieser Interaktionsformen herangezogen werden kann. Die mit der Verallgemeinerung gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die 3D-Interaktion der 2D-Interaktion mit der Maus bezüglich der Bewegungszeiten leicht unterlegen ist. Dabei muss mit bewertet werden, dass bei der Maus-Interaktion überwiegend mit trainierten Probanden gemessen wurde, während die 3D-Interaktion für fast alle Probanden Neuland war. Insgesamt hat sich die im Beitrag vorgeschlagene 2D-/3D-Verallgemeinerung von Fitts' Gesetz als eine valide Messmethodik zum Vergleich verschieden dimensionaler Interaktion herausgestellt.

1 Einleitung

Nach Jahrzehnten relativen Stillstandes auf dem Markt der Mensch-Maschine-Interaktion (d.h. Fokussierung auf WIMP[1]-Interaktion) haben sich in den letzten Jahren von mehreren Richtungen her neue Interaktionsformen etablieren können. Von Seiten der Smartphones hat mittlerweile die Multi-Touch-Technologie breiten Einzug erhalten. Von Seiten der Computerspiele hat Microsoft mit der Vorstellung und Vermarktung der Microsoft Kinect ein Eingabegerät bereitgestellt, das Einfluss weit über den Spielemarkt hinaus haben dürfte, was auch erklärtes Ziel von Microsoft ist (Shaw 2012). Dieser aufkommenden Heterogenität wohnt die Gefahr inne, dass Grundsätze der Dialoggestaltung, wie etwa die Erwartungskonformität, wieder stärker verletzt werden. Der von (Bright 2011) beschriebene „Touch First"-

[1] Aus dem Englischen: WIMP = Windows, Icons, Menus, and Pointers, die Direktmanipulation in Fenstersystemen unter der Zuhilfenahme von Symbolen, Menüs und der Maus. (Chignell, Waterworth 1991) beschreiben diesen Begriff und seine geschichtliche Entwicklung.

Ansatz von Microsoft, die Gestaltung aller Interaktionsparadigmen an einem Paradigma, „Touch“ also, zu orientieren, hilft hier sicherlich.

Dennoch wäre es wünschenswert, ein einheitliches Rahmenwerk zum Vergleich nahezu jeglicher 2D- und 3D-Interaktion zu haben, um Entscheidungen für ein Interaktionsparadigma auch durch *quantitative* Analysen zu untermauern. Dazu will dieser Artikel einen Beitrag leisten. Zunächst werden die theoretischen und praktischen Grundlagen der durchgeführten Versuche dargestellt, dann die Versuche selbst und am Schluss wird eine Bewertung der Ergebnisse vorgenommen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zur Vereinheitlichung der Nomenklatur zunächst Fitts’ Gesetz und einige Varianten davon vorgestellt. Die Variante dieses Beitrages bedient sich einiger Elemente der Informationstheorie, die ebenfalls kurz dargestellt werden.

2.1 Fitts’ Gesetz

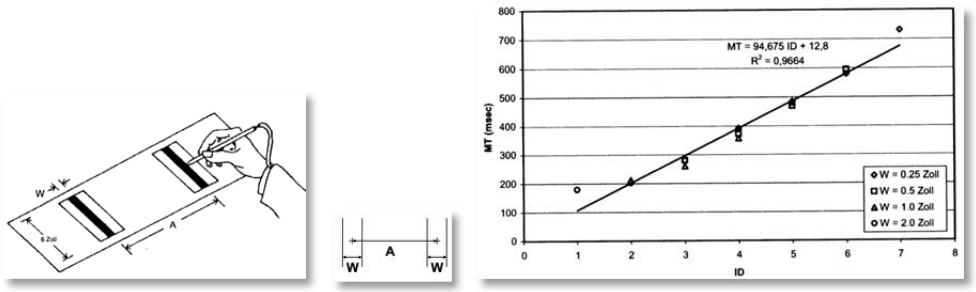

Abbildung 1: Fitts’ Gesetz (Fitts 1954) nach (MacKenzie 1992)

Fitts’ Gesetz (Fitts 1954) dient der Modellierung der Bewegungszeit *MT* (engl. Movement Time). Es wird davon ausgegangen, dass die Bewegungsaufgabe eine gewisse Entfernung *A* überbrückt und das Ziel, das zu treffen ist, eine Breite *W* hat (siehe auch Abbildung 1, Mitte). Daraus wird ein Maß zur Bewertung der Schwierigkeit einer Bewegungsaufgabe definiert (*ID*, engl. Index of Difficulty):

$$ID := ld\left(\frac{2A}{W}\right). \qquad (1)$$

Mit Hilfe des *ID* lässt sich die Bewegungszeit *MT* modellieren:

$$MT := a + b \cdot ID. \qquad (2)$$

Die Konstanten *a, b* werden dabei durch lineare Regression durch zuvor getätigte Experimente bestimmt (siehe Abbildung 1, rechts).

Neben der einfachen Vorhersage der Bewegungszeiten *MT* kann das Modell natürlich auch zur Ex-Ante-Vorhersage verschiedener Interaktionslayouts verwendet werden. Einen Schritt weiter geht (Oel 2002), der Fitts’ Gesetz zur Optimierung der Bedienzeit von mausgesteuerten Anwendungen einsetzt. Der vorliegende Beitrag nutzt Fitts’ Gesetz dahingehend, dass die

verschiedenen Ausprägungen der Regressionskonstanten *a, b* zum Vergleich verschiedener Nutzungskontexte herangezogen werden.

2.1.1 Modifikationen von Fitts' Gesetz

Viele Modifikationen von Fitts' Gesetz[2] adressieren das Problem, dass dessen eindimensionale Formulierung sich einer einfachen Anwendbarkeit bei 2D-Benutzungsschnittstellen verschließt. Beispielsweise ist der zu Zeiten von Fitts' Veröffentlichung pathologische Fall, dass $A << W$ ist, bei grafischen Benutzungsschnittstellen sehr wohl möglich: Die Maus kann sehr nahe, wenn nicht sogar direkt auf dem Ziel stehen, wenn eine neue Interaktion gestartet wird. Dies würde in Definition (1) im Extremfall zur Vorhersage von negativen Bewegungszeiten führen. (MacKenzie 1992) löst dies durch eine am Theorem von Shannon–Hartley angelehnte Neudefinition des *ID*, die auch Eingang in die Norm (DIN EN ISO 9241-9) gefunden hat:

$$ID := ld\left(\frac{A}{W} + 1\right). \qquad (1')$$

Die ursprünglich eindimensionale Formulierung von Fitts' Gesetz wird für den 2D-Fall (siehe Bild rechts) von (MacKenzie, Buxton 1992) so abgewandelt, dass entweder *W'* oder das Minimum *min{W, H}* in Definition (1') für *W* eingesetzt werden. (Accot, Zhai 2003) verallgemeinern diesen Ansatz, indem sie eine gewichtete Norm ansetzen und zu folgender Formulierung der Bewegungszeit gelangen:

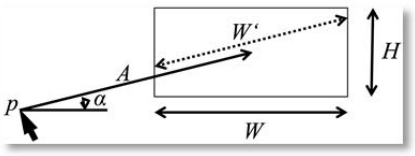

Abbildung 2: 2D-Ziele (nach Accot, Zhai, 2003)

$$MT := a + b \cdot ld\left(\sqrt{\left(\frac{A}{W}\right)^2 + \eta\left(\frac{A}{H}\right)^2 + 1}\right). \qquad (2')$$

(Rohs et al. 2011) verallgemeinern Fitts' Gesetz für Augmented-Reality-Anwendungen durch eine polygonale Modellierung des Ziels und die Hinzunahme der Displaygröße in die Berechnung von *MT*. (Vetter et al. 2011) zeigen, dass der Winkel α in Abbildung 2 die Bewegungszeit *MT* sinusförmig beeinflusst und führen daher diesen Winkel in die Berechnung von *MT* ein. Das Umfahren von Hindernissen modellieren (Vaughan et al. 2010) durch Einführen des nötigen Abstands von der Ideallinie in die Berechnung von *ID*.

Diese Ansätze behindern eine einfache Anwendbarkeit auf gerasterte Aus- und Eingabemedien jedoch oftmals insofern, als dass sie i) mit metrischen Variablen arbeiten[3] und ii) zur Berechnung der Bewegungszeit die Startposition der Maus *p* kennen müssen. i) stellt eine unnötige Hürde dar, wenn man (Guiard 2009) folgt: eine gleichgroße Skalierung von *D* und

---

2 Einen Überblick über die bis 2002 vorhandene Literatur verschafft (MacKenzie 2002). Die hohe Anzahl von Varianten zu Fitts' Gesetz und deren heterogener Einsatz wird in (Drewes 2010) diskutiert.

3 *A, W, H* müssen „mit dem Metermaß" gemessen werden bzw. aus Bildschirmgröße, Bildschirmauflösung und Maus-Parametern individuell berechnet werden.

W bleibt nicht nur in Gleichung (1) ohne Folgen, sondern sie beeinflusst auch – in Grenzen – die Bewegungszeit *MT* nicht. ii) ist insbesondere dann unhandlich, wenn man die Bedienzeit für ein komplettes Layout, etwa einer Eingabemaske mit *n* Klick-Zielen, vorhersagen will, da dann auch Modelle für die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der einzelnen Positionen p_i benötigt werden.

2.1.2 Erweiterungen für die Interaktion im 3D

(Fu et al. 2011) geben in ihrer Arbeit einen schönen Überblick über den derzeitigen Stand der Bestrebungen, Fitts' Gesetz für 3D-Interaktion anwendbar zu machen. Wie bei vielen 2D-Erweiterungen im Abschnitt zuvor wird meist versucht, durch Hinzunahme von z.B. Pfadlängen oder Greifwinkeln die höhere Dimensionalität in die Modelle eingehen zu lassen. Die Autoren bemängeln jedoch die hohe Anzahl von Parametern, die eine Bewertung und den Vergleich der Performanz erschweren und greifen zu einer Definition des *ID* wie in Gleichung (1') oben. Die Ansätze haben wieder den Nachteil, dass *A* und *W* und weitere eingehende Parameter metrische Abstandsmaße sind und die Startpunkte p_i benötigt werden.

2.2 Informationstheorie

Die zur Umformulierung von Fitts' Gesetz benötigten Elemente der Informationstheorie sind recht einfach und z.B. im Lehrbuch (Kaderali 1991) dargestellt. Die Idee der neuen Variante von Fitts' Gesetz ist es nämlich, den Index of Difficulty *ID* in den Definitionen (1) oder (1') durch den aus der Informationstheorie bekannten Begriff des *Informationsgehaltes I* zu ersetzen. Zu dessen Definition gegeben seien *n* Symbole $x_1, ..., x_n$ mit ihren Auftrittswahrscheinlichkeiten $P(x_i)$. Dann ist der Informationsgehalt *I* eines Symbols x_i:

$$I := -ld\big(P(x_i)\big). \qquad (3)$$

Beispiel: Kennt man bei einer Münze (die nie auf dem Rand liegen bleibt) mit zwei gleichwahrscheinlichen Seiten x_1, x_2 das Ergebnis eines Wurfexperiments, so hat man einen Informationsgehalt von $I = -ld(P(x_i)) = -ld(0{,}5) = 1\ bit$ erlangt. Eigenschaften von *I* sind:

$$I(x) \geq 0, \qquad (4)$$

$$I(x_i) > I\big(x_j\big) \;\Leftrightarrow\; P(x_i) < P\big(x_j\big), \qquad (5)$$

$$I(x_i) = 0 \;\Leftrightarrow\; P(x_i) = 1, \qquad (6)$$

$$I(x_i) = \infty \;\Leftrightarrow\; P(x_i) = 0\,. \qquad (7)$$

Einige Interpretationen dieser Gleichungen angewandt auf Fitts' Gesetz sind in Abschnitt 3.3.1 zu finden.

3 Verallgemeinerung von Fitts' Gesetz für beliebig dimensionale Interaktionsräume

Obwohl wie dargestellt Fitts' Gesetz oft variiert wird, bleibt der Kern, so auch bei der in dieser Arbeit vorgestellten Variante, derselbe. Die Bewegungszeit *MT* wird per linearer Re-

gression mit dem Index of Difficulty *ID* korreliert. Die Regressionskonstanten *a*, *b* können dann zur Vorberechnung von Bewegungszeiten oder zur Optimierung herangezogen werden. Ändert man den Nutzungskontext zum Beispiel durch den Einsatz eines neuen Feedbacks am Bildschirm, so können neue Regressionskonstanten *a'*, *b'* ermittelt werden und so bestimmt werden, ob und wenn ja, wie viel Performanzvorteil das neue Feedback hergibt. Will man jedoch 2D- mit 3D-Interaktion vergleichen, fehlt bisher ein durchgängiger Ansatz zum Vergleich. Dieser wird in der vorliegenden Arbeit dadurch gegeben, dass die ursprüngliche Definition des *ID* von Fitts als Informationsgehalt eines eindimensionalen Ereignisses durch den Informationsgehalt *I* von Ereignissen beliebiger Dimension ersetzt wird:

$$MT = a + b \cdot I(X). \qquad (8)$$

X ist dabei das Zielobjekt, das im 2D angeklickt oder im 3D angefasst werden soll. Was also noch benötigt wird, ist die Wahrscheinlichkeit *P(X)*, um *I(X)* gemäß Definition (3) zu berechnen.

3.1 Wahrscheinlichkeit von Interaktionsobjekten im 2D

Bei 2D-Anwendungen am Bildschirm lässt sich die Wahrscheinlichkeit *P(X)* so definieren:

$$P(X) := \frac{Anzahl\ der\ Pixel\ von\ X}{Anzahl\ aller\ Pixel}. \qquad (9)$$

Damit kann man also für beliebig geformte Zielobjekte *X* auf dem Bildschirm ohne jegliche metrische Messungen direkt eine Wahrscheinlichkeit und somit mit (3) einen Informationsgehalt und mit (8) ein Modell für die Bewegungszeit angeben.

Im Bild rechts ergibt sich also die Wahrscheinlichkeit des „Hilfethemen"-Menüs m_1 zu:

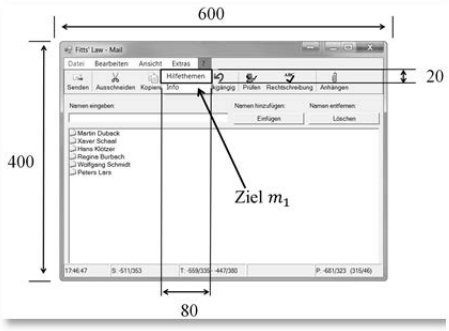

Abbildung 3: Mail-Client mit Vermaßungen eines Menüs

$P(m_1) = \frac{20 \cdot 80}{400 \cdot 600} = 0{,}0067$ und somit ein Informationsgehalt von

$I(m_1) = -ld(0{,}0067) = 7{,}222\ bit.$

3.2 Wahrscheinlichkeit von Interaktionsobjekten im 3D

Bei 3D-Anwendungen, z.B. mit dem Kinect-Sensor, lässt sich die Wahrscheinlichkeit *P(X)* so definieren:

$$P(X) := \frac{Voxel\ von\ X}{Anzahl\ aller\ Voxel}. \qquad (10)$$

Voxel (zusammengesetzt aus volumetric und pixel) sind dabei einzelne Rasterelemente des durch den Kinect-Sensor aufgespannten 3D-Rasters.

Im Bild rechts ergibt sich also die Wahrscheinlichkeit des Ziels m_2 des in den vergleichenden Experimenten eingesetzten Spiels zu:

$P(m_2) = \frac{100 \cdot 80 \cdot 90}{600 \cdot 400 \cdot 350} = 0{,}0086$ und einem Informationsgehalt von

$I(m_2) = -ld(0{,}0086) = 6{,}861\ bit.$

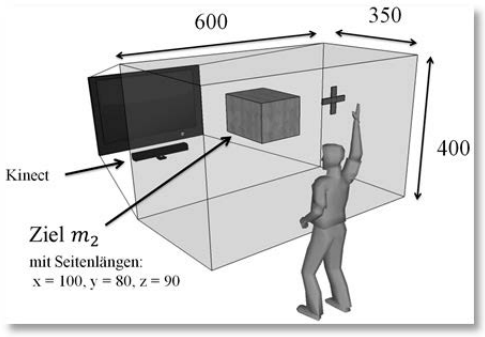

Abbildung 4: Kinect-Client mit Interaktionsraum

3.3 Eigenschaften des informationstheoretischen Ansatzes

3.3.1 Interpretation des Informationsgehaltes von menschlicher Interaktion

Setzt man für Zielobjekte *X* deren Informationsgehalt *I(X)* gemäß Definition (3) an, gewinnen die Gleichungen (4) – (7) die im Folgenden diskutierten Bedeutungen. Dass gemäß (4) immer $I(X) \geq 0$ ist, bedeutet für die Bewegungszeit *MT*, dass diese niemals negativ werden kann. Damit ist ein Defizit der ursprünglichen Formulierung von Fitts' Gesetz wie beim Ansatz in (MacKenzie 1992) ebenfalls gelöst.

Gleichung (5) kann man so interpretieren, dass große Zielobjekte große Wahrscheinlichkeiten haben und daher kleine Informationsgehalte und kleine Bewegungszeiten. Kleine Zielobjekte haben umgekehrt große Bewegungszeiten. Auch dies spiegelt die Realität gut wider. Nach Gleichung (6) hat ein Ziel, das den ganzen Bildschirm umfasst, eine Wahrscheinlichkeit von 1 und somit eine Bewegungszeit $MT = a$, die minimal ist. Nach Gleichung (7) hat ein Ziel mit 0 Pixeln eine Wahrscheinlichkeit von 0 und eine Bewegungszeit von unendlich – für ein Ziel, das nicht auf dem Bildschirm ist, dauert es ewig, bis es angeklickt ist.

Man kann also schon hier aufgrund rein theoretischer Überlegungen feststellen, dass der Ansatz, den Index of Difficulty mit dem Informationsgehalt gleichzusetzen, bisher vorhandene Paradoxien beseitigt und die üblichen Intuitionen („Kleine Schaltfläche dauert länger.") gut widerspiegelt. Problematisch wird der Ansatz jedoch, wenn die untersuchten Zielobjekte von der heute in GUIs üblichen Form stark abweichen und zum Beispiel sehr „dünne, lange" Schaltflächen modelliert werden sollen. Einen Ansatz, dieses und weitere Probleme anzugehen, beschreibt der folgende Absatz.

3.3.2 Markov-Quellen höherer Ordnung

Betrachtet man das Diagramm in Abbildung 6 rechts (hellgraue Quadrate), das gemäß Gleichung (8) ermittelt wurde, fällt auf, dass die Streuung vergleichsweise hoch ist. Dies liegt daran, dass wie erwähnt kein Wissen vom Ausgangspunkt der Interaktion in Gleichung (8)

eingeht, sondern vielmehr davon ausgegangen wird, dass dieser Ausgangspunkt gleichwahrscheinlich beliebig irgendwo auf dem Bildschirm ist. Dies hat bei Ex-Ante-Vorhersagen aber auch einen entscheidenden Vorteil: Soll die Gesamtbedienzeit eines Layouts vorhergesagt werden, genügt es, die Bedienzeiten der einzelnen Bedienelemente aufzuaddieren und so eine Vorhersage für die Gesamtbedienzeit zu erhalten. Eine Modellierung der Startpunkte der Interaktion und deren jeweiliger Wahrscheinlichkeiten entfällt (nicht jeder Benutzer klickt schließlich die Bedienelemente in derselben Reihenfolge an). Dadurch ist der Ansatz auch recht einfach zum Vergleich von Interaktionen in verschiedendimensionalen Räumen einsetzbar. Auch ist die Annahme der Gleichverteilung deshalb wohl zunehmend richtig, da Multi-Touch-Interaktion mit vielen Fingern und 3D-Interaktion mit der Kinect mit mehreren Händen mehrerer Anwender die Startpositionen eher als zufallsverteilt vorgeben.

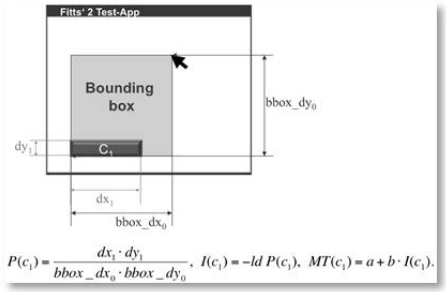

Abbildung 5: Bounding-Box Ansatz zur Definition bedingter Wahrscheinlichkeiten

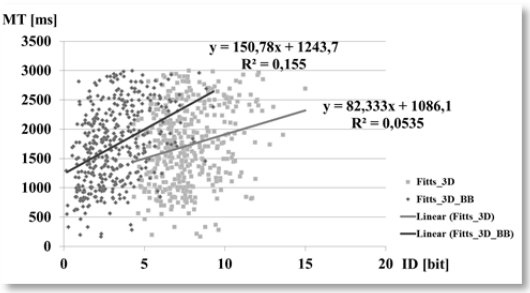

Abbildung 6: Bewertung von Interaktion mit (links, dunkelgraue Rauten) und ohne (rechts, hellgraue Quadrate) bedingte Wahrscheinlichkeiten (Bounding-Boxes)

Wenn jedoch zum Beispiel für den Vergleich von verschiedenen Feedbacks bei der Interaktion eine höhere *MT/ID*-Korrelation gewünscht wird, bietet die Informationstheorie wieder einen Lösungsweg an. Dort spricht man von sogenannten *Markov-Quellen k-ter Ordnung*, wenn die Wahrscheinlichkeit *k* Schritte in die Vergangenheit zurück betrachtet wird. Der Informationsgehalt wird dann aus *bedingten* Wahrscheinlichkeiten berechnet. So zum Beispiel beträgt die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass im Deutschen nach den Buchstaben „sc" ein „h" erscheint: $P(h|sc)$ = 0,98 (Kaderali 1991) und der Informationsgehalt ist folglich 0,029 bit. Zum Vergleich: Bei einer Markov-Quelle 0-ter Ordnung (kein Gedächtnis) wären $P(h)$ = 0,0406 und somit der Informationsgehalt 4,62 bit.

Überträgt man diesen Ansatz für $k = 1$ auf Interaktionsaufgaben, so kann nicht mehr die Grundgesamtheit aller Pixel in Definition (9) (bzw. Voxel in Definition (10)) im Nenner stehen, sondern man muss den Startort der Interaktion mit einbeziehen. Um dies zu tun, setzt man, wie in Abbildung 5 dargestellt, das Volumen der Bounding-Box, die durch den Startpunkt (d.h. die Mausposition) und das Bewegungsziel C_1 aufgespannt wird, in den Nenner ein. Abbildung 6 stellt links (dunkelgraue Rauten) die Ergebnisse dieses Ansatzes vor. Die Korrelation ist besser, die Informationsgehalte sind – wegen der verkleinerten Grundgesamtheiten erwartungsgemäß – geringer. Im Rest des Beitrages wird diese Variante gewählt (also der Einsatz von bedingten Wahrscheinlichkeiten beziehungsweise Bounding-Boxes).

4 Plausibilisierung der Ansätze

In diesem Kapitel wird die vorgestellte Variante von Fitts' Gesetz dazu eingesetzt, 2D- und 3D-Interaktion miteinander zu vergleichen.

4.1 2D-Experimente

Die Probanden haben mit der Maus ein Windows-Programm wie in Abbildung 3 bedient, bei dem Ziele mit der Maus anzuklicken waren. Die Probanden waren Informatikstudierende im Grundstudium, also interaktionstechnisch eher versierte Personen. Die Experimente wurden seit 2004 mit 20-30 Personen einmal je Halbjahr durchgeführt.

4.2 3D-Experimente

Für die Erfassung von Interaktionsdaten im dreidimensionalen Raum wurde die Microsoft Kinect eingesetzt, eine mit einer Tiefensensor-Kamera ausgestattete Hardware, welche die Erkennung von Körperbewegungen und Handgesten erlaubt.

Um eine größere Anzahl von Probanden für 3D-Tests zu gewinnen, wurde auf dem World Usability Day 2011 der in Abbildung 4 skizzierte Kinect-Client mit 54 Probanden betrieben (Abbildung 7). Für die Studie wurde ein Spiel implementiert, bei dem die Probanden zehn 3D-Objekte (d.h. verschieden große Quader) möglichst schnell mit der Hand erreichen sollten. Das Spiel wurde mit einem 2D-Monitor visualisiert. Weitere Einzelheiten sind in (Skrenković et al. 2012) beschrieben.

Abbildung 7: Versuchsaufbau

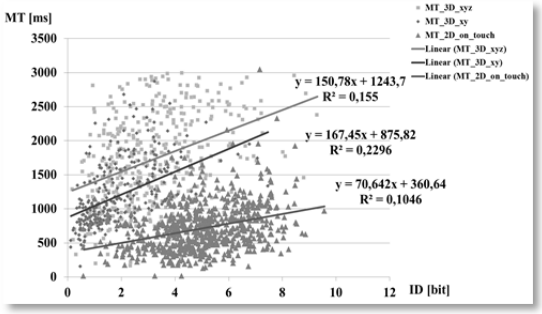

Abbildung 8: Performanz der im 3D interagierenden Probanden

4.3 Vergleich 2D/3D

In Abbildung 8 werden die erzielten Ergebnisse (MT_3D_xyz) zum Vergleich mit den Ergebnissen der mausbasierten Interaktion (MT_2D_on_touch) dargestellt. Dass den Probanden insbesondere die Kontrolle der Tiefe (Z-Achse) mangels einer 3D-Ausgabe und wegen nur schwachem Pseudo-3D-Feedback wie Schatten an den Wänden schwerfiel[4], zeigt eine

[4] Nur 33% haben dieses Feedback bewusst wahrgenommen.

Auswertung der selben Interaktionen, die sich auf die XY-Ebene beschränkt (MT_3D_xy). Hier zeigen sich wesentlich bessere Werte, die denen der mausbasierten Interaktion näher kommen.

5 Diskussion und Ausblick

Zunächst ist als wichtiges Ergebnis festzuhalten, dass die in diesem Beitrag vorgestellte informationstheoretische Modifikation von Fitts' Gesetz der 2D-Interaktion und der 3D-Interaktion ein einheitliches, quantifizierbares Modell zur Bewertung und Vorhersage der Bewegungszeiten zur Verfügung stellt. Durch eine Orientierung an den Markov-Quellen der Informationstheorie sind sowohl zustandsbehaftete als auch zustandsfreie Modelle möglich, die jeweils ihre oben genannten eigenen Vor- und Nachteile haben.

Die Ergebnisse des 2D-/3D-Vergleiches zeigen, dass die 3D-Interaktion der 2D-Interaktion mit der Maus bezüglich der Bewegungszeiten zunächst unterlegen ist. Dabei muss mit bewertet werden, dass bei der Maus-Interaktion mit trainierten Probanden gemessen wurde, während die 3D-Interaktion für fast alle Probanden Neuland war. Besondere Mühe bereitete den Probanden die Kontrolle der Z-Koordinate (Interaktion in die Tiefe). Wenn diese ausgeblendet wird, wie in Abbildung 8, kommen sich die 2D-/3D-Ergebnisse schon näher. Die Autoren gehen davon aus, dass ein besseres Training der Probanden und ein besseres 3D-Feedback gleiche, wenn nicht sogar bessere Ergebnisse erzielen werden.

Zukünftige Arbeiten werden sich daher zunächst einem verbesserten 3D-Feedback und dessen Bewertung widmen. Auch der Vergleich mit (Multi-) Touch-basierter Interaktion ist von Nöten. Die Kinect bietet weit mehr als die einfache Kontrolle lediglich einer Handposition, sie ist vielmehr in der Lage, das komplette menschliche Skelett zu verfolgen. Somit bieten sich hier interessante weitere Forschungsthemen, die zurzeit untersucht werden. Dadurch, dass die in diesem Beitrag vorgestellte Vergleichsmethodik auf beliebige Dimensionen erweiterbar ist[5], können Interaktionsaufgaben modelliert und verglichen werden, bei denen Anwender nicht nur die kartesische 3D-Position kontrollieren müssen, sondern auch noch die drei Freiheitsgrade der Orientierung, also insgesamt sechs Dimensionen.

Danksagung

Wir danken den Gutachtern für die vielen wertvollen Hinweise und Anregungen.

Literaturverzeichnis

Accot, J., Zhai, S. (2003). *Refining Fitts' law models for bivariate pointing.* Proceedings of CHI 2003, 193-200.

Bright, P. (2011). *Microsoft gives the first official look of Windows 8 touch interface*. arstechnica.com/information-technology/2011/06/microsoft-gives-the-first-official-look-of-windows-8-touch-interface/

[5] Die Aufgabe besteht dabei lediglich darin, N-dimensionale Aufrasterungen für den gesamten Interaktionsraum und die Ziele im Interaktionsraum zu definieren, um die Wahrscheinlichkeiten wie in Definition (9) zu erhalten.

Chignell, M., Waterworth, J. (1991). *WIMPS and NERDS: An Extended View of the User Interface*. SIGCHI Bulletin, 23(2), 15-21.

DIN EN ISO 9241-9 (2002). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 9: Anforderungen an Eingabegeräte - außer Tastaturen.*

Drewes, H. (2010). *Only One Fitts' Law Formula – Please!* CHI EA '10 Proceedings, 2813-2822.

Fitts, P. (1954). *The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement.* Journal of Experimental Psychology, vol. 47, 381-391.

Fu, M., Hershberger, A., Sano, K., Çavusoglu, M. (2011). *Effect of visuo-haptic co-location on 3D Fitts' task performance.* IROS 2011, 3460-3467.

Guiard, Y. (2009). *The Problem of Consistency in the Design of Fitts' Law Experiments: Consider either Target Distance and Width or Movement Form and Scale.* CHI '09, 1809-1818.

Kaderali, F. (1991). *Digitale Kommunikationstechnik, Bd.1, Netze, Dienste, Informationstheorie, Codierung.* Vieweg Verlagsgesellschaft.

MacKenzie, I., Buxton, W. (1992). *Extending Fitts' law to two-dimensional tasks.* CHI 1992, 219-226.

MacKenzie, I. (1992). *Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction.* Human-Computer Interaction, 7, 91-139.

MacKenzie, I. (2002). *Bibliography of Fitts' Law Research.* www.yorku.ca/mack/RN-Fitts_bib.htm

Oel, P. (2002). *Optimierung der Bedienzeit von mausgesteuerten grafischen Mensch-Maschine-Schnittstellen*. Shaker Verlag, Aachen. 2002. ISBN 3-8322-0531-4.

Rohs, M., Oulasvirta, A., Suomalainen, T. (2011). Interaction with Magic Lenses: Real-World Validation of a Fitts' Law Model. CHI '11, 2725-2728.

Shaw, F. (2012). *Microsoft 2012 CES Keynote Recap.* blogs.technet.com/b/microsoft_blog/archive/2012/01/09/that-s-a-wrap-microsoft-2012-ces-keynote-recap.aspx

Skrenković, A., Harter, A., Bröckl, U. (2012). *World Usability Day 2011 in Stuttgart.* Magazin der Hochschule Karlsruhe, ISSN-1863-821X, Ausgabe 65, 39.

Vaughan, J, Barany, D., Sali, A., Jax, S., Rosenbaum, D. (2010). *Extending Fitts' Law to three-dimensional obstacle-avoidance movements: support for the posture-based motion planning model.* Exp Brain Res 207,133-138.

Vetter, S., Bützler, J., Jochems, N., Schlick, C. (2011). *Fitts' law in bivariate pointing on large touch screens: age-differentiated analysis of motion angle effects on movement times and error rates.* UAHCI'11: users diversity - Volume Part II, 620-628.

Kontaktinformationen

Ulrich Bröckl, Andreas Harter, Ana Suzana Skrenković
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
Ulrich.Broeckl@hs-karlsruhe.de