



Bewegungen mit indirekter Sicht im Altersverlauf

· Ältere Arbeitnehmer · Zielbewegungen · Indirekte Sicht · Visumotorische Transformationen

Zusammenfassung

Präzise Zielbewegungen werden im höheren Berufs- und Lebensalter langsamer, vor allem bei größerer Weite und höheren Genauigkeitsanforderungen. Darüberhinaus findet sich eine Tendenz zu kürzeren Bewegungen. Besondere Schwierigkeiten entstehen möglicherweise bei Bewegungsaufgaben mit indirekter Sicht, etwa bei der Steuerung eines Mauszeigers auf einem Bildschirm oder bei minimal-invasiven chirurgischen Eingriffen. Die bisher vorliegenden Untersuchungen zum Altersverlauf der Anpassung an neue visumotorische Transformationen ergeben ein eher inkonsistentes Bild. Die Anpassung wird nicht generell schlechter, sondern Altersveränderungen hängen offenbar von noch weitgehend unbekanntem Randbedingungen ab. Zu diesen zählen wahrscheinlich die Art der von einer Anpassung beanspruchten Prozesse, die Art der visumotorischen Transformation, verschiedene Merkmale der Lernbedingungen sowie die beim Lernen gleichzeitig zu bewältigenden geistigen Arbeiten.

Praktische Relevanz

Altersveränderungen bei motorischen Leistungen betreffen nicht alle Aufgaben in gleichem Maße. Sofern Freiheitsgrade bei der Aufgabengestaltung bestehen, implizieren aufgabenabhängige Altersveränderungen Hinweise auf die alterdifferenzierte Gestaltung beispielsweise von Mensch-Computer-Schnittstellen.

Die Arbeiten an diesem Vorhaben werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt (He 1187/15-1)

(60) 2006/4 Z. ARB. WISS.

Des mouvements avec vue indirecte au cours de l'âge

· Employés âgés · Mouvements cibles · Vue indirecte · Transformations visumotrices

Résumé

Des recherches empiriques ont démontré que les mouvements précis ralentissent avec l'âge, et particulièrement avec de grandes distances à couvrir et de hautes demandes en précision. En outre, on observe une tendance à raccourcir les mouvements. Il est possible que ces difficultés sont particulièrement accentuées pour des tâches dans lesquelles l'exécution et l'observation du mouvement sont séparées spatialement, comme c'est par exemple le cas avec la manipulation d'une souris ou d'un instrument chirurgical à invasion minimale. Pourtant, les recherches existantes concernant l'adaptation à de nouvelles transformations visumotrices révèlent une image inconsistante. L'adaptation des personnes âgées n'est pas mauvaise en général. Il apparaît que les changements avec l'âge dépendent de conditions qui sont pour la plupart inconnues. Parmi les conditions possibles comptent le genre de processus qui sont actifs durant l'adaptation, le mode de la transformation visumotrice, différentes caractéristiques d'environnement ou le besoin d'exécuter simultanément des tâches mentales durant l'acquisition de la transformation visumotrice.

Importance Pratique

Les changements en performance visumotrice varient en travers de tâches différentes. S'il y existait des degrés de liberté dans l'organisation d'une tâche particulière, on pourrait utiliser la connaissance des modifications en performance avec l'âge dans cette genre des tâches pour restructurer les conditions de travail selon l'âge, par exemple afin d'optimiser l'interaction de machine et personne.



Movements with indirect vision in younger and higher working-age

· Aging workforce · Aimed movements · Indirect vision · Visuomotor transformations

Summary

The most general age-related change of human performance is cognitive and motor slowing, which starts in early adult age and proceeds with increasing interindividual variability. Slowing of aimed movements is stronger for long-amplitude movements than for short ones, that is, the slope of Fitts' law increases with age. Age-related slowing is accompanied by an age-related reduction of amplitudes of open-loop movements or of initial acceleration-deceleration phases of closed-loop movements. In terms of muscle activity, the level of cocontractions tends to increase at higher age.

Modern technology is associated with partly increasing demands on motor skills. In particular there is an increasing frequency of transformed movements with indirect vision, as in controlling the position of a cursor on a computer monitor by means of a mouse. To operate devices like this, humans have to learn to deal with visuomotor transformations. Effective motor control requires that those movements can be determined which result in a desired output of the transformation, e. g. a particular path of the cursor. Learning to operate devices which involve visuomotor transformations can involve different processes:

- ◆ optimization of closed-loop control
- ◆ acquisition of an internal model of the transformation to be used in open-loop control
- ◆ strategic adjustments based on explicit knowledge of the transformation.

Explicit knowledge of the transformation can deviate from the internal model as indexed by open-loop performance. For example, age-related differences in open-loop amplitudes have no counterpart in explicit knowledge about the amplitudes of the movements needed for a cursor to reach a visual target.

Findings from applied research suggest that there may be particular problems to produce transformed movements with indirect vision at higher working age. Basic-research findings on age-related changes of adapting to novel visuomotor transformation are only few and inconsistent. The inconsistency suggests that there is no generalized impairment of plasticity as far as visuomotor transformation are concerned, but that there are boundary conditions for age-related changes. We conjecture four of them:

- (1) Age-related changes are different for different processes; they are particularly pronounced for strategic adjustments.

This conjecture is based on rather consistent results of three studies. Age-related changes should thus be present when strategic adjustments are involved in adaptation to novel visuomotor transformations, but absent otherwise.

- (2) Age-related changes are different for different visuomotor transformations; they are particularly pronounced for non-natural transformations. This conjecture is based on an analogy with findings on natural and nonnatural kinds of bimanual coordination. Natural transformations are easy to adapt to, they tend to be spontaneously chosen, and internal models of nonnatural transformations should fall back into linear models under unfavourable conditions (e.g. extended periods without visual feedback).
- (3) Age-related changes depend on the conditions of learning. This conjecture is closely related to the first one in that different conditions of learning are likely to be associated with different combinations of the processes of adaptation. For example, by way of choosing certain conditions, the role of strategic adjustments can be minimized, or the importance of acquiring an internal model can be maximized.
- (4) Adaptation to a novel visuomotor transformation is associated with increasing „cognitive costs“ with increasing age. This conjecture is based on various findings which indicate that motor processes become more extensively integrated with cognitive processes in the course of adult aging. Direct evidence, however, is still quite limited.

Practical Relevance

Age-related changes of motor performance vary across tasks with different characteristics. To the extent that there are degrees of freedom in task design, task-related age variations imply some guidance for the age-related design of e.g. human-computer interfaces.



Am Arbeitsplatz begegnen sich technischer Fortschritt und demographische Entwicklung mit unmittelbaren Konsequenzen für alle Beteiligten. Das betrifft auch Bewegungen, ohne die menschliche Arbeit kaum möglich ist. Dementsprechend differenziert stellen sich Arbeitsbewegungen dar. Grob lassen sich dabei Ganzkörperbewegungen mit deutlicher Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems von kleineren Bewegungen einzelner Körperglieder, die ohne offensichtliche körperliche Beanspruchung ausgeführt werden können, unterscheiden. Im ersteren Fall sind die Leistungsgrenzen primär energetischer Art, im letzteren Fall sind sie durch die Präzision der Bewegungssteuerung und somit durch die Qualität der im sensumotorischen System repräsentierten Bewegungsmuster gegeben. In diesem Beitrag soll die Rolle des Alterns für die Steuerung speziell einfacher Zielbewegungen beschrieben werden. Dabei sind Bewegungen mit indirekter Sicht von besonderem Interesse, da sie charakteristisch für viele moderne Arbeitsplätze sind. Kennzeichnend für diese Klasse von Bewegungen ist die räumliche Trennung von Beobachtung und Ausführung.

Altersbedingte Veränderungen gezielter Bewegungen

Eine der allgemeinsten Altersveränderungen ist die Verlangsamung. Sie zeigt sich beispielsweise in der Zeit, die für einfache kognitive Operationen benötigt wird (z. B. Welford 1981; Myerson et al. 1990; Li et al. 2001), aber auch in der Zeit für die Initiierung und Ausführung einfacher und komplexer Bewegungen (Proctor et al. 2005; Teeken et al. 1996; Yan et al. 1998). Die motorische Verlangsamung entwickelt sich im Verlauf des Arbeitslebens, beginnend im frühen Erwachsenenalter (Szafran 1951; Teeken et al. 1996; Yan et al. 1998). Allerdings weisen Altersverläufe stets eine erhebliche interindividuelle Variabilität auf und sind von beeinflussbaren Bedingungen wie der körperlichen Geübtheit abhängig.

Bild 1 illustriert die Verlangsamung an Hand eigener unveröffentlichter Daten von jeweils 21 jüngeren (19-30 Jahre) und älteren (51-65 Jahre) Versuchsteilnehmern. Ihre Aufgabe war es, einen auf einem Bildschirm sichtbaren Cursor durch Handbewegungen unterschiedlicher Weite und unterschiedlicher Richtung, die sie unter einem Sichtschutz auf

einer Glasplatte ausführten, „zügig und möglichst genau“ in auf dem Bildschirm dargebotene Ziele zu bewegen. Nach einer Übungsphase mit kontinuierlicher visueller Rückmeldung der Cursorposition konnten in den dargestellten Testdurchgängen weder die zu bewegende Hand noch der Cursor, der sonst die Position der Hand auf dem Bildschirm anzeigte, gesehen werden. Die Bewegungen mussten also ohne visuelle Rückmeldung so ausgeführt werden, dass der unsichtbare Cursor das auf dem Bildschirm gezeigte Ziel möglichst genau erreichte. Die älteren Versuchsteilnehmer hatten nicht nur, wie es typisch ist, verlängerte Bewegungszeiten, sondern die Verlangsamung nahm außerdem – ebenfalls typisch – mit der Bewegungsweite zu.

Eine der bekanntesten Gesetzmäßigkeiten in der Bewegungsforschung ist das Fitts'sche Gesetz, das den Zusammenhang zwischen Bewegungszeit, Bewegungsweite und Zielgröße beschreibt. Unter unterschiedlichen Bedingungen gilt näherungsweise:

$$BZ = a + b [\log_2 (2A/W)]$$

mit BZ als Bewegungszeit, A (amplitude) als Weite und W (width)

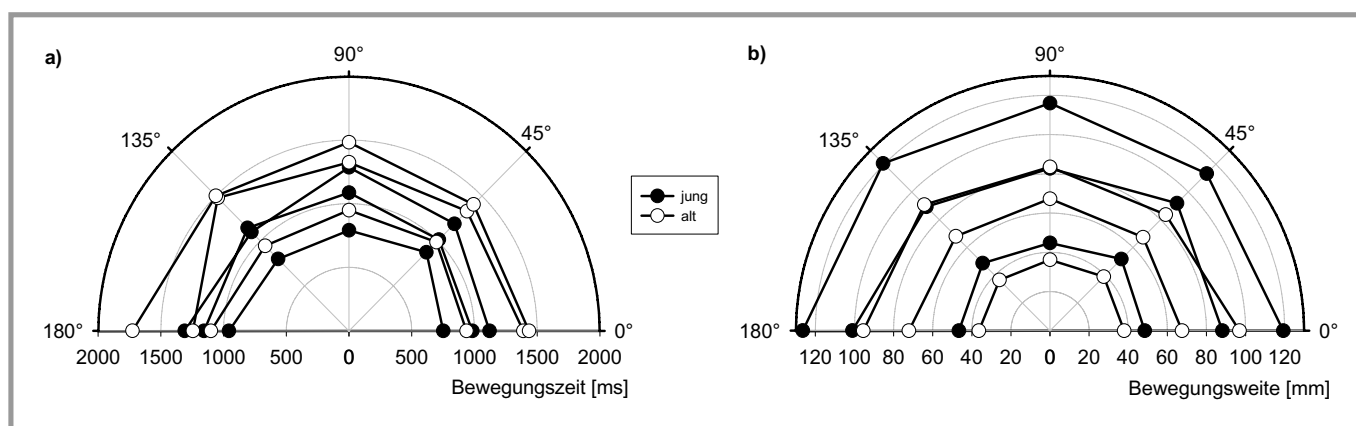


Bild 1: Bewegungszeit (a) und Weite (b) von Bewegungen ohne visuelle Rückmeldungen. Die Bewegungen wurden in 5 verschiedene Richtungen ausgeführt, die Soll-Weiten waren 30, 60 und 90 mm (visumotorische Verstärkung von 1). Die je 3 Kurven für jüngere und ältere Versuchsteilnehmer sind von innen nach außen nach der Soll-Weite gestaffelt

Figure 1: Movement time (a) and amplitude (b) of open-loop movements. Movements were of 5 different directions, target amplitudes were 30, 60, and 90 mm (visuomotor gain was 1). The 3 curves each for younger and older subjects are arranged by increasing amplitudes

Illustration 1: Temps de mouvement (a) et distance (b) des mouvements sans feedback visuelles. Les mouvements étaient des cinq directions différentes avec amplitudes cibles de 30, 60 et 90 mm (gain de transformation visumotrices était 1). Les trois représentations graphique pour chaque groupe sont rangés par l'amplitude croissante





als Zielgröße. Diese Gesetzmäßigkeit wurde zuerst von Fitts (1954) beschrieben, und seitdem wird der auch als Schwierigkeitsindex (index of difficulty) bezeichnete Logarithmus des Verhältnisses von Weite und Zielgröße zur Basis 2 ausgedrückt. Im höheren Berufsalter steigt, wie Bild 1a grob illustriert, die Bewegungszeit stärker mit der Weite an als im jüngeren Berufsalter (bei konstanter Zielbreite). Allgemeiner ausgedrückt vergrößert sich mit zunehmendem Alter die Steigung des Fitts'schen Gesetzes (Ketcham et al. 2002).

Bild 1b zeigt eine zweite Altersveränderung, die weniger auffällig ist als die Verlangsamung: Ältere Personen tendieren zu geringeren Bewegungsweiten als jüngere Personen. Das zeigt sich sehr deutlich bei den für Bild 1 ausgewerteten Testblöcken mit Bewegungen ohne visuelle Rückmeldung. Bei den in der Übungsphase ausgeführten Bewegungen mit kontinuierlicher visueller Rückmeldung wird das Ziel allerdings immer erreicht, so dass es hier einer anderen Analyse als die der Bewegungsweite bedarf, um die Tendenz zur Verkürzung der Bewegungen zu erkennen. So ist bei Älteren die in der ersten Bewegungsphase zurückgelegte Strecke kleiner als bei Jüngeren (Pratt, Chasteen & Abrams, 1994), was dafür spricht, dass die Weite der für die Vorausplanung der Bewegung zentral repräsentierten Bewegungstrajektorie bei Älteren kürzer ist. Oft ist bei Älteren auch die relative Dauer der Beschleunigungsphase verkürzt und die der Bremsphase verlängert (z. B. Cooke et al. 1989).

Mit den kinematischen Merkmalen verändert sich im Altersverlauf auch das Muster der myoelektrischen Aktivität. Darling, Cooke und Brown (1989) berichten von stärkeren Kokontraktionen antagonistischer Muskeln bei Zielbewegungen älterer Personen. Während bei den jüngeren Versuchsteilnehmern sich ein klares Muster von phasischer Agonistenaktivität und nachfolgender phasischer Antagonistenaktivität zeigte, war bei Älteren die phasische Antagonistenaktivität sehr unregelmäßig und teilweise nicht erkennbar. Ein Aktivitätsmuster mit erhöhter Kokontraktion sollte mit einer erhöhten mechanischen Versteifung des bewegten Körpergliedes einherge-

hen. Rüssel (1948) beschreibt die Versteifung als typisches Merkmal von Arbeitsbewegungen. Da „Versteifung“ aber leicht als „Verkrampfung“ verstanden werden kann, bevorzugt er den Begriff der „verhaltenen Bewegungen“ in Abgrenzung gegen „frei ausschwingende Bewegungen“. Verhaltenen Bewegungen sind weniger als frei ausschwingende Bewegungen den Einflüssen nicht-muskulärer Kräfte überlassen und unterliegen somit direkter den Wirkungen muskulärer Kräfte.

Bewegungen mit indirekter Sicht

Die durch Strukturwandel und technischen Fortschritt beschleunigte Entwicklung von Arbeitsaufgaben führt zu neuartigen hochkomplexen Anforderungen an die sensumotorische Leistungsfähigkeit des Arbeitnehmers. Ein Beispiel sind Bewegungen mit indirekter Sicht, deren charakteristisches Merkmal die räumliche Trennung von Bewegungsausführung und -beobachtung ist. In ihrer einfachsten Form findet man diese moderne Anforderung an allen PC-Arbeitsplätzen. Dort transformiert die Computermaus eine auf dem Tisch oder einer speziellen Unterlage ausgeführte Handbewegung in eine auf dem Bildschirm sichtbare Bewegung des Mauszeigers. Die Beziehung zwischen der tatsächlichen Handbewegung und dem beobachtbaren Bewegungseffekt kann beliebig komplex sein. Grundsätzlich lassen sich aber visumotorische Verstärkung und visumotorische Rotation voneinander unterscheiden. Erstere gibt das Verhältnis von Weite der Cursorbewegung zu Weite der Handbewegung an. Letztere beschreibt etwaige Drehungen in der Überführung der Bewegungsrichtung der Hand in die des Mauszeigers. Während allerdings wenige Menschen mit einer gedrehten Maus arbeiten, spielt diese Art der Transformation zum Beispiel bei der Benutzung von Hebeln eine Rolle.

Kompliziertere Aufgaben als die Bedienung einer Computermaus, bei denen auch Kombinationen aus Verstärkung und Rotation vorkommen, finden sich beispielsweise bei modernen minimalinvasiven Operationstechniken. Während durch die Körperfläche eingeführte

Instrumente bewegt werden, wird das durch ein Endoskop aufgenommene Bild auf einem Bildschirm beobachtet, der sich an einem anderen Ort befindet als dem, an dem die Bewegungen stattfinden. Die Spitze der Instrumente bewegt sich hier stets in Gegenrichtung zur Hand, und die Verstärkung, d. h., die Weite der Bewegung der Spitze im Verhältnis zur Weite der Bewegung der Hand, hängt davon ab, wie weit das Instrument in den Körper eingeführt ist.

Die Übersetzung der Bahn der Handbewegung in die Bahn des effektiven Teils eines Werkzeugs, die dann beispielsweise auf einem Monitor beobachtet werden kann, wird als kinematische Transformation bezeichnet. Oft findet sich zusätzlich eine dynamische Transformation: Durch die genutzten Werkzeuge verändern sich die erforderlichen Kräfte. Mit fortschreitender Entwicklung scheinen sich die Freiheitsgrade bei der Gestaltung dynamischer Transformationen zu erhöhen. Kräfte können zum Beispiel beim Training chirurgischer Eingriffe in einem virtuellen Körper beliebig aufgeschaltet werden, während das beim direkten Eingriff nicht möglich ist. (Der Begriff „dynamisch“ wird im Zusammenhang mit Transformationen nicht nur für veränderte Beziehungen zwischen Kräften und Bewegungen verwendet, sondern manchmal auch für zeitabhängige kinematische Transformationen.)

Das Lernen des Umgangs mit einer Transformation kann man formal als die Lösung eines Steuerungsproblems beschreiben (vgl. Heuer 2006). Im Alltag stellt sich uns dieses Problem umgekehrt dar als gerade beschrieben. Phänomenal werden Bewegungen ausgehend von ihrem Handlungsziel geplant und nicht umgekehrt. Damit die gewünschte Ausgangsgröße (=Bewegungseffekt) der motorischen Transformation erreicht werden kann, muss eine geeignete Eingangsgröße bestimmt werden. Daher muss die Transformation zumindest näherungsweise invertiert werden. Für diese Invertierung stehen uns prinzipiell zwei Methoden zur Verfügung. Einerseits ist es das, was ein Regelkreis leistet, und zwar ohne dass die Transformation im eigentlichen Sinne gelernt wird. Durch kontinuierliche Soll-Ist-Wert-Vergleiche werden lediglich momentane Abweichungen von der gewünschten Bewe-



gungsbahn ausgeglichen, ohne dass ein vollständiger Bewegungsplan zentral repräsentiert wird. Die erforderliche Eingangsgröße kann allerdings auch ohne Regelung bestimmt werden, nämlich dann, wenn die Transformation gelernt wird. Oft wird in diesem Fall vom Erwerb eines inneren Modells der Transformation gesprochen. Bei Menschen finden sich beide Wege der Lösung des Steuerungsproblems (Cruse et al. 1990). Wenn die Transformation einfach ist und gut gelernt werden kann, spielt das innere Modell eine ausschlaggebende Rolle bei der Steuerung zielgerichteter Bewegungen. Ist sie dagegen schwer und kann kaum oder gar nicht gelernt werden, ist die Regelung für die Leistung entscheidend. Ein auffälliges Merkmal geregelter Bewegungen ist ihre Langsamkeit. Visuelle Rückmeldungen werden nur mit Verzögerungen verarbeitet (Woodworth 1899; Keele & Posner 1968), und Regelkreise mit verzögerten Rückmeldungen werden bei hohen Verstärkungen leicht instabil. Daher müssen kleine Verstärkungen gewählt werden, was zu langsamen Bewegungen führt (und eher schlechten Näherungslösungen für das Steuerungsproblem).

Eine Leistungsverbesserung bei der Übung transformierter Bewegungen kann sowohl auf eine Verbesserung der visuellen Regelung wie auch auf eine zunehmende Genauigkeit eines inneren Modells der Transformation zurückgehen. Durch Ausblendung visueller Rückmeldungen kann man die visuelle Regelung ausschalten und die Genauigkeit eines inneren Modells erfassen (vgl. Davidson et al. 2000). Neben diesen beiden Komponenten bei der Beherrschung von Transformationen wird gelegentlich noch eine dritte genannt, die als „strategische Anpassung“ bezeichnet werden kann. Damit sind bewusste Korrekturen bzw. bewusste Abweichungen von den sonst spontan ausgeführten Bewegungen gemeint. Bewegungen können beispielsweise bewusst weiter sein, als es dem Ziel entspricht, oder in eine andere Richtung ausgeführt werden. Formal gesehen handelt es sich bei den bewussten Korrekturen im Prinzip um eine Veränderung der gewünschten Bewegung.

Die Unterscheidung zwischen dem inneren Modell einer Transformation und dem expliziten Wissen, das strategischen Anpassungen zugrunde liegt,

mag im Einzelfall schwierig sein. Klar ist aber, dass explizites Wissen und die Beherrschung von Transformationen bei ausgeblendeter visueller Rückmeldung auseinander fallen können. Beispielsweise müssen Veränderungen visumotorischer Verstärkungen relativ groß sein, bevor sie bemerkt werden (z. B. Knoblich & Kircher 2004), und innere Modelle nichtlinearer Transformationen können erworben und angewendet werden, ohne dass diese Nichtlinearität bewusst wird (Verwey & Heuer im Druck).

Bild 2 zeigt ein weiteres Beispiel für das Auseinanderfallen von explizitem Wissen über eine Transformation und innerem Modell. Es handelt sich um unveröffentlichte Daten derselben Versuchsteilnehmer, von denen die in Bild 1 gezeigten Daten stammen. Nach einer Übungsperiode mit einer visumotorischen Verstärkung von 1.5 wurden erneut Bewegungen ohne visuelle Rückmeldungen geprüft. Deren Weiten sind in Bild 2a dargestellt. In der Übungsphase wurden nur Bewegungen in eine Richtung und mit einer Weite verwendet: eine Bewegung nach rechts (0°) mit einer Zielweite von 4 cm

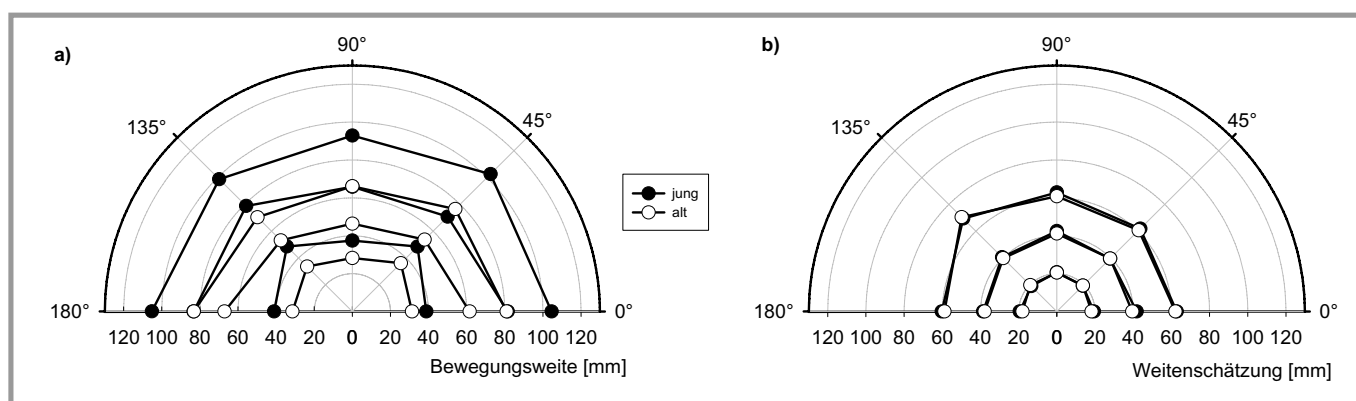


Bild 2: Weite von Bewegungen ohne visuelle Rückmeldungen (a) und explizite Urteile (b). Die Bewegungen wurden in 5 verschiedene Richtungen ausgeführt; die visuell vorgegebenen Weiten waren 30, 60 und 90 mm, die bei einer visumotorischen Verstärkung von 1.5 Bewegungen von 20, 40 und 60 mm entsprechen. Die je 3 Kurven für jüngere und ältere Versuchsteilnehmer sind von innen nach außen nach der Soll-Weite gestaffelt

Figure 2: Amplitudes of open-loop movements (a) and explicit judgments (b). Movements were of 5 different directions; visual target amplitudes were 30, 60, and 90 mm, which corresponded to movement amplitudes of 20, 40, and 60 mm with the visuomotor gain of 1.5. The 3 curves each for younger and older subjects are arranged by increasing target amplitudes

Illustration 2: Amplitude des mouvements sans feedback visuelles (a) et jugements explicites (b). Les mouvements étaient des cinq directions différentes. Les amplitudes cibles visuelles étaient 30, 60 et 90 mm. D'après un gain visumotrice de 1.5, les amplitudes des mouvements correspondants étaient 20, 40 et 60 mm. Les trois représentations graphique pour chaque groupe sont rangés par l'amplitude croissante



für die Hand und 6 cm für den Cursor auf dem Monitor. Die veränderte visumotorische Verstärkung wurde sowohl von den jüngeren wie auch von den älteren Versuchsteilnehmern gelernt, und das Lernen generalisierte über verschiedene Richtungen und Weiten (vgl. Krakauer et al. 2000). Wiederum aber waren die Bewegungen der Jüngeren durchweg weiter als die Bewegungen der Älteren.

In Bild 2b sind die Ergebnisse expliziter Tests gezeigt, die nach den Bewegungstests ohne visuelle Rückmeldungen ausgeführt wurden. Statt eine Bewegung zum Ziel auszuführen, mussten die Versuchsteilnehmer bei diesen Tests den Versuchsleiter anweisen, eine auf dem Bildschirm gezeigte Linie zwischen Start und Zielposition länger oder kürzer werden zu lassen, bis die Länge der gesehenen Linie der Weite der dem Ziel zugeordneten Bewegung entsprach. Das explizite Wissen war bei Älteren und Jüngeren recht genau, und vor allem waren die Urteile in den beiden Altersgruppen nicht verschieden. Die Unterschiede in den tatsächlich den verschiedenen Zielen zugeordneten Bewegungen gingen also nicht mit entsprechenden Unterschieden im expliziten Wissen über die visumotorische Transformation einher.

Explizites Wissen über die Transformation und somit strategische Anpassung kann natürlich auch beim Test ohne visuelle Rückmeldungen eine Rolle spielen. Die klassische Methode ist daher ein Nachtest, bei dem die vorher gelernte Transformation fehlt. Typisch ist der negative Nacheffekt, der darauf zurückgeht, dass die gelernte Transformation weiterhin angewendet wird. In jüngeren Untersuchungen werden die Versuchsteilnehmer manchmal nicht über das Fehlen der Transformation informiert, so dass die fortgesetzte Anwendung der gelernten Transformation nicht bemerkenswert ist. In älteren Untersuchungen aber sind die Versuchsteilnehmer über das Fehlen der Transformation informiert. Der negative Nacheffekt findet sich trotzdem, obwohl strategische Anpassungen jetzt fehlen sollten. Unklar ist allerdings, wieweit die Ergebnisse auch durch strategische Anpassungen an die jetzt fehlende Transformation beeinflusst werden können. Insgesamt gesehen ist also die Erfassung der verschiedenen

Komponenten der Anpassung an neue Transformationen nur mit einigen Vorbehalten möglich.

Altersbedingte Veränderungen von Bewegungen mit indirekter Sicht

Eine Reihe von Beobachtungen lassen vermuten, dass motorische Aufgaben mit indirekter Sicht eine besondere Herausforderung im höheren (Berufs-)Alter darstellen. Beispielsweise berichten Agresta et al. (2004), dass jüngere Ärzte bei Eingriffen, bei denen laparoskopische und offene Operationen in gleicher Weise möglich sind, häufiger laparoskopische Techniken einsetzen als ältere Ärzte. Risucci, Geiss, Gellman, Pinard und Rosser (2001) berichten von Leistungsvorteilen jüngerer Ärzte beim formalisierten Training laparoskopischer Techniken. Auch bei vergleichsweise einfachen Aufgaben mit einer Computermaus wie dem Positionieren des Cursors, dem Anklicken oder Ziehen tendieren ältere Nutzer zu schlechteren Leistungen als jüngere Nutzer (Smith et al. 1999; Walter et al. 1997). Zum Teil mögen diese Altersunterschiede einfach die oben skizzierten Veränderungen in der Ausführung einfacher Bewegungen reflektieren, zum Teil mögen sie aber auch durch die visumotorischen Transformationen und die indirekte Sicht bedingt sein. Beispielsweise fanden Walter, Millians und Worden (1996), dass die Altersunterschiede auch von der Art der visumotorischen Transformation abhängen, speziell der Beziehung zwischen Bewegung einer Computermaus und der resultierenden Bewegung des Cursors.

Stärker theoretisch motivierte Untersuchungen von Altersunterschieden bei der Anpassung an neue visumotorische Transformationen sind noch relativ selten. Dennoch ergeben sie bereits ein inkonsistentes Bild (vgl. Buch et al. 2003): Die Anpassung gelingt Älteren manchmal schlechter als Jüngeren, aber nicht immer; der Nacheffekt ist bei Älteren größer, kleiner oder ebenso groß wie bei Jüngeren. Hinter diesen unterschiedlichen Befunden verbergen sich natürlich Untersuchungen mit verschiedenen Transformationen, Trainingsmethoden, Testverfah-

ren, Methoden der Datenanalyse, Instruktionen usw. Wenngleich die Heterogenität der Befunde daher nicht verwunderlich ist, erlauben sie doch eine unter praktischen Gesichtspunkten nicht unwichtige Folgerung: Obwohl eine mit zunehmendem Alter abnehmende Anpassungsfähigkeit durchaus plausibel erscheint, findet sich keine durchgängig verringerte Fähigkeit zur Anpassung an neue visumotorische Transformationen im höheren Alter. Das gilt für die zumeist untersuchten Altersgruppen oberhalb von 65 Jahren, und das gilt natürlich erst recht für das höhere Berufsalter zwischen 45 und 67 Jahren, in dem Altersveränderungen generell noch schwächer ausgeprägt sind. Aus der Frage, ob es Altersveränderungen bei der Anpassung an neue visumotorische Transformationen gibt, wird somit die Frage nach den Bedingungen, unter denen sie auftreten, und nach ihrer Art, insbesondere hinsichtlich der an einer erfolgreichen Anpassung beteiligten Teilprozesse.

Im Folgenden sollen partielle Antworten auf diese Frage beschrieben werden. Diese Antworten sind teilweise durch experimentelle Daten belegt, manchmal stärker, manchmal schwächer; teilweise handelt es sich auch um Analogieschlüsse, für die keine direkten Belege vorliegen. Die vorhandenen experimentellen Belege betreffen in aller Regel höhere Altersgruppen als die hier vor allem interessierende Gruppe der 45-67jährigen. Bei der Verallgemeinerung gehen wir von einem prinzipiell kontinuierlichen Verlauf von Altersveränderungen aus, wobei allerdings geringfügige Änderungen praktisch bedeutungslos sein können. Angesichts der Ungewissheiten wollen wir unsere partiellen Antworten in Form von vier Mutmaßungen darstellen.

1. Mutmaßung: Altersveränderungen betreffen unterschiedliche Prozesse der Anpassung an neue visumotorische Transformationen in unterschiedlichem Maße; besonders betroffen sind strategische Anpassungen.

McNay und Willingham (1998) untersuchten die Anpassung an eine Rotation der visuellen Rückmeldungen um 90°. Bei einer solchen Rotation finden sich typischerweise stark gekrümmte Bewegungsbahnen. Wird zum Beispiel



eine Bewegung des Cursors auf dem Monitor von unten nach oben gefordert, tendieren die Versuchsteilnehmer zunächst dazu, eine Handbewegung nach vorn zu beginnen. Der Cursor auf dem Bildschirm bewegt sich dann nach links. Die Handbewegung wird korrigiert und läuft im Bogen nach rechts, der Cursor bewegt sich entsprechend im Bogen nach oben. Die Abweichung von der geraden Bahn vom Start zum Ziel wird im Verlauf der Anpassung kleiner und kann als Maß für die Güte der Anpassung verwendet werden. Im Nachtest (ohne die Rotation) beginnt die Bewegung dann typischerweise in Gegenrichtung zur vorherigen Rotation; bei Fehlen visueller Rückmeldungen wird ihre Richtung natürlich nicht so korrigiert, wie es bei vorhandenen visuellen Rückmeldungen der Fall ist.

Im Verlauf der Übung fanden McNay und Willingham (1998) eine Anpassung an die Rotation, die bei den jüngeren Versuchsteilnehmern schneller und vollständiger war als bei den älteren. Im Nachtest aber, bei dem die Versuchsteilnehmer über das Fehlen der Rotation informiert waren und die visuelle Rückmeldung ausgeblendet wurde, unterschieden sich die Nacheffekte der beiden Altersgruppen nicht. Da im Nachtest strategische Anpassungen fehlen sollten, schließen die Autoren, dass die Güte strategischer Anpassungen altersabhängig ist. Die Befunde von McNay und Willingham (1998) wurden von Bock (2005) bei einer Rotation von 60° und etwas anderen abhängigen Variablen bestätigt. Zusätzlich zeigte Bock (2005), dass der Transfer von Lernen mit gezielten Bewegungen auf eine kontinuierliche Tracking-Aufgabe nicht altersabhängig war. Wegen der unterschiedlichen Aufgaben sollten Strategien bzw. Unterschiede in der Güte von Strategien nicht zum Transfer beitragen. Schließlich wiesen die jüngeren Untersuchungsteilnehmer deutlich besseres explizites Wissen über die Transformation auf als die älteren Untersuchungsteilnehmer. Ergänzend zeigten auch Buch, Young und Contreras-Vidal (2003), dass die Anpassung an eine Rotation von 90° bei Jüngeren besser war als bei Älteren. Wenn diese Rotation aber in kleinen Schritten eingeführt wurde, und dabei sollten strategische Anpassungen eine geringere Rolle spielen, verschwand der Altersunterschied.

Während die Hinweise auf altersabhängige strategische Anpassungen recht deutlich sind, sind Hinweise auf eine Altersabhängigkeit von Regelprozessen und dem Erwerb innerer Modelle von Transformationen allenfalls sehr indirekt vorhanden. Mit zunehmendem Alter scheint die Abhängigkeit der Bewegungssteuerung von visueller Rückmeldung stärker zu werden (Yan et al. 2000), und zwar auch nach ausgedehntem Training (Seidler-Dobrin & Stelmach 1998). Eine solche Änderung könnte mit einer altersabhängigen Genauigkeit innerer Modelle von Transformationen zusammenhängen, insbesondere der Kompensation ungenauerer innerer Modelle dienen.

2. Mutmaßung: Altersveränderungen betreffen Anpassung an unterschiedliche visumotorische Transformationen in unterschiedlichem Maße; besonders betroffen sind nicht-natürliche Transformationen.

In den Untersuchungen zur Anpassung an eine visumotorische Rotation fand sich recht konsistent ein Altersunterschied. Ebenso fand sich ein Unterschied im expliziten Wissen über die visumotorische Rotation. Bei einer Anpassung an eine neue visumotorische Verstärkung ist das nicht unbedingt der Fall, wie Bild 2 illustriert. In diesen unveröffentlichten Daten fand sich weder im expliziten Wissen noch in den Tests mit und ohne neue Transformation, beide ohne visuelle Rückmeldungen, ein zuverlässiger Altersunterschied, der nicht schon bei den ersten Baseline-Messungen (Bild 1) vorhanden gewesen wäre und der daher nichts mit der Anpassung an die neue Transformation zu tun hat.

Anpassungen an Rotationen und veränderte visumotorische Verstärkungen unterscheiden sich. Während die Anpassung an eine neue visumotorische Verstärkung über verschiedene Zielweiten und Bewegungsrichtungen generalisiert (Bock 1992; Bock & Burghoff 1997; Krakauer et al. 2000), gilt dies bei den langsamer erfolgenden Anpassungen an visumotorische Rotationen nur für einen kleinen Bereich von Richtungen (Krakauer et al. 2000; Pennel et al. 2002). So scheint auch introspektiv die Rotation stärker von einer natürlichen (oder kompatiblen) Zuordnung abzuweichen als die An-

passung an eine neue visumotorische Verstärkung. Die Richtungszuordnung links-links, rechts-rechts, vorn-oben, hinten-unten scheint in viel stärkerem Maße ausgezeichnet zu sein als eine Weitzuordnung im Verhältnis 1:1.

Wenn wir von einer „natürlichen“ visumotorischen Transformation sprechen, dann meinen wir damit eine Transformation mit Eigenschaften analog zu einem „natürlichen“ raum-zeitlichen Bewegungsmuster (Heuer & Schmidt 1988). Natürliche Transformationen tendieren dazu, spontan gewählt und leicht gelernt zu werden; je stärker die zu lernende Transformation von einer natürlichen Transformation abweicht, desto schwerer fällt das Lernen, und desto leichter erfolgt ein Rückfall zu einer natürlichen Transformation, wenn die Bewegungen beispielsweise längere Zeit ohne visuelle Rückmeldungen ausgeführt werden. Auch nicht-lineare Transformationen sollten weniger natürlich sein als lineare Transformationen; innere Modelle nichtlinearer Transformationen sollten sich möglicherweise aus linearen entwickeln und ggf. zu linearen Modellen rückentwickeln (vgl. Koh & Meyer 1991).

Der Gedanke, dass die Anpassung an natürliche Transformationen eher unempfindlich für das Alter ist, während die Anpassung an nicht-natürliche Transformationen mit zunehmendem Alter eher schwerer fällt, beruht auf einer Analogie. Natürliche und nicht-natürliche Bewegungsmuster mit den oben genannten Eigenarten gibt es in sehr ausgeprägter Weise bei beidhändigen Bewegungen. Während symmetrische Bewegungen natürlich sind und recht unempfindlich für das Alter, zeigten sich bei davon abweichenden Bewegungsmustern deutliche Altersveränderungen (Serrien et al. 2000; Swinnen et al. 1998).

Der Gedanke einer altersabhängigen Präferenz für natürliche Bewegungsmuster steht im Einklang mit neurobiologische Befunden. So gehören Bereiche des Stirnhirns, zu deren Funktion die Durchsetzung zielgerichteter, flexibler Handlungsweisen gegenüber dem Routineverhalten zählt, zu den Hirnarealen, die zuerst im Laufe des Alterns an Funktionalität einbüßen (Raz 2000). Daher könnte die Tendenz zu mehr oder weniger automatisierten Ver-



haltensweisen verstärkt und ein Abweichen davon, auch im Fall von Bewegungen, erschwert werden.

3. **Mutmaßung:** Altersveränderungen der Anpassung an visumotorische Transformationen hängen von den Lernbedingungen ab.

Diese Mutmaßung ist kaum durch vorhandene Daten begründet. Eine Ausnahme ist das von Buch et al. (2003) beschriebene Ergebnis, dass der Altersunterschied bei der Anpassung an eine Rotation dann verschwindet, wenn die Rotation in kleinen Schritten eingeführt wird. Dieses Verfahren der allmählichen Einführung von visumotorischen Transformationen hat zur Folge, dass die neue Transformation kaum bemerkt wird, strategische (und bewusste) Anpassungen also fehlen. Sofern es stimmt, dass es Altersunterschiede in der Wirksamkeit strategischer Anpassungen gibt, werden sie also durch die langsame und schrittweise Einführung der Transformation verhindert.

Außer von der Art der Einführung der Transformation kann auch von der Art der Rückmeldung beim Lernen ein Einfluss auf mögliche Altersunterschiede erwartet werden, nämlich dann, wenn sich bei der Anpassung an eine Transformation Unterschiede in der Güte innerer Modelle oder der Effizienz von Regelprozessen zeigen sollten. Kontinuierliche Rückmeldung, die eine Regelung jeder einzelnen Bewegung in der Lernphase erlaubt, sollte eine Optimierung von Regelprozessen unterstützen. Terminale Rückmeldung dagegen, bei der die visuelle Rückmeldung während der Bewegung ausgeblendet ist und erst am Ende eingeblendet wird, so dass die Abweichung der Endposition von der Position des Ziels gesehen werden kann, sollte den Erwerb eines inneren Modells der Transformation unterstützen. Beispielsweise konnten Verwey und Heuer (im Druck) bei terminaler Rückmeldung den Erwerb eines inneren Modells einer nichtlinearen Transformation beobachten, während – nach unveröffentlichten Daten – bei kontinuierlicher Rückmeldung ein solches inneres Modell in der Lernphase nicht erworben wird.

4. **Mutmaßung:** Anpassung an neue visumotorische Transformationen erfordert höhere „kognitive Kosten“ mit zunehmendem Alter.

Bei älteren Menschen scheint sich die Kontrolle selbst grundlegender Bewegungsmuster wie beim Gehen und Laufen zu verändern. Speziell scheint die Verzahnung sensumotorischer und kognitiver Leistungen mit zunehmendem Alter enger zu werden (Li & Lindenberger 2002). Das zeigt sich beispielsweise in der Zunahme der Interferenz zwischen gleichzeitig ausgeführten sensumotorischen und kognitiven Aufgaben mit dem Alter (z. B. Lindenberger et al. 2000; Li, Lindenberger et al. 2001; Riby et al. 2004). Es zeigt sich auch in Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren, die bei älteren Personen bei sensumotorischen Aufgaben eine prinzipiell ausge dehntere kortikale Aktivierung zeigten als bei jüngeren Personen, und zwar auch in solchen Arealen, die eher mit sensorischen und kognitiven Prozessen zu tun haben als mit motorischen (Heuninckx et al. 2005). Direkte Hinweise darauf, dass die Interferenz mit kognitiven Aufgaben speziell beim Lernen einer visumotorischen Transformation bei älteren Personen stärker ist als bei jüngeren, werden von Bock und Schneider (2002) berichtet.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass keine der skizzierten Mutmaßungen einfach bessere oder schlechtere Bewegungsleistungen in jüngerem oder höherem Alter betrifft. Altern bedeutet zuerst einmal Veränderung, so dass es auch hier primär um die Identifikation von charakteristischen Veränderungen in der Bewegungssteuerung geht, deren Leistungswirkungen dann von Randbedingungen abhängen. Die Kenntnis dieser Veränderungen in der Bewegungssteuerung erlaubt ein vollständigeres Verständnis der Wechselbeziehungen von Mensch, Arbeitstätigkeit und Arbeitsumwelt. Sie ist Voraussetzung für eine zielgerichtete altersdifferenzierte Gestaltung von Arbeitssystemen, die über ein Denken hinausgeht, das auf altersabhängige größere und kleinere Leistungen und/oder Belastungen konzentriert ist.

Literatur

Agresta, F.; De Simone, P.; Leone, L.; Arezzo, A.; Biondi, A.; Bottero, L.; Catena, F.; Conzo, G.; Del Genio, G.; Fersini, A.; Guerrieri, M.; Ilomei, G.; Tonelli, P.; Vitellaro, M.; Docimo, G.; Crucitti, A.: Laparoscopic appendectomy in Italy: an appraisal of 26863 cases. *Journal of Laparoscopic & Advanced Surgical Techniques*, 14, 1-8 2004

Bock, O.: Adaptation of aimed arm movements to sensory-motor discordance: Evidence for direction-independent gain control. *Behavioral Brain Research*, 51, 41-50 1992

Bock, O.: Components of sensorimotor adaptation in young and elderly subjects. *Experimental Brain Research*, 160, 259-263 2005

Bock, O.; Burghoff, M.: Visuo-motor adaptation: evidence for a distributed amplitude control system. *Behavioral Brain Research*, 89, 267-273 1997

Bock, O.; Schneider, S.: Sensorimotor adaptation in young and elderly humans. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26, 761-767 2002

Buch, E. R.; Young, S.; Contreras-Vidal, J. L.: Visuomotor adaptation in normal aging. *Learning and Memory*, 10, 55-63 2003

Cooke, J. D.; Brown, S. H.; Cunningham, D. A.: Kinematics of arm movements in elderly humans. *Neurobiology of Aging*, 10, 159-165 1989

Darling, W. G.; Cooke, J. D.; Brown, S. H.: Control of simple arm movements in elderly humans. *Neurobiology of Aging*, 10, 149-157 1989

Cruse, H.; Dean, J.; Heuer, H.; Schmidt, R. A.: Utilization of sensory information for motor control. In: O. Neumann & W. Prinz (Eds.), *Relationships between perception and action. Current approaches*. (S. 43-79) Berlin: Springer 1990

Davidson, P. R.; Jones, R. D.; Sirisena, H. R.; Andreae, J. H.: Detection of adaptive inverse models in the human motor system. *Human Movement Science*, 19, 761-795 2000

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

Heuer, H.: Arbeitsbewegungen und motorische Fertigkeiten. In: B. Zimolung & U. Konradt (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie D/III/2, Ingenieurpsychologie*. (S. 71-103) Göttingen: Hogrefe 2006

Heuer, H.; Schmidt, R. A.: Transfer of learning among motor patterns with different relative timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 241-252 1988

Heuninckx, S.; Wenderoth, N.; Debaere, F.; Peeters, R.; Swinnen, S. P.: Neural basis of aging: the penetration of cognition into action control. *Journal of Neuroscience*, 25, 6787-6796 2005

Keele, S. W.; Posner, M. I.: Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 155-158 1968

Ketcham, C. J.; Seidler, R. D.; Van Gemmert, A. W.; Stelmach, G. E.: Age-related kinematic differences as influenced by task difficulty, target size, and movement amplitude. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 57, P54-P64 2002

Knoblich, G.; Kircher, T. T. J.: Deceiving oneself about being in control: conscious detection of changes in visuomotor coupling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 657-666 2004

Koh, K.; Meyer, D. E.: Function learning: Induction of continuous stimulus-response relations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 17, 811-836 1991

Krakauer, J. W.; Pine, Z. M.; Ghilardi, M. F.; Ghez, C.: Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *The Journal of Neuroscience*, 20, 8916-8924 2000

Li, K. Z. H.; Lindenberger, U.: Relations between aging sensory/sensorimotor and cognitive functions. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26, 777-783 2002

Li, K. Z. H.; Lindenberger, U.; Freund, A. M. & Baltes, P. B.: Walking while memorizing: age-related differences in compensatory behavior. *Psychological Science*, 12, 230-237 2001

Li, S. C.; Lindenberger, U.; Sikström, S.: Aging cognition: from neuromodulation to representation. *Trends in Cognitive Science*, 5, 479-486 2001

Lindenberger, U.; Marsiske, M.; Baltes, P. B.: Memorizing while walking: increase in dual-task costs from young adulthood to old age. *Psychology and Aging*, 15, 417-436 2000

McNay, E. C.; Willingham, D. B.: Deficit in learning of a motor skill requiring strategy, but not of perceptuomotor recalibration, with aging. *Learning & Memory*, 4, 411-420 1998

Myerson, J.; Hale, S.; Wagstaff, D.; Poon, L. W.; Smith, G. A.: The information-loss model: a mathematical theory of age-related cognitive slowing. *Psychological Review*, 97, 475-487 1990

Pennel, I.; Coello, Y.; Orliaguet, J.-P.: Frame of reference and adaptation to directional bias in a video-controlled reaching task. *Ergonomics*, 45, 1047-1077 2002

Pratt, J.; Chasteen, A. L.; Abrams, R. A.: Rapid aimed limb movements: Age differences and practice effects in component submovements. *Psychology and Aging*, 9, 325-334 1994

Proctor, R. W.; Vu, K. L.; Pick, D. F.: Aging and response selection in spatial choice tasks. *Human Factors*, 47, 250-270 2005

Raz, N.: Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In: F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Hrsg.) *The handbook of Aging and Cognition* (2. Aufl.). (S. 1-90) Hillsdale, N.J.: Erlbaum 2000

Riby, L. M.; Perfect, T. J.; Stollery, B. T.: The effects of age and task domain on dual task performance: a meta-analysis. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16, 863-891 2004



Risucci, D.; Geiss, A.; Gellman, L.; Pinard, B.; Rosser, J.: Surgeon-specific factors in the acquisition of laparoscopic surgical skills. *American Journal of Surgery*, 181, 289-293 2001

Rüssel, A.: Die Arbeitsbewegungen. *Zentralblatt für Arbeitswissenschaft*, 2, 71-76 1948

Seidler, R. D.; Stelmach, G. E.: Reduction in sensorimotor control with age. *Quest*, 47, 386-394 1995

Seidler-Dobrin, R. D.; Stelmach, G. E.: Persistence in visual feedback control by the elderly. *Experimental Brain Research*, 119, 467-474 1998

Serrien, D. J.; Swinnen, S. P.; Stelmach, G. E.: Age-related deterioration of coordinated interlimb behavior. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 55, P295-P303 2000

Smith, M. W.; Sharit, J.; Czaja, S. J.: Aging, motor control, and the performance of computer mouse tasks. *Human Factors*, 41, 389-396 1999

Swinnen, S. P.; Verschueren, S. M. P.; Bogaerts, H.; Dounskaia, N.; Lee, T. D.; Stelmach, G. E.; Serrien, D. J.: Age-related deficits in motor learning and differences in feedback processing during the production of a bimanual coordination pattern. *Cognitive Neuropsychology*, 15, 439-466 1998

Szafran, J.: Changes with age and with exclusion of vision in performance at an aiming test. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 3, 111-118 1951

Teeken, J. C.; Adam, J. J.; Paas, F. G. W. C.; van Boxtel, M. P. J.; Houx, P. J.; Jolles, J.: Effects of age and gender on discrete and reciprocal aiming movements. *Psychology & Aging*, 11, 195-198 1996

Verwey, W. B.; Heuer, H.: Nonlinear visuomotor transformations: locus and modularity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (im Druck)

Walker, N.; Millians, J.; Worden, A.: Mouse accelerations and performance of older computer users. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40th Annual Meeting* (pp. 151-154) Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society 1996

Walter, N.; Philbin, D. A.; Fisk, A. D.: Age-related differences in movement control: adjusting submovement structure to optimize performance. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 52B, P40-P52 1997

Welford, A. T.: Signal, noise, performance, and age. *Human Factors*, 23, 97-109 1981

Woodworth, R. S.: The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review Monographs*, 3, Nr. 13 1899

Yan, J. H.; Thomas, J. R.; Stelmach, G. E.: Aging and rapid aiming arm movement control. *Experimental Aging Research*, 24, 155-168 1998

Yan, J. H.; Thomas, J. R.; Stelmach, G. E.; Thomas, K. T.: Developmental features of rapid arm movements across the lifespan. *Journal of Motor Behavior*, 32, 121-140 2000

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. Herbert Heuer
Institut für Arbeitsphysiologie
an der Universität Dortmund
Ardeystraße 67
D-44139 Dortmund
E-Mail: heuer@ifado.de