Auf dem Weg zur Blickmaus: Die Beeinflussung der Fixationsdauer durch kognitive und kommunikative Aufgaben

Boris Velichkovsky[1], Andreas Sprenger[1] und Marc Pomplun[2]

[1]Technische Universität Dresden, [2]Universität Bielefeld

Zusammenfassung

Die Entwicklung eines subjektzentrierten Paradigmas der Mensch-Computer-Interaktion benötigt umfangreiche Erkenntnisse über die Mechanismen der Informationsverarbeitung des Menschen. Neue psychologische und technologische Entwicklungen ermöglichen es nicht nur, wie bis jetzt, die statistischen Charakteristiken von Menschen einzubeziehen, sondern auch Systeme zu bauen, die für die aktuellen Foci der Aufmerksamkeit und die Absichten miteinander interagierender Personen sensibel sind. Dazu können moderne Methoden der Augenbewegungsregistrierung einen wertvollen Beitrag leisten. Die wichtigsten Schritte in diese Richtung sind mit der Benutzung von Augenbewegungsdaten als ein Ausgabemedium, für blickabhängige Bildbearbeitung und für die Disambiguierung verbaler wie auch nichtverbaler Informationen verbunden. In diesem Beitrag berichten wir über experimentelle Untersuchungen, die die Beeinflussung der Fixationsdauer durch eine Reihe von kognitiven und kommunikativen Aufgaben genau analysieren können. Speziell geht es um Suchaufgaben, perzeptive, semantische, metakognitive (selbst-referentielle) und deiktische kommunikative Aufgaben. Die Ergebnisse sprechen für eine selektive Beeinflussung von verschiedenen Segmenten der Fixationsdauer durch diese Aufgaben, wobei explizite kommunikative Anforderungen die Anzahl von besonders langen Fixationen (>500 ms) in einer signifikanten Weise erhöhen. Das öffnet den Weg zu einer gezielten Benutzung verschiedener Gruppen der Fixationen bei der Interaktion mit Computern. Die Frage der Trainierbarkeit der menschlichen Okulomotorik im Hinblick auf die kommunikativen Leistungen wird zusätzlich behandelt.

Einleitung

Wichtige technologische Veränderungen reifen oft unauffällig in den interdisziplinären Nebenfeldern. Neue Forschungsmethoden aus den Neuro- und Kognitionswissenschaften können in der nächsten Zukunft solche Veränderungen im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion auslösen. Diese Veränderungen ermöglichen die Entwicklung technischer Systeme, die für momentane Leistungsfähigkeiten und Intentionen des Nutzers sensibel sind. Zum erstenmal zeigen die Methoden der Augenbewegungsmessung und bildgebende Verfahren aus der Neurophysiologie (Neuroimaging) menschliche kognitive Prozesse anschaulich auf. Insbesondere die Blickregistrierung findet zunehmend ihre Anwendung für alternative Varianten der Interaktion mit Computern [8, 12, 25] und wird in den Fachliteratur als eine der wichtigsten mittelfristigen Perspektiven der Entwicklung auf diesem Feld geschätzt [13]. In unserem Beitrag wollen wir einige für die Benutzung der Augenbewegungsdaten notwendige Fragen stellen und experimentell beantworten.

Augenbewegungsmessung und Mensch-Computer-Interaktion

Moderne Eyetracking Systeme bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bei relativ geringer Beanspruchung des Nutzers – sie arbeiten zunehmend berührungslos, schnell und mit hoher Genauigkeit. Frühere Methoden waren ausschließlich für Laboruntersuchungen konzipiert und mit starken Einschränkungen für die Probanden verbunden (wie die

Kopffixierung mit Beißbrett oder eine Rekalibrierung nach jedem Lidschlag - siehe [29]). Die sprunghafte Entwicklung der Computertechnologie hat dazu geführt, daß videobasierte Systeme vermehrt eingesetzt werden. Diese Systeme benutzen Infrarot-Kameras und bestimmen aus dem Bild der Pupille und teilweise dem Cornealreflex einer Lichtquelle den Blickort. Je nach Anwendungszweck werden derzeit verschiedene Systeme eingesetzt, um die Vorteile entsprechend zu nutzen. So verlangen berührungslos arbeitende Systeme vom Nutzer außer einer kurzen Kalibrierphase nur eine relativ konstante Sitzposition, wobei Kopfbewegungen meist zugelassen sind. Die Genauigkeit der Systeme liegt unter 0,5 Winkelgrad, der Blickort bleibt über die gesamte Meßperiode stabil. Nachteilig wirkt sich aber die relativ geringe zeitliche Auflösung von 50 bzw. 60 Hz auf die Erkennung von Sakkaden und kurzen Fixationen aus [21, 26].

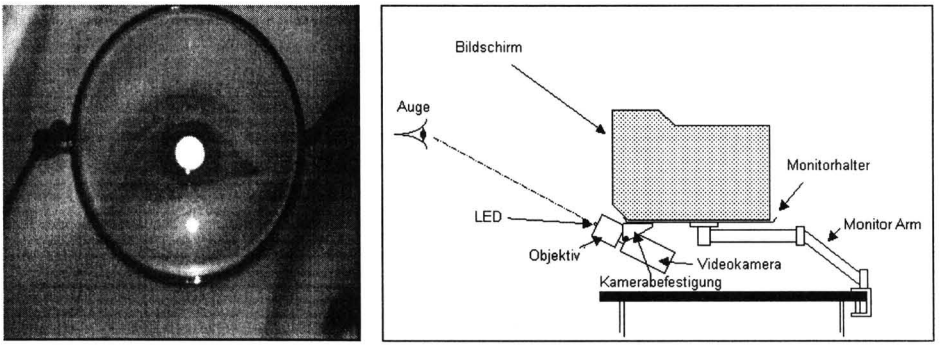

Abb. 1: Menschliches Auge unter Infrarotbeleuchtung einer Registrierungskamera. Für die Blickorterfassung wird die Pupillenfläche und der darunter liegende Cornealreflex benutzt. Störreflexe, wie durch das Brillenglas, werden kompensiert. Rechts: Aufbau eines berührungslos arbeitenden Systems am Arbeitsplatz.

Eine weitere Gruppe von Eyetracking-Systemen verwendet Infrarot-Miniaturkameras, die an einem Kopfgestell befestigt sind. Solche Systeme erlauben deutlich höhere Abtastraten bis zu 600 Hz bei 0,25 Winkelgrad Meßgenauigkeit [20]. Auch hier sind Kopfbewegungen – teilweise auch Körperbewegungen im Raum – zulässig. Probanden bemerken lediglich das sehr leichte Kopfgestell, das Gesichtsfeld ist überwiegend nicht eingeschränkt. Die Verwendung der Blickortinformation für kommunikative Aufgaben erfordert Systeme, die eine leistungsfähige Datenübertragung aufweisen. Neueste Systeme kommunizieren per TCP/IP, so daß die Blickortdaten auch über große Distanzen per Internet transferiert werden können [25].

Der räumlichen Auflösungsmöglichkeit eines Meßsystems kommt eine besonders große Bedeutung zu. Das foveale Sehfeld ist zwar im Mittel 2 Winkelgrad groß, die Menschen können jedoch in der Regel visuell zwei Punkte im Abstand von nur einer Bogenminute unterscheiden. Bei der Anwendung von Augenbewegungen in der Mensch-Computer-Interaktion hat sich eine Meßgenauigkeit von mindestens 0,5 Winkelgrad als sinnvoll herausgestellt. Neuronale Netze können dabei den Meßfehler der Eyetracking-Systeme um bis zu 70% reduzieren [1, 16]. Durch eine Blickortbestimmung bekommen wir auch Hinweise über die Verteilung der Aufmerksamkeit. In der Tat ist die Blickrichtung der einzige relativ zuverlässige (obwohl, nicht ideale - [9, 11]) Hinweis auf den Fokusort der visuellen Aufmerksamkeit. Einzelne Parameter der Augenbewegungen bieten weiterhin Aufschluß über

kognitive Verarbeitungsprozesse und emotionale Zustände. Je nach Meßsystem liegen verschiedene Parameter zur Auswertung vor. Beispielhaft seien hier die Lidschlußaktivität, Pupillendurchmesser sowie die besonders interessanten Parameter der Blickrichtung und der Fixationsdauer erwähnt.

Es ergibt sich eine Reihe möglicher Anwendungen. Die erste und naheliegendste Anwendung ist die der „Blickmaus". Das Hauptanwendungsgebiet ist in dem Bereich, wo die feingesteuerte Benutzung von Händen unmöglich ist. Beispielsweise können körperbehinderte oder ältere Menschen, die weder die Extremitäten noch die Sprache benutzen können, mithilfe dieses Systems mit der Umwelt kommunizieren. Augenbewegungsdaten können zur Steuerung verschiedener elektronischer Systeme eingesetzt werden, so z.B. e-mail, Fax, Telefon, Videophon und Sprachgeneratoren.

Ein weiterer Ansatz zur blickortgesteuerten Interaktion verfolgt weniger die Idee, Augenbewegungen als Ersatz für die Computermaus zu benutzen. Vielmehr werden die Rohdaten auf einer semantisch höheren Ebene interpretiert und in einer neuen Form von Multimedia-Anwendung ohne explizite Befehlseingabe seitens des Menschen benutzt. Dabei wird kontinuierlich die Zuwendung der Aufmerksamkeit zu einzelnen Objekten gemessen (z.B. [12, 21]). Als Bezeichnung für dieses „noncommand" Interaktionsprinzip wurde der Begriff „Interest and Emotion Sensitive Media" [6] vorgeschlagen. Mit anderen Worten, die Möglichkeit der Augenbewegungsmessung ermöglicht eine quasi-passive Beeinflussung von elektronischen Medien. Dies läßt sich erreichen durch Messung

- des Interessensschwerpunktes durch Identifizierung von Aufmerksamkeitsbereichen in komplexen Bildern,
- von emotionalen Reaktionen, die sich durch die Auswertung von Lidschlägen und Pupillendurchmesser zeigt (siehe [8, 21, 23]).

Einige frühere Versuche in diese Richtung waren aber wenig erfolgreich, da sie den Unterschied zwischen Augenbewegungen und verschieden Aufmerksamkeitsformen nicht beachteten. Jacobs [12] nannte treffend die spezifische Schwierigkeit das "Midas touch problem": Wenn alle Augenbewegungen unmittelbare Konsequenzen für die Arbeit des Computers hätten, wäre jede Interaktion schlicht unmöglich. Offensichtlich sollen Fixationen für diese Anwendungen mit zeitlichen Filtern in expliziten Bereichen der Fixationsdauer und/oder Fixationsgruppen eingeordnet werden. Moderne Systeme dieser Art sind mit Einführung zeitlicher Filtern im Bereich von 500 ms verbunden, was als eine empirisch gefundene Startvariable eingeschätzt werden kann (siehe z.B.[20]). Wie begründet ist diese Wahl und was bedeuten verschiedene Segmente der Fixationsdauer bei menschlichen Augenbewegungen?

Das vorläufige Modell der visuellen Informationsverarbeitung

Die Beantwortung dieser Fragen setzt voraus, daß wir eine Klassifikation möglicher Aufgaben für das menschliche visuelle System und die Okulomotorik aufstellen und den Einfluß dieser Aufgaben auf Parameter der Augenbewegungen überprüfen. In der letzten Zeit hat die Entdeckung von sogenannten *Expreß-Sakkaden* [7] das allgemeine Interesse an Augenbewegungen geweckt. Diese Bewegungen haben eine außergewöhnlich kurze Latenz von etwa 100 ms, die mit Abstand kürzeste Latenz unter allen menschlichen Bewegungen überhaupt. Die Expreß-Sakkaden sind als okulomotorische Komponenten der Orientierungsreaktion zu interpretieren: Sie sind gewissermaßen immer von der Außenwelt reflexartig

erzwungen und widersetzen sich Versuchen der bewußten Kontrolle. Ihre potentielle Benutzung für die Interaktion mit Computern ist deshalb mehr als fraglich.

Eine Auflistung der mehr zentral-gesteuerten Aufgaben ist zur Zeit hauptsächlich auf Basis des gesunden Menschenverstands möglich (siehe aber [3, 5, 22]). Jede relevante Portion der Information soll zuerst gefunden werden. Die bedeutenste Funktion der Augenbewegung ist die Realisierung von solchen *Suchaktivitäten*, die Sakaden aber auch mit anderen motorischen Aktivitäten (Kopf- und Torsodrehung, Lokomotionen) vereinigen. Wenn ein potentiell relevantes Objekt oder Merkmal gefunden ist, soll es natürlich perzeptiv beschrieben werden. Solche perzeptive *Identifikation* ohne Augenbewegungen ist kaum möglich (obwohl diese Bewegungen höchstwahrscheinlich von einem anderen Typ als Suchsakkaden sind). Nach der perzeptiven Identifikation oder vielleicht parallel mit deren letzter Phase kann die Information *semantisch kategorisiert* werden. Danach (oder wiederum parallel damit) findet für einige Fragmente der Information auch meta-kognitive, selbst-referentielle Bearbeitung statt. Diese Einschätzung kann auch aus der Perspektive von anderen Menschen passieren, da wir soetwas wie die „Theorie des Geistes" (Vorstellungen über Vorstellungen von anderen Menschen über dieselben Sachverhalte) haben [23]. Nur dann ist das Wissen für eine etwaige *Kommunikation* vorbereitet. Daß die Augenbewegungen auch bei der Kommunikation eine wichtige Rolle spielen, wurde schon vor mehr als 100 Jahren von Ewald Hering [10] betont, blieb aber bis heute wenig erforscht.

In einer Reihe zum Teil noch laufender Experimente wurde an der Universität Bielefeld und an der TU Dresden ein Versuch unternommen, die Parameter der Augenbewegungen bei den oben erwähnten Aufgaben zu untersuchen.

Augenbewegungen in Suchaufgaben

Ein typisches Muster der Suchsakkaden ist in der Abbildung 2 dargestellt [24, 17]. Die Aufgabe besteht in dem Auffinden eines Unterschiedes zwischen dem linken und rechten Teil des Bildes der in Form und in Farbe variierten Objekte. Man kann sehr deutlich hochamplitudige Augenbewegungen sehen, die skandierend große Flächen mehr oder weniger systematisch abtasten und zwar in der Art und Weise, daß eine unmittelbare Wiederholung des „Besuches" von denselben Objekten bzw. Objektgruppen extrem unwahrscheinlich ist. Der neurophysiologische Mechanismus im Hintergrund dieser Variante des „travelling salesman problem" ist der sogenannte IOR-Effekt (Inhibition of return), wobei unmittelbar nach einer Fixation (anscheinend nur im Suchmodus) alle Sakkaden zur selben Lokation gehemmt werden [11].

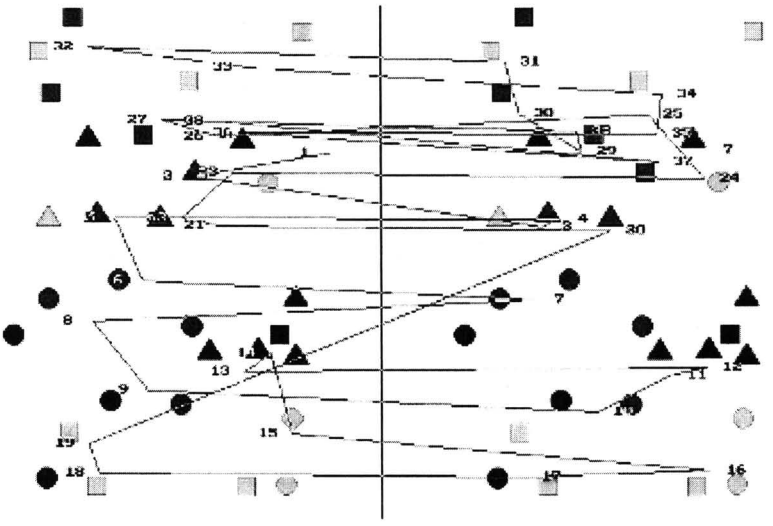

Abb.2: Ein typisches Muster der sakkadischen Augenbewegungen bei Suchaufgaben

Die Fixationsdauer von Suchsakkaden in solchen Experimenten liegt etwa zwischen 120 und 250 ms, signifikant abhängig von der Komplexität des betrachteten Bildausschnitts. Die Zeiten können sich in der Umgebung der Zielobjekte, die den gesuchten Unterschied aufweisen, vergrößern, was gewöhnlich kurz vor der Antwort geschieht. Hier sind aber nicht mehr Suchsakkaden, sondern okulomotorische Komponenten von relativ höheren Prozessen aktiv. Auf dieser letzten Stufe des Suchvoganges treten nun durchaus auch wiederholte Fixationen in derselben Region auf. Für die mögliche Anwendung der Fixationsortdaten bedeuten diese Erkenntnisse, daß auch das Segment der Fixationsdauer unmittelbar über der Spannweite der „Expreß-Fixationen", bis mindestens 250 ms, im regelmäßigen Betrieb für die Blickmausinitiation gesperrt bleiben sollte.

Verarbeitungstiefe und Fixationsdauer

Wenn eine potentiell wichtige Information im visuellen Umfeld gefunden ist, kann sie in verschiedenen „Tiefen" bearbeitet werden: Man bleibt sozusagen entweder auf der Oberfläche, wobei nur physikalische Merkmale der Objekte kodiert sind, oder man versucht auch semantische Beziehungen zu rekonstruieren. Die etwaige Verarbeitungstiefe ist eine Funktion der Situation, der Aufgabe sowie der Fertigkeiten (und Fähigkeiten) des Menschen. In der Kognitionspsychologie bilden die Untersuchungen der Verarbeitungstiefe ein selbständiges Ressort, wobei die meisten Daten mindestens über perzeptive, semantische und selbst-referenzielle Stufen der Verarbeitung sprechen [3, 24]. Mit weitgehend ähnlichen Ergebnissen sind aus dieser Perspektive die Prozesse der Bearbeitung der verbalen und nichtverbalen Informationen untersucht worden. Einige Beweise sprechen dafür, daß auch Parameter der Augenbewegungen eine deutliche Korrelation mit der Verarbeitungstiefe

aufzeigen. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel des Materials aus einem von unserer letzten Experimente [26], wo durch die variable Reduzierung der sensorischen Vorlage (gezeigt sind nur 3 Stufen) die Schwerigkeit der Bearbeitung kontrolliert wurde. Die Probanden sollten solche Bilder auf dem perzeptiven, semantischen oder metakognitiven (selbst-referentiellen) Niveau bearbeiten.

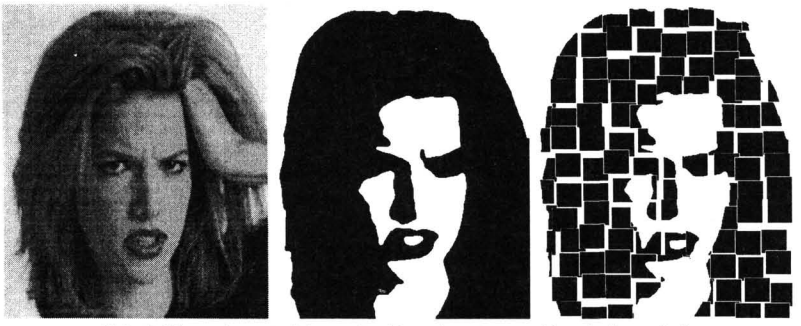

Abb. 3: Versuchsmaterial aus den Experimenten zur Verarbeitungstiefe

Bei der Betrachtung der Augenbewegungsdaten begrenzen wir uns auf eine Analyse der Fixationsdauer. In der Abbildung 4 sind die Verteilungen der Fixationsdauer der mehr als 27.000 Sakkaden von insgesamt fast 50 Probanden für jeweilige Verarbeitungstiefe dargestellt.

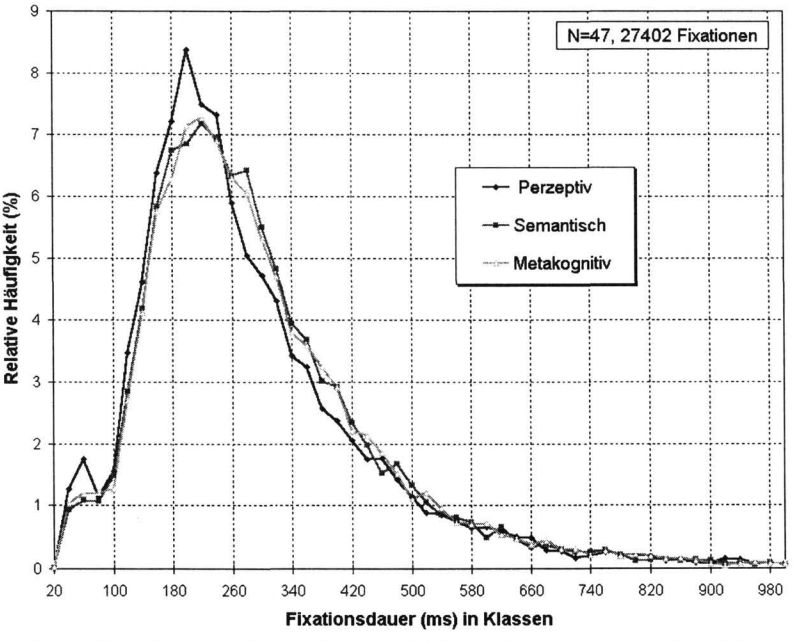

Abb. 4: Verteilung der Fixationsdauer in Abhängigkeit von der Verarbeitungtiefe

Man kann leicht sehen, daß die Kurven für die semantische und metakognitive Enkodierung weitgehend identisch sind. Beide unterscheiden sich aber von der der Fixationen bei perzeptiver Enkodierung. Diese Unterschiede liegen im Intervall zwischen etwa 120 und 450 ms – mit Übergang von einem großen Anteil der „perzeptiven" Fixationen zu dem großen Anteil der Fixationen bei der „tieferen" Verarbeitung bei einer Fixationsdauer von etwa 250 ms. Was sagen uns diese Daten nun? Offensichtlich läuft auch nach der Fixationsdauer von 250 ms eine interne Informationsverarbeitung weiter, diesmal mit Akzent auf Semantik und persönlicher Bedeutung. Bevor diese Information bearbeitet wird, wäre die Benutzung der Blickortdaten zwecks Kommunikation einfach verfrüht. In welchem Bereich der Fixationsdauer kann man Spuren kommunikativer Intentionen der Menschen entdecken?

Gibt es spezifische „kommunikative Fixationen"?

Die Blickrichtung für Ziele der Kommunikation zu benutzen ist eine natürliche menschliche Fähigkeit. In der Face-to-Face Interaktion mit anderen Menschen verwenden wir diese Fähigkeit zur Disambiguierung von verbalen Anweisungen, so daß – und zwar sehr früh in der Ontogenese – ein Zustand der „gemeinsamen Aufmerksamkeit" entstehen kann: Kooperierende Partner fixieren zur gleichen Zeit dieselben Objekte, wodurch das Problem der referentiellen Mehrdeutigkeit wegfällt (siehe [18]). Diese Besonderheit der natürlichen Kommunikation kann einen großen Teil ihrer Vorteile gegenüber technologisch vermittelten Formen der Kommunikation erklären, besonders bei der Übergabe von praktischem Wissen und konstruktiven Anweisungen. In der Abbildung 5 ist eine der Versuchsanordnungen unserer Experimente gezeigt, die es erlaubten, die relevanten Aspekte der natürlichen Kommunikation, in erster Linie die Berücksichtigung der Blickrichtung, auf elektronisch vermittelte Kommunikation zu übertragen [23, 27].

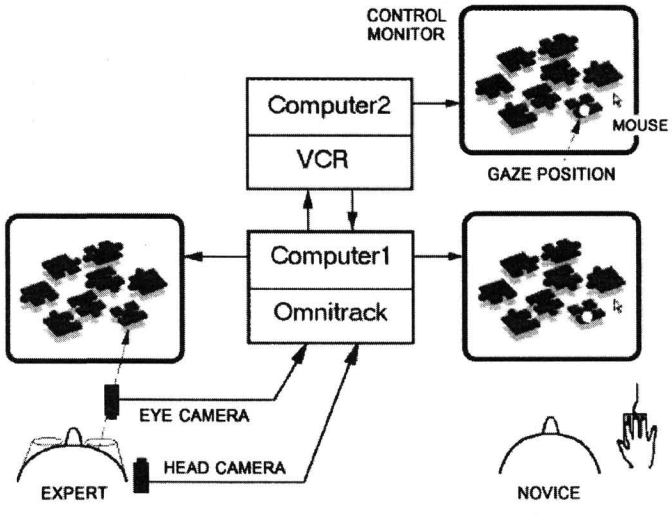

Abb. 5: Versuchsanordnung in Experimenten zum Transfer der Blickrichtungsdaten

Die Aufgabe bestand darin, ein computergestütztes Puzzlespiel zu lösen, dessen Teile mit einer Computermaus bewegt werden konnten. An den Experimenten nahmen jeweils Paare

von Probanden teil, nämlich ein Experte, der die Puzzles trainiert hatte und sie mühelos und schnell lösen konnte, und ein Novize, der die Puzzlebilder nicht kannte. Nur der Novize konnte die Puzzleteile bewegen, und der Experte, der auf seinem Monitor dieselbe Puzzleszene wie der Novize betrachtete, versuchte, ihm so gut wie möglich dabei zu helfen. Die sprachliche Kommunikation der Teilnehmer sowie deren Augenbewegungen wurden dabei registriert. Es galt generell eine der folgenden drei Kommunikationsbedingungen:

- „Sprache": Experte und Novize konnten sich nur verbal verständigen.
- „Sprache und Maus": zusätzlich zur verbalen Kommunikation konnte der Experte einen Mauszeiger auf dem Bildschirm bewegen, der für beide Teilnehmer sichtbar war.
- „Sprache und Blick": zusätzlich zur verbalen Kommunikation wurde immer die aktuelle Blickposition des Experten oder des Novizen auf dem Monitor des Partners angezeigt.

Wir verzichten an dieser Stelle auf die Darstellung der umfangreichen Ergebnisse dieser Experimente. Im Kontext dieses Beitrages sind die Daten über Besonderheiten der Augenbewegungen von speziellem Interesse. Diese Daten zeigen, daß explizite Intention mit dem eigenem Blick, die die verbale Anweisung unterstützt, zu einem signifikanten Zuwachs an der Sakkaden mit Fixationsdauer länger als 500 ms führt. Es zeigt sich auch eine negative Korrelation zwischen der Anzahl solcher Fixationen bei dem Experten und der Zeit des Problemlösen von Novizen: Offensichtlich können solche lange Fixationen als eine wertvolle Quelle der Information zusätzlich zu sprachlichen Anweisungen bei der Interaktion mit dem Computer benutzt werden.

Schlußfolgerungen und Aufgaben für die Zukunft

Im Hinblick auf die am Anfang gestellten Fragen über die funktionelle Bedeutung der verschiedenen Segmente der Fixationsdauer in der menschlichen Informationsverarbeitung liefern diese Experimente erstaunlich deutliche Ergebnisse. In der Reihenfolge der Aufgaben von der Informationssuche in der visuellen Umgebung, über perzeptive, semantische und selbst-referentielle Verarbeitung zur Kommunikation des Wissens an Partner bei kooperativem Problemlösen scheinen scheinen mit einer Verlängerung der Fixationsdauer verknüpft zu sein. Eine zusätzliche Validierung durch neurophysiologische Daten zeigte, daß die Veränderungen der Verarbeitungstiefe eine Veränderung der Ebene der entsprechenden Hirnmechanismen bedeuten [2, 28]. Besonders bei kommunikativen Intentionen findet man außergewöhnlich lange Fixationen, die genau dem empirisch gefundenen Schwellenwert für Blickmausanwendungen von 500 ms entsprechen. Eine anschauliche Zusammenfassung dieser Ergebnisse ist in Abbildung 6 zu finden.

Unsere praktische Empfehlung zur Überwindung des „Midas touch problem" ist deshalb die Einstellung des zeitlichen Filters auf Werte über 450-500 ms. Diese Schwelle scheint auch aus einem anderem Grund von Bedeutung zu sein. Bei der sprachlichen Beschreibung einer Szene (wie auch beim lauten Lesen) eilen Augen und visuelle Aufmerksamkeit der Sprache immer voran, so daß eine zeitliche Spanne zwischen Augen und Stimme (Eye-Voice Span) entsteht. Diese Spanne ist sehr variabel, beträgt aber in der Regel etwa 400-500 ms [27]. Mit anderen Worten, nur wenn der Blickort mit einer Latenz von etwa 500 ms expliziert wird, werden der sprachliche Fokus und die visuelle Aufmerksamkeit auf demselben Objekt konvergieren. Solche Redundanz verstärkt die Zuverlässigkeit der Angaben und schafft Möglichkeiten zum Zustand der „gemeinsamen Aufmerksamkeit"

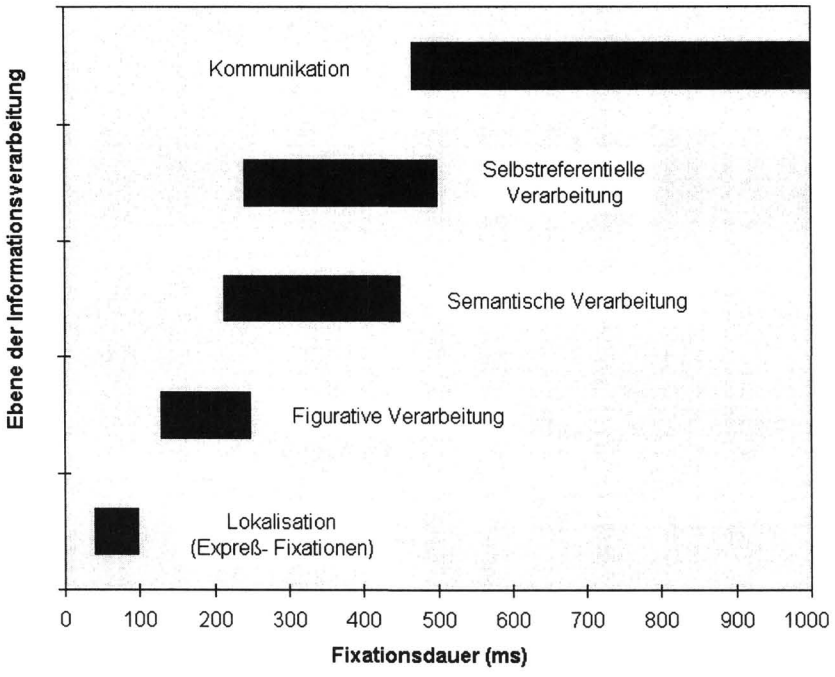

Abb. 6: Fixationsdauer als Indikator der Ebenen der Informationsverarbeitung

Es gibt weitere technische Möglichkeiten, die Blickmaus in ein völlig sicheres Kommunikationsmittel zu verwandeln. Man könnte anstelle individueller Fixationen die kommulativen Zeiten nahliegender Gruppen von Fixationen als die Auslösezeit für Schaltknöpfe verwenden, besonders wenn dazu die Technik des Aufbaus von sogenannten „Aufmerksamkeitslandschaften" verwendet wird [15, 27]. Im Gegensatz zur manuell gesteuerten Computer-Maus braucht eine Blickmaus nicht unbedingt ein visuelles Feedback, ein solches z.B. in Form von „Eyecons" [8, 25] fügt der Interaktion jedoch zusätzlich ein hohes Maß an Zuverlässigkeit bei. In einer weiteren Entwicklung könnte eine eklektische Kombination von Blickort, Blickdauer, Pupillendurchmesser und Blinzelhäufigkeit als Indizes von Interesse oder verschiedener Interpretationen einer Szene von einem neuronalen Netzwerk erkannt werden, das durch Lernabschnitte individuell eingestellt wird [14, 19, 25].

Natürlich bedeuten solche Sicherungsmaßnahmen weitere Verzögerungen bei der Initiation der Blickmaus, die noch weiter über dem kritischen Wert 500 ms liegen können. Das scheint aber nicht ein permanenter Nachteil dieser Technologie zu sein. Mehrere Beobachtungen zeigen, daß infolge des Übungseffekts der kritische Werte unter 500 ms verlagert werden kann, ohne daß die Zuverlässigkeit der Antworten gefährdet wird. Nach einem Bericht [4] können geübte Nutzer mit einem Schwellenwert von unter 250 ms arbeiten. Nach unserer Klassifikation entspricht das einer Verarbeitung im perzeptiven Bereich, wahrscheinlich sogar nur unter Berücksichtigung der räumlichen Lokationen der virtuellen Tasten. Offensichtlich

kann auch das Auge die Evolution der Hand nachvollziehen, zu einem Instrument neuer menschlicher Fertigkeiten, die durch technologischen Fortschritt ins Leben gerufen wurden.

Danksagungen

Unser Dank gilt Mitarbeitern und Kollegen in Dresden, Bielefeld und Toronto, die an diesen Untersuchungen teilgenommem haben, insbesondere Frank Binkowski, Rosalía Hillers, Constanze Liebers, Eyal Reingold und Helge Ritter. Wir bedanken uns auch bei Nancy und Dixon Cleveland (LC Technologies, Inc., Fairfax, VA) für die Information über Trainierbarkeit der menschlichen Okulomotorik.

Literaturverzeichnis

[1] Baluja S. & Pomerleau D.: Non-intrusive gaze-tracking using artificial neural networks. In: Neural information processing systems 6, New York, 1994: Morgan Kaufman Publishers.

[2] Blaxton, T.A., Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Figlozzi, C.M., Gaillard, W.D. & Theodore, W.H.: Functional mapping of human memory using PET: Comparison of conceptual and perceptual tasks In: Canadian Journal of Experimental Psychology, 50 (1996), 42-56.

[3] Challis, B.H., Velichkovsky, B.M. & Craik, F.I.M. Levels-of-processing effects on a variety of memory tasks: New findings and theoretical implications. In: Consciousness & Cognition, 5 (1996), 63-89.

[4] Cleveland, D. & Cleveland, N.: Persönliche Mittelung, 1996 September.

[5] Deacon, T. W.: Prefrontal cortex and symbolic learning. In: B.M.Velichkovsky and D.M.Rumbaugh (Eds.), Communicating meaning. Mahwah, NJ, 1996: Lawrence Erlbaum Associates.

[6] Engell-Nielsen, T., Glenstrup, A.J. & Hansen, J.P.: Eye-gaze interaction: A new media – not just a fast mouse. In: International Journal of Human-Computer Interaction Studies, 1996 (in press).

[7] Fischer, B. & Weber, H.: Express saccades and visual attention. In: Behavioral and Brain Sciences, 16, (1993), 553-610.

[8] Hansen, J.P., Andersen, A.W. & Roed, P. Eye-gaze control of multimedia systems. In Y.Anzai, K.Ogawa and H.Mori (eds), Symbiosis of human and artifact. Proceedings of the 6th international conference on human computer interaction. Amsterdam, 1995: Elsevier Science Publisher.

[9] Helmholtz, H.v.: Handbuch der physiologischen Optik, 3.Auflage. Hamburg und Leipzig, 1896: L.Voss.

[10] Hering, E.: The theory of binocular vision. New York, 1977: Plenum Press [Erste deutsche Ausgabe, 1868]

[11] Hoffmann, J.E.: Visual attention and eye movements. In: H.Pashler (Ed.), Attention. London, 1996 in press: University College London Press.

[12] Jacob, R.J.K.: Eye tracking in advanced interface design. In: W.Barfield and T.Furness (Eds.), Advanced interface design and virtual environments. New York, 1995: Oxford University Press.

[13] Joch, A.: What pupils teach computers. In: Byte 21 (1996), 99-102.

[14] Nielsen, J.: Noncommand user interfaces. In: Communications of the ACM, 36(4), 83-99, 1993.

[15] Pomplun, M., Ritter, H. & Velichkovsky, B.M. Disambiguating complex visual information: Towards communication of personal views of a scene. In: Perception (UK)**25** (**8**), 1996.

[16] Pomplun, M., Velichkovsky, B.M. & Ritter, H.: An artificial neural network for high precision eye movement tracking. In B.Nebel & L.Drescher-Fischer (Eds.), Lectures notes in artificial intelligence. Berlin, 1994: Springer Verlag.

[17] Pomplun, M., Sichelschmidt, L., Wagner, K., Cleremont, C., Rickheit, G. & Ritter, H: Comparative visual search. In: Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance, 1996 submitted.

[18] Raeithel, A. & Velichkovsky, B.M.: Joint attention and co-construction of tasks. B.Nardi (Ed.), Context and consciousness: Activity theory and human-computer interaction. Cambridge MA, 1995: MIT Press. 199-233.

[19] Ritter, H. Parametrized self-organizing maps. In S.Gielen and B.Kappen (Eds.), ICANN93-Proceedings, Berlin, 1993: Springer.

[20] Stampe, D.M. & Reingold, E. Eye movement as a response modality in psychological research. In Proceedings of the 7th European conference on eye movements, Durham, University of Durham, 31st of August-3d of September, 1994.

[21] Starker, I. & Bolt, R. A. A gaze-responsive self-disclosing display. In CHI 90 Proceedings. New York, 1990: ACM Press.

[22] Velichkovsky, B.M.: The levels endeavour in psychology and cognitive science. In: P.Bertelson, P.Eelen and G.d'Ydewalle (Eds.), International perspectives on psychological sciences: Leading themes.Howe UK, 1994: Lawrence Erlbaum Associates.

[23] Velichkovsky, B.M.: Communicating attention: Gaze position transfer in cooperative problem solving. In: Pragmatics and Cognition, 3 (1995), 199-222. 23.

[24] Velichkovsky, B.M., Challis, B.H. & Pomplun, M.: Arbeitsgedächtnis und Arbeit mit dem Gedächtnis: Visuell-räumliche und weitere Komponente der Verarbeitung. In: Zeitschrift für experimentelle Psychologie, 42 (1995), 672-701.

[25] Velichkovsky, B.M. & Hansen, J.P.: New technological windows into mind. In: CHI 96 Proceedings: Human factors in computing systems. New York, 1996: ACM Press. 496-504.

[26] Velichkovsky, B.M., Hillers, R. & Sprenger, A.: Enkodierung, Augenbewegungen und Gedächtnisleistung bei der Bearbeitung unbekannter Gesichter. 1996 in Vorbereitung.

[27] Velichkovsky, B.M., Pomplun, M. and Rieser. H.: Attention and communication: Eye-movement-based research paradigms. In: W.H.Zangemeister et al. (Eds.), Visual attention and cognition. Amsterdam, 1996: Elsevier Science Publisher. 125-154.

[28] Velichkovsky, B.M., Klemm, T., Dettmar, P. & Volke, H.-J.: Evozierte Kohärenz des EEG II: Kommunikation der Hirnareale und Verarbeitungstiefe. In: Zeitschrift für Elektroenzephalographie, Elektromyographie und verwandte Gebiete, 27 (1996), 111-118.

[29] Yarbus, A.L.: Eye movements and vision, New York, 1967: Plenum Press [Erste russische Ausgabe, 1965].

Adressen der Autoren

Prof. Dr. habil. Boris M.Velichkovsky
Dipl.-Psych. Andreas Sprenger
Technische Universität Dresden
Fachbereich Psychologie
AE Angewandte Kognitionsforschung
D-01062 Dresden
Email velich@psy1.psych.tu-dresden.de

Dipl.-Inf. Marc Pomplun
Universität Bielefeld
Technische Fakultät
AE Neuroinformatik
D-33615 Bielefeld
Email impomplu@techfak.uni-bielefeld.de