



Una metodica innovativa per la valutazione quantitativa di abilità visuomotorie

Maurizio Bejor¹, Silvia Mandrini², Rossella Togni¹, Matteo Chiappedi²,
Federica Scarpina³, Melissa Aquino³, Francesca Giulia Magnani³, Alessio Toraldo³

¹SC Riabilitazione Specialistica, Università degli Studi di Pavia, Fondazione IRCCS Policlinico San Matteo, Pavia, ²UOC Riabilitazione, Fondazione Don Carlo Gnocchi ONLUS, Salice Terme (PV), e ³Dipartimento di Psicologia, Università degli Studi di Pavia, Pavia, Italia

Una metodica innovativa per la valutazione quantitativa di abilità visuomotorie

Le abilità visuomotorie sono alla base di una vasta gamma di azioni quotidiane. La corretta programmazione del recupero di pazienti che, a seguito di menomazioni a carico del sistema nervoso centrale, subiscono una compromissione di tali abilità, richiede lo sviluppo di sistemi di valutazione in grado di stabilire quantitativamente quale dei livelli di organizzazione del sistema visuomotorio sia coinvolto. Basandoci sulle assunzioni proposte agli inizi degli anni Novanta da Milner e Goodale riguardo all'esistenza di due vie di processamento dell'informazione visiva (ventral stream e dorsal stream) che interagiscono nella pianificazione e nella programmazione del movimento, il nostro studio si è proposto di validare l'utilizzo di una metodica in grado di valutare quantitativamente e selettivamente le abilità percettive e visuomotorie connesse, rispettivamente, a tali vie. Diciannove soggetti non patologici destrimani (età media 22.8 anni \pm 3.18) hanno partecipato all'esperimento. Sono state somministrate prove di puntamento ritardato, di pantomima di distanza ritardata e di indicazione della posizione opposta a quella ricordata sull'asse orizzontale per la valutazione del ventral stream; prove di afferramento e di puntamento immediato per la valutazione del dorsal stream. Le varie prove sono state filmate ed elaborate con il software di videoanalisi Dartfish ProSuite. L'analisi statistica dei risultati ha confermato vari pattern già noti in letteratura tra cui la predominanza attenzionale per i campi visivi in alto a sinistra, la predominanza del tono flessorio nei movimenti dell'arto superiore eseguiti nello spazio peripersonale prossimale, la tendenza a sovrastimare distanze ridotte e a sottostimare distanze maggiori, l'evitamento di stimoli di riferimento. Pertanto possiamo concludere che la metodica è affidabile ed è resa vantaggiosa dalle caratteristiche di relativa semplicità e completa trasportabilità.

An innovative method for the quantitative assessment of visuomotor skills

Visuomotor skills are the basis for a great number of daily activities. In order to define a correct rehabilitation program for neurological patients who have an impairment in these skills, it is requested to develop new tools that allow to understand which of the visuomotor system levels of organization are compromised by neurological lesions. Milner and Goodale (1992, 1995) proposed the existence of two pathways for the processing of visual information (ventral stream and dorsal stream) that interact in movement planning and programming. Starting from these theories, our study aimed to validate a method to assess the perceptual and visuomotor skills of, respectively, the ventral and the dorsal stream in a quantitative way. For this purpose right handed healthy subjects (mean age 22.8 years \pm 3.18) with normal or cor-

rected-to-normal vision participated in this experiment. To assess the ventral stream a delayed pointing task, a distance reproduction task and a delayed antipointing task were presented. To evaluate the dorsal stream we administered a grasping task and immediate pointing task. Performance was recorded and processed by the video-analysis software Dartfish ProSuite. Results referred to attentional predominance for the superior left visual fields, predominance of the flexor tone in proximal peripersonal space arm movements, obstacle avoidance, overestimation of short distances and underestimation of long distances in healthy subjects. We can therefore conclude that our method is reliable and advantageous for its characteristics of simplicity and transportability.

Introduzione

La coordinazione visuomotoria è essenziale per la destrezza delle estremità superiori [1] e rappresenta la base per una vasta gamma di azioni quotidiane dirette verso bersagli di interesse, come movimenti di raggiungimento (reaching) e di afferramento (grasping) [2]. La visione non si limita alla sola costruzione di una rappresentazione interna statica del mondo esterno, ma ha anche la funzione di guidare l'azione motoria. È stato proposto [3] che la coordinazione occhio-mano avvenga in una sequenza ordinata che prevede:

1. la visualizzazione del target;
2. la focalizzazione attenzionale su di esso;
3. la sua identificazione e localizzazione;
4. la pianificazione cognitiva e la programmazione del movimento;
5. l'attivazione dei muscoli dell'arto superiore per iniziare ed eseguire il movimento;
6. il controllo dell'azione eseguita.

Tali processi richiedono l'integrazione di diversi sistemi, inclusi il sistema somatosensoriale e percettivo, i sistemi centrali di elaborazione, monitoraggio e controllo, l'attenzione, la motivazione e l'integrità del sistema motorio. Durante queste fasi, le informazioni propriocettive e visive sono integrate al fine di guidare e correggere il movimento, provvedendo a un controllo a feedback e a feed-forward [4-5]. Vista l'importanza delle abilità visuomotorie nelle attività di vita quotidiana, è facilmente intuibile la gravità di una loro eventuale compromissione, specialmente se questa rappresenta l'esito di menomazioni a carico del sistema nervoso centrale. La corretta programmazione del recupero di tali pazienti richiede lo sviluppo e l'applicazione di sistemi di valutazione in grado di stabilire, possibilmente in maniera quantitativa, quale dei livelli di organizzazione del sistema visuomotorio sia compromesso e di garantire il monitoraggio dell'efficacia dell'intervento.

Le vie della visione: ventral stream e dorsal stream

Le informazioni ricevute nelle aree visive del lobo occipitale vengono proiettate a varie aree visive associative nei lobi parietale e temporale. Ungerleider e Mishkin (1982) hanno identificato, sulla base di precedenti teorie e di dati sperimentali ottenuti da lesioni della corteccia corticale di scimmia, la presenza di due vie di proiezione dalla corteccia visiva primaria a centri superiori [6]: il dorsal stream, così chiamato per la sua posizione dorsale nella convessità del manto corticale, che collega l'area visiva primaria (V1) al lobo parietale posteriore, responsabile della localizzazione degli oggetti, e per questo chiamato anche via del dove (where stream); il ventral stream, centrato sull'area V4, che connette l'area V1 al lobo temporale inferiore (ITL), responsabile del riconoscimento degli oggetti e per questo chiamato via del cosa (what stream) [7].

Una nuova fondamentale interpretazione dell'organizzazione del sistema visivo è stata proposta da Goodale e Milner (1995). Osservazioni compiute sulla paziente D.F., con lesioni bilaterali nell'area occipito-laterale nel ventral stream e una piccola lesione a livello della corteccia parietale posteriore sinistra,

ma con pieno risparmio delle aree visive [8], dimostrarono che la paziente presentava un profondo deficit nella discriminazione della forma degli oggetti, ma manteneva la capacità di compiere gesti accurati verso di essi [9]. Studi su soggetti sani dimostrarono inoltre la capacità, in certe condizioni sperimentali, di agire senza essere consci della propria azione [10]: sulla base di tali evidenze sperimentali Milner e Goodale hanno proposto che la differenza fondamentale tra i due stream non consiste, come volevano Ungerleider e Mishkin, nel tipo di percolato (spazio verso oggetto), ma nell'uso che i centri superiori fanno di entrambi i tipi di informazione (azione verso percezione/riconoscimento) [11].

Il ventral stream trasporta le informazioni necessarie per la percezione degli stimoli, mentre il dorsal stream quelle necessarie per il controllo dell'azione motoria diretta ad essi. Una proposta simile è stata avanzata negli stessi anni da Jeannerod (1994), il quale ha suggerito di distinguere un modo semantico e un modo pragmatico di elaborare l'informazione, volti, rispettivamente, alla comprensione cosciente del mondo esterno e alla programmazione motoria [12]. Il ventral stream trasforma dunque l'informazione visiva in rappresentazioni percettive che incorporano le caratteristiche peculiari degli oggetti e le loro relazioni, attribuendo loro un significato e stabilendone il nesso causale. Una lesione del ventral stream può produrre, oltre ad agnosia visiva, dove il riconoscimento degli oggetti non è possibile attraverso l'informazione visiva, anche negligenza spaziale unilaterale (NSU, neglect syndrome) [11], nella quale il paziente tende a ignorare gli stimoli posti nello spazio controlesionale.

In contrasto, il dorsal stream trasporta le informazioni visive riguardanti la posizione e la disposizione degli oggetti momento per momento, con lo scopo di coordinare i movimenti dell'effettore nello spazio visivo. Per tale motivo è maggiormente coinvolto nel controllo ed integrazione degli stimoli presenti in periferia e nei campi visivi inferiori, ovvero dove è più probabile rilevare contemporaneamente le mani, i piedi e il terreno, permettendo così al lobo parietale di guidare e osservare il movimento delle mani [13]. La sovraespressione dei campi visivi inferiori nel flusso dorsale è evidente in alcune zone come l'area V6a: è stato dimostrato che movimenti di puntamento con la mano guidati dalla visione sono più veloci e accurati quando vengono svolti nei campi visivi bassi, rispetto ad alcuni movimenti compiuti nei campi visivi superiori [14]. Un deficit a livello del flusso dorsale è responsabile della condizione di atassia ottica, caratterizzata da errori nella direzione dei movimenti di raggiungimento della mano verso un oggetto di interesse, soprattutto quando questo è collocato nella periferia del campo visivo [15-16].

Ventral e dorsal stream non sono indipendenti, ma funzionalmente dissociabili: la via dorsale elabora solo le azioni motorie che l'osservatore può compiere all'interno del mondo percepito visivamente utilizzando sistemi di coordinate basate sugli effettori motori dell'agente, mentre la via ventrale elabora delle rappresentazioni del mondo esterno indipendenti dall'osservatore e si basa, dunque, sull'utilizzo di coordinate basate sull'oggetto: essa media la costruzione della rappresentazione percettiva e mnestica che trascende le limitazioni temporali del dorsal stream.

È stato osservato che i due stream vengono attivati separatamente a seconda che le azioni siano effettuate in tempo reale verso un target visibile, piuttosto che con una latenza di almeno due secondi dopo la presentazione dello stimolo [17]. Milner et al. (1999) hanno mostrato come la paziente A.T., con lesioni al flusso dorsale e atassia ottica, migliorava la sua prestazione in compiti di puntamento quando lo stimolo da raggiungere scompariva più di due secondi prima dell'inizio del movimento [18].

Effetti della dominanza emisferica nelle relazioni spaziali

Negli anni '50, le prove con presentazione tachistoscopica lateralizzata di stimoli hanno mostrato che parole mostrate nella metà destra del campo visivo destro vengono identificate meglio di quelle presentate nella metà sinistra [19]. Tali primi dati sono stati interpretati in relazione all'ordine di lettura che nelle lingue occidentali va da sinistra a destra; solo l'evidenza qualche anno dopo del risultato analogo in pazienti split brain, con resezione del corpo calloso, ha modificato la prospettiva di interpretazione a favore del riconoscimento di un ruolo superiore dell'emisfero sinistro sul destro in compiti visuoverbali nell'individuo nor-

male, sia in termini comportamentali, sia di attivazione asimmetrica di aree corticali [20]. Un vantaggio dell'emisfero destro emerge invece in compiti visuospatiali, in cui, ad esempio, si richiede la localizzazione di un punto, il paragone dell'inclinazione di linee, il riconoscimento di facce [21].

Scopo del lavoro

L'obiettivo primario dello studio è la validazione di una metodica in grado di quantificare le abilità percettive (i.e. ventral stream) e visuomotorie (i.e. dorsal stream) in un campione di soggetti sani, al fine di ottenere un range di valori di normalità utilizzabile in fase sia diagnostica che prognostica. Al fine di ottenere indicazioni più precise riguardanti l'entità della compromissione di tali abilità in pazienti patologici, la metodica prevede la somministrazione di una serie di test neuropsicologici volti alla valutazione delle abilità visuomotorie dipendenti dalle due vie di processamento dell'informazione visiva. La verifica delle quantificazioni ottenute è data dal confronto con pattern noti in letteratura e tiene conto dell'influenza che eventuali fattori neuromeccanici possono esercitare nell'esecuzione dei test.

Materiali e metodi

Campione

Per questo studio è stato reclutato un gruppo di 19 soggetti sani, destrimani, con visione normale o corretta (14 femmine, 5 maschi; età media in anni pari a 22.8 ± 3.18 ; scolarità media in anni pari a 15.78 ± 1.35).

I criteri di esclusione dello studio sono stati anamnesi positiva per malattie psichiatriche, potus, malattie neurologiche di rilievo e gravi problemi binoculari non adeguatamente compensati da lenti correttive.

Tutti i soggetti sono stati informati circa la modalità e gli scopi della ricerca e hanno firmato il consenso scritto informato.

Compiti sperimentali

Per la valutazione del ventral stream ogni soggetto è stato sottoposto a prove di puntamento di una posizione ricordata (Delayed Pointing o Position) e di stima di una distanza ricordata (Delayed Distance), nonché a compiti di controllo consistenti nell'indicazione ritardata di una posizione ricordata sull'asse orizzontale (Delayed Pointing) e della posizione simmetricamente opposta a quella ricordata sull'asse orizzontale (Delayed Antipointing). Ogni soggetto è stato fatto sedere ad un tavolo, su cui sono stati posti, centralmente rispetto al suo asse sagittale mediano, un piano d'appoggio in formica bianca (reso ribaltabile in senso antero-posteriore rispetto al soggetto grazie ad un sistema a cerniera) e, a circa 55-60cm dai suoi occhi, uno schermo LCD da 22 pollici, per la presentazione degli stimoli visivi. È stato utilizzato un piano non riflettente per evitare riflessi visivi durante l'esecuzione dei compiti e per favorire una rilevazione nitida della telecamera. Le condizioni di esecuzione dei test sono state rese omogenee attraverso un apposito sistema di illuminazione calibrato a 100 Watt di potenza e indicando sul piano d'appoggio, con una fettuccia ruvida, il punto su cui i diversi soggetti dovevano appoggiare il dito indice durante la fase di proiezione dello stimolo e a cui dovevano ritornare alla conclusione di ogni trial. Per ogni trial, lo stimolo target consisteva di un cerchio nero (diametro di 5 mm) proiettato su sfondo bianco, posizionato alle distanze di 3, 6, 9 cm e lungo i raggi di 45, 135, 180, 225, 270, 315 gradi rispetto a una croce nera (5x5 mm) posta centralmente nel campo di proiezione. Prima dell'esperimento, al soggetto sono state fornite prove di esempio a scopo chiarificatore.

Prove di valutazione del ventral stream

Nella prova di Delayed Pointing (P) al soggetto è stato presentato lo stimolo visivo e, dopo un periodo di latenza di due secondi in assenza di input visivo, è stato richiesto di riproporre col dito indice la posizione del target rispetto alla croce centrale, sul piano d'appoggio ove già presente la croce centrale. Nella prova di Delayed Distance (D), dopo la presentazione dello stimolo e un periodo di latenza di due secondi, al soggetto è stato richiesto di mimare con il primo e il secondo dito la distanza tra i due elementi, in assenza di target visibile. Le due tipologie di prove sono state somministrate in blocchi separati, secondo l'ordine ABBA. Essendo le posizioni lungo l'asse orizzontale, ovvero 0 e 180 gradi, più significative per lo studio della metrica spaziale, le posizioni lungo questi assi sono state presentate ciascuna tre volte. Si è ottenuto così un totale, per ogni blocco, di 36 prove, di cui 18 relative alle posizioni non orizzontali (45, 90, 135, 225, 270, 315 gradi) e 18 relative alle posizioni orizzontali (0, 180). Per quanto riguarda la randomizzazione, sono state utilizzate sequenze pseudo-casuali, in quanto sono stati posti i vincoli di evitare la costruzione di sequenze con stimoli identici consecutivi nonché con più di tre stimoli sull'asse orizzontale consecutivi, al fine di scoraggiare la codifica puramente categoriale in termini di destra-sinistra.

Allo scopo di verificare ulteriormente le proprietà dell'elaborazione percettiva, è stata introdotta una prova di controllo sperimentale, costituita da Delayed Pointing task (DP) e di Delayed Antipointing task (DAP), dove è stato richiesto di indicare col dito indice rispettivamente la posizione ricordata corrispondente a quella visualizzata sullo schermo e la posizione simmetricamente opposta a quella proiettata. Poiché l'asse più sensibile alla detezione di disfunzioni in seguito a lesioni cerebrali è quello orizzontale, durante questo compito sono stati presentati stimoli alle distanze di 3, 6, 9 cm dalla croce centrale sull'asse 0 e 180 gradi, per un totale di 18 prove per compito.

Al soggetto non è stato imposto un limite di tempo massimo nella fase di studio dello stimolo.

Per accertare l'attivazione del solo ventral stream durante l'esecuzione di questi compiti, è stato introdotto il periodo di latenza di due secondi tra la fase di presentazione dello stimolo e la richiesta di esecuzione del gesto, come suggerito da Milner e Goodale (1995). Inoltre la stima di distanza è stata riprodotta su un piano ortogonale a quello di presentazione; qualora, invece, fosse stata effettuata con pollice ed indice appoggiati sulle due posizioni dove comparivano effettivamente gli stimoli, il compito sarebbe divenuto equivalente a una memoria di posizione, impedendo di discriminare i processi distinti che guidano l'esecuzione dei due compiti. Anche nella prova di Delayed Pointing il gesto motorio è stato dissociato dal piano di proiezione dello stimolo: se infatti si fosse chiesto al soggetto di indicare la posizione ricordata nello stesso punto dove questa appariva fisicamente, tale posizione sarebbe potuta essere codificata in termini retinotopici, eliminando alla base la differenza di processamento tra dorsal e ventral stream, che si desiderava misurare. Due ulteriori accortezze hanno reso improbabile l'utilizzo del dorsal stream:

1. la possibilità data a un secondo operatore, posizionato alla destra dell'esaminando, di mantenere sollevato il piano d'appoggio ribaltabile durante la fase di proiezione dello stimolo, appoggiandolo in posizione orizzontale solo mentre il soggetto effettuava il movimento con la mano a mezz'aria, impedendo la visualizzazione della propria mano e dunque l'attivazione del dorsal stream;
2. la rimozione dello stimolo dallo schermo due secondi prima dell'esecuzione del gesto motorio, al fine di permettere di utilizzare la memoria dello stimolo osservato e dunque l'attivazione del ventral stream.

Prove di valutazione del dorsal stream

Le prove che hanno valutato le abilità visuomotorie connesse al dorsal stream sono state di indicazione immediata di una posizione (Immediate Pointing) e di afferramento di oggetti di diverse dimensioni (Grasping). In queste prove non è stato necessario l'utilizzo dello schermo e

non è stata sfruttata la ribaltabilità del sistema. Al soggetto sono state rese accessibili le informazioni visive circa la posizione del proprio effettore nello spazio.

Nella prova di Immediate Pointing (IP), sono stati stampati su fogli A4 bianchi un cerchio nero (diametro 5mm) e una croce centrale (5x5 mm); lo stimolo target è stato presentato alle distanze di 3, 6 o 9 cm e lungo i raggi di 45, 135, 180, 225, 270, 315 gradi rispetto alla croce centrale. Al soggetto è stato richiesto di effettuare un puntamento diretto sullo stimolo. Sono state somministrate in totale 36 prove, con presentazione in ordine random degli stimoli.

Nella prova di Grasping (G), sono stati presentati regoli grigi di dimensioni 1x1x3, 1x1x6, 1x1x9 cm, ad un'inclinazione di 45 e 90 gradi rispetto all'asse di simmetria del foglio. Al soggetto è stato richiesto di afferrare con il primo e il secondo dito le estremità di regoli. Sono state effettuate 36 prove, somministrate in ordine random.

Apparato di rilevazione

Tutti i movimenti sono stati ripresi da una fotocamera posta ortogonalmente a circa 50 cm dal piano d'appoggio e successivamente rielaborati con il software di videoanalisi Dartfish ProSuite. Tale software ha consentito di misurare le posizioni e le distanze indicate dai vari soggetti, di raccogliere i dati ottenuti in tabelle e di trasferirli su fogli Excel. È stata ovviata la necessità di replicare la precisa distanza tra fotocamera e piano di ripresa grazie alla calibratura effettuata all'inizio di ogni nuova prova, eseguita riprendendo un righello millimetrato posto sul piano d'appoggio, ed estraendo, grazie alla successiva analisi dei filmati con Dartfish, l'esatta unità di misura in cm. Tale agevolazione ha garantito l'assoluta trasportabilità del sistema.

Le prove con errori da parte del soggetto e con errori di rilevazione della telecamera, sono state escluse dalle analisi. Per le prove di Delayed Pointing, Delayed Distance, Immediate Pointing e degli esperimenti di controllo sull'asse orizzontale di Delayed Pointing, Delayed Antipointing sono state calcolate le differenze tra le misure note degli stimoli somministrati e le misure indicate dai soggetti. Per la prova di Grasping è stata calcolata la differenza tra la massima apertura di primo e secondo dito prima dell'afferramento e la misura dei regoli presentati. Pertanto nel primo gruppo di prove qui citate l'indagine statistica ha consentito di quantificare il range di errore delle misure indicate dai vari soggetti, mentre nella prova di Grasping, l'analisi ha fornito indicazioni riguardo a quanto i vari soggetti aprivano in più le dita rispetto alle dimensioni dell'oggetto da afferrare quando si trovavano a circa 2/3 della fase di volo. Sono stati calcolati media e deviazione standard degli scarti di tutti i soggetti; successivamente per ogni prova è stato utilizzato il General Linear Model a diversi fattori. Ciò ha permesso di ottenere grafici esplicativi dell'andamento delle prestazioni del gruppo di soggetti testato nelle diverse prove.

Risultati

Delayed Pointing e Delayed Distance: errore sistematico

Medie e deviazioni standard sono riportate in tabella 1.

Le analisi sono state condotte separatamente a seconda della posizione spaziale degli stimoli presentati: in particolare sono state considerate le medie degli errori per i gruppi di stimoli presentati a sinistra, al centro e a destra del campo visivo e le medie degli stimoli presentati in alto, in centro e in basso.

Per quanto riguarda il primo gruppo (gruppo A, medie e deviazioni standard in tabella 1) è stato applicato il modello lineare generalizzato (GLM) con disegno 2 (tipo di compito: Delayed Pointing o Delayed Distance) x3 (posizione nello spazio: sinistra, centro, destra), da cui è risultata significativa l'interazione tra compito e posizione dello stimolo [$F(1.336, 0.856)=4.53$; $p=0.017$]. In particolare, nel compito di Delayed

Pointing l'effetto di posizione dello stimolo non è risultato significativo, mentre nel compito di Delayed Distance si è evidenziato un effetto lineare [F(1, 1.625)=5.914, p=0.026; Figura 1].

Per quanto riguarda il secondo gruppo (gruppo B, medie e deviazioni standard in tabella 1), il modello lineare generalizzato con disegno 2 (tipo di compito: Delayed Pointing o Delayed Distance) x3 (posizione nello spazio: alto, centro, basso), ha rilevato la presenza di interazione tra compito e posizione dello stimolo [F(1.71, 2.49)=32.03 p<0.001], evidenziabile nella figura 2; per il compito di Delayed Pointing l'effetto di posizione dello stimolo è risultato significativo [F(1, 477)=21.32; p<0.001], come per il Delayed Distance [F(1, 0.377)=11.01; p=0.004].

Delayed Pointing e Delayed Distance: errore casuale

Il modello lineare generalizzato con disegno 2 (compito) x3 (posizione) non ha rilevato nessun effetto né interazione significativi (medie e deviazioni standard in tabella 2).

Prove di controllo Delayed Pointing e Delayed Antipointing: errore sistematico

Medie e deviazioni standard dell'errore sistematico dei vari soggetti sono riportate in tabella 3. È stato utilizzato un modello lineare generalizzato dal disegno 2 (compito: DP e DAP) x2 (lato della risposta: destra e sinistra) x3 (distanza: 3, 6, 9 cm). È risultato significativo l'effetto della distanza dello stimolo dalla croce centrale [F(1.07, 28.12)=16.84, p=0.001]: tale effetto non dipende dal compito, come evidenziato nella figura 3.

Prove di controllo Delayed Pointing e Delayed Antipointing: errore casuale

Medie e deviazioni standard dell'errore casuale dei vari soggetti sono riportate in tabella 4. È stato utilizzato un GLM dal disegno 2 (compito: DP e DAP) x2 (lato della risposta: destra e sinistra) x3 (distanza: 3, 6, 9 cm). È risultato significativo l'effetto di distanza [F(1.78, 2.37)=25.8, p<0.001] (figura 4): per le distanze brevi (3 cm) si evidenzia una sovrastima (circa 0.75 cm) mentre per quelle lunghe (9 cm) una sottostima (circa -0.20 cm); la figura 3 mostra l'andamento sovrapponibile dei due compiti eseguiti per gli stimoli a destra e a sinistra, indicando l'indipendenza del fenomeno dal lato di risposta.

Grasping: errore sistematico

Medie e deviazioni standard dell'errore sistematico dei vari soggetti sono riportate in tabella 5. È stato effettuato un modello lineare generalizzato dal disegno 2 (inclinazione del regolo: 45° o 90°) x3 (lunghezza del regolo: 3, 6, 9 cm), mostrando un effetto significativo della lunghezza [F(1.53, 145.26)=733.30, p<0.001] e dell'inclinazione del regolo [F(1, 238.58)=1,707.22, p<0.001]; nessuna interazione è risultata significativa (Figura 5). Riguardo al fattore lunghezza è stata osservata una relazione tra l'apertura delle dita e la lunghezza del regolo: la percentuale di apertura è stata circa il 20% più ampia della lunghezza del regolo. Per quanto riguarda gli effetti dell'inclinazione, invece, è emerso che l'apertura delle dita risultava maggiore con inclinazione a 45°.

Grasping: errore casuale

Medie e deviazioni standard dell'errore casuale dei vari soggetti sono riportate in tabella 6. È stato effettuato un modello lineare generalizzato dal disegno 2 (inclinazione del regolo: 45° o 90°) x3 (lunghezza del regolo: 3, 6, 9 cm), da cui non è emerso nulla di significativo.

Immediate Pointing

Non è stata effettuata alcuna indagine statistica poiché l'errore è risultato nullo per tutti i soggetti.

Discussione

Prove di Distance e Position

I risultati statistici hanno evidenziato che nei movimenti di puntamento ritardato i soggetti hanno commesso errori di sovrastima per tutte le posizioni, più spiccati per gli stimoli posti in basso. Non si sono invece registrate differenze significative in relazione alla lateralità della posizione del compito. Gli errori di sovrastima per gli stimoli proiettati in basso sono spiegabili da fattori neuromeccanici relativi alla predominanza del tono muscolare flessorio dell'arto superiore quando vengono compiuti puntamenti nello spazio peripersonale prossimale rispetto a quello distale. Nella stima di distanza ricordata, invece, si è notata una sovrastima per gli stimoli posti in alto a sinistra rispetto agli stimoli proiettati in basso a destra. Tale fenomeno potrebbe essere spiegato da effetti di dominanza emisferica per cui l'emisfero destro, specializzato nella rappresentazione visuospatiale, analizzando gli stimoli posti nei campi visivi a sinistra, apporterebbe un vantaggio e dunque una predominanza per i campi visivi a sinistra. Anche effetti di abitudini di lettura potrebbero contribuire alla spiegazione di questo fenomeno, essendo tutti i soggetti valutati di cultura occidentale, abituati a scansionare le parole di un testo partendo da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso. A tale proposito sarebbe interessante sottoporre questi test a soggetti di cultura orientale, abituati a leggere da destra a sinistra, per verificare se sia possibile registrare il fenomeno inverso.

Prove di Delayed Pointing e Delayed Antipointing sull'asse orizzontale

Dal test degli effetti entro soggetti, eseguito considerando la media degli errori indicati, è emerso il solo effetto della distanza del pallino rispetto alla croce centrale sull'esecuzione del compito. Tale effetto ha fatto sì che per le distanze brevi (3 cm) è stata registrata una sovrastima (circa 0.75 cm), per quelle lunghe (9 cm) una sottostima (circa -0.20 cm). Come mostrato nella figura 3, l'andamento sovrapponibile dei due compiti eseguiti per gli stimoli a destra e a sinistra suggerisce l'indipendenza del fenomeno dal lato di risposta: tale comportamento rientra nell'effetto di evitamento del punto di riferimento [22], per cui una minore distanza tra il target e la croce centrale porterebbe il soggetto a indicare posizioni più distanti di quelle percepite per evitare di imbattersi nella seconda, come se rappresentasse un ostacolo; tale comportamento è assente per gli stimoli a più ampia distanza dalla croce: è infatti osservabile la negativizzazione dell'errore. Il test degli effetti entro soggetti, eseguito considerando l'errore casuale commesso in tali prove, ha evidenziato nuovamente un effetto significativo della distanza dello stimolo dalla croce centrale. Tale effetto riflette il fatto che quando un soggetto indica posizioni più lontane rispetto alla croce di riferimento ha una variabilità di risposta maggiore rispetto a quando indica posizioni vicine, pertanto l'errore aumenta in relazione all'aumentare della distanza: il fenomeno è indipendente dal lato di risposta, come visualizzato nella figura 4.

Prove di Grasping

Dal test degli effetti entro soggetti sono stati osservati effetti sull'apertura di presa sia della lunghezza, sia dell'inclinazione del regolo. L'influenza della lunghezza indica che l'apertura delle dita è tanto maggiore quanto più è lungo il regolo da afferrare, e le analisi svolte hanno indicato che la percentuale di apertura è stata di circa il 20% in più rispetto alla lunghezza del regolo. Per quanto riguarda gli effetti dell'inclinazione, invece, è emerso che l'apertura delle dita risulta maggiore quando il regolo è inclinato a 45°. Quest'ultimo fenomeno può essere spiegato da vincoli neuromotori che intervengono durante un movimento di grasping in soggetti normoinnervati: l'avvicinamento al corpo delle articolazioni di spalla, gomito e polso implica la predominanza del tono flessorio dell'arto superiore che deve essere adeguatamente controbilanciato dall'attivazione dei muscoli antagonisti estensori.

L'orientamento del regolo a 45° implica una prevalenza flessoria dell'arto superiore maggiore rispetto all'inclinazione a 90°, per cui il soggetto darebbe un comando di attivazione ai muscoli estensori più forte, inclusi i muscoli estensori delle dita. Nei due compiti verrebbe dunque compiuto lo stesso gesto, ma nell'inclinazione a 45° il comando motorio di tipo estensorio sarebbe rinforzato. Potrebbe risultare interessante la somministrazione di queste prove a soggetti con alterazioni del tono muscolare, per valutare l'eventuale abolizione di tale fenomeno. Inoltre la posizione del polso influenza la tensione dei muscoli estrinseci delle dita, per cui la maggior attivazione dei muscoli estensori del polso per le inclinazioni a 45°, rispetto a quelle a 90°, contrasterebbe maggiormente l'azione dei muscoli Flessori Profondo e Superficiale delle dita e Flessore Lungo del pollice, inducendo una maggiore apertura delle dita.

Prove di Immediate Pointing

La prova di Immediate Pointing, non richiedendo ai soggetti l'uso di informazioni visive memorizzate, ma di stimoli direttamente visibili, ha indagato abilità visuomotorie dipendenti dal flusso dorsale, permettendo di valutare eventuali condizioni patologiche di atassia ottica. I risultati sono stati negativi per tutti i soggetti, registrando una serie di scarti pari a zero.

Conclusioni

L'analisi dei dati ha evidenziato alcuni fenomeni già segnalati in letteratura. In particolare si è posta in evidenza la predominanza attenzionale per i campi visivi in alto a sinistra e la conseguente maggior accuratezza e precisione nel puntamento di stimoli ricordati in regioni dello spazio corrispondenti a tali campi visivi [23]. Si è potuto inoltre rilevare la predominanza del tono flessorio nei movimenti dell'arto superiore eseguiti nello spazio peripersonale prossimale rispetto allo spazio peripersonale distale e la tendenza a sovrastimare distanze piccole e a sottostimare distanze maggiori. Da ultimo sono stati identificati l'effetto di evitamento di stimoli di riferimento e una maggior apertura di presa tra indice e pollice qualora vengano effettuati movimenti dell'arto superiore associati a una predominanza del tono muscolare flessorio. Tali corrispondenze riflettono l'accuratezza della raccolta dei dati e dell'analisi statistica effettuata, rendendo la metodica valida e affidabile. Anche l'assenza di interazioni significative tra errori casuali e compiti svolti conferisce stabilità al sistema. La strumentazione innovativa ha consentito la misurazione precisa delle posizioni indicate, delle distanze stimate e delle aperture di presa utilizzate dai vari soggetti, con relativa facilità, senza l'utilizzo di apparecchiature invasive, né l'applicazione di marker fisici sul soggetto. La completa trasportabilità del sistema e la non necessità di ambienti preconfigurati per la sua applicazione, lo rende particolarmente vantaggioso rispetto ad altre metodiche di rilevazione, quando si volessero effettuare rilevazioni in setting osservazionali diversi.

Tabelle e figure

Tabella 1. Errore sistematico nelle prove di Delayed Pointing e Delayed Distance: medie e deviazioni standard. I dati sono stati suddivisi secondo i due gruppi di analisi per posizioni degli stimoli a sinistra, in centro e a destra del campo visivo (gruppo A) e per posizioni degli stimoli in alto, in centro e in basso del campo visivo (gruppo B).

GRUPPO A		<i>Delayed Pointing</i>	<i>Delayed Distance</i>
<i>Sinistra</i>	Media (Deviazione Standard)	0.33 (0.80)	0.59 (1.14)
<i>Centro</i>	Media (Deviazione Standard)	0.46 (0.65)	0.24 (0.95)
<i>Destra</i>	Media (Deviazione Standard)	0.34 (0.57)	0.11 (0.77)
GRUPPO B		<i>Delayed Pointing</i>	<i>Delayed Distance</i>
<i>Basso</i>	Media (Deviazione Standard)	0.73 (0.89)	0.24 (0.89)
<i>Centro</i>	Media (Deviazione Standard)	0.41 (0.55)	0.13 (0.87)
<i>Alto</i>	Media (Deviazione Standard)	0.02 (0.67)	0.43 (0.91)

Tabella 2. Errore casuale nelle prove di Delayed Pointing e Delayed Distance: medie e deviazioni standard. I dati sono stati suddivisi secondo i due gruppi di analisi per posizioni degli stimoli a sinistra, in centro e a destra del campo visivo (gruppo A) e per posizioni degli stimoli in alto, in centro e in basso del campo visivo (gruppo B).

GRUPPO A		<i>Media</i>	<i>Deviazione Standard</i>
<i>Delayed Distance</i>	Sinistra	0.91	0.26
<i>Delayed Distance</i>	Centro	0.82	0.32
<i>Delayed Distance</i>	Destra	0.79	0.35
<i>Delayed Pointing</i>	Sinistra	1.04	0.74
<i>Delayed Pointing</i>	Centro	1.14	0.47
<i>Delayed Pointing</i>	Destra	1.06	0.67
GRUPPO B		<i>Media</i>	<i>Deviazione Standard</i>
<i>Delayed Distance</i>	Basso	0.88	0.49
<i>Delayed Distance</i>	Centro	0.83	0.36
<i>Delayed Distance</i>	Alto	0.96	0.52
<i>Delayed Pointing</i>	Basso	0.96	0.62
<i>Delayed Pointing</i>	Centro	1.01	0.79
<i>Delayed Pointing</i>	Alto	0.98	0.54

Tabella 3. Errore sistematico nelle prove di controllo Delayed Pointing (DP) e Delayed Antipointing (DAP) sull'asse orizzontale: medie e deviazioni standard. I dati sono divisi secondo le distanze dello stimolo di 3, 6, 9 cm dalla croce centrale.

	DP 3cm	DP 6cm	DP 9cm	DAP 3cm	DAP 6cm	DAP 9cm
<i>Media</i>	0.68	0.17	-0.21	0.77	0.44	-0.22
<i>Deviazioni Standard</i>	0.58	0.68	0.82	0.56	0.59	0.93

Tabella 4. Errore casuale nelle prove di controllo Delayed Pointing (DP) e Delayed Antipointing (DAP) sull'asse orizzontale: medie e deviazioni standard. I dati sono divisi secondo le distanze dello stimolo di 3, 6, 9 cm dalla croce centrale.

	DP 3cm	DP 6cm	DP 9cm	DAP 3cm	DAP 6cm	DAP 9cm
<i>Media</i>	0.45	0.65	0.82	0.43	0.60	0.75
<i>Deviazioni Standard</i>	0.54	0.31	0.41	0.43	0.40	0.55

Tabella 5. Errore sistematico delle prove di Grasping: medie e deviazioni standard. I dati sono suddivisi a seconda della lunghezza di 3, 6, 9 cm del regolo e dell'inclinazione di presentazione a 45° o 90°.

		<i>Regolo da 3 cm</i>	<i>Regolo da 6 cm</i>	<i>Regolo da 9 cm</i>
<i>Inclinazione a 45°</i>	Media	3.91	6.02	7.67
	Deviazioni Standard	0.44	0.63	0.56
<i>Inclinazione a 90°</i>	Media	1.00	2.96	4.48
	Deviazioni Standard	0.39	0.48	0.46

Tabella 6. Errore casuale delle prove di Grasping: medie e deviazioni standard. I dati sono suddivisi a seconda della lunghezza di 3, 6, 9 cm del regolo e dell'inclinazione di presentazione a 45° o 90°.

		<i>Regolo da 3 cm</i>	<i>Regolo da 6 cm</i>	<i>Regolo da 9 cm</i>
<i>Inclinazione a 45°</i>	Media	0.54	0.59	0.49
	Deviazioni Standard	0.34	0.34	0.16
<i>Inclinazione a 90°</i>	Media	0.46	0.51	0.64
	Deviazioni Standard	0.20	0.29	0.31

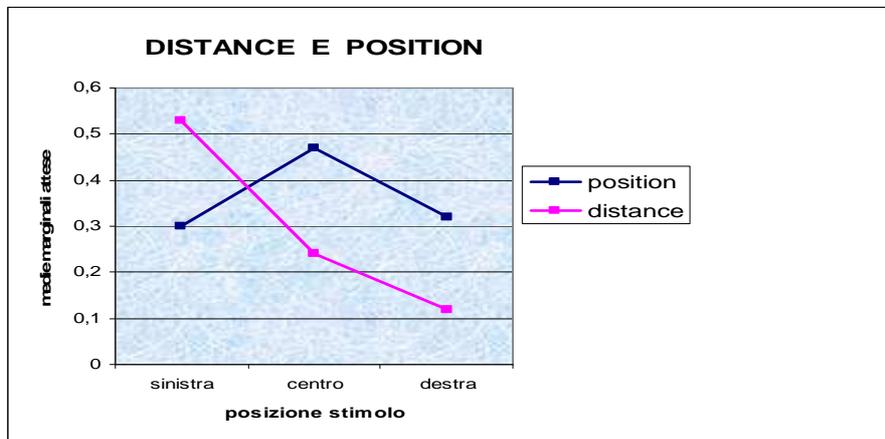


Figura 1. Errore sistematico in cm nelle prove di Delayed Distance e Delayed Position per i gruppi di stimoli proiettati a sinistra, al centro e a destra del campo visivo. Sull'asse Y sono indicate le medie degli errori compiuti dai soggetti, sull'asse X la posizione degli stimoli secondo i gruppi sinistra, centro, destra.

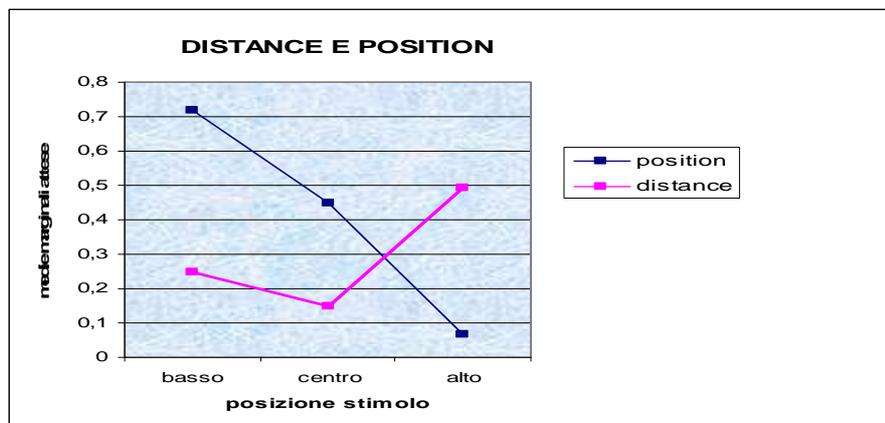


Figura 2. Errore sistematico in cm nelle prove di Delayed Distance e Delayed Position per i gruppi di stimoli proiettati in basso, in centro e in alto del campo visivo. Sull'asse Y sono indicate le medie degli errori compiuti dai soggetti, sull'asse X la posizione degli stimoli secondo i gruppi basso, centro, alto.

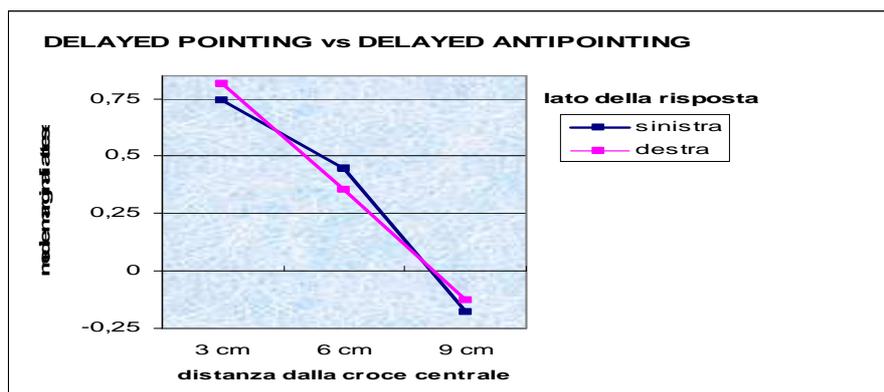


Figura 3. Errore sistematico in cm nelle prove di controllo di Delayed Pointing e Delayed Antipointing per i gruppi di stimoli proiettati a 3, 6, 9, cm dalla croce centrale. Il grafico rosa indica le medie degli errori per gli stimoli proiettati a destra della croce centrale, il grafico blu indica le medie degli errori per gli stimoli proiettati a sinistra della croce centrale. Sull'asse Y sono indicate le medie degli errori compiuti dai soggetti, sull'asse X la distanza degli stimoli dalla croce centrale.

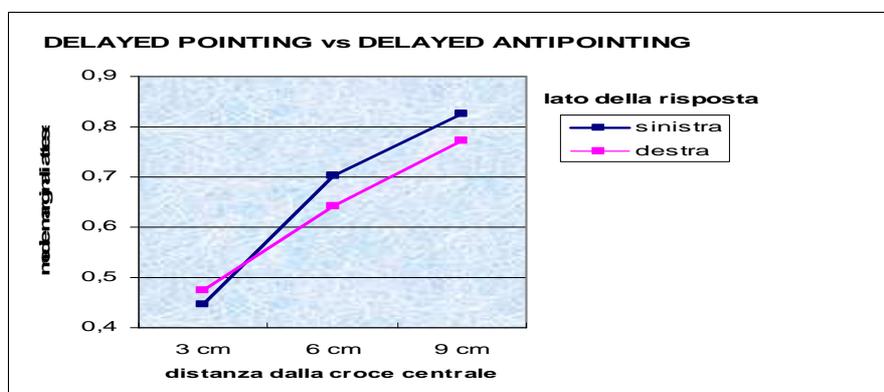


Figura 4. Errore casuale in cm nelle prove di controllo di Delayed Pointing e Delayed Antipointing per i gruppi di stimoli proiettati a 3, 6, 9, cm dalla croce centrale. Il grafico rosa indica le deviazioni standard degli errori per gli stimoli proiettati a destra della croce centrale, il grafico blu indica le deviazioni standard degli errori per gli stimoli proiettati a sinistra della croce centrale. Sull'asse Y sono indicate le medie degli errori compiuti dai soggetti, sull'asse X la distanza degli stimoli dalla croce centrale.

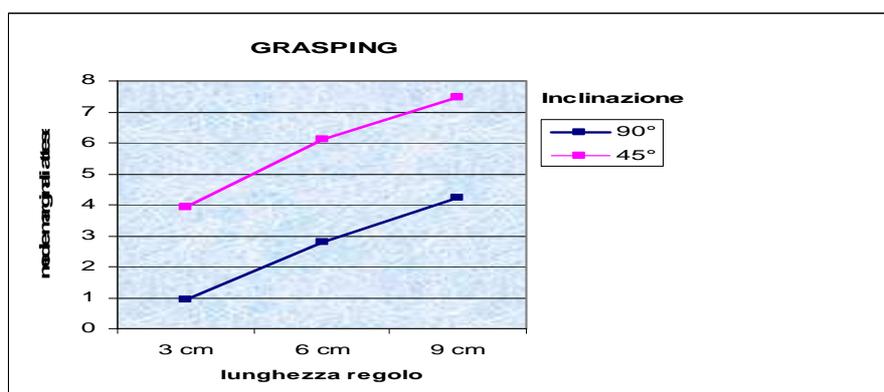


Figura 4. Media delle massime prese di apertura per i regoli di 3, 6, 9 cm di lunghezza e a 45° e 90° di inclinazione. Il grafico rosa si riferisce alle inclinazioni a 45°, il grafico blu alle inclinazioni a 90°. Sull'asse Y sono indicate le medie delle massime aperture di presa, sull'asse X le lunghezze dei regoli di 3, 6, 9 cm.

Bibliografia

1. Desrosiers J, Hebert R, Bravo G. Upper-extremity motor coordination of healthy elderly people. *Age Ageing* 1995;24:108-112.
2. Crawford JD, Medendorp WP, Marotta JJ. Spatial transformations for eye-hand coordination. *J Neurophysiol* 2004;92:10-19.
3. Jeannerod M. Mechanism of visuomotor coordination: a study in normal and brain-damaged subject. *Neuropsychologia* 1986;24(1):41-78.
4. Turvey MT, Fonseca S. Nature of motor control: perspective and issues. In: Progress in motor control: a multidisciplinary perspective. *Springer Verlag*, New York, NY, 2009.
5. Gottlieb G, Song Q, Almeida G et al. Directional control of planar human arm movement. *J Neurophysiol* 1997;78(6):2985-2988.
6. Ungerleider L, Mishkin M. Two cortical visual systems. In: Analysis of Visual Behaviour. *MIT press*, Cambridge, UK, 1982.
7. Rizzolatti G, Sinigaglia C. So quel che fai. Il cervello che agisce e i neuroni specchio. *Raffaello Cortina Editore*, Milano, IT, 2006.
8. James WT, Culham J, Humphrey GK et al. Ventral occipital lesion impair object recognition but not object directed grasping: an fMRI study. *Brain* 2003;126:2463-2475.
9. Milner AD, Perrett DI, Johnston RS et al. Perception and action in visual form agnosia. *Brain* 1991;114:405-428.
10. Dehaene S, Changeux JP, Naccache L et al. Conscious, preconscious, and subliminal processing: A testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences* 2006;10:204-211.
11. Milner AD, Goodale MA. The visual brain in action. *Oxford University press*, Oxford, UK, 1995.
12. Jeannerod M. The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral Brain Sciences* 1994;17:187-245.
13. Motter BC, Mountcastle VB. The functional properties of the light-sensitive neurons of the posterior parietal cortex studied in waking monkeys: foveal sparing and opponent vector organization. *J Neurosci* 1981;1:3-26.
14. Danckert E, Goodale MA. Superior performance for visually guided pointing in the lower visual field. *Experimental Brain Research* 2001;137:303-308.
15. Gréa H, Pisella L, Rossetti Y et al. A lesion of the posterior parietal cortex disrupts on-line adjustments during aiming movements. *Neuropsychologia* 2002;40:2471-2480.
16. Pisella L, Gréa H, Tilikete C et al. An automatic pilot for the hand in human posterior parietal cortex: Toward reinterpreting optic ataxia. *Nature Neuroscience* 2000;3:729-736.
17. Westwood DA, Goodale MA. Perceptual illusion and the real-time control of action. *Spatial Vision* 2003;16:243-254.
18. Milner AD, Paulignan Y, Dijkerman HC et al. A paradoxical improvement of misreaching in optic ataxia: new evidence for two separate neural systems for visual localization. *The Royal Society* 1999;266:2225-2229.
19. Tassinari G. Dominanza emisferica e corpo calloso. In: *Fisiologia Medica, Edi-ermes s.r.l.*, Milano, IT, 2005.
20. Toga AW, Thompson PM. Mapping brain asymmetry. *Nat Rev Neurosci* 2003;4:37-48.
21. Hutsler J, Galuske RAW. Hemispheric asymmetries in cerebral cortical networks. *Trends Neurosci* 2003;26:429-435.
22. Milner AD, Goodale MA. Two visual systems re-viewed. *Neuropsychologia* 2008;46:774-785.
23. De Montalembert M, Auclair L, Mamassian P. Where is the sun for hemi-neglect patients? *Brain and Cognition* 2010;72:264-270.