

Auge-Hand-Koordination und Aufmerksamkeitsprozesse in der Mensch-Computer Interaktion – Eine empirische Untersuchung mittels Eye-tracking

Marco Furtner und Pierre Sachse

Schlüsselwörter: Auge-Hand-Koordination, Aufmerksamkeit, Mensch-Computer Interaktion, Eye-tracking

Zusammenfassung

Die Analyse der Auge-Hand-Koordination ist ein sehr aktuelles und bedeutsames interdisziplinäres Forschungsgebiet zur Optimierung der Mensch-Computer Interaktion. Gegenwärtig findet in der Forschungsliteratur eine intensive Diskussion zu spezifischen Interaktionsmustern zwischen der Auge und der Hand bzw. dem Maus-Cursor statt. Hinsichtlich der Analyse der spezifischen Auge-Hand-Koordination (Führungsverhalten des Auges, Auge-Hand Synchronizität und Führungsverhalten der Hand) wurden in der vorliegenden experimentellen Untersuchung 141 Probanden mittels Blickbewegungsanalyse (Eye-tracking) untersucht. Ferner erfolgte die Überprüfung spezifisch auftretender Aufmerksamkeits- und Aktivierungsaspekte. Als Stimulusmaterial wurden drei Labyrinthaufgaben unterschiedlicher Komplexität verwendet. Die Resultate der experimentellen Untersuchung zeigen neue Belege zum Führungsverhalten des Auges, zur Verzögerungszeit der Hand bzw. des Maus-Cursors und zum Komplexitätsgrad auf.

Abstract

The analysis of the eye-hand coordination is a rather recent research area which is very important for the improvement of human computer interaction and is characterized in particular by its interdisciplinary approach. At present, there is a discussion concerning the specific interaction patterns between the eye and the hand (mouse-cursor). In accordance to the analysis of the specific eye-hand coordination in the following experimental investigation, 141 participants were examined by means of eye movement analysis. Furthermore the analysis of attentional processes was accomplished. Altogether, three different complex labyrinth tasks were presented. With regard to the specific eye-hand coordination during the solution process of the different labyrinth tasks, the results show new evidence concerning the eye guidance, the delay time of the hand (mouse-cursor), and the specific complexity degree.

Einleitung

Die Auge-Hand-Koordination dominiert viele Aspekte unseres täglichen Lebens, wie beispielsweise das Heben einer Kaffeetasse, die Bedienung einer Maschine oder die Anwendung einer Computermaus während der Mensch-Computer Interaktion. Obwohl sich die wissenschaftliche Forschung bereits seit Jahrzehnten mit der Auge-Hand-Koordination beschäftigt, werden die Erkenntnisse zur Auge-Hand-Koordination erst allmählich als eigenständiges Forschungsgebiet wahrgenommen (Crawford et al., 2003). Die Bewegungen von Auge, Kopf und Körper zur Lokalisation von Objekten sind eine der komplexesten Situationen für das visuo-motorische System, wobei wir erst jetzt die Komplexität der Auge-Hand-Koordination allmählich zu verstehen lernen (Desmurget et al., 1998).

Eine Untersuchung zur Auge-Hand-Koordination von Henriques et al. (2003) zeigt, dass retinale Hintergrundbewegungen vom visuo-motorischen System für die Kontrolle von visuell

geführten Aktionen verwendet werden. Folglich liefern Blickbewegungen eine Unterstützung zur Führung der Hand. Dennoch sind Blickbewegungen nach Crawford et al. (2004) der eigentliche „Sklave“ des Systems, da die Umwelt lediglich über die Handbewegung selbst direkt beeinflusst werden kann. Nach Binsted et al. (2001) scheint umgekehrt die Hand nicht der „Sklave“ des Auges zu sein. In ihrer Studie konnten sie nachweisen, dass die Hand exakt auf einer Zielposition verbleibt, während das Auge oberhalb oder unterhalb der Zielposition fixiert wird.

Gegenwärtig existiert eine intensive Diskussion darüber, ob das Auge tatsächlich der „Sklave“ der Hand ist, oder ob umgekehrt, nicht die Hand doch der „Sklave“ des Auges ist. Nach Johansson et al. (2001) unterstützt das Führungsverhalten des Auges die Planung von Handbewegungen mittels Markierung von Schlüsselpositionen für die zukünftigen Zielpositionen der Hand. Sheth und Shimojo (2002) untersuchten die Wirkung eines fehlenden visuo-motorischen Feedbacks bezogen auf die frühen Phasen zielorientierter Bewegungen. Der Verlust der visuo-motorischen Rückmeldung zeigte seine Auswirkungen bereits in den frühen Beschleunigungsphasen der Bewegungsbahn. Aufgrund der fehlenden visuellen Kontrolle dauerte die Beschleunigungsphase der Cursor-Bewegung länger, die höchste Bewegungsgeschwindigkeit wurde später erreicht und die Cursor-Geschwindigkeit reduzierte sich rascher. Die Analyse von Sakkaden nimmt in der Forschung zur Auge-Hand-Koordination einen wichtigen Stellenwert ein. Snyder et al. (2002) zeigten einen Anstieg der Sakkaden-Geschwindigkeiten in Bezug auf die Bewegungskoordination zwischen Auge und Hand. Korrespondierende, gleichzeitige und zielorientierte Auge-Hand-Bewegungen reduzieren die Antwortzeit von Sakkaden und ferner wird die Anzahl von korrigierenden Sakkaden verringert (vgl. Lünenburger et al., 2000). Bei einer fehlerhaften Handbewegung erfolgt eine Sakkaden-Hemmung, da die Handposition neu bewertet werden muss. Fixationen nehmen ebenfalls einen wichtigen Stellenwert zur Erforschung der Auge-Hand-Koordination ein. Pelz et al. (2001) zeigten, dass die Handbewegung so lange verzögert wird, bis eine informationsreiche Fixation nahezu vollständig ist. Demnach wird die Handbewegung so lange unterbrochen, bis das Auge die Führung der Handbewegung übernehmen kann.

Einen möglichen Erklärungsansatz zur Auge-Hand-Koordination liefert die „conversion-on-demand“ Hypothese der visuo-motorischen Repräsentation und Kontrolle von Henriques et al. (1998; vgl. Crawford et al., 2003). Zu Beginn wird die Zielrepräsentation im fokussierten Zentrum des Auges gehalten. Die endgültige retinale Repräsentation wird durch die Auswahl eines Handlungsziels spezifiziert. Schließlich wird ein dreidimensionales motorisches Signal hinsichtlich des motorischen Bezugsrahmens produziert. Ein Schlüsselmerkmal dieses Modells liegt in seiner Berücksichtigung der frühen Zielrepräsentation im retinalen Bezugsrahmen. Demzufolge müssen die Repräsentationen mit jeder Augenbewegung aktualisiert werden. Dadurch wird das Arbeitsgedächtnis in Bezug auf das repräsentierte Sehfeld auf den aktuellsten Stand gebracht (vgl. Snyder, 2000).

Von besonderem Interesse sind spezifisch auftretende Interaktionsmuster zwischen dem Auge und der Hand. Beispielsweise zeigt sich über verschiedene Versuchspersonen hinweg keine konsistente Auge-Hand-Koordination. Nach Smith et al. (2000) können insgesamt drei unterschiedliche Verhaltensmuster in Bezug auf das jeweils relevante Ziel beobachtet werden: (1) die Blickbewegung folgt dem Cursor, (2) die Blickbewegung führt den Cursor zum jeweiligen Ziel und (3) nachdem das Ziel erreicht wurde, springt die Blickbewegung abwechselnd zwischen dem Ziel und dem Cursor hin und her. Die Resultate der Untersuchung von Sailer et al. (2005) verweisen auf eine besonders frühe räumliche Trennung zwischen dem Auge und der Hand. Das Auge nimmt bereits sehr schnell eine neue Zielrepräsentation auf, während sich die Hand – auf Basis der älteren Zielinformation – noch auf der vorhergehenden Zielposition befindet.

Die Kernfragestellung der nachfolgenden experimentellen Untersuchung bezieht sich auf die Analyse des möglichen Führungsverhaltens des Auges (*eye guidance*) und die spezifisch auf-

tretenden Interaktionsmuster der Auge-Hand-Koordination über die drei unterschiedlich komplexe Labyrinthaufgaben hinweg.

Methoden

Versuchspersonen

In der nachfolgend beschriebenen experimentellen Versuchsanordnung wurden 141 Studenten der Universität Innsbruck analysiert. Das Durchschnittsalter der Versuchspersonen war 24.6 Jahre (SD = 5; 13 – 49 Jahre). Insgesamt nahmen 91 Frauen (65 %) und 50 Männer (35 %) an der Untersuchung teil. Ferner waren alle Probanden normalsichtig beziehungsweise trugen Sehhilfen, die für die Bewältigung der Versuchsaufgaben eine Normalsichtigkeit gewährleisteten. Für die Teilnahme wurden die Probanden bezahlt. Die Versuchsteilnehmer verfügten über keinerlei Informationen bezüglich des Untersuchungszwecks.

Versuchsmaterial

In Bezug auf das visuelle Stimulusmaterial wurden drei unterschiedlich komplexe Labyrinthaufgaben verwendet. Die Bestimmung des Komplexitätsgrades erfolgte über (1) die Anzahl der Eingänge, (2) die Anzahl der zielführenden Eingänge, (3) den kürzesten Idealweg zum Ziel und (4) die Wegabweichungen vom kürzesten Idealweg. Demnach mussten die Labyrinthaufgaben folgende Bedingungen erfüllen: Sie müssen über mehrere Eingänge verfügen, welche über verschiedene Wege zum Zentrum – dem Ziel der Labyrinthaufgabe – führen und auch Sackgassen beinhalten können. Beim Bildmaterial handelt es sich um Labyrinthentwürfe von verschiedenen Künstlern des 17. und 18. Jahrhunderts. Die festgelegte Darbietungsfolge der Labyrinthaufgaben geht mit einer jeweiligen Steigerung des Komplexitätsgrades einher (vgl. Abbildung 1). Das erste Labyrinth stammt von Jean Francois de Neufforge: „*Kupferstich mit sechs Grundrissen für Garten-Labyrinth*“; das zweite Labyrinth ist von Petrus Laurembergius: „*Horticultura*“ und das dritte von Ignaz Haas: „*Entwürfe für Gartenlabyrinth*“.



Abb. 1: Festgelegte Darbietungssequenz mittels eines Anstiegs des Komplexitätsgrades der Labyrinthaufgaben von links (Labyrinth 1), über das mittlere (Labyrinth 2) bis zum rechten Labyrinth (Labyrinth 3)

Geräte

In der nachfolgenden experimentellen Versuchsanordnung wurde ein so genanntes table-mounted Eye-tracking System (*Eye-gaze Analysis System*) verwendet, mit welchem eine Erkennung und Registrierung von Fixationen und Sakkaden möglich ist. Die Aufnahme der Blickbewegungen erfolgte binokular mittels einer Aufnahme Frequenz von 120 Hz. Durch zwei Beobachtungsmonitore können jeweils das rechte und das linke Auge – die durch die entsprechen-

den Binokularkameras erfasst werden – während der Testung in Echtzeit betrachtet und gegebenenfalls die Position des Probanden korrigiert werden. Für die Analyse der Blickbewegungen wurde die Eye-tracking Software NYAN Version 1.2 verwendet. Die Labyrinth wurden auf einem 17 Zoll Computerbildschirm (View Sonic VG700b) mit einer Bildwiederholfrequenz von 75 Hz dargeboten.

Versuchsablauf

Zu Beginn der experimentellen Untersuchung erhielten die Versuchspersonen eine schriftliche Instruktion hinsichtlich der erfolgreichen Durchführung der jeweiligen Labyrinthaufgabe. Die Versuchspersonen wurden instruiert, zu Beginn ihre Blickfixationen auf einen beliebigen Labyrintheingang ihrer Wahl zu richten und ausgehend von diesem Eingangspunkt das Lösungsziel – das Zentrum des jeweiligen Labyrinths – zu erreichen. Gleichzeitig zu den Blickbewegungen mussten die Probanden den Maus-Cursor in einer dynamisch wechselseitigen Interaktion bewegen und diesen über den gesamten Lösungsprozess hinweg so präzise wie möglich mit der jeweils aktuellen Blickfixation in Übereinstimmung bringen. Gelangten die Versuchspersonen in eine „Sackgasse“, mussten sie sich sowohl mittels Blickfixation als auch mittels Maus-Cursor wiederum zurückbewegen. Wurden alle Wegstrecken eines Einganges erfolglos zurückgelegt, konnten die Versuchspersonen mit einem anderen Eingang ihrer Wahl erneut beginnen. Der Zeitrahmen für die Lösung der Labyrinthaufgaben war offen.

Ergebnisse

Zur Analyse von ausgewählten Auge-Hand Koordinationspunkten wurden für das jeweilige Labyrinth nach Zufallsprinzip fünf spezifische Punkte festgelegt. Neben der Untersuchung von spezifischen Interaktionsmustern zwischen dem Auge und der Hand wurde eine Häufigkeitsanalyse nach folgenden Kriterien durchgeführt: (1) die Blickfixation befindet sich vor der Hand (Maus-Cursor), (2) die Blickfixation und die Hand (Maus-Cursor) befinden sich exakt an demselben Punkt und (3) die Hand (Maus-Cursor) befindet sich vor der Blickfixation. Über die drei Labyrinthaufgaben hinweg wurden insgesamt 1.905 spezifische Auge-Hand Interaktionspunkte analysiert (Labyrinth 1: 640; Labyrinth 2: 645; Labyrinth 3: 620).

Die Resultate zeigen über alle drei Labyrinthaufgaben hinweg eine deutliche Verzögerungszeit der Hand (Maus-Cursor) (vgl. Abbildung 2). In Hinblick auf die spezifische Blickfixation zeigte sich die kürzeste Verzögerungszeit (in ms) beim dritten und komplexesten Labyrinth ($M = 511$, $SD = 290$). Die einfachste Labyrinthaufgabe (Labyrinth 1) zeigt ebenfalls eine Verzögerungszeit von über einer halben Sekunde ($M = 536$, $SD = 475$), wobei die längste Verzögerung der Hand beim zweiten Labyrinth beobachtet werden konnte ($M = 660$, $SD = 443$). Mittels Varianzanalyse (ANOVA) zeigt sich über die drei Labyrinthaufgaben ein signifikanter Haupteffekt hinsichtlich der Verzögerungszeit des Maus-Cursors ($F(2, 378) = 4.78$, Cohen's $f = .15$, $p = .09$). Die Analyse der Mittelwertdifferenzen erfolgte mittels Games-Howell Post-hoc Test. Hierbei konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Labyrinthaufgabe 2 und 3 beobachtet werden ($p = .005$), wobei sich keine signifikanten Differenzen zwischen Labyrinth 1 und 2 ($p = .079$) resp. Labyrinth 1 und Labyrinth 3 ($p = .871$) zeigten.

Hinsichtlich der Aufmerksamkeits- und Aktivierungsprozesse zeigt sich über die drei Labyrinthaufgaben hinweg ein weiterer bedeutsamer Effekt bezüglich der mittleren Fixationsdauer (in ms). Wird jene mittlere Fixationsdauer (in ms) analysiert, welche unmittelbar mit einer Maus(-Cursor)Bewegung einhergeht und wird diese ferner mit der gesamten durchschnittlichen Fixationsdauer (in ms) über die Labyrinthaufgaben hinweg verglichen, so zeigten sich deutlich längere mittlere Fixationsdauern (in ms) während einer spezifischen Hand(-Cursor-)Bewegung: Labyrinth 1: 235 ms vs. 159 ms; Labyrinth 2: 184 ms vs. 150 ms; Labyrinth 3: 169 ms vs. 138 ms.

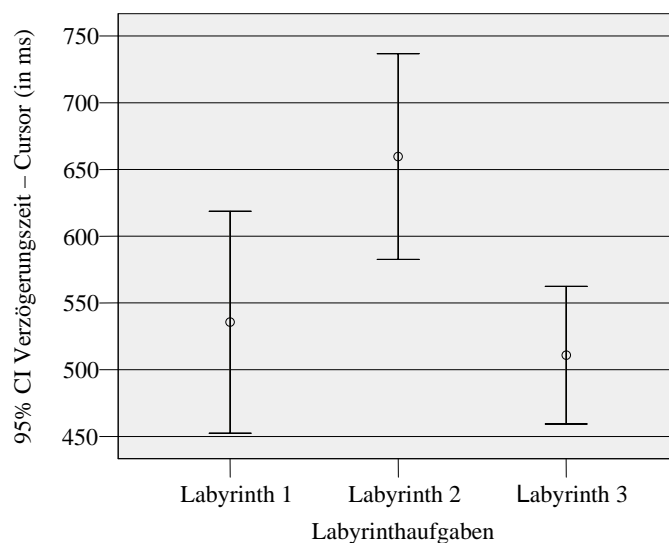


Abb. 2: Mittlere Verzögerungszeiten (in ms) der Hand (Maus-Cursor) hinsichtlich der jeweiligen Blickposition über die drei unterschiedlich komplexen Labyrinthaufgaben (95 % CI)

In den nachfolgenden Analysen beschäftigten wir uns mit der Fragestellung, ob es über die drei unterschiedlich komplexen Labyrinthaufgaben Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit der Verzögerungszeit der Hand (Maus-Cursor) gibt. Mittels Kruskal-Wallis H -Test zeigt sich diesbezüglich ein signifikanter Haupteffekt ($H = 22.09, p = .000$) über die Labyrinthaufgaben (Labyrinth 1: 205; Labyrinth 2: 214; Labyrinth 3: 155). Die Einzelvergleiche zwischen den Labyrinthen erfolgte mittels U -Test. Zwischen Labyrinth 1 und Labyrinth 2 ($U = 7975, p = .478$) ergab sich kein signifikanter Unterschied, während signifikante Differenzen sowohl zwischen Labyrinth 1 und 3 ($U = 5997.50, p = .000$) als auch Labyrinth 2 und 3 ($U = 5523.50, p = .000$) beobachtet werden konnten. Neben der Verzögerungszeit der Hand (Maus-Cursor) konnten in der vorliegenden Untersuchung bestimmte Fälle der Auge-Hand Synchronizität beobachtet werden. Dies bedeutet, dass sich das Auge und die Hand zu einem bestimmten Zeitpunkt exakt an demselben Ort befanden. Die Häufigkeiten bezüglich der Verzögerungszeit der Hand (Maus-Cursor) und der Auge-Hand Synchronizität zeigen folgende Werte für das jeweilige Labyrinth. Verzögerungszeit der Hand vs. Auge-Hand Synchronizität: Labyrinth 1 (136:41); Labyrinth 2 (113:27); Labyrinth 3 (114:36). Über alle Einzelvergleiche hinweg konnten signifikante Unterschiede zwischen der Verzögerungszeit der Hand (Maus-Cursor) und der Auge-Hand Synchronizität mittels U -Test beobachtet werden: Labyrinth 1: $U = 334.50, p = .000$; Labyrinth 2: $U = 112, p = .000$; Labyrinth 3: $U = 454, p = .000$.

Conclusio

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen deutliche Belege für das Führungsverhalten des Auges auf. Es ergab sich eine durchschnittliche Verzögerungszeit der Hand von über einer halben Sekunde (570 ms). Dieses Resultat ist äußerst bedeutsam, da die Probanden bezüglich des Lösungsprozesses instruiert wurden, sowohl das Auge als auch die Hand jeweils an derselben Position zu halten. Hinsichtlich der Komplexität und des Aufmerksamkeits- bzw. Aktivierungsaspektes der jeweils zu lösenden Labyrinthaufgabe zeigen sich ebenfalls bedeutsame Differenzen, wobei das komplexeste Labyrinth die kürzesten Verzögerungszeiten der Hand aufweist und auch deutlich kürzere mittlere Fixationsdauern (in ms) während einer Cursorbewegung aufzeigt. Neben der Registrierung des Führungsverhaltens des Auges konnten auch einige Fälle der Auge-Hand Synchronizität beobachtet werden. Das Führungsverhalten

des Auges tritt jedoch über alle drei Labyrinthaufgaben signifikant häufiger auf. Im Vergleich zu Smith et al. (2000) zeigen die Untersuchungsergebnisse ein deutliches Führungsverhalten des Auges, wobei ein Führungsverhalten der Hand über keinen der registrierten Fälle beobachtet werden konnte. Entgegen der Ansichten von Crawford et al. (2004) oder Binsted et al. (2001) zeigt das Auge keinesfalls eine potentielle „Sklaven“-Rolle gegenüber der Hand. Hingegen werden die Ergebnisse von Sailer et al. (2005) bezüglich des Führungsverhaltens des Auges und einer sehr frühen räumlichen Trennung von der Auge und der Hand unterstützt. Die Führung durch das Auge liefert dem Organismus eine rasche visuelle Orientierung und dient zur Antizipation von neuen Informationen aus der visuellen Umwelt. Die Ergebnisse bezüglich des Komplexitätsgrades des Stimulus: „*Je höher die Komplexität der Aufgabe und je höher der Aufmerksamkeits- und Aktivierungsgrad, desto geringer ist tendenziell die durchschnittliche Verzögerungszeit der Hand und desto kürzer ist die mittlere Fixationsdauer (in ms)*“ liefern eine wichtige Grundlage für weitere Untersuchungen, wobei Effekte bezüglich der Komplexität einer Aufgabe und der Verzögerungszeit der Hand (Maus-Cursor) erwartet werden können.

Literatur

- Binsted, G., Chua, R., Helsen, W. & Elliott, D. (2001). Eye-hand coordination in goal-directed aiming. *Human Movement Science*, 20 (4), 563-585.
- Crawford, J.D., Henriques, D.Y.P., Medendorp, W.P. & Khan, A.Z. (2003). Ocular kinematics and eye-hand coordination. *Strabismus*, 11, 33-47.
- Crawford, J.D., Medendorp, W.P. & Marotta, J.J. (2004). Spatial transformations for eye-hand coordination. *Journal of Neurophysiology*, 92, 10-19.
- Desmurget, M., Pélisson, D., Rossetti, Y. & Prablanc, C. (1998). From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22 (6), 761-788.
- Henriques, D.Y.P., Klier, E.M., Smith, M.A., Lowy, D. & Crawford, J.D. (1998). Gaze-centered remapping of remembered visual space in an open-loop pointing task. *The Journal of Neuroscience*, 18 (4), 1583-1594.
- Henriques, D.Y.P., Medendorp, W.P., Gielen, C.C.A.M. & Crawford, J.D. (2003). Geometric computations underlying eye-hand coordination: Orientations of the two eyes and the head. *Experimental Brain Research*, 152 (1), 70-78.
- Johansson, R.S., Westling, G., Bäckström, A. & Flanagan, J.R. (2001). Eye-hand coordination in object manipulation. *The Journal of Neuroscience*, 21 (17), 6917-6932.
- Lünenburger, L., Kutz, D.F. & Hoffmann, K.-P. (2000). Influence of arm movements on saccades in humans. *European Journal of Neuroscience*, 12 (11), 4107-4116.
- Pelz, J., Hayhoe, M. & Loeber, R. (2001). The coordination of eye, head, and hand movements in a natural task. *Experimental Brain Research*, 139 (3), 266-277.
- Sailer, U., Eggert, T. & Straube, A. (2005). Impaired temporal prediction and eye-hand coordination in patients with cerebellar lesions. *Behavioural Brain Research*, 160 (1) 72-87.
- Sheth, B.R. & Shimojo, S. (2002). How the lack of visuomotor feedback affects even the early stages of goal-directed pointing movements. *Experimental Brain Research*, 143 (2), 181-190.
- Smith, B.A., Ho, J., Ark, W. & Zhai, S. (2000). Hand eye coordination patterns in target selection. *Proceedings of Eye Tracking Research & Applications Symposium*, 117-122.
- Snyder, L.H. (2000). Coordinate transformations for eye and arm movements in the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 10 (6), 747-754.
- Snyder, L.H., Calton, J.L., Dickinson, A.R. & Lawrence, B.M. (2002). Eye-hand coordination: Saccades are faster when accompanied by a coordinated arm movement. *Journal of Neurophysiology*, 87 (5), 2279-2286.