

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

**Corso di laurea in Scienze psicologiche cognitive e
psicobiologiche**

Elaborato finale

**Interazioni numerico-motorie nei giovani adulti: uno studio
fNIRS**

Numerical-motor interaction in young adults: a fNIRS study

Relatrice

Prof.ssa Mariagrazia Ranzini

Correlatrice

Dott.ssa Sara Noacco

Laureando: Andrea De Pretto

Matricola: 2115667

Anno accademico 2025/2026

Abstract

Nel presente studio viene indagata l'interazione tra le abilità motorie e la cognizione numerica in un ampio gruppo di giovani adulti ($N=84$). L'obiettivo principale dello studio è capire le associazioni tra abilità finomotorie e cognizione numerica, e verificare la relazione di tali abilità con gli indici di connettività funzionale ottenuti tramite l'utilizzo della tecnica fNIRS (functional Near Infrared Spectroscopy). L'esperimento si è articolato in due fasi: nella prima fase veniva richiesto al partecipante di svolgere delle batterie di test standardizzati per valutarne le abilità manuali, fino motorie, cognitive, e in particolare numeriche. Nella seconda fase l'attività emodinamica corticale a riposo veniva registrata per 15 minuti con l'utilizzo della fNIRS. Sono state svolte delle analisi statistiche di base per ogni test e, successivamente, sono stati calcolati i coefficienti di correlazione di Spearman per valutare la relazione tra la performance del partecipante nei compiti numerici e la performance nei compiti motori. In seguito, sono stati ricavati gli indici di connettività funzionale a partire dal dato fNIRS registrato. Gli indici sono stati infine messi in relazione con il punteggio ottenuto da ogni partecipante nei test neuropsicologici. Questo studio potrebbe rivelare delle importanti connessioni tra alcuni network cerebrali comuni a compiti cognitivi e motori rilevati utilizzando la fNIRS e la prestazione nei test svolti dal partecipante stesso.

Indice

Introduzione

<i>La cognizione numerica</i>	5
<i>Le abilità fino motorie</i>	6
<i>La cognizione incarnata</i>	9
<i>Modello ATOM e GradiATOM</i>	9
<i>La cognizione incarnata nel ciclo di vita</i>	10
<i>fNIRS</i>	11
<i>La fNIRS nel resting state</i>	13
MATERIALI E METODI	15
<i>Partecipanti</i>	15
<i>Edinburgh Handedness Inventory (EHI)</i>	15
<i>Montreal Cognitive Assessment (MoCA)</i>	15
<i>Gnosia Digitale</i>	16
<i>Digit Span</i>	16
<i>Test di Corsi</i>	17
<i>Purdue Pegboard Test</i>	17
<i>9 hole peg test</i>	18
<i>Lsc-sua (lettura, scrittura e calcolo – studenti universitari e adulti)</i>	18
<i>fNIRS</i>	18
<i>Resting state e preprocessing segnale fNIRS</i>	20
<i>Analisi della connettività funzionale</i>	22
RISULTATI	23
<i>Statistiche di Base</i>	23
<i>Risultati dei test neuropsicologici</i>	24
<i>Risultati e Correlazioni della connettività funzionale</i>	26

<i>Risultati e correlazioni della connettività funzionale con i test neuropsicologici.....</i>	26
DISCUSSIONE	28
<i>Analisi correlazionale dei test neuropsicologici.....</i>	28
<i>Analisi correlazionale della connettività funzionale con i test neuropsicologici.....</i>	28
<i>Pattern osservabili: test numerici.....</i>	28
<i>Pattern osservabili: test motori</i>	30
<i>Limiti dello studio</i>	30
<i>Conclusioni</i>	31
<i>Bibliografia.....</i>	32

INTRODUZIONE

La cognizione numerica

La cognizione numerica è l'abilità di percepire, stimare e manipolare i numeri. La comprensione di numeri e quantità è fondamentale nella società odierna. Disturbi legati alla dimensione numerica, come la discalculia e l'ansia per la matematica, possono complicare la vita professionale e il benessere psicologico delle persone (Sixtus, 2023).

Il concetto di numero è riconducibile a una proprietà di un insieme di oggetti presenti nel mondo, ma il termine numero può risultare ambiguo, poiché racchiude diverse sfaccettature (Dehaene, 1992). Dehaene (1992) introduce il concetto di *numerosità*, che viene usato per riferirsi a quantità numericamente misurabili. In quest'ottica, viene proposto il termine *numeron* per indicare la rappresentazione mentale della numerosità. L'autore definisce la quantificazione come il "prendere" la numerosità di un insieme di oggetti e associarne il rispettivo *numeron* mentale.

Dehaene propone il *Triple Code Model* (TCM), secondo cui i numeri potrebbero essere codificati in tre modi. Il primo, visivo-verbale, in cui i numeri verrebbero rappresentati e manipolati secondo il modello linguistico utilizzato, lettera per lettera. Il secondo, visivo arabo, dove i numeri verrebbero manipolati secondo il loro rispettivo numero arabo. Infine, per terzo, un modo corrispondente alla loro grandezza analogica, in cui i numeri sono codificati come distribuzioni variabili di attivazione lungo una linea numerica mentale orientata nello spazio. Successivamente, Dehaene et al. (1993) riprendono il concetto di grandezza analogica (*magnitude*) e introducono l'effetto SNARC (*Spatial-Numerical Association of Response Codes*): tramite una serie di esperimenti dimostrano che la mente associa intrinsecamente le grandezze numeriche a quantità spaziali fisiche (numeri piccoli a destra e numeri grandi a sinistra). Van Dijck e Fias (2011) contestano questa interpretazione dell'effetto SNARC, sostenendo che potrebbe trattarsi di una strategia adottata per svolgere al meglio il compito richiesto. Propongono quindi un approccio basato sulla memoria di lavoro: sarebbe la posizione di un oggetto all'interno di una sequenza a determinare l'associazione tra numeri e spazio, in cui i numeri più piccoli verrebbero posizionati più a sinistra e i numeri più grandi a destra, lungo un continuum. Per dimostrare la loro posizione, i ricercatori hanno condotto due esperimenti. Nel primo, ai partecipanti veniva chiesto di memorizzare una sequenza di numeri in

ordine casuale e poi di effettuare un giudizio di parità. Come risultato, hanno scoperto che i numeri all'inizio della sequenza venivano risposti più velocemente con la mano sinistra, mentre quelli alla fine venivano risposti più velocemente con la mano destra. Per assicurarsi che tale effetto non fosse prerogativa dei numeri, hanno replicato l'esperimento sostituendo le cifre con parole (nomi di frutta e verdura). Anche in questo caso, hanno osservato degli effetti di associazione spazio-posizione: le prime parole facilitavano le risposte con la mano sinistra, mentre le ultime con la destra. Hanno quindi dimostrato e concluso che l'effetto SNARC potrebbe essere dovuto a associazioni spazio-posizione temporanee che si formano nella memoria di lavoro, e non alle rappresentazioni semantiche a lungo termine dei numeri.

Sixtus et al, (2023) affermano che il concetto di grandezza (o *magnitude*) risulti, nel modello TCM, troppo poco separato dagli aspetti semantici del numero: il TCM assumerebbe che il significato dei numeri derivi quasi esclusivamente dalla loro grandezza analogica. Aspetti come la cardinalità e l'ordinalità non sarebbero stati tenuti in sufficiente considerazione dall'autore. Inoltre, il modello TCM non riconosce le dita come un formato rappresentazionale nel bambino, nonostante i simboli creati con le dita coinvolgano tutti e tre i diversi registri del modello TCM. Proponendo una prospettiva senso-motoria, e quindi per superare l'idea che la percezione dei numeri non sia legata al sistema motorio, Sixtus et al. (2023) mostrano come la comprensione numerica emerga ancorando tre concetti chiave, introdotti parzialmente dal modello TCM, a sistemi cerebrali legati alla percezione dell'azione. La *magnitude* sarebbe legata al sistema di grandezza generalizzato (GMS), nei lobi parietali, che processa anche spazio e tempo ai fini dell'azione. Il concetto di ordinalità sarebbe legato al sistema motorio attraverso la mappatura e quindi una 'cognitivizzazione' dello spazio: a livello cerebrale, sarebbe supportata dall'attività dei lobi parietali superiori. Infine, la cardinalità si baserebbe sul sistema visuo-motorio, che ci permette di riconoscere immediatamente piccole quantità (subitizzare).

Le abilità fino motorie

Sixtus e colleghi affermano quindi che il concetto di numero è radicato nelle esperienze sensomotorie: in questo paragrafo vediamo come le abilità fino-motorie siano legate alle abilità matematiche e accademiche. Prima di tutto, è necessario definire il concetto di

abilità motoria fine. Pitchford et al. (2016) descrivono il movimento motorio fine come l'abilità di conciliare il controllo e la coordinazione della muscolatura distale della mano e delle dita. Per completare questa definizione è necessario distinguere due componenti del movimento fino-motorio. L'integrazione fino-motoria è l'abilità di sincronizzare il movimento mano-occhio con l'elaborazione di uno stimolo visivo per eseguire uno specifico movimento: si basa fortemente sul sistema visivo. La precisione fino-motoria è considerata un'abilità puramente manuale, che si basa in minima parte sulla componente visiva: è definita come la capacità di eseguire movimenti manuali accurati, con un contributo minimale del sistema visivo. Carlson et al. (2013) hanno indagato quale tra la coordinazione visuo-motoria e l'integrazione visuo-spaziale sia il predittore più forte del successo accademico dei bambini. Nello studio di Carlson et al. vengono quindi valutate separatamente queste due componenti e si discute quale delle due sia maggiormente associata a matematica, lettura, scrittura e, più in generale, alle abilità cognitive e accademiche. Sembra che l'associazione tra abilità fino-motorie e risultati accademici sia dovuta all'integrazione visuo-motoria, e che questa componente sia correlata maggiormente alla matematica e alla scrittura, più che alla lettura e al parlato.

Jeannerod (1984) ha descritto per la prima volta in maniera dettagliata il processo di un'azione più naturale: nello studio, l'autore si concentra principalmente sul movimento di prensione. Questo movimento si compone di due movimenti di base, distinti e coordinati: il primo è il movimento di trasporto del braccio fino a raggiungere l'oggetto; il secondo, invece, è la presa dell'oggetto. Questi movimenti sono considerati naturali perché coinvolgono un gran numero di articolazioni. Il primo movimento viene quindi chiamato *reaching*: questo movimento implica il calcolo delle coordinate dell'oggetto nello spazio, e tale operazione è svolta dal sistema visivo. Il secondo movimento, invece, viene chiamato *grasping* e riflette il calcolo della forma, delle dimensioni e del peso dell'oggetto: anche questa operazione è compiuta dal sistema visivo. Studi su bambini appena nati hanno dimostrato che *reaching* e *grasping* non si sviluppano con la stessa velocità e nello stesso tempo e potrebbero rimanere indipendenti prima che diventino completamente coordinati (Di Franco, Muir, & Dodwell, 1978). Infatti, l'azione di afferrare un oggetto sarebbe il risultato della combinazione di *reaching* e *grasping*: il trasporto del braccio coinvolge le articolazioni prossimali, mentre l'afferramento dell'oggetto coinvolgerebbe le articolazioni distali. Un bambino piccolo può quindi

essere in grado di ‘dirigere’ il braccio verso un oggetto senza saper aprire e preparare le dita, oppure stringere un oggetto messo nella sua mano senza saper coordinare il braccio per andarlo a prendere.

Andres et al. (2007) hanno dimostrato che l'elaborazione della grandezza numerica interagisce con la stima dimensionale durante il *grasping*. La visione di numeri grandi (stampati sul blocco da afferrare nell'esperimento) aumenta la grandezza della presa: questo effetto si riduce progressivamente man mano che la mano si avvicina all'oggetto. Inoltre, studi recenti di *brain imaging* hanno mostrato che i giudizi sulla grandezza numerica e sulla grandezza fisica di un oggetto sono entrambi associati a un incremento dell'attività del solco intraparietale e della corteccia premotoria (Andres et al., 2007; Fias et al., 2003). Come evidenziato da Ranzini et al. (2025), queste due aree mostrano specificità funzionale: il solco intraparietale è coinvolto in molte funzioni cognitive di base (l'elaborazione spaziale, l'attenzione, la memoria di lavoro e il linguaggio), mentre le aree premotoria e motoria sembrano attivarsi per processi generali legati alla preparazione e all'esecuzione della risposta.

Uno studio di Lindemann et al. (2007) ha testato il movimento di *grasping* in risposta a un numero presentato visivamente. I risultati hanno mostrato che l'inizio del movimento era velocizzato quando i partecipanti dovevano eseguire una presa di precisione in risposta a numeri piccoli. Quando invece i numeri presentati erano più grandi, l'apertura massimale durante la fase di *reaching* era maggiore. Un altro aspetto interessante dello studio di Lindemann (2007) riguarda il fatto che la grandezza del numero non influenzava l'azione se questa includeva solo una componente di *reaching* e non di *grasping*: ad esempio, se l'azione consisteva nel *pointing* (ovvero nell'indicare l'oggetto più grande o più piccolo, che quindi non coinvolge una componente di *grasping*), i tempi di reazione e la curvatura della traiettoria del dito, in questo caso, non erano influenzati dalla grandezza dei numeri. Questi risultati sembrerebbero dimostrare come ci sia un collegamento tra la cognizione numerica e l'azione: la grandezza del numero non influenza solo la pianificazione per afferrare l'oggetto, quindi i tempi di reazione allo stimolo (se il soggetto doveva rispondere in seguito alla presentazione di un numero più piccolo, una presa di precisione veniva eseguita molto più velocemente), ma anche il

modo in cui viene eseguita l'azione, quindi la mano tende ad aumentare la sua apertura dopo la presentazione di un numero più grande.

La cognizione incarnata

Viste le evidenze del collegamento tra il sistema motorio e il sistema numerico, risulta fondamentale introdurre il concetto di cognizione incarnata. La teoria della cognizione incarnata (*Embodied Cognition*, Wilson, 2002) assume che le rappresentazioni concettuali non siano soltanto il risultato di un network di rappresentazioni astratte, ma sostiene che i simboli diventino importanti nel momento in cui vengono collegati a un'esperienza corporea (Sixtus et al., 2023). Il lavoro di Wilson (2002) cerca di fare chiarezza sull'argomento, che fino a quel momento storico risultava confuso. Come prima cosa, l'autrice spiega come l'approccio 'incarnato' del linguaggio, e in particolare della sintassi, potrebbe essere strettamente legato alla semantica e basarsi sulle rappresentazioni della nostra conoscenza corporea del mondo: queste rappresentazioni sfrutterebbero la nostra esperienza percettiva per codificare le relazioni grammaticali all'interno di una frase. Successivamente, Andres et al. (2004) indagano il rapporto tra il sistema motorio e la cognizione numerica, partendo dalle evidenze del contare con le dita e dell'indicare con il dito per quantificare un insieme di oggetti. Riportano anche evidenze dai dati di neuroimaging: compiti aritmetici o di confronto numerico sembrerebbero attivare le aree parietali e premotorie, vicine a quelle attive durante la manipolazione di oggetti o i compiti di *grasping*.

Modello ATOM e GradiATOM

All'interno della cornice teorica della cognizione incarnata, Walsh (2003) propone il modello *A Theory of Magnitude (ATOM)*. In questa teoria viene reinterpretato il processamento cognitivo dei concetti di spazio, tempo e quantità, sostenendo che queste tre dimensioni dell'ambiente non vengano elaborate separatamente, ma condividano i medesimi meccanismi di elaborazione. Al centro di questo modello vi è il ruolo della corteccia parietale, in particolare della corteccia parietale inferiore, che fungerebbe da substrato neurale condiviso, un "punto d'incontro" per queste tre grandezze. Secondo Walsh, questa architettura corticale non è casuale, ma è un risultato evolutivo, dettato dal bisogno dell'organismo di muoversi nell'ambiente e di eseguire rapide trasformazioni sensorimotorie. A supporto di questa visione vi sono evidenze provenienti dagli studi di

neuroimaging, che mostrerebbero una sovrapposizione di attività a livello parietale: ad esempio, sottraendo l'attivazione di compiti di controllo spaziale o di intensità da un compito di giudizio temporale, l'attivazione specifica della corteccia parietale destra scompare, a dimostrazione dell'utilizzo delle medesime strutture per elaborare il concetto di grandezza. Un'evoluzione naturale e più dettagliata di questa prospettiva teorica è rappresentata dal modello GradiATOM (*Gradient Theory of Magnitude*) proposto da Cona e colleghi (2021, 2024), che spiega come l'elaborazione di queste grandezze si organizzi all'interno delle specifiche strutture corticali seguendo transizioni a "gradiente". Secondo questa teoria, lungo un gradiente corticale le caratteristiche funzionali delle aree cerebrali variano in modo continuo, facendo sì che le funzioni destinate a interagire strettamente tra loro si collochino in posizioni spazialmente contigue. Gli autori hanno infatti individuato specifiche regolarità anatomiche a livello di elaborazione: nell'Area Motoria Supplementare (SMA), l'elaborazione dello spazio attiva maggiormente le porzioni più anteriori (pre-SMA), mentre il tempo recluta le porzioni più posteriori (SMA-proper); nelle regioni frontali e parietali, l'elaborazione dello spazio è supportata dalle aree più dorsali, mentre il tempo coinvolge maggiormente le regioni ventrali, con una preferenza del giro frontale inferiore destro per l'elaborazione del tempo e del solco intraparietale destro per lo spazio. Infine, estendendo il modello per includere specificamente l'elaborazione della numerosità, Cona e colleghi hanno dimostrato che l'elaborazione dei numeri si sovrappone a quella del tempo e dello spazio fungendo da "ponte": la vicinanza neurale tra l'elaborazione dello spazio e dei numeri emerge in modo predominante nelle regioni parietali e nella SMA, mentre la prossimità cerebrale tra l'elaborazione del tempo e dei numeri si manifesta principalmente nelle regioni frontali, confermando che questa organizzazione a gradiente garantisce la contiguità spaziale necessaria per un'efficiente integrazione di tutte e tre le grandezze al fine di guidare l'azione.

La cognizione incarnata nel ciclo di vita

Swathi et al. (2026) sintetizzano le evidenze per esplorare la relazione tra cognizione numerica e atto motorio lungo l'intero ciclo di vita. Il legame tra numeri e azioni sembrerebbe emergere sin dalla prima infanzia: durante questa fase, l'esplorazione fisica dell'ambiente e le abilità fino-motorie, in particolare la capacità di riconoscere le dita, diventerebbero predittori dell'acquisizione delle abilità numeriche, come l'aritmetica.

L'uso delle dita fungerebbe da impalcatura: bambini con discalculia presenterebbero deficit nella gnosis digitale e bambini con disturbi motori mostrerebbero difficoltà matematiche associate. Negli adulti, l'accoppiamento numeri-azione si dimostra ancora robusto: la percezione di numeri piccoli velocizzerebbe l'avvio delle prese di precisione e causerebbe deviazioni della traiettoria dell'azione verso sinistra, mentre i numeri grandi facilitano le prese di forza e migliorano l'efficienza dei movimenti verso destra. La metanalisi sembrerebbe dimostrare come in compiti di confronto numerico e svolgimento di azioni come *grasping* e *reaching* si osservi una convergenza nell'attivazione del solco intraparietale sia destro che sinistro, nel lobulo parietale superiore e nel giro precentrale sinistro. Negli anziani, l'integrazione tra i processi numerici e i sistemi di azione sembra preservarsi. Gli anziani recluterebbero reti di neuroni e motorie più vaste per compensare le difficoltà e l'invecchiamento fisiologico, riuscendo a mantenere una buona prestazione nei compiti matematici.

fNIRS

La luce continua (continuous light) è stata usata come tecnica non invasiva per indagare il tessuto umano, come il seno e la testa, facendo passare la luce attraverso il corpo sin dall'inizio del XIX secolo (Scholkmann et al., 2014). Nel 1930, dei ricercatori tedeschi (Matthes e Gross, 1938) hanno dimostrato per la prima volta la possibilità di determinare per via spettroscopica le concentrazioni di ossiemoglobina (O_2Hb) e deossiemoglobina (HHb) nei tessuti umani, impiegando due lunghezze d'onda situate rispettivamente nello spettro del rosso e del vicino infrarosso.

Nel 1977, Jobsis (1977) dimostrò per primo la possibilità di monitorare in modo continuo e non invasivo le concentrazioni di O_2Hb e HHb a livello cerebrale. Perciò, è conosciuto come il padre della fNIRS (*Functional Near Infrared Spectroscopy*).

Bunce et al. (2006) forniscono una descrizione più dettagliata dei principi di funzionamento della spettroscopia del vicino infrarosso. Sappiamo come lo stato funzionale di un tessuto influenzi come la luce viene assorbita dagli stessi; il cervello umano cambia a livello fisiologico in risposta a stimoli ambientali e questi cambiamenti non sono altro che cambiamenti di volume del sangue e dell'attività elettrochimica. La fNIRS riesce a registrare questi cambiamenti fisiologici utilizzando la luce del vicino infrarosso (circa 700-950 nm). L'attività neuronale è caratterizzata da un incremento del

metabolismo del glucosio: ciò si traduce in un aumento del consumo sia di glucosio sia di ossigeno. Quando si riducono i livelli di glucosio e ossigeno, a seguito di un incremento del consumo, aumentano il flusso e il volume di sangue nella zona in cui avviene il fenomeno: l'ossigeno trasportato è generalmente maggiore di quello richiesto dall'attività neuronale, e ciò porta a una sovrabbondanza di sangue ossigenato nelle zone maggiormente attive. Visto che sia il sangue ossigenato che quello deossigenato hanno caratteristiche ottiche differenti nello spettro del vicino infrarosso, i cambiamenti di concentrazione di queste molecole durante l'attività possono essere misurati usando la spettroscopia del vicino infrarosso.

La tecnica fNIRS si distingue da altre tecniche di *neuroimaging* per la sua non invasività (Lu et al., 2010). Rispetto ad altre tecniche di neuroimmagine non invasive, la NIRS riesce a catturare in maniera molto precisa la concentrazione di emoglobina nella zona direttamente sotto i detettori; tuttavia, non riesce a registrare un segnale che si spinga più in profondità della corteccia cerebrale. In questo modo è possibile localizzare con precisione la zona in cui avviene quell'attività. Ha inoltre una risoluzione spaziale superiore rispetto a EEG/MEG (Lu et al., 2010), consentendo di distinguere i segnali provenienti da zone del cervello vicine tra loro. Rispetto alla fMRI, la fNIRS presenta vantaggi soprattutto nella registrazione della connettività funzionale in stato di riposo (*resting-state functional connectivity*, RSFC). In particolare, risulta meno costosa, facile da utilizzare e meno ingombrante per il partecipante: consente sia misurazioni continue di lunga durata, sia misurazioni ripetute in brevi intervalli di tempo. È molto utile, specialmente nella registrazione del segnale nei neonati e in quelle situazioni dove l'utilizzo della fMRI risulta di difficile setup. Offrendo la possibilità di monitorare sia il segnale dell'emoglobina ossigenata sia quello dell'emoglobina deossigenata, offre un quadro metabolico più ricco dell'attività cerebrale rispetto a quello offerto dal segnale BOLD della fMRI, che si basa solo sull'emoglobina deossigenata. La spettroscopia del vicino infrarosso, inoltre, possiede una velocità di campionamento superiore (circa 10 Hz) rispetto alla risonanza magnetica funzionale (circa 1 Hz): questo permette di registrare e filtrare successivamente in modo chiaro le fluttuazioni della respirazione e del battito cardiaco, evitando che queste si confondano con il segnale neurale.

Artemenko et al. (2022) utilizzano la fNIRS per indagare i correlati neurali dell'uso delle dita per contare ed eseguire operazioni matematiche nei bambini. L'obiettivo dello studio di Artemenko et al. (2022) è stato testare se un allenamento mirato all'uso delle dita nei bambini porti ad attivazioni sia nella corteccia sensorimotoria (associata al movimento delle dita) sia nella corteccia parietale (in particolare il solco intraparietale, associato all'elaborazione numerica), durante il calcolo mentale. I bambini del gruppo sperimentale hanno mostrato una maggiore attivazione della corteccia sensomotoria destra durante la risoluzione di calcoli che richiedevano l'uso di entrambe le mani. Inoltre, anche i bambini del gruppo sperimentale sono risultati più veloci nel risolvere le addizioni che potevano essere calcolate usando una sola mano: l'autore affermerebbe che questo potrebbe essere una prova del fatto che i vincoli fisici del nostro corpo si rifletterebbero in vincoli cognitivi, che influenzano l'efficienza del calcolo.

La fNIRS nel resting state

La connettività funzionale in stato di riposo (da qui in poi, RS-FC) riguarda l'attività cerebrale svolta in assenza di stimoli esterni, con occhi chiusi o aperti, con o senza un punto di fissazione. L'obiettivo della registrazione del RS-FC è catturare le proprietà statistiche generate in maniera spontanea dall'attività neurale (Snyder et al., 2012). Quando invece si sta svolgendo un task, l'obiettivo dello studio è misurare la risposta neurale indotta (Snyder et al., 2012). Damoiseaux et al. (2007) spiegano l'importanza della misurazione del *resting state*. Anche in assenza di stimoli esterni, il cervello umano non è inattivo, ma presenta attività di specifici e molteplici sistemi sincronizzati, noti come *Resting State Networks* (RSNs) e *Default Mode Network* (DMN). Misurare l'attività di queste reti a riposo è importante perché si ritiene che siano fondamentali per consolidare i ricordi passati e prepararci alle azioni future. Inoltre, quando si indagano gli effetti di uno specifico task sull'attività neurale di un partecipante, ciò che viene osservato potrebbe essere contaminato dalla presenza di fattori confondenti, come bias legati alla prestazione o l'utilizzo di strategie cognitive differenti a seconda della fascia d'età. Rilevare l'attività a riposo eliminerebbe questi bias, garantendo un confronto più pulito (Coquelet et al., 2020).

Nello studio di Lu et al. (2010), la tecnica fNIRS viene utilizzata per indagare la RSFC in un campione di 29 giovani adulti. La loro attività neurale è stata registrata in due

sessioni: nella prima, di 8 minuti, a riposo, mentre nella seconda, di 6 minuti, durante lo svolgimento di un task. I risultati mostrerebbero che le mappe di connettività generate dalle registrazioni fNIRS coincidono con i network cerebrali in stato di riposo, come dimostrato dalla risonanza magnetica funzionale (Cordes et al., 2000). Damoiseaux et al. (2008) utilizzano la risonanza magnetica funzionale per esaminare come l'invecchiamento influisca sull'attività cerebrale del default mode network (DMN: è uno specifico network cerebrale attivo durante lo stato di riposo e che si disattiva durante l'esecuzione di compiti cognitivi (Douw et al., 2011). Vengono confrontati 10 giovani e 22 anziani. I soggetti sono stati valutati con diversi test per la memoria, l'attenzione e le funzioni esecutive. L'analisi mostrerebbe che l'attività di due network specifici risulterebbe significativamente ridotta negli anziani rispetto ai giovani. Mason et al. (2007) avrebbero dimostrato un'associazione tra il DMN e il fenomeno del *mind wandering*, ovvero il vagare della mente con pensieri indipendenti dallo stimolo. Secondo Damoiseaux et al., la minore integrità del DMN negli anziani potrebbe essere dovuta alla diminuzione di quest'attività spontanea.

In uno studio del 2017, Diciotti e colleghi hanno testato un gruppo di anziani affetti da MCI (*Mild Cognitive Impairment*), con l'obiettivo di capire se l'attività cerebrale spontanea a riposo (RS-FC) fosse associata ai deficit cognitivi ed esecutivi che caratterizzano questa condizione. A un campione di anziani, di media età 75 anni, è stato somministrato il test MoCA (Montreal Cognitive Assessment, Nasreddine et al., 1995) e, per misurare più nello specifico le funzioni esecutive, sono stati sottoposti anche allo Stroop test (Golden et al., 1978). Tale fase veniva poi seguita da una registrazione in laboratorio dell'attività neurale a riposo mediante fMRI, chiedendo ai partecipanti di tenere gli occhi chiusi e di non pensare a nulla in particolare. I risultati sono sembrati controintuitivi: i pazienti con punteggi peggiori ai test mostravano una maggiore sincronizzazione di specifiche aree del cervello, anziché una diminuzione dell'attività. Gli autori hanno ipotizzato che questa iperattività (in particolare nel cervelletto) non sia altro che una plasticità maladattiva che contribuisce al peggioramento della cognizione (Faivre et al., 2012).

MATERIALI E METODI

Partecipanti

Il campione è composto da 81 partecipanti, di cui il 58% sono donne. Per un partecipante non è stato possibile recuperare età, sesso e scolarità. L'età è compresa tra i 19 e i 29 anni ($MD = 22$, $SD = 2.32$). La scolarità media del campione è risultata pari a 16.34 anni. Hanno potuto partecipare solo coloro che avevano almeno 18 anni compiuti; non hanno potuto partecipare coloro che erano affetti da abuso di sostanze, da un disturbo psichiatrico noto, da disturbi motori che coinvolgevano gli arti superiori e da disturbi di calcolo noti. I partecipanti sono stati sottoposti a una sessione di test neuropsicologici e, successivamente, a una sessione di testing in laboratorio con fNIRS, della durata variabile tra 1 e 2 ore. Le due sessioni sono state effettuate a distanza temporale variabile (1-2 settimane). I partecipanti sono stati reclutati tramite pubblicità dell'Università degli Studi di Padova. Precedentemente alle sessioni sperimentali, i partecipanti hanno firmato il modulo di consenso informato e l'informativa sul trattamento dei dati personali.

Edinburgh Handedness Inventory (EHI)

L'Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) è un semplice test di 10 item che riguarda situazioni quotidiane per indagare la manualità dominante di un partecipante a un esperimento: può essere utilizzato in esperimenti neuropsicologici e clinici, oltre che in altri. Nell'esperimento trattato in questo paper, i vari item vengono valutati utilizzando una scala Likert, che va da 'assoluta preferenza sinistra' a 'assoluta preferenza destra'. Una volta completato il test, si ottiene un punteggio da -100 a +100: un punteggio superiore a 50 viene considerato dominanza manuale destra. Tutti i partecipanti hanno ottenuto un punteggio superiore a 50; di conseguenza, vengono considerati destrimani.

Montreal Cognitive Assessment (MoCA)

Il Montreal Cognitive Assessment è un test di valutazione cognitiva ideato da Nasreddine et al. (1995): per gli autori, un punteggio inferiore a 26 era il compromesso ideale tra sensibilità e specificità per identificare una condizione di *mild cognitive impairment* (MCI) e l'Alzheimer. La sindrome del deterioramento cognitivo lieve è definita da un declino cognitivo maggiore di quanto si aspetterebbe per l'età e la scolarità dell'individuo (Gauthier et al., 2006). Il test valuta un totale di 8 abilità cognitive generali: memoria verbale a breve e a lungo termine, abilità visuospaziali, funzioni esecutive, attenzione,

concentrazione, memoria di lavoro, linguaggio, orientamento spaziale e temporale. Il tempo massimo per completare il test è di 10 minuti: svolgendo correttamente tutti e 10 i task, si può ottenere un punteggio massimo di 30 punti. Viene aggiunto un punto se la persona ha 12 o meno anni di istruzione.

Gnosia Digitale

Il test della Gnosia Digitale viene ideato nel 1995 da Benton (Benton, 1995) con l'obiettivo di valutare l'abilità di localizzare, indicare o nominare le dita della propria mano. La mancanza di quest'abilità è per l'autore sintomo della presenza di un deficit o di una lesione cerebrale, principalmente nell'emisfero dominante, sia negli adulti sia, più specificatamente, nei bambini dai 5 ai 9 anni.

Il test della gnosis digitale utilizzato per questo esperimento prende ispirazione da quello ideato da Benton e dalla versione ideata da Noel et al. (2005), che ha aumentato la complessità del compito aggiungendo, ad esempio, tocchi sequenziali. Lo sperimentatore deve essere seduto di fronte al partecipante, che deve tenere la mano rivolta verso il basso: una scatola copre la mano, in modo che sia visibile solo allo sperimentatore. La prima fase del test consiste nell'iniziare a testare la mano dominante (in questo caso la destra) e prevede che lo sperimentatore sfiori, per 15 volte, un dito diverso fino all'unghia. A volte gli item possono richiedere di toccare con due dita contemporaneamente. Si assegna un punteggio di 1 per le risposte corrette e di 0 per le errate. La seconda fase dell'esperimento prevede di testare in modo consequenziale la mano dominante e la non dominante, per un totale di 10 item (5 item per ciascuna mano). Anche in questo caso, si assegna un punteggio di 1 alle risposte corrette e di 0 a quelle errate.

Digit Span

Questo test, standardizzato per la popolazione italiana da Monaco et al. (2013), viene utilizzato per la valutazione della memoria a breve termine. Lo sperimentatore deve leggere una serie di numeri con un intervallo di approssimativamente 1 secondo: appena si finisce di leggere una serie, si fa un cenno al partecipante, che deve iniziare a ripeterla. Se il partecipante ripete correttamente la serie, si passa alla successiva, che è maggiore di un numero. Se invece sbaglia, si ripete la seconda serie della stessa lunghezza di quella appena enunciata. Se sbaglia anche la seconda serie della stessa lunghezza, il test viene interrotto. Il test è strutturato in modo che il partecipante debba ripetere i numeri sia nello

stesso ordine in cui vengono detti (digit span avanti), sia in ordine inverso (digit span indietro). Il punteggio finale in entrambe le versioni del test viene dato dal numero totale di cifre ripetute correttamente dal partecipante.

Test di Corsi

Il test di Corsi è un test neuropsicologico inventato da Philip Corsi e descritto per la prima volta da Brenda Milner nel 1971 (Milner, 1971): serve a valutare la memoria a breve termine visuo-spaziale. A livello pratico, il materiale fisico consiste in nove cubi fissati in modo irregolare su una tavoletta di base. Il test può essere di due tipi: il test di Corsi in avanti (*Forward CBT*) e quello di Corsi all'indietro (*Backward CBT*). Nella versione in avanti del test, l'esaminatore tocca con il dito indice i cubi in una certa sequenza, alla velocità di uno ogni 2 secondi. Dopo aver toccato ogni cubetto, l'esaminatore torna alla posizione di partenza sul tavolo. Il compito del partecipante è toccare esattamente gli stessi cubi nella stessa sequenza dopo la presentazione. L'obiettivo del test è valutare lo spatial span, ovvero il massimo numero di cubi che si è in grado di indicare nell'ordine corretto. Le sequenze sono di grandezza crescente: per la stessa lunghezza vengono presentate al massimo 3 sequenze e, se il partecipante ne riproduce almeno 2 correttamente, si passa alla lunghezza successiva. Il punteggio finale consiste nella lunghezza della sequenza più lunga correttamente riprodotta dal soggetto in almeno 2 dei 3 trials: ciò indica lo span di memoria visuo-spaziale del partecipante.

Purdue Pegboard Test

Il Purdue Pegboard Test (Tiffin & Asher, 1948) è uno strumento standardizzato impiegato per valutare la destrezza e la coordinazione fino-motoria attraverso un tabellone dotato di due file da 25 fori e di vaschette superiori contenenti i componenti da assemblare. La prova comprende 2 subtest unimanuali per la mano destra e per la sinistra e un subtest bimanuale simultaneo, ciascuno della durata di 30 secondi, nei quali il punteggio corrisponde rispettivamente al numero di perni individuali o di coppie posizionate nei fori. A questi si aggiunge un compito di assemblaggio bimanuale di perni, collaretti e rondelle della durata di 60 secondi, il cui punteggio è determinato dal totale dei componenti montati secondo una procedura specifica, e infine un indice complessivo calcolato sommando i punteggi registrati nelle tre prove di inserimento dei perni.

9 hole peg test

Nel 1985, Mathiowetz fornisce per la prima volta una procedura standardizzata per il 9-hole peg test. Come il *Purdue Pegboard test*, anche questo task serve a misurare la destrezza del partecipante nell'uso delle dita per svolgere semplici compiti di assemblaggio. Nell'esperimento trattato in questo elaborato, il materiale consisteva in una tavoletta forata nove volte e in un apposito spazio contenente i perni per gli stessi fori. Prima con la mano dominante e poi con la non dominante, al partecipante veniva richiesto di inserire i perni nei fori finché tutti fossero pieni, nel minor tempo possibile. Alla fine, veniva registrato il tempo impiegato, in secondi, per eseguire il test con la mano destra e con la mano sinistra.

Lsc-sua (lettura, scrittura e calcolo – studenti universitari e adulti)

I test Lsc-sua consistono in una batteria di prove volte a valutare le abilità di lettura, scrittura e calcolo nell'ambito dei disturbi cognitivi negli studenti universitari e negli adulti. La nuova versione è stata ideata nel 2020 da Cornoldi et al. In questa ricerca, venivano valutate solamente le abilità numeriche: al partecipante venivano sottoposte 6 prove, che andavano nello specifico a valutare le conoscenze sintattiche e lessicali di comprensione e produzione dei numeri, oltre che gli aspetti strategici del calcolo orale, la capacità di recuperare velocemente un risultato in memoria senza dover ricorrere a procedure di calcolo, la capacità di ragionare per ordine di grandezza e indagare in modo specifico la presenza di errori di natura sintattica e lessicale. Ogni prova ha un punteggio dedicato: 1 punto per ogni item risposto correttamente. Il punteggio finale è la somma dei punteggi ottenuti in ciascun subtest. Il tempo di esecuzione di ogni prova veniva registrato anche dallo sperimentatore.

fNIRS

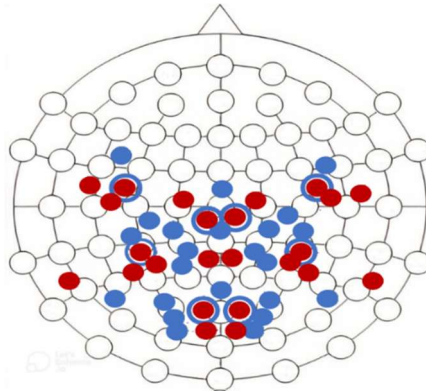
Per la registrazione del segnale fNIRS, la taglia ottimale della cuffia (disponibile nelle misure 54, 56 e 58 cm) è stata stabilita a priori in base alla circonferenza della testa del partecipante. Per i partecipanti con una circonferenza compresa tra 54 e 56 cm è stata selezionata la cuffia da 54 cm; per il range compreso tra 56 e 58 cm è stata scelta la cuffia da 56 cm; infine, per i soggetti con una circonferenza uguale o superiore a 58 cm è stata impiegata la cuffia da 58 cm. Per posizionare la cuffia correttamente, venivano individuati i punti *inion* e *nasion* e il punto centrale della distanza tra le orecchie: la cuffia veniva poi

posizionata in modo che un suo punto specifico coincidesse con l'incrocio di queste tre coordinate (Anastasi et al., 2006).

Lo strumento fNIRS utilizzato in questo esperimento funziona grazie a diodi emettitori di luce, chiamati sorgenti, e a diodi per catturare la luce riflessa dai tessuti più o meno ossigenati, chiamati detettori. I diodi sorgente emettono luce a due lunghezze d'onda distinte nel vicino infrarosso: 760 nm e 850 nm. Ciò è necessario per la separazione dei segnali: la radiazione a 760 nm è impiegata per quantificare le variazioni di emoglobina deossigenata (HHb), mentre quella a 850 nm è utilizzata per rilevare le concentrazioni di emoglobina ossigenata (O₂Hb) (Scholkmann et al., 2014). Il segnale NIRS è stato registrato a una frequenza di 5.2083 Hz con uno spettrometro NIRS a onda continua (NIRScout, NIRx Medical Technologies, Berlin, Germany). Lo strumento era dotato di 24 sorgenti LED e 23 detettori (a valanga, caratterizzati da una sensibilità di 0,5 pW e un range dinamico di 90 dB) e di 8 canali a separazione corta, con una distanza tra sorgenti e detettori di 8 mm: gli *short channel* sono canali di misurazione in cui la distanza fisica tra la sorgente di luce e il detettore è molto ridotta, tipicamente di 4-5 mm. A causa di questa distanza molto ravvicinata, la luce segue una traiettoria molto più superficiale e quindi il segnale catturato è quasi esclusivamente influenzato dagli strati di tessuto extracerebrale ed è meno sensibile ai tessuti più profondi. Il loro scopo è quindi catturare le interferenze fisiologiche superficiali, come i cambiamenti del flusso sanguigno nello scalpo, che rappresentano rumore per le misurazioni fNIRS (Scholkmann et al., 2014). Per definire le aree da registrare ai fini dell'esperimento, è stato utilizzato un array creato con un *Array Designer basato su Matlab* (Brigadoi et al., 2018). Per ottenere una configurazione simmetrica, ciascuna coordinata è stata trasposta anche nell'emisfero opposto. Ai fini dell'obiettivo dello studio, ovvero stabilire se esiste una correlazione tra gli indici di connettività calcolati nel RSFC e i risultati dei partecipanti ottenuti durante i test neuropsicologici, è stata studiata una configurazione degli optodi in modo da registrare il segnale da un array frontoparietale, in modo bilaterale che copre le zone parietali inferiori (Ranzini et al, 2022), il giro postcentrale e il precuneo (Arsalidou et al, 2018), la corteccia motoria e la corteccia motoria supplementare (Berteletti et al, 2015), il giro postcentrale e il giro fusiforme (Istomina et al, 2024). La lunghezza minima del canale doveva essere di 20 mm, mentre la massima di 40 mm. La distanza minima tra gli

optodi era di 10 mm. Di seguito è riportata un'immagine per una migliore comprensione della disposizione degli optodi.

Figura 1



Note: pallini rossi: sorgenti, pallini blu: detettori, pallini cerchiati: short channel

Resting state e preprocessing segnale fNIRS

Per soggetto sono stati estratti 15 minuti di attività funzionale a riposo, ovvero il RS-FC. Durante la registrazione il partecipante era istruito a mantenere gli occhi aperti, guardando il punto di fissazione sullo schermo, e a non muoversi. Inoltre, gli veniva richiesto di restare il più rilassato possibile e di non alterare la respirazione. Per favorire la corretta registrazione del segnale fNIRS, la luce della stanza veniva spenta e il partecipante veniva lasciato solo, in modo da misurare la sua attività cerebrale a riposo.

La preparazione dei dati fNIRS (*preprocessing*) è stata eseguita utilizzando l'ambiente MATLAB (versione R2024a), tramite le funzioni della toolbox Homer3 (versione 1.80.2). Per ogni partecipante sono stati individuati i canali rumorosi e, successivamente, rimossi secondo soglie scelte in modo arbitrario ($SNR = 12$; range di intensità accettabile: 0.00004 -3). L'intensità ottica rilevata nei canali accettabili è stata convertita in variazioni di densità ottica (OD). Sempre utilizzando la toolbox Homer 3, sono stati individuati gli artefatti di movimento. Gli artefatti di movimento sono la conseguenza dello spostamento tra gli optodi e lo scalpo: questo spostamento genera rumore, che a sua volta causa un cambiamento della linea di base (baseline shift) anche dopo che il movimento è cessato, rendendo il segnale originale difficile da distinguere dal segnale rumoroso (Cooper et al., 2012). A questo proposito, le soglie di individuazione sono state: ampiezza = 0.5, durata = 1 s, finestra = 12 s. È stato inoltre applicato un filtro passa-banda Butterworth (0.009-0.08 Hz) (Hussin et al, 2016) per isolare le frequenze di interesse del segnale emodinamico a riposo.

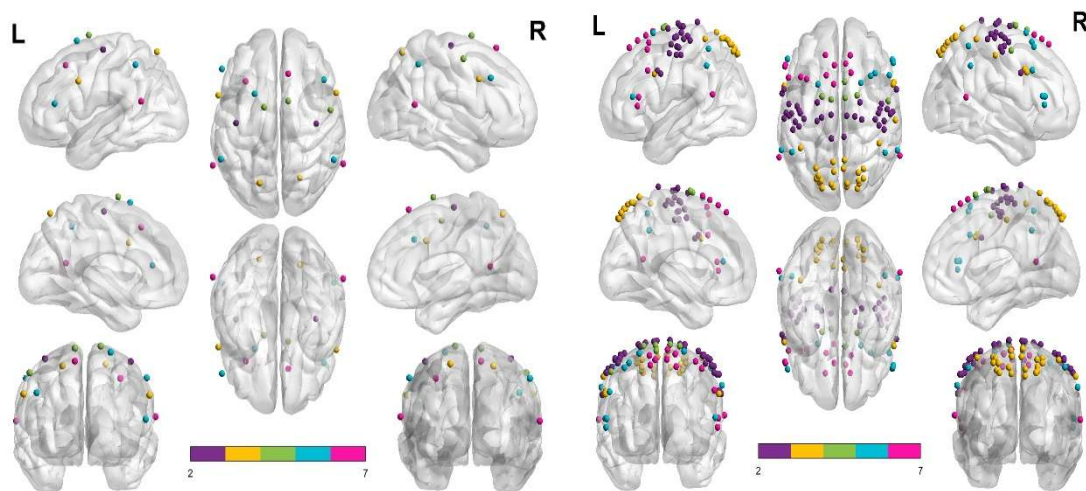
Per l'elaborazione dei dati fNIRS, Scholkmann et al. (2014) hanno rielaborato la legge di Beer-Lambert (Calloway, 1997), postulando la legge di Beer-Lambert modificata (MBLL). La formula di Beer-Lambert modificata integra dei parametri alla formula di Beer-Lambert per tenere conto del percorso non lineare che la luce segue nei tessuti biologici, calcolando le variazioni nel tempo delle concentrazioni di fotoni in emoglobina ossigenata e deossigenata. Nello specifico di questo esperimento, sono stati utilizzati valori di *Differential Pathlength Factor* (DPF) specifici: i DPF non sono altro che il rapporto di scala tra la lunghezza reale del percorso compiuto dai fotoni e la distanza geometrica tra sorgente e detettore. Il parametro varia in base alla lunghezza d'onda della luce emessa: quindi, in base a se viene calcolata la luce riflessa dall'emoglobina ossigenata o deossigenata, venivano utilizzati due valori diversi, rispettivamente 5.0 e 6.1. (Fox et al., 2010). In seguito alla registrazione e all'applicazione della legge di Beer-Lambert modificata, il segnale sistemico, come battito cardiaco e respirazione, è stato separato tramite regressione dei canali a separazione corta (short-separation, SS), applicata canale per canale. Infine, dopo la regressione, i canali sono stati ulteriormente esclusi se presentavano una correlazione con il segnale SS < 0.4 .

Sono stati esclusi i soggetti con meno di 15 minuti di registrazione disponibili dall'inizio del segnale di *trigger*, nonché quelli con meno di 5 minuti di segnale privo di artefatti di movimento e quelli con più del 30% del segnale rilevato dai vari canali al di sotto di un certo standard di qualità.

Analisi della connettività funzionale

Una volta individuati i canali validi, sono stati assegnati alle parcelle dell'Atlas scoperto da Yeo et al., che nel 2011 ha mappato 7 network cerebrali funzionanti a riposo. In questo studio, dei 7 network individuati da Yeo et al., 5 sono stati coperti dalla montatura utilizzata (prima immagine): *Somatomotor*, *Dorsal Attention*, *Salience/Ventral Attention*, *Control* e *Default Mode Network*, per un totale di 18 parcelle. I restanti due network, *Visual* e *Limbic*, non sono rappresentati, come atteso dalla posizione degli optodi. Le due immagini allegate rappresentano la posizione approssimativa di ogni canale e di ogni parcella, e il colore indica il network di appartenenza.

Figura 2: Montatura utilizzata e network corrispondenti



Note: 2= somatomotor 3= Dorsal Attention, 4= Salience/Ventral Attention 6= Control 7=DMN

Per ogni soggetto e ogni parcella, il segnale dei canali buoni è stato combinato tramite una media pesata ottimizzata con PCA (*Principal Component Analysis*). Sempre per ogni soggetto è stata inoltre calcolata la matrice di correlazione di Pearson tra i segnali di tutte le coppie di parcelle. La significatività della FC di gruppo è stata valutata con un approccio non parametrico basato su permutazioni (10.000 permutazioni): le parcelle sono state poi aggregate per network. Per ogni coppia di network è stata calcolata la FC media sui valori assoluti delle connessioni significative.

RISULTATI

Statistiche di Base

Per ogni test sono state calcolate le statistiche di base: media, mediana, deviazione standard, massimo, minimo e quartili. Di seguito è riportata la *Tabella 1* riassuntiva per maggiore chiarezza.

<i>Tabella 1:</i>	<i>Valore</i>	<i>Deviazione</i>	<i>Punteggio</i>	<i>Punteggio</i>
<i>Statistiche di base</i>	<i>medio</i>	<i>Standard</i>	<i>Massimo</i>	<i>Minimo</i>
<i>MoCA</i>	28.52	1.32	30	25
<i>Gnosia Digitale</i>	38.19	1.90	40	31
<i>Digit Span avanti</i>	6.72	0.98	5	9
<i>Digit span indietro</i>	5.51	1.07	3	8
<i>Test di Corsi</i>	6.2	1.07	8	3
<i>Pegboard Destra</i>	13.37	1.74	17	7
<i>Pegboard Sinistra</i>	12.56	1.6	16	9
<i>Pegboard Entrambe</i>	10.72	1.49	15	8
<i>Pegboard somma</i>	36.63	3.93	46	27
<i>Peg assemblaggio</i>	33.99	5.19	50	22
<i>Nine-Hole Peg dx</i>	16.38	1.96	22	9
<i>Nine-Hole Peg sx</i>	17.69	1.86	23	14
<i>LSC-SUA 1</i>	18.39	1.88	20	12
<i>LSC-SUA 1 sec</i>	127.22	31.88	260	77
<i>LSC-SUA 2</i>	19.66	0.71	20	16
<i>LSC-SUA 2 sec</i>	47.19	12.15	89	26
<i>LSC-SUA 3</i>	6.8	2.34	10	0
<i>LSC-SUA 3 sec</i>	157.25	48.58	335	81
<i>LSC-SUA 4</i>	24.40	3.92	30	13
<i>LSC-SUA 4 sec</i>	117.02	27.80	240	60
<i>LSC-SUA 5</i>	9.56	2.72	16	4
<i>LSC-SUA 5 sec</i>	60	0	60	60
<i>LSC-SUA 6</i>	9.18	0.94	10	6
<i>LSC-SUA 6 sec</i>	74.02	23.48	151	43

Note: LSC-SUA 1: dettato di numeri, LSC-SUA 2: lettura di numeri, LSC-SUA 3: calcolo a mente, LSC-SUA 4: fatti aritmetici, LSC-SUA 5: il calcolo approssimativo, LSC-SUA 6: trascrizione di numeri

Per ogni test sono stati identificati valori outlier, ovvero punteggi che superavano una soglia stabilita a priori, e quindi non utilizzati nel calcolo delle statistiche di base e delle correlazioni. In particolare, la soglia concordata è stata $3 \cdot IQR$ (*Inter Quartile Range*): si

calcola la soglia interquartilica, ovvero la fascia centrale di una distribuzione, che comprende i dati situati tra il 25° e il 75° percentile, e si moltiplica per 3. Tale soglia è stata adottata con l'obiettivo di preservare la massima quantità di osservazioni valide per le analisi, provvedendo alla rimozione dei punteggi estremi. Nello specifico, l'individuazione di un valore anomalo ha comportato l'esclusione della singola misurazione alterata, mantenendo valide le restanti prestazioni del partecipante.

Risultati dei test neuropsicologici

Di seguito è riportata l'analisi correlazionale, condotta per comprendere le interazioni tra le funzioni cognitive e motorie testate nel gruppo dei giovani adulti.

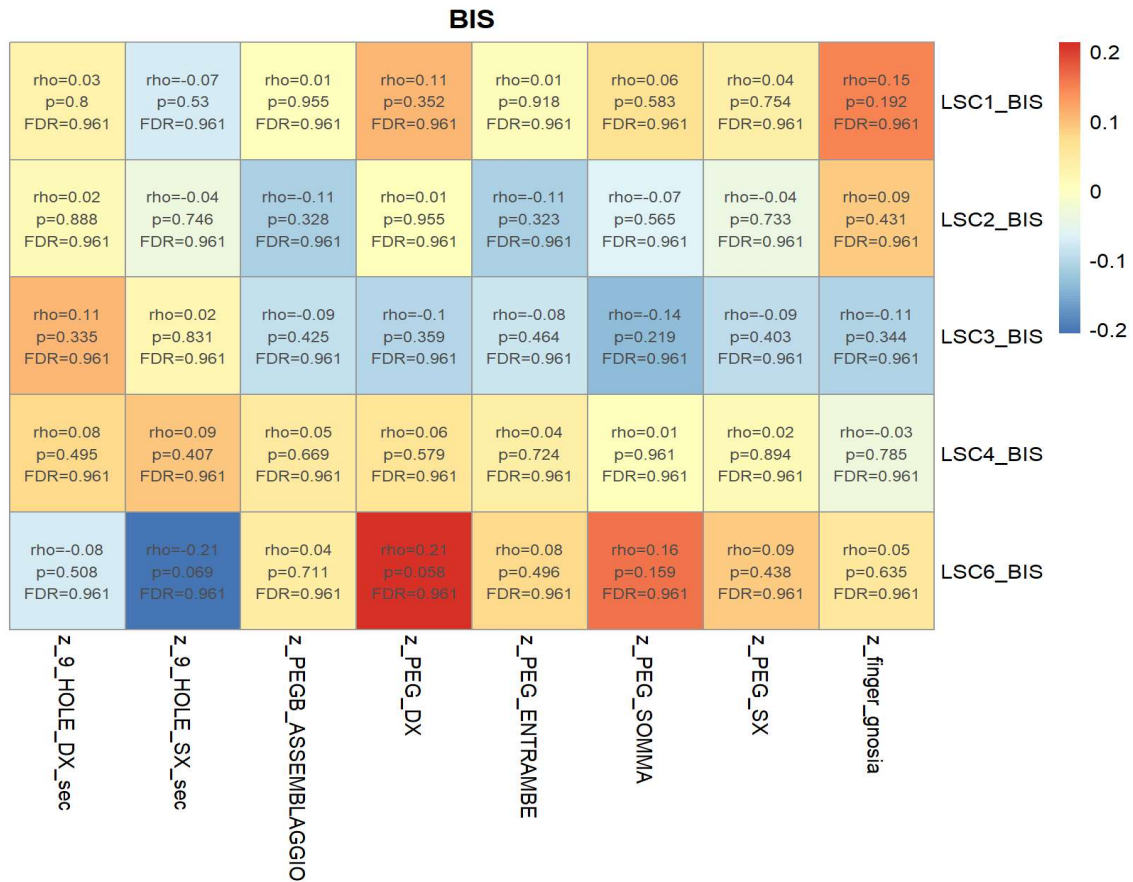
In particolare, i test delle abilità numeriche sono stati correlati a quelli delle abilità motorie dei partecipanti. Il metodo utilizzato per calcolare le correlazioni è stato il coefficiente *rho* di *Spearman*, non parametrico, necessario per le distribuzioni di dati la cui normalità non è nota con certezza (Hauke et al., 2011).

I punteggi lsc-sua (tempi di reazione e accuratezza) sono stati aggregati in un unico indice utilizzando il metodo BIS (*balanced integration score*, Liesefeld et al., 2015), che consiste nel riportare e standardizzare i punteggi nella stessa scala di misura, per poi sottrarre l'uno all'altro, come riportato sotto:

$$BIS = Z_{PC} - Z_{RT}$$

Al fine di evitare l'esclusione di correlazioni significative, è stata applicata la correzione per confronti multipli basata sul *False Discovery Rate* (FDR; Benjamini & Hochberg, 1995). Rispetto alle procedure classiche, questa tecnica statistica risulta meno conservativa ed è formalmente definita come il valore atteso della proporzione di falsi positivi sul totale delle scoperte significative. Di seguito viene presentata la *Tabella 2*, una *heatmap* generata tramite il software statistico R (versione 4.5.2), la quale illustra i coefficienti di correlazione (*rho*), i valori *p* nominali e i rispettivi valori *p* corretti mediante il metodo FDR.

Tabella 2



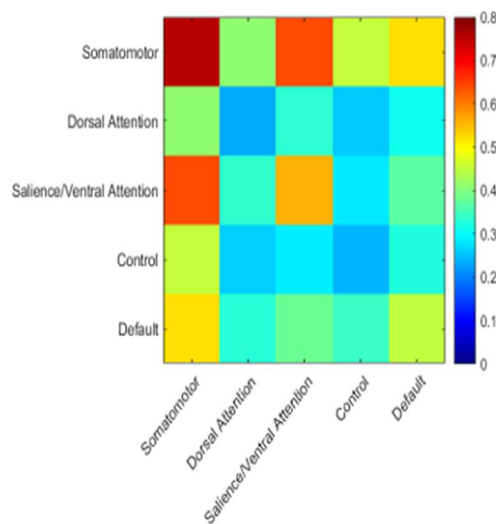
Note: correlazioni test neuropsicologici

Come si può notare dalla tabella, non risultano correlazioni significative. Nonostante ciò, si possono notare delle correlazioni che, sebbene non significative, sembrano interessanti: ad esempio, tra il test 'LSC_SUA_6' e 'PEG_DX', ovvero tra i compiti di scrittura di numeri e i compiti utilizzando la Purdue Pegboard ($r=0.21$). Un altro risultato interessante riguarda la correlazione sempre tra il test 'LSC_SUA_6' e il test '9_HOLE_SX', che si svolge sempre mediante l'utilizzo della Purdue Pegboard ma utilizzando la mano sinistra.

Risultati e Correlazioni della connettività funzionale

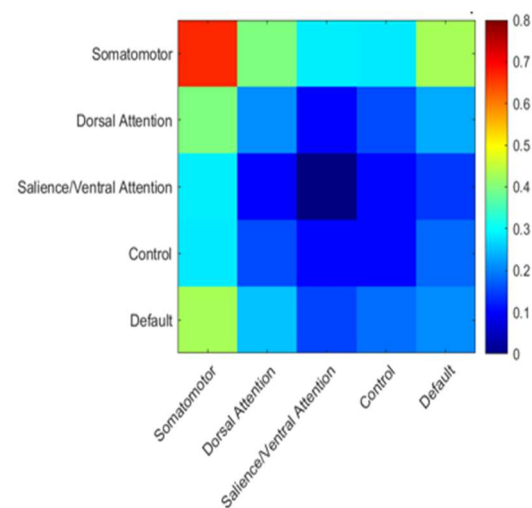
Di seguito vengono riportate le correlazioni ottenute tra i network: come detto nella sezione materiali e metodi, sono state calcolate le matrici di correlazione di Pearson per ogni partecipante e per ogni parcella, e successivamente è stata calcolata la media della FC di ogni coppia di network. La cella diagonale della matrice di network rappresenta la FC intra-network, ovvero la correlazione media tra le parcelle dello stesso network (escludendo l'autocorrelazione di ciascuna parcella con sé stessa). Un valore elevato sulla diagonale indica che le sottoregioni di quel network sono internamente coese.

Figura 3



Note: FC media per network – HbR

Figura 4



Note: FC media per network - HbO

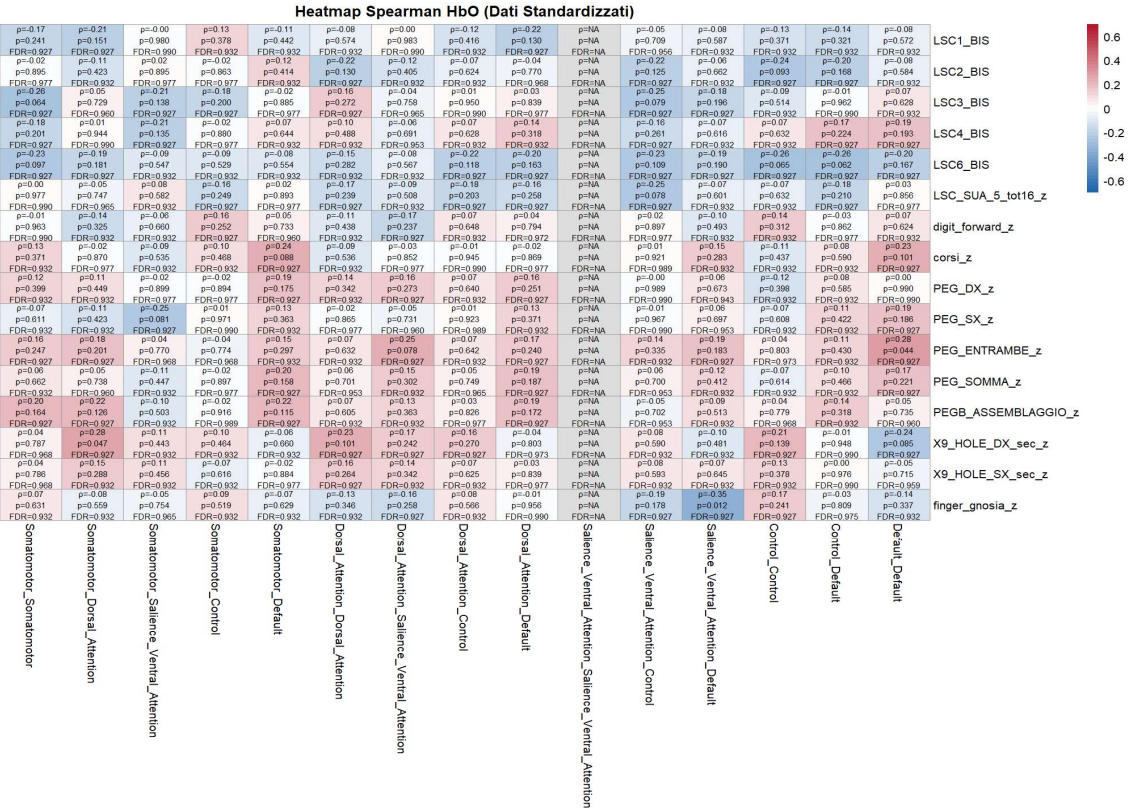
La connettività intra- e inter-network sembra essere presente e diffusa, anche se i valori non sono molto alti; sono comunque la media di correlazioni significative tra parcelle. La connettività del *somatomotor* è molto più forte di quella degli altri network; questo è sicuramente in parte dovuto al fatto che ci sono molti più canali nelle ROI di questo network. I risultati sembrano, per la maggior parte, coerenti tra HbO e HbR, tranne il *Saliency Ventral Attentional network*.

Risultati e correlazioni della connettività funzionale con i test neuropsicologici

Come nelle correlazioni precedenti, è stato calcolato il *rho* di Spearman corretto tramite confronti multipli (*fdr*). Il valore minimo del p-value come soglia è stato scelto a 0.005. I partecipanti coinvolti in queste analisi sono risultati infine 77, dopo aver escluso coloro

che non rispettavano i parametri di esclusione scelti in precedenza. Nonostante non siano presenti correlazioni significative, risulta interessante notare alcuni pattern osservabili dai risultati ottenuti. Vengono riportate di seguito le correlazioni ottenute per quanto riguarda la connettività funzionale con i test neuropsicologici, nel caso del sangue ossigenato. Viene trattato solo il caso dell'HbO per questioni metodologiche e di letteratura: l'ossiemoglobina costituisce il parametro fNIRS dotato del miglior rapporto segnale-rumore e della maggiore sensibilità nel rilevare le variazioni del flusso sanguigno cerebrale regionale indotte dall'attività spontanea a riposo (Lu et al, 2010).

Tabella 3



Note: Correlazioni test neuropsicologici-connettività funzionale (HBO).

DISCUSSIONE

Analisi correlazionale dei test neuropsicologici

Il motivo dell'assenza di correlazioni significative potrebbe essere dovuto ad un fattore evolutivo: infatti, il legame tra motricità fine e abilità matematiche varia nel corso dello sviluppo: Gashaj e Trninic (2023) mostrerebbero che le correlazioni tra abilità fino motorie e matematiche sono forti all'inizio della scuola primaria, ma si attenuano già a partire dal quarto anno di scuola. Come spiegato in precedenza, ciò sembrerebbe essere un processo di automatizzazione: una volta che le abilità fino-motorie di base e le operazioni matematiche diventano automatiche, queste ultime ridurrebbero la loro correlazione con le abilità matematiche. Negli adulti, l'aritmetica diventerebbe più astratta e il coinvolgimento motorio calerebbe significativamente (Prabhu et al., 2026).

Come riportato nell'esposizione dei risultati, risultano interessanti le correlazioni ottenute tra il test 'numerico' 'LSC_SUA_6' e i test 'motori' 'PEG_DX e 9_HOLE_SX'. Questi risultati potrebbero riflettere la connessione tra la componente motoria del test 'numerico', ovvero la scrittura con la mano destra essendo i partecipanti tutti destrimani, e i compiti 'motori' eseguiti sempre con la mano destra.

Analisi correlazionale della connettività funzionale con i test neuropsicologici

L'ultimo importante passo di questo elaborato riguarda le correlazioni calcolate tra gli indici di connettività funzionale e i risultati ottenuti dai partecipanti nei test neuropsicologici.

Pattern osservabili: test numerici

Come prima osservazione, possiamo notare che un'elevata connettività intra-network, in particolare per la rete somatomotoria, correla negativamente con una prestazione migliore nei test 'numerici' e positivamente con una prestazione migliore nei test 'motori'. Questo risultato sembra essere controintuitivo rispetto alle nostre ipotesi di base, ovvero che una prestazione migliore nei test neuropsicologici di dominio numerico correli positivamente con la connettività inter- e intra-network somatomotori. La spiegazione potrebbe essere fornita da Gashaj e Trninic (2023), che dimostrerebbero come l'interazione tra la motricità fine e le abilità numeriche è massima durante l'infanzia: negli adulti, siccome l'aritmetica diventerebbe via via un processo più automatizzato, si riduce la dipendenza

dall'atto motorio manifesto, e quindi anche la correlazione con i test numerici risulterebbe essere bassa.

Un altro aspetto interessante da notare risulta essere le correlazioni che si ottengono con il test 'PEG_DX', ovvero il Purdue Pegboard Test eseguito con la mano destra. Si osserva, infatti, che i risultati ottenuti in tale test e le connessioni intra- e inter-network somatomotorie correlerebbero maggiormente nel caso di punteggio maggiore ottenuto nel suddetto test. Come riportato nella tabella delle correlazioni della connettività funzionale, la rete somatomotoria presenta un elevato valore di connettività intra-network, mostrando un'alta coesione. Più il sistema risulta coeso ed efficiente, migliore potrebbe essere l'esecuzione manuale fine, nonché la velocità di coordinazione del soggetto.

Un altro pattern comune che si osserva tra le correlazioni è quello delle correlazioni negative che sussistono tra i test numerici LSC e le connessioni tra i vari network. Questo è vero sia per le connessioni intra-network che inter-network: a riposo, la connettività tra queste reti è negativamente correlata con le prestazioni nei test 'numerici'. Il pattern opposto lo possiamo invece osservare per quanto riguarda i test 'motori': una maggiore connettività intra- e inter-network correla positivamente con una performance migliore ai vari test 'motori'. Anche questo aspetto è in contrapposizione alle ipotesi di partenza. Ciò lascia spazio a delle considerazioni riguardanti le future analisi: infatti, ciò che osserviamo è una correlazione negativa a riposo, che corrisponde alla prima parte di questo esperimento. Sarebbe quindi interessante comprendere come si comportano i vari network, e quindi le conseguenti correlazioni, quando il partecipante sta effettivamente svolgendo un task. Questa domanda potrebbe trovare risposta analizzando in futuro la seconda parte di questo disegno sperimentale, che corrisponde alla registrazione del segnale NIRS mentre il partecipante è intento a svolgere dei task 'numerici' e 'motori'. Nel frattempo, si possono trarre delle considerazioni e delle ipotesi su quello che si osserva: queste correlazioni negative potrebbero significare che i network risultano già a riposo particolarmente segregati e fortemente accoppiati. Quando viene richiesto al soggetto di eseguire un compito, il cervello potrebbe avere una ridotta capacità di reclutare i circuiti necessari per eseguirlo: ciò potrebbe tradursi in una peggiore prestazione nei test 'numerici'.

Pattern osservabili: test motori

Queste osservazioni riguarderebbero però i test ‘numerici’: come detto in precedenza, se si considerano le correlazioni ottenute con i test ‘motori’, osserviamo principalmente delle correlazioni positive. Ciò sembrerebbe essere in linea con quanto ipotizzato: una performance migliore nei test ‘motori’ si traduce in una maggiore connettività sia inter- che intra-network. Risulta importante inoltre mostrare come le scale di misura diverse di due tipi di test ‘motori’ convergano verso lo stesso significato, se correlate con il valore di connettività funzionale intra-network somatomorio. Prendendo infatti in considerazione i test che prevedevano l’utilizzo della Purdue Pegboard come ‘PEG_SOMMA’ ($r=0.06$), nei quali una performance migliore si traduceva nell’inserimento di più perni possibile, e i ‘Nine Hole Peg Test’ (DX, $r = 0.04$) dove invece una performance migliore si traduce nell’impiegare meno tempo possibile nell’inserire i perni nei fori, notiamo che le correlazioni sono entrambe positive. Per entrambi i test, una migliore destrezza manuale e coordinazione motoria si associano a un maggiore valore di connettività funzionale a riposo: essendo il gesto motorio un compito prettamente automatizzato nell’adulto, una rete motoria più connessa con i sistemi di controllo attentivo a riposo potrebbe facilitare l’azione immediata. Tale affermazione è in linea con quanto affermato e discusso in precedenza da Gashaj e Trninic (2023) e Prabhu et al. (2026), che suggerirebbero che con l’avanzare dell’età e il progredire della scolarizzazione, le abilità fino-motorie vanno incontro ad un processo di automatizzazione. L’efficienza nell’esecuzione del gesto poggerrebbe quindi su circuiti sensomotori integrati e dedicati: una maggiore connettività a riposo del network somatomotorio con altri network rifletterebbe un sistema in uno stato che rende il partecipante più incline ad esprimere una buona prestazione in uno specifico test motorio.

Limiti dello studio

Lo studio, nonostante il rigore metodologico e analitico adottato, presenta dei limiti nelle osservazioni che è possibile trarne. I risultati vengono discussi solo per quanto riguarda il segnale registrato dell’Ossiemoglobina. L’esclusione della De-Ossiemoglobina è stata discussa in precedenza, ma l’inclusione anche di questa analisi avrebbe potuto confermare le dinamiche di accoppiamento tra network. Un altro limite rilevabile riguarda il campione utilizzato, che è composto da giovani adulti sani. Per un confronto più completo e coerente, sarebbe interessante valutare i partecipanti in età evolutiva.

Un altro limite riguarda la tecnologia fNIRS: lo strumento cattura il segnale emodinamico a livello della corteccia cerebrale superficiale, non permettendo di analizzare il contributo di eventuali strutture corticali profonde nello svolgimento dei task dell'esperimento.

Conclusioni

Nonostante la mancanza di risultati correlazionali significativi, questo studio ha permesso di osservare delle importanti relazioni tra lo stato di riposo e la performance nei test neuropsicologici di un significativo campione di giovani adulti (81). Ciò che è stato ottenuto in questo esperimento è importante sia perché conferma in parte quanto visto in letteratura, sia perché pone le basi per successivi interventi in materia. Questi studi potrebbero portare a ulteriori sviluppi e a possibili interventi preventivi sia per giovani adulti sia per popolazioni di età differente.

Bibliografia

- **Anastasi, G., Balboni, G., Motta, P., et al. (2006).** *Trattato di anatomia umana*. Edi. Ermes, Napoli.
- **Andres, M., Davare, M., Pesenti, M., Olivier, E., & Seron, X. (2004).** Number magnitude and grip aperture interaction. *NeuroReport*, 15(18), 2773–2777. <https://www.ovid.com/00001756-200412220-00017>
- **Andres, M., Ostry, D. J., Nicol, F., & Paus, T. (2008).** Time course of number magnitude interference during grasping. *Cortex*, 44(4), 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.007>
- **Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2018).** Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 239–250.
- **Artemenko, C., Wortha, S. M., Dresler, T., Frey, M., Barrocas, R., Nuerk, H.-C., & Moeller, K. (2022).** Finger-Based Numerical Training Increases Sensorimotor Activation for Arithmetic in Children—An fNIRS Study. *Brain Sciences*, 12(5), 637. <https://doi.org/10.3390/brainsci12050637>
- **Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995).** Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- **Benton, A. L. (1959).** *Right-left discrimination and finger localization*. Paul B. Hoeber, Inc. <https://psycnet.apa.org/record/1960-03808-000>
- **Berteletti, I., & Booth, J. R. (2015).** Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in Psychology*, 6, 226. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00226>
- **Brigadoi, S., Salvagnin, D., Fischetti, M., & Cooper, R. J. (2018).** Array designer: automated optimized array design for functional near-infrared spectroscopy. *Neurophotonics*, 5(3), 035010. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.5.3.035010>
- **Bunce, S. C., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., Onaral, B., & Pourrezaei, K. (2006).** Functional Near-Infrared Spectroscopy: An Emerging Neuroimaging Modality.

IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 25(4), 54–62. doi: 10.1109/MEMB.2006.1657788

- **Butterworth, B. (2008).** Developmental dyscalculia. *Child neuropsychology: Concepts, theory, and practice*, 357-374.
- **Calloway, D. (1997).** Beer-Lambert law. *Journal of Chemical Education*, 74(7), 744. <https://doi.org/10.1021/ed074p744.3>
- **Cameron, C. E., Brock, L. L., Murrah, W. M., Bell, L. H., Worzalla, S. L., Grissmer, D., & Morrison, F. J. (2012).** Fine Motor Skills and Executive Function Both Contribute to Kindergarten Achievement. *Child Development*, 83(4), 1229–1244. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01768.x>
- **Carlson, A. G., Rowe, E., & Curby, T. W. (2013).** Disentangling fine motor skills' relations to academic achievement: the relative contributions of visual-spatial integration and visual-motor coordination. *The Journal of Genetic Psychology*, 174(5), 514–533. <https://doi.org/10.1080/00221325.2012.717122>
- **Cona, G., Wiener, M., & Scarpazza, C. (2021).** From ATOM to GradiATOM: Cortical gradients support time and space processing as revealed by a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, 224, 117407. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117407>
- **Cona, G., Wiener, M., Allegrini, F., & Scarpazza, C. (2024).** Gradient Organization of Space, Time, and Numbers in the Brain: A Meta-analysis of Neuroimaging Studies. *Neuropsychology Review*, 34(3), 721–737. <https://doi.org/10.1007/s11065-023-09609-z>
- **Cooper, R. J., Selb, J., Gagnon, L., Phillip, D., Schytz, H. W., Iversen, H. K., ... & Boas, D. A. (2012).** A systematic comparison of motion artifact correction techniques for functional near-infrared spectroscopy. *Frontiers in Neuroscience*, 6, 147. <https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00147>
- **Coquelet, N., Wens, V., Mary, A., Niesen, M., Popescu, D., Ranzini, M., ... & De Tiège, X. (2020).** Comparing MEG and high-density EEG for intrinsic functional connectivity mapping. *NeuroImage*, 210, 116556. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116556>
- **Cordes, D., Haughton, V. M., Arfanakis, K., Wendt, G. J., Turski, P. A., Moritz, C. H., et al. (2000).** Mapping functionally related regions of brain with

functional connectivity MR imaging. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 21(9), 1636–1644.

- **Cornoldi, C., Montesano, L., & Valenti, A. (2020).** *LSC-SUA Prove di lettura, comprensione del testo, scrittura e calcolo. Batteria per la valutazione dei DSA e altri disturbi in studenti universitari e adulti*. Trento: Erickson.
- **Damoiseaux, J. S., Rombouts, S. A., Barkhof, F., Scheltens, P., Stam, C. J., Smith, S. M., & Beckmann, C. F. (2006).** Consistent resting-state networks across healthy subjects. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(37), 13848–13853.
- **Damoiseaux, J. S., Beckmann, C. F., Arigita, E. J., Barkhof, F., Scheltens, P., Stam, C. J., ... & Rombouts, S. A. (2008).** Reduced resting-state brain activity in the "default network" in normal aging. *Cerebral Cortex*, 18(8), 1856–1864. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm207>
- **Dehaene, S. (1992).** Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1–42. [10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)
- **Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993).** The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- **Di Franco, D., Muir, D. W., & Dodwell, P. C. (1978).** Reaching in very young infants. *Perception*, 7(4), 385–392. <https://doi.org/10.1068/p070385>
- **Diciotti, S., Orsolini, S., Salvadori, E., Giorgio, A., Toschi, N., Ciulli, S., Ginestroni, A., Poggesi, A., De Stefano, N., Pantoni, L., Inzitari, D., & Mascalchi, M. (2017).** Resting state fMRI regional homogeneity correlates with cognition measures in subcortical vascular cognitive impairment. *Journal of the Neurological Sciences*, 373, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2016.12.003>
- **Douw, L., Schoonheim, M. M., Landi, D., van der Meer, M. L., Geurts, J. J. G., Reijneveld, J. C., Klein, M., & Stam, C. J. (2011).** Cognition is related to resting-state small-world network topology: an magnetoencephalographic study. *Neuroscience*, 175, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.11.039>
- **Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P., & Orban, G. A. (2003).** Parietal representation of symbolic and nonsymbolic numbers. *Journal of*

- Cognitive Neuroscience*, 15(1), 47–56.
<https://doi.org/10.1162/089892903321107819>
- **Faivre, A., Rico, A., Zaaraoui, W., Crespy, L., Reuter, F., Soulier, E., Malikova, I., Confort-Gouny, S., Cozzone, P. J., Pelletier, J., & Ranjeva, J. P. (2012).** Assessing brain connectivity at rest is clinically relevant in early multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis Journal*, 18(9), 1251–1258.
<https://doi.org/10.1177/1352458511435930>
 - **Gashaj, V., & Trninic, D. (2023).** Adding up fine motor skills: Developmental relations between manual dexterity and numerical abilities. *Acta Psychologica*, 241, 104087. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2023.104087>
 - **Gauthier, S., Reisberg, B., Zaudig, M., Petersen, R. C., Ritchie, K., Broich, K., Belleville, S., Brodaty, H., Bennett, D., Chertkow, H., Cummings, J. L., de Leon, M., Feldman, H., Ganguli, M., Hampel, H., Scheltens, P., Tierney, M. C., Whitehouse, P. J., & Winblad, B. (2006).** Mild cognitive impairment. *The Lancet*, 367(9518), 1262–1270. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)68542-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68542-5)
 - **Golden, C. J. (1978).** *Stroop Color and Word Test: A manual for clinical and experimental uses*. Stoelting Company.
 - **Hauke, J., & Kossowski, T. (2011).** Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87-93. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1>.
 - **Hussin, S. F., Birasamy, G., & Hamid, Z. (2016).** Design of butterworth band-pass filter. *Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 32-46.
 - **Istomina, A., & Arsalidou, M. (2024).** Add, subtract and multiply: Meta-analyses of brain correlates of arithmetic operations in children and adults. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 69, 101419.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2024.101419>
 - **Jeannerod, M. (1984).** The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16(3), 235–254.
<https://doi.org/10.1080/00222895.1984.10735319>

- **Jöbsis, F. F. (1977).** Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198(4323), 1264–1267. DOI: [10.1126/science.92919](https://doi.org/10.1126/science.92919)
- **Kirjakovski, A., & Utsuki, N. (2012).** The spatial-quantity association of response codes (SQUARC) effect for continuous quantities. *International Journal of Psychological Studies*, 4(2), 22-31.
- **Liesefeld, H.R., Janczyk, M. (2019).** Combining speed and accuracy to control for speed-accuracy trade-offs(?). *Behav Res* 51, 40–60. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1076-x>
- **Lindemann, O., Abolafia, J. M., Girardi, G., & Bekkering, H. (2007).** Getting a grip on numbers: Numerical magnitude priming in object grasping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(6), 1400–1409. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1400>
- **Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010).** Illuminating the developing brain: the past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(3), 269-284. [10.1016/j.neubiorev.2009.07.008](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.07.008)
- **Lu, C.-M., Zhang, Y.-J., Biswal, B. B., Zang, Y.-F., Peng, D.-L., & Zhu, C.-Z. (2010).** Use of fNIRS to assess resting state functional connectivity. *Journal of Neuroscience Methods*, 186(2), 242–249. [10.1016/j.jneumeth.2009.11.010](https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2009.11.010)
- **Mason, M. F., Norton, M. I., Van Horn, J. D., Wegner, D. M., Grafton, S. T., & Macrae, C. N. (2007).** Wandering minds: the default network and stimulus-independent thought. *Science*, 315(5810), 393–395. DOI: [10.1126/science.1131295](https://doi.org/10.1126/science.1131295)
- **Mathiowetz, V., Weber, K., Kashman, N., & Volland, G. (1985).** Adult norms for the Nine Hole Peg Test of finger dexterity. *The Occupational Therapy Journal of Research*, 5(1), 24–38. <https://doi.org/10.1177/153944928500500102>
- **Matthes, K., & Gross, F. (1938).** Investigations on the absorption of red and infrared light by carboxygenated, oxygenated, and reduced blood. *Naunyn-Schmiedebergs Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie*, 191(2-4), 369–380..

- **Milner, B. (1971).** Interhemispheric differences in the localization of psychological processes in man. *British Medical Bulletin*, 27(3), 272–277. <https://psycnet.apa.org/record/1972-32010-001>
- **Monaco, M., Costa, A., Caltagirone, C., & Carlesimo, G. A. (2013).** Forward and backward span for verbal and visuo-spatial data: standardization and normative data from an Italian adult population. *Neurological Sciences*, 34(5), 749–754. <https://doi.org/10.1007/s10072-012-1130-x>
- **Nasreddine, Z. S., Phillips, N. A., Bédirian, V., Charbonneau, S., Whitehead, V., Collin, I., Cummings, J. L., & Chertkow, H. (2005).** The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: A brief screening tool for mild cognitive impairment. *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), 695–699. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x>
- **Noël, M. P. (2005).** Finger gnosis: A predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11(5), 413–430. <https://doi.org/10.1080/09297040590951550>
- **Oldfield, R. C. (1971).** The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- **Pitchford, N. J., Papini, C., Outhwaite, L. A., & Gulliford, A. (2016).** Fine Motor Skills Predict Maths Ability Better than They Predict Reading Ability in the Early Primary School Years. *Frontiers in Psychology*, 7, 783. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00783>
- **Prabhu, S., Giraud, M., Noacco, S., Brigadoi, S., Mioni, G., Cutini, S., Saccani, M. S., Ranzini, M., & Nava, E. (2026).** Number-action coupling across the lifespan: Sensorimotor foundations of numerical cognition. *iScience*, 2589004226017955. DOI: [10.1016/j.isci.2026.116420](https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.116420)
- **Ranzini, M., Scarpazza, C., Radua, J., Cutini, S., Semenza, C., & Zorzi, M. (2022).** A common neural substrate for number comparison, hand reaching and grasping: a SDM-PSI meta-analysis of neuroimaging studies. *Cortex*, 148, 31–67. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.12.007>
- **Ranzini, M., Brigadoi, S., Dinç, Y., Scatturin, P., Vallesi, A., Semenza, C., Castiello, U., Zorzi, M., & Cutini, S. (2025).** Unveiling the sensorimotor basis

- of numerical processing: A functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study. *NeuroImage*, 324, 121576. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121576>
- **Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014).** A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *NeuroImage*, 85, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004>
 - **Sixtus, E., Krause, F., Lindemann, O., & Fischer, M. H. (2023).** A sensorimotor perspective on numerical cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(4), 367–378. DOI: [10.1016/j.tics.2023.01.002](https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.01.002)
 - **Snyder, A. Z., & Raichle, M. E. (2012).** A brief history of the resting state: the Washington University perspective. *NeuroImage*, 62(2), 902–910. [10.1016/j.neuroimage.2012.01.044](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.01.044)
 - **Tiffin, J., & Asher, E. J. (1948).** The Purdue Pegboard: Norms and studies of reliability and validity. *Journal of Applied Psychology*, 32(3), 234–247. <https://doi.org/10.1037/h0061266>
 - **van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2011).** A working memory account for spatial–numerical associations. *Cognition*, 119(1), 114–119. [10.1016/j.cognition.2010.12.013](https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.12.013)
 - **Walsh, V. (2003).** A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. DOI: [10.1016/j.tics.2003.09.002](https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002)
 - **Yeo BT, Krienen FM, Sepulcre J, et al (2011).** The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol*, 106(3):1125–1165. doi: 10.1152/jn.00338.2011.
 - **Wilson, M. (2002).** Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>