



FONDAZIONE^{ETS}
LUIGI EINAUDI
PER STUDI DI POLITICA
ECONOMIA E STORIA

Gemelli



Fondazione Policlinico Universitario Agostino Gemelli IRCCS
Università Cattolica del Sacro Cuore

Paper

**“La neuroscienza dietro la scrittura:
la scrittura a mano vs. la digitazione – chi vince la battaglia?”**

Giugno 2025

La neuroscienza dietro la scrittura: la scrittura a mano vs. la digitazione – chi vince la battaglia?

Giuseppe Marano, Georgios D. Kotzalidis, Francesco Maria Lisci, Maria Benedetta Anesini, Sara Rossi, Sara Barbonetti, Alice Ronsisvalle, Laura Artuso, Cecilia Falsini, Romina Caso, Giuseppe Mandracchia, Caterina Brisi, Gianandrea Traversi, Osvaldo Mazza, Roberto Pola, Gabriele Sani, Eleonora Gaetani, and Marianna Mazza.

Abstract

Background: L'avvento della tecnologia digitale ha significativamente alterato la modalità di scrittura. Mentre la digitazione è diventata la modalità dominante della comunicazione scritta, la scrittura a mano rimane una capacità umana fondamentale, e il suo profondo impatto sui processi cognitivi continua ad essere un argomento di intenso scrutinio scientifico. **Metodo:** Questo paper indaga i meccanismi neurali alla base della scrittura a mano e della digitazione, esplorando i distinti vantaggi cognitivi e neurologici associati con ognuno. Sintetizzando i risultati degli studi di mappatura cerebrale, esploriamo come la scrittura a mano e la digitazione attivano in modo differenziato regioni del cervello associate con il controllo motorio, la percezione sensoriale e funzioni cognitive di ordine superiore. **Risultati:** La scrittura a mano attiva un ampio network di regioni cerebrali coinvolte nel processo motorio, sensoriale e cognitivo. La digitazione coinvolge pochi circuiti neurali, risultando in un coinvolgimento cognitivo più passivo. Nonostante i vantaggi della digitazione in termini di velocità e convenienza, la scrittura a mano rimane uno strumento importante per apprendere e per il mantenimento della memoria, in particolar modo nei contesti educativi. **Conclusioni:** Questa review contribuisce al dibattito in corso riguardo il ruolo della tecnologia nell'educazione e nello sviluppo cognitivo. Capendo le differenze neurali tra la scrittura a mano e la digitazione, possiamo acquisire informazioni sulle strategie di apprendimento ottimali e i potenziali vantaggi cognitivi per ottimizzare le metodologie educative, cognitive e psicologiche.

1.Introduzione

La scrittura a mano è un processo complesso che coinvolge meccanismi neurofisiologici e comprende sia le abilità oculomotorie e manuali che le dimensioni relazionali e affettive. L'attività del cervello si riflette nel movimento del gesto grafico, fornendo una finestra sul mondo interiore dell'individuo. La scrittura a mano è un forma di espressione unica e personale che trasmette più del contenuto scritto a parole. Serve come un intimo riflesso dell'individualità di chi scrive, includendo elementi della personalità, dello stato d'animo e dello stato fisico. Al di là del suo scopo pratico per la comunicazione, la scrittura a mano possiede un significato simbolico nei contesti culturali, storici e psicologici.

Le caratteristiche della scrittura, come la dimensione, la pressione, l'inclinazione e la spaziatura, possono rivelare informazioni sui tratti di una persona. L'analisi della scrittura a mano, nota anche come grafologia, è un metodo di identificazione dei tratti di un individuo attraverso la sua scrittura. Gli studiosi di grafologia studiano queste caratteristiche per analizzare la personalità, le tendenze emotive e persino i livelli di stress. Mentre la validità scientifica della grafologia rimane dibattuta, la scrittura a mano innegabilmente mette in evidenza le sfumature della condizione mentale e fisica dello scrittore al momento di scrivere.

La scrittura a mano è un'abilità acquisita di produzione linguistica, attraverso la quale gli stimoli esterni (visivi o uditivi) vengono tradotti in una traccia fluida e coordinata su un foglio di carta. Si tratta innanzitutto di un processo e poi di un prodotto: la scrittura a mano coinvolge il coordinamento di processi linguistici, motori e visuo-spaziali, un insieme di operazioni che permettono di mappare rappresentazioni ortografiche astratte in schemi grafo-motori distribuiti su uno spazio bidimensionale.

I processi linguistici coinvolgono l'attivazione della rappresentazione ortografica delle parole, la conversione dei fonemi (i suoni corrispondenti a ciascuna lettera) in grafemi (simboli scritti), e il mantenimento di rappresentazioni grafemiche astratte nel buffer grafemico, un deposito di memoria in cui le rappresentazioni ortografiche delle parole possono rimanere attive per un breve periodo. I processi motori e visuo-spaziali, invece, comprendono la pianificazione motoria dei movimenti della mano, la loro trasformazione in comandi motori, il buon controllo motorio del gesto, l'integrazione visuo-motoria (cioè il coordinamento tra percezione visiva e movimenti della mano), la propriocezione (la percezione della posizione e del movimento della mano indipendente dalla vista) e la consapevolezza sensoriale delle dita. La scrittura a mano necessita l'esecuzione di un gesto che, come ogni altro atto motorio, richiede la mobilitazione dei network neurali. A distinguere il gesto grafico dagli altri movimenti è la sua estrema precisione: rappresenta un atto estremamente preciso di abilità motoria che gli esseri umani acquisiscono attraverso l'apprendimento estensivo e la maturazione nel tempo. Di conseguenza, la scrittura a mano è un'abilità acquisita. Con l'esperienza, il bambino migliora gradualmente sia gli aspetti linguistici (conversione fonemico-grafemica) che quelli motori (coordinazione mano-occhio), passando da un movimento controllato volontariamente e retrospettivamente ad un movimento controllato anticipatorio. Negli adolescenti e negli adulti, man mano che il gesto grafico diventa sempre più automatizzato e spontaneo, la rilevazione degli errori avviene in concomitanza con il movimento.

Culturalmente, la scrittura a mano si è evoluta insieme alla tecnologia, passando da una necessità quotidiana ad una forma d'arte in alcuni contesti. Nei documenti storici, serve come una finestra sul passato, preservando le tradizioni, le emozioni e l'essenza di un'epoca. Le moderne tecnologie come la tastiera e l'annotazione digitale hanno ridotto il ricorso alla scrittura a mano, ma la sua importanza persiste, soprattutto nei settori personali e creativi.

In una prospettiva evolutiva, la scrittura si è evoluta dal controllo motorio necessario per l'uso degli strumenti e le prime forme di rappresentazione simbolica, come i disegni delle caverne. Queste attività richiedevano movimenti della mano precisi e sono strettamente legati allo sviluppo della destrezza manuale umana. La digitazione è un'abilità relativamente recente in termini evolutivi, emersa con l'invenzione delle macchine da scrivere e dei computer. Si basa su abilità motorie grossolane (dita) piuttosto che sul fine controllo motorio, e quindi fa meno affidamento sullo sviluppo evolutivo della destrezza manuale. La scrittura comporta la produzione di forme uniche che richiedono attenzione e creatività individuali, riflettendo il graduale sviluppo della comunicazione simbolica nel corso dei millenni, mentre la digitazione si basa sulla pressione di tasti predefiniti, astruendo l'atto di comunicazione dalla forma dei simboli, che riduce il carico cognitivo di creare forme uniche.

I meccanismi neurali alla base della scrittura a mano sono strettamente legati alle funzioni percettive, motorie e cognitive, fornendo un ricco substrato per l'espressione di pensieri ed emozioni. Laganaro et al. hanno studiato l'uso della grafia, della calligrafia e dei segnali vocali per la classificazione dei pazienti affetti da disturbo depressivo, dimostrando il potenziale di questo approccio multi-modale per una migliore accuratezza diagnostica. In un successivo lavoro, Laganaro et al. hanno ulteriormente approfondito questi risultati sviluppando modelli di apprendimento automatico basati su caratteristiche grafo-fonologiche specifiche per la rilevazione del disturbo depressivo, evidenziando il promettente potenziale di questo approccio per applicazioni cliniche. Studi attuali hanno esplorato il potenziale dell'analisi della scrittura come biomarcatore non invasivo per i disordini neurologici, quale la malattia del Parkinson (PD). Mancini et al. hanno sviluppato modelli di apprendimento automatico basati su segnali grafici per lo screening e il telerilevamento del Parkinson. Allo stesso modo, Fratello et al. hanno studiato l'uso di algoritmi di classificazione per lo screening del Parkinson utilizzando funzioni grafiche e di scrittura a mano, dimostrando risultati promettenti nella differenziazione tra pazienti con il Parkinson e pazienti sani.

Recenti studi di neuroimaging, tra cui la risonanza magnetica funzionale (fMRI), elettroencefalografia (EEG) e tomografia a emissione di positroni (PET), hanno fornito informazioni sui meccanismi neurali che sottostanno a queste due forme di espressione scritta. Questi studi rivelano differenze significative nei modelli di attivazione cerebrale quando gli individui si impegnano nella scrittura a mano e non nella digitazione, suggerendo che le due modalità di scrittura possono contribuire in modo diverso ai processi cognitivi come la conservazione della memoria, l'apprendimento e l'elaborazione del linguaggio. Mentre esploriamo queste distinzioni neurali, è cruciale considerare le implicazioni per le pratiche educative, in particolare nel contesto di un ambiente di apprendimento sempre più digitalizzato.

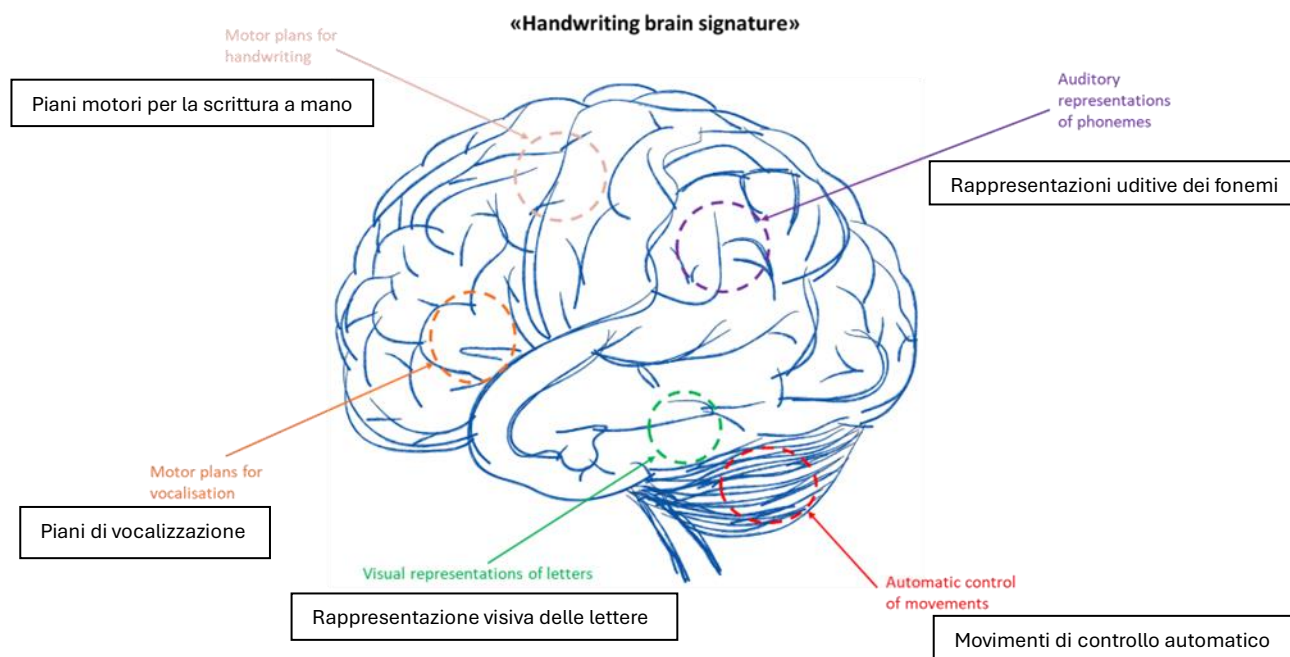
1.1. La scrittura a mano *versus* la digitazione

La scrittura a mano e la digitazione coinvolgono diversi meccanismi cognitivi e neurali, che hanno implicazioni sia dal punto di vista evoluzionistico che da quello neuroscientifico. Da una prospettiva neuroscientifica, gli studi dimostrano che la scrittura a mano coinvolge la corteccia senso-motoria, le aree visive e i centri del linguaggio (ad esempio l'area di Broca) in modo più estensivo rispetto alla digitazione. La formazione delle lettere richiede infatti l'integrazione del feedback visivo e tattile, nonché la pianificazione motoria. La digitazione attiva prevalentemente le regioni motorie associate ai movimenti ripetitivi delle dita e all'elaborazione visiva, con un coinvolgimento meno diretto delle aree associate alla memoria e al linguaggio. La scrittura a mano rafforza la memoria e l'apprendimento attraverso l'"effetto di codifica", dove lo sforzo di formare lettere migliora la conservazione e la comprensione. Ciò è particolarmente evidente nei bambini che imparano a scrivere, poiché la scrittura a mano favorisce lo sviluppo di percorsi neurali associati all'alfabetizzazione. Inoltre, mentre è efficiente per registrare grandi quantità di informazioni, digitare non impegna i sistemi di memoria del cervello in modo profondo. La ricerca mostra che chi digita tende a trascrivere verbalmente, il che si traduce in un trattamento più superficiale delle informazioni. Il ritmo più lento della scrittura a mano favorisce un pensiero e una creatività più profondi, poiché il cervello ha più tempo per elaborare e sintetizzare le idee. È anche vero che la velocità di digitazione può favorire il brainstorming e la rapida generazione di idee, ma può portare a un processamento meno riflettente.

La scrittura a mano, un processo motorio dinamico, coinvolge una rete di regioni cerebrali principalmente associate al controllo motorio, alla coordinazione visuo-spaziale e al trattamento del linguaggio. Studi che utilizzano la fMRI e la stimolazione magnetica transcranica (TMS) hanno identificato la corteccia motoria primaria, la corteccia premotoria, l'area motoria supplementare (SMA) e il cervelletto come le aree principali che controllano l'esecuzione e il perfezionamento dei movimenti di scrittura. Inoltre, il lobo parietale facilita l'integrazione visuo-spaziale, mentre l'area di Broca e altre regioni corticali legate al linguaggio contribuiscono alla codifica ortografica e alla rappresentazione grafemica durante le attività di scrittura a mano. Al contrario, la digitazione, che si caratterizza per la selezione e l'organizzazione di simboli preformati piuttosto che per la loro produzione manuale, si basa su una combinazione distinta di funzioni motrici e cognitive. Questa modalità comporta un maggiore coinvolgimento della corteccia prefrontale per la decisione e l'attenzione, nonché delle regioni parietali posteriori per l'organizzazione spaziale. Mentre la digitazione richiede meno controllo motorio, la sua dipendenza dalla memoria di lavoro e dalle funzioni esecutive è pronunciata, riflettendo l'affidamento del compito a processi cognitivi di ordine superiore. Nonostante queste differenze, sia la scrittura a mano che la digitazione dipendono da percorsi neurali condivisi per l'elaborazione visiva e ortografica. La corteccia occipitotemporale ventrale, compresa la cosiddetta "area visiva della forma delle parole" (VWFA), integra il riconoscimento e l'interpretazione dei simboli scritti. Questa area, in combinazione con le regioni temporali e parietali, sostiene la codifica neurale del linguaggio scritto attraverso le modalità.

La comprensione dell'interazione di queste strutture cerebrali è fondamentale non solo per individuare le basi neurali della comunicazione scritta, ma anche per affrontare i deficit cognitivi e motori che compromettono la capacità di scrittura. La **figura 1** presenta una rappresentazione visiva della complessa rete neurale alla base della scrittura a mano.

Figura 1. Correlati neurali della scrittura a mano.



1.2. Obiettivo della ricerca

Per valutare se la scrittura a mano e la digitazione condividono circuiti cerebrali comuni o differiscono nell'attività cerebrale quando eseguita, abbiamo esaminato gli studi sulla neuroimaging di queste due attività, da sole o in combinazione. Abbiamo scelto di selezionare solo studi che riguardano i partecipanti adulti, poiché il cervello cambia rapidamente durante l'infanzia e l'adolescenza e non si stabilizza fino ai 24 anni.

2. Materiali e metodi

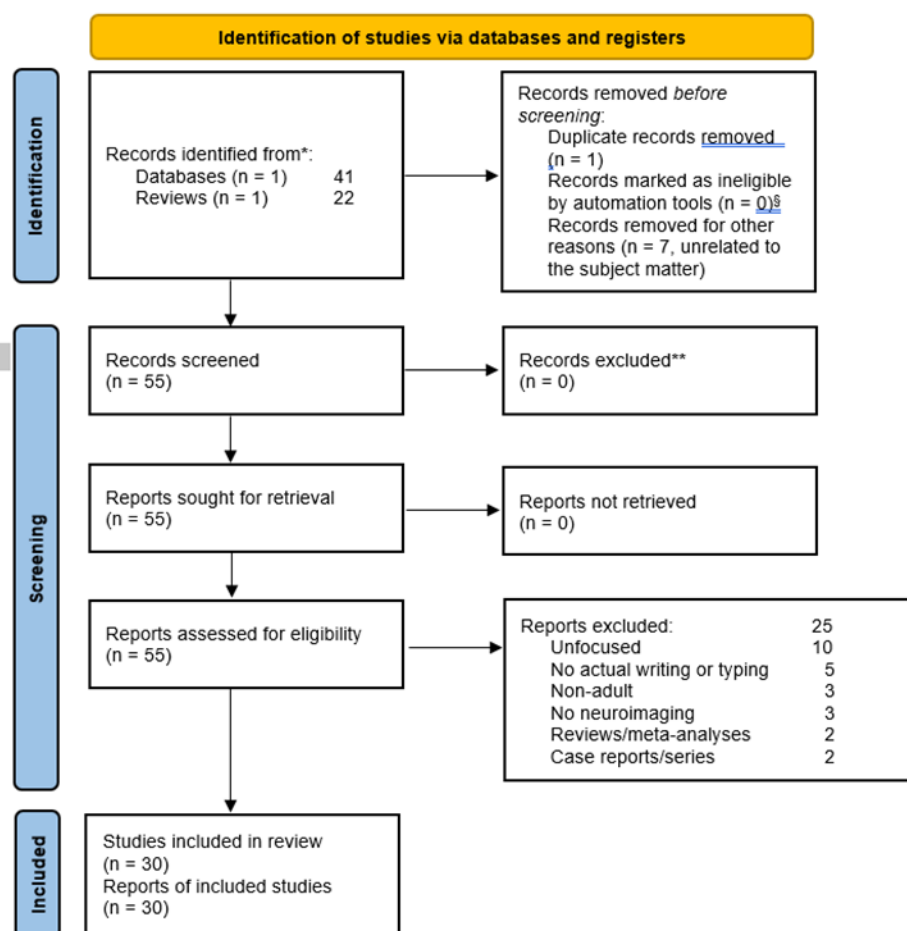
Questa ricerca era destinata a catturare tutti gli aspetti di attivazione o disattivazione cerebrale durante la scrittura a mano o a “macchina” per identificare modelli specifici di attivazione cerebrale, quindi consisteva in tre diverse ricerche combinate: una riferita sia alla scrittura a mano che alla digitazione, e uno ciascuno per la neuroimaging del sottotipo di scrittura. Una volta raccolti, tutti gli articoli sono stati scaricati e valutati per l'ammissibilità durante incontri in stile Delphi, in cui tutti gli autori hanno partecipato fino a raggiungere il pieno consenso.

Sono stati inclusi studi che hanno valutato soggetti umani mentre scrivevano a mano o durante la digitazione con fMRI o EEG o altre tecniche di imaging funzionale che consentono agli investigatori di identificare i luoghi di attivazione. Sono esclusi tutti gli studi che non forniscono dati o adottano metodi inadatti al nostro scopo. Abbiamo escluso articoli di opinione, quali editoriali, ipotesi, lettere al redattore e punti di vista, studi su animali, recensioni, meta-analisi e linee guida, collettivamente tradotte in recensioni, relazioni di casi e serie di casi, e tutti gli articoli non focalizzati o non correlati che emergono con la nostra strategia di ricerca. Sebbene le recensioni non fossero incluse tra gli articoli

ammissibili, abbiamo cercato a mano nelle loro liste di riferimento per identificare studi che potrebbero essere sfuggiti alla nostra ricerca. Non abbiamo incluso studi su bambini o adolescenti, poiché i loro cervelli sono ancora in via di sviluppo e devono ancora raggiungere la loro impostazione definitiva. I nostri risultati e le decisioni in merito all'ammissibilità sono riportati nel Supplemento (**Tabella S1**) e nella Figura 1, dove è presentato il diagramma di flusso PRISMA con le ragioni del

l'esclusione (**Figura 2**). Gli studi inclusi sono presentati nella **Tabella Supplementare S2**.

Figura 2. Diagramma di flusso PRISMA della nostra ricerca con i motivi del l'esclusione.



*Consider, if feasible to do so, reporting the number of records identified from each database or register searched (rather than the total number across all databases/registers).

**If automation tools were used, indicate how many records were excluded by a human and how many were excluded by automation tools. [§]No automation tools were used.

3. Risultati

La nostra ricerca, condotta il 5 dicembre 2024 sul database PubMed, ha prodotto 41 risultati, ai quali si sono aggiunti altri 22 ottenuti sia casualmente che tramite ricerca manuale di recensioni/meta-analisi di liste di riferimento, per un totale di 63 articoli. Di questi, 30 erano ammissibili, mentre il resto è stato escluso per varie ragioni (**Figura 2**). La **Tabella 1** ne presenta un riassunto.

Tabella 1. Riassunto degli studi sulla neuroimaging della scrittura a mano e della digitazione inclusi nello studio in ordine cronologico.

Study	Population	Technique	Design	Results	Conclusion/Observations
Petrides et al., 1995 [16]	11 σ r-h prctcs, $\bar{x}=24$, age range 18-32 yrs.	PET, $H_2^{18}O$ rCBF, 1.5T MRI co-registration on T&TSA.	PET scans during free recall of words, repetition of heard words, a pair-associate word task, and writing-to-dictation. Each task performed during a 60-sec scanning, preceded by a learning or practicing. During scans, prctcs were wrapped in a black curtain in a dim-lit environment with kept eyes open	$\uparrow$ activation in left VLPFC (BA45) during verbal information retrieval from long-term memory, mid-DLPFC (BA9/46) during pair-associate and free recall tasks, and SMCx and posterior PCx (but not VLPFC) during the writing-to-dictation condition.	VLPFC is involved in the strategic retrieval of verbal episodic information, while the DLPFC is activated during tasks requiring mnemonic output monitoring, and the SMCx and posterior PCx are activated during writing, suggesting distinct functional specialisations within the frontal Cx.
Seitz et al., 1997 [17]	8 healthy r-h Caucasian medical students (4 σ , 4 φ , $\bar{x}$ age 28 ± 3 yrs) with normal or corrected visual acuity.	PET, [^{18}O]butanol rCBF, 1.5T MRI co-registration on T&TSA.	Prctcs, trained in controlled graphomotor tasks, underwent 6 PET scans to investigate the neural basis of graphomotor trajectory processing in PCx. Tasks were BL visual stimulation, fast and precise writing of overlearned letters, learning and execution of novel ideograms, and mental imagery of writing movements without physical execution. PET imaging was integrated with detailed kinematic analysis of writing trajectories recorded on a digitizing tablet. rCBF measured to identify neural activations associated with different levels of motor control and learning.	Writing velocities similar in sitting and lying and in PET conditions. $\uparrow$ CBF <i>vs.</i> BL during Learning in left MCx, PreMCx, SMA, cingulate, right dentate nucleus, cerebellar vermis, and in PCx, IPS, right SMG, and SPL. $\uparrow$ CBF <i>vs.</i> BL during Execution in bilateral superior posterior PCx, OL, and anterior cerebellum. No $\downarrow$ in rCBF appeared in any area. Fast and precise writing of overlearned letters showed $\uparrow$ CBF <i>vs.</i> BL in posterior PCx. Ideograms executed slower than letters but only in the learning phase.	PCx engaged in motor coordination and learning of new movement patterns associated with the automatic processing of previously consolidated movements. In contrast, during learning and execution of novel ideograms, $\uparrow$ activation in parietal and frontal regions. There are two subsystems, one engaged in controlled processing around the anterior IPS and another in posterior PCx during automatic execution. During mental imagery, both subsystems are simultaneously active.
Nakamura et al., 2000 [18]	10 health r-h students at Kyoto University native Japanese speakers (6 σ , 4 φ , age range 20-25 yrs).	fMRI, 1.5T images analysed through SPM96.	The study used fMRI to investigate the neural mechanisms underlying writing and mental recall of kanji orthography in Japanese speakers. Prctcs performed four tasks: kana-to-kanji transcription, iMR, oral reading of kana words, and SJ of kana words. Visual identification of kana characters was used as a baseline for all tasks. Each trial involved a stimulus presentation followed by a response period. Stimuli consisted of 60 kana words transcribed from two-character kanji words, representing either concrete or abstract nouns.	Writing and mental recall of kanji (ideograms) orthography activate specific brain regions, particularly involving the left PITC _x , that was central to the retrieval and representation of the visuo-graphic orthography of kanji, distinguishing it from oral reading or SJ. During kana-to-kanji transcription and iMR-pMR tasks, increased activation was also observed in frontal and parietal regions, suggesting the involvement of circuits related to motor control and working memory. In contrast, tasks involving reading and SJ showed $\uparrow$ activation in medial superior temporal areas, which are associated with linguistic decoding and semantic comprehension.	Supports that the left PITC _x plays a central role in the retrieval of visual engrams of letters. During the act of writing, there is no need for conscious effort to recall the visual images of letters or words to be written, as the sequential visumotor skill proceeds automatically due to the presence of a specialised neural subsystem for retrieving visual graphic forms.
Katanoda et al., 2001 [19]	17 r-h σ healthy prctcs, age range 19-31 yrs, with vision normal or corrected-to-normal.	fMRI, 1.5T, T2*-weighted BOLD aligned with T1-weighted scans for anatomic localization.	To define essential for writing brain regions, fMRI measured brain haemodynamic responses during writing the names of depicted objects, silently naming the objects or performing finger tapping guided by visual cues, activating separately visual, linguistic, and motor processes, respectively. Conditions were	Anterior part of left SPL, posterior SFG and MFC, and right cerebellum are $\uparrow$ activated compared to the naming and tapping tasks. $\uparrow$ activation of left PCx with retrieval of graphic letter representation, while PreMCx supports motor	The results confirm differentiate writing from other linguistic and motor activities.

			alternated every 32 sec and repeated randomly, ensuring that each condition occurred 6 times, resulting in a total of 18 blocks (576 sec).	planning required for the complex sequential movements involved in writing. ↑ activation in right cerebellum attributable to the motor complexity associated with finger movements during writing.	
Matsuo et al., 2001 [20]	12 r-h (1 ambidextrous) healthy Japanese (8 σ, 4 ♀, age range 22-29 yrs).	fMRI 3T, T2-weighted images overlapping with fMRI; ROI analysis with SPM96 using T&TSA MR normalization.	Investigation of collaborative mechanisms between visuospatial processing and motor execution in performing visual language generation tasks, using Japanese Kanji, ideographic characters, to design tasks. Differences in activated volumes in four tasks: Kanji-grapheme puzzle task; Writing-Kanji-corresponding-to-phonogram task; Copying-Kanji task; and Circle task.	Border portions between IPL and OL involved bilaterally during the puzzle task, along with premotor areas and pre-SMAs. P-O activation may be related to the analysis of configuration or to segmentation/integration of Kanji figures.	Activation in higher motor areas may be induced by cognitive components related to motor function to perform the visuospatial language task. A collaborative mechanism in higher motor areas may explain the effectiveness of tactile reading in letter recognition by patients with pure alexia or kinaesthetic facilitation by Kanji users when recalling difficult Kanji.
Siebner et al., 2001 [21]	10 healthy r-h prctcs (8 σ, 2 ♀; $\bar{x}$ age 41.3 ± 10.9 yrs).	PET, $H_2^{15}O$ -rCBF normalised on T&TSA MRs.	Continuous handwriting recording through digitising graphics tablet during PET scanning, rCBF measured during word writing, either FO-L or at about half speed, (SC-L), both without visual feedback, i.e., you don't see what you write, hence you need a continuous modification of the motor output according to the kinaesthetic feedback from the hand. Pencil movements recorded during PET scanning analysed off-line using a stroke-based analysing program. $\bar{x}$ NIV/stroke used to quantify the mode of motor control during PET scans. $\bar{x}$ NIV/stroke=1 in FO-L, higher numbers in SC-L.	Foci in left primary SMCx, right lateral PreMCx, left anterior PCx, left anterior putamen, left rostral SMA and right precuneus showed a graded ↑ in functional activation with ↑ $\bar{x}$ NIV/stroke (shifting to SC-L). No area showed a negative relationship between rCBF and $\bar{x}$ NIV/stroke.	A set of cortical and subcortical brain regions is involved in the processing of movements associated with SC-L writing. FO-L handwriting is achieved by optimised cooperation of the manual sensorimotor network rather than by a selective activation of a distinct network component. The functional activation pattern during handwriting is not influenced by different levels of motor learning.
Siebner et al., 2002 [22]	11 healthy r-h prctcs (2 ♀, 9 σ; $\bar{x}$ age 42 yrs, range 26-58 yrs) <i>vs.</i> 11 healthy l-h converted to right handwriting (4 ♀, 7 σ; $\bar{x}$ age 47 yrs, range 34-64 yrs) <i>vs.</i> 6 consistent l-h, not converted to right hand writing (1 ♀, 5 σ; $\bar{x}$ age 32 yrs, range 25-55 yrs).	PET, $H_2^{15}O$ -rCBF; analysis through SPM implemented in PRO-MATLAB environment normalised on MNI template; location of peak activation with T&TSA.	Before starting PET scanning, prctcs trained for writing the German word for barking, "bellen" ×10 min in the scanner. Handwriting alternated with rest 3 times; which came first counterbalanced across prctcs. A 6 sec pacing tone was present throughout the experiment. Prctcs wrote at a speed of their choice; after finishing word-writing, they repositioned their hand at the starting point and then wrote the word time and again, until a 50 sec scanning period had finished. Since radioisotope injection (that takes ≈25-35 sec to appear in brain) which occurred when prctcs started writing, the first 4-6 writing tasks were discarded and only the last 8 counted for PET data acquisition (and included for kinematic analysis). Continuous handwriting recording through digitising graphics tablet during PET scanning. rCBF measured during word writing, either FO-L or SC-L, both without visual feedback. Analysed were vertical stroke length, vertical stroke duration, peak vertical writing velocity, and $\bar{x}$ NIV/stroke. $\bar{x}$ NIV/stroke=1 in FO-L.	↑ familial left-handedness in l-h and converted l-h <i>vs.</i> r-h, all r-h and converted l-h assumed a standardised hand-writing position, while in consistent l-h half of the sample assumed an inverted posture (pen towards writer). Kinematics and order of writing/rest not different among groups. ↑ rCBF in r-h in writing <i>vs.</i> rest in foci like left SMCx, left caudal SMA, left DLPFC, left SPL and IPL, right precuneus and right anterior IPS in the Cx and bilateral thalamus. ↑ rCBF in converted l-h in writing <i>vs.</i> rest in similar regions, but with less left lateralisation and a shift to the right in DLPFC and right SPL and IPL, and thalamus, while activity in the pallidum was shifted at left. Control consistent l-h showed ↑ rCBF in writing <i>vs.</i> rest in the above regions with right lateralisation (they were writing with the left hand); ↑ rCBF in consistent (uncorrected) l-h in writing <i>vs.</i> rest in right ventral PreMCx (BA6). All groups showed similar patterns of ↓ rCBF during	Writing elicits activation patterns in consistent r-h prctcs in the dominant (contralateral) hemisphere, as occurs with uncorrected l-h while writing with their dominant hand; hence, opposite activation patterns occur that are expected. Corrected l-h show activation patterns that are midway between consistent r-h and consistent l-h. Reverse hemispheric asymmetry in l-h <i>vs.</i> corrected l-h. The stronger activation of the right lateral PFC in converted l-h compared to the more prominent activation in left dorsal and ventral PFC during right-hand writing in r-h might reflect adaptation, i.e., more activation is needed to support a "corrected" behaviour. Deactivations were probably meant to represent signal cleaning during tasks. Methodological limitation: handedness classified according to self-report (reporting bias).

				automatic right-hand writing, with medial and lateral PFC and occipitoparietal visual association area deactivation; r-h deactivated right lateral PFC, while converted l-h showed bilateral deactivation. Left parietal and left ventral PFC clusters selectively activated during writing only in r-h, while the focus in left DLPFC was activated in both r-h and converted l-h, but task-related activation of left dorsal PreMCx was more pronounced in innate r-h. DLPFC deactivated during automatic writing in both r-h and converted l-h. $\uparrow$ rCBF in converted l-h during writing in posteromedial right STG, right precuneus, right parietal operculum, and right lateral PFC. $\uparrow$ rCBF in converted l-h during writing in right STG, right precuneus, and right parietal operculum-SII, while r-h showed deactivations. ANCOVA showed $\uparrow$ rCBF in right IPL in SMG and right rostral SMA and ACC with $\uparrow$ left-handedness index.	
Nakamura et al., 2002 [23]	9 healthy r-h volunteers (age range 21-30 yrs) native Japanese speakers.	fMRI, 1.5T images analysed through SPM96.	40 Japanese commonly used nouns for all 6 activation tasks. Stimuli could be in both kanji (ideograms) and kana scripts (phonemic alphabet). Upon auditory presentation of the same set of word stimuli, prtcs performed different behavioural tasks according to prespecified instructions. In iWD, prtcs wrote down the first character of each two-character kanji word. In iMR, prtcs mentally visualised a graphic form of the kanji and judged whether it belonged to the L-R type or not. Similarly, in pWD and pMR, prtcs wrote down and imagined the first character of each kana string, respectively. In REP, prtcs orally repeated the auditory stimuli, whereas in SJ, they determined whether the stimulus words represented concrete objects or abstract concepts.	The iWD task produced a distinct activation focus in left PITC _x , in addition to extensive activation in left SMC _x . In the pWD task, a smaller cluster of activated voxels in left PITC _x did not survive the statistical criterion. iMR and pMR tasks activated the left PITC _x similarly. REP and SJ also activated other cortical areas including the left PFC and bilateral IPL, IPS and inferior PC _x .	Contrary to the traditional view, the obtained functional imaging evidence indicates that in normal people the neural systems for processing the two different scripts are separable only functionally, rather than anatomically.
Beeson et al., 2003 [24]	12 healthy r-h adults (6 ♀; 6 ♂) age range 20- 53 yrs, $\bar{x}$ age=38.4 yrs, English speakers.	fMRI, 1.5T, T2*-weighted BOLD aligned with T1-weighted scans to localise areas according to MNI-SPM99.	The prtcs were administered two protocols, each consisting of three tasks. For one protocol, the three conditions were generative writing of single words, writing letters of the alphabet, and drawing circles (words/alphabet/circles). The second protocol included generative writing of single words, subvocal generative naming of single words, and a rest condition (writing/naming/rest).	The linguistic components of writing were mainly localised in left PITC _x (BA37) and the motor components of the writing process in left-hemisphere fronto-parietal network: IPS, SPL, DLPFC, medial PFC, and SMC _x for the hand.	This study contradicts the long-proposed notion that orthographic representations for familiar words were stored in the dominant (left) AG (BA39) in the form of visual images.
Omura et al., 2004 [25]	15 healthy r-h adults (9 ♂, 6 ♀), age range 18 - 39 yrs ($\bar{x}$ age 25.7 $\pm$ 6.4), Japanese speakers.	fMRI, 1.5T, T2*-weighted BOLD aligned with T1-weighted; areas defined with MNI-SPM99.	Four experimental conditions: (1) writing to dictation of meaningless phonograms, (2) writing to dictation of meaningless symbols (control condition for condition (1)), (3) repetition of meaningless phonograms, and (4) repetition of	Left premotor Cx (BA6), extending into Broca's area (BA44-BA45), was activated in phoneme-to-grapheme conversions during the performance of writing to dictation tasks. Left STG (BA22) activated in both writing	Findings suggest that the left premotor area transfers phonemic representations to graphemic motor output to create letters in writing to dictation. The left STG is thought to transform auditory information into

			particular phonograms (control condition for condition (3)).	to dictation and repetition tasks.	phonetic (auditory) and/or graphic (visual) representations of letters.
Rektor et al., 2006 [26]	10 healthy r-h adult Czech speakers (2 ♀, 8 ♂) age range 20-25 yrs, $\bar{x}$ age 23.5±1.28.	fMRI, 1.5T, T1-weighted scans fitted on fMRI images to localise areas using SPM99.	The task had two parts. In the first, prtcs were instructed to write dots, in the second, they were instructed to write the letters of the alphabet (beginning with "a"). Prtcs were instructed to fix their gaze on the line at the top of the MR gantry and keep their eyes open. Since prtcs were supine in scanner and the touch screen on their abdomen, they could not see what they were writing. Prtcs switched between tasks when asked by the investigator to do so. Prtcs first trained and then entered the MR gantry. They used an optomechanical pen to write slowly on a touch scanner connected to the computer via a fibre optic cable. They were told to write letters in 20 sec intervals, tracking time covertly, without detaching the pen from the touch screen; doing so was error.	In "dot writing" significant activation clusters were in left pericentral region, left IPL, left middle cingulate and left thalamus, and to a lesser extent, in right IPL and right OL. In "writing letters", ↑ activations in PreMCx, SMCx and supramarginal Cx, VPL-Thal and VPM-Thal at left, in bilateral PreMCx and PCx, and in postcentral gyrus, IPL and premotor regions at right. ↑ activations with "writing letters" <i>vs.</i> "dot writing" in right IPL-OL (BA37) and SPL (BA7).	The right hemisphere is dominant for tasks requiring manipulation in space. It is possible that activation of this region is linked with the spatial dimension of the writing. This study was performed without visual control and the demand on orientation in space and spatial imagination was rather high. Right-sided PCx may play an important role in the elemental mechanism of writing.
Harrington et al., 2007 [27]	11 healthy r-h adult 5 ♂, 6 ♀; $\bar{x}$ age 37.1 yrs, range 22-61 yrs, of whom 6 (2 ♂, 4 ♀; $\bar{x}$ age 39.0 yrs, range 26-54 yrs) participated in Experiment 2	fMRI 1.5T, T1-weighted images EPI sequences analysed through AFNI AlphaSim normalised on T&TSA; ROI approach	fMRI used to compare brain activity during the mental simulation of writing and drawing. Experiment 1: after training with writing or drawing imagery, prtcs entered the scan and were shown different pictures (2 sec each) on a screen through a mirror on top of the head coil with the instruction to write or draw, imagining to write their names or drawing them until they were commanded to stop (11 blocks for each task, total time 6 min 32 sec, one block lasted 8 sec and was followed by a 4-8 sec resting condition). The procedure was repeated to control for speed. Experiment 2: 6 prtcs of the initial sample performed the same task as above, but actually writing or drawing with a pencil on a sheet of paper, each time a new one	Imagined drawing and writing activated similar areas in the left hemisphere, like the PremCx, IFG, posterior ITG, and parietal areas. Imagined writing lateralised at left in all ROIs, particularly SPL and PreMCx; imagined drawing lateralised at left in all ROIs save SPL. Imagined drawing <i>vs.</i> BL ↑ activation in bilateral insular Cx (BA13), right posterior ITG (BA37), right MFG/IFG (BA46/9), and left anterior IFG (BA47). ↑ activation with imagined drawing <i>vs.</i> writing in right IFG, bilateral MFG, bilateral IFG, bilateral parietal, and bilateral posterior ITG; exclusive activations for drawing <i>vs.</i> writing in right SFG (BA9) and bilateral OL (BA19). No laterality differences between imagined <i>vs.</i> actual drawing and writing. ↑ activation for actual drawing <i>vs.</i> imagined drawing and actual writing <i>vs.</i> imagined writing in precentral gyrus (BA4); ↑ activation for actual drawing <i>vs.</i> imagined drawing in SFG (BA 6)	Mental imagery of motion recruits the same Cx areas used in motor performance. The differences in activation reflect the use of distinct brain pathways for symbolic (writing) <i>vs.</i> visuo-spatial (drawing) processes. Frontal eye field activation can be due to use of the eyes to mentally draw objects, but prtcs were not asked whether they imagined with eyes open or closed; furthermore, prtcs were not controlled for hand movements during imagery, that could have helped with imaging some individual prtcs
Longcamp et al., 2008 [28]	12 r-h prtcs (6 ♂, 6 ♀; $\bar{x}$ age 26 ± 3 yrs)	fMRI 3T, T2*-weighted EPI sequence superimposed on T1-weighted images; analysis with SPM2 normalised on MNI template; significant clusters identified with T&TSA	Three training sessions (1/wk × three weeks) to learn how to write (both hand- and type-writing) two sets of ten new characters. Behavioural recognition by the mirror-normal judgment task (at BL and 1 st , 3 rd and 5 th wks). Sensorimotor test to evaluate long-term memory by block task at 6 wks. fMRI recognition test at 1 st wk	Behavioural results: correct response rates were higher × written characters [main effect of modality, $F_{(1, 11)}=25.6$, $p=0.001$]. Response accuracy ↓ with time [main effect of time of testing, $F_{(2, 24)}=13.9$, $p=0.001$]. fMRI results: level of performance was significantly ↑ for handwritten than for typed characters (Wilcoxon's rank-order test, $z=2.45$; $p=0.008$)	Better recognition of written than typed new characters. Performance recognition not determined by familiarity with character but rather by type of motor activity associated during training. Handwriting memory facilitates discrimination between characters and their mirror images for longer periods than typewriting memory. Different neural circuits underlie recognition performance differences between hand-

					and type-writing characters with fMRI and supported by left-sided lateralisation of activations
Tremblay et al., 2008 [29]	ST: 6 healthy r-h English speakers (4 ♀, 2 ♂; $\bar{x}$ age 26±4.91 yrs). NST: 6 healthy r-h English speakers (3♀, 3♂; $\bar{x}$ age 22.7 ± 2.27 yrs)	EEG 64-pin active Ag-AgCl electrodes, EMG of the orbicularis oris muscle with two flat electrodes placed above upper and lower lip	ST: two EEG-recorded tasks, reading a word (EXT) and generating a word (INT). NST: two EEG-recorded tasks, externally specified task (EXT), a self-selected keyboard press task (four choices) (INT). Four ERD variables: peak amplitude, onset time, duration and time-to-peak. The within-subject variables were: response MODE (EXT, INT) and frequency BAND (α , β), and the between-subject variables were TASK (keyboard press, speech) and REGION (left, right, medial)	The ERD patterns for the ST and the NST were similar. The INT task compared with EXT was associated with a longer ERD that started earlier, ended later, peaked later and tended to be of greater amplitude. β ERD was associated more closely with the timing of the stimulus while α ERD was associated more closely with the timing of the response	β ERD patterns showed a closer relation to response selection. In contrast, α ERD patterns were more closely related to response onset, perhaps reflecting attentional demands overseeing motor response execution. ERD patterns for the speech and keyboard press tasks were very similar across the frequency bands, suggesting that the orofacial and finger motor systems use similar underlying neural mechanisms
Roux et al., 2009 [30]	12 >63±19.18% r-h ($\bar{x}$ age 22±3.88 yrs and 12 >69±18.91% l-h healthy volunteers ($\bar{x}$ age 25±5.05). Sex of volunteers not given	fMRI 1.5T; EPI sequenced images normalised on T&TSA template and analysed with MATLAB 7 using SPM5	Word dictation without visual control and repetition tasks, alternating activation and resting blocks plus 2 control tasks to match sensory input and motor output; when hearing GO, prtcs drew circles or repeated the syllable pra. To exclude interference with fMRI signal related to elementary sensorimotor processes and ensure selectivity for word handwriting, dictation was contrasted with same word repetition task and masking (circle tracing and syllable repetition)	↑ activation in left superior frontal sulcus (BA6) in r-h and in same area in left-handers. ↑ activation in the hand motor cortex homolateral to the writing hand in both groups. In r-h conjunction of handwriting (dictation-repetition) with preferred and non-preferred hand colocalise in left BA6, less significantly in left-handers. Conjunction in r-h concurred to indicate left-sided dominance of BA6, while in left-handers this was less marked and shifted to the right (dominant) hemisphere for hand movements	An area located close to the superior frontal sulcus in BA6, anterior to the hand primary motor area, is selectively involved in handwritten word production. fMRI signal increase was selective to word handwriting, as dictation was contrasted with repetition and exclusive masks were used to exclude changes in cortical activity relating to elementary sensorimotor processes. Handwriting-related activation in BA6 was bilateral in r-h prtcs but slightly ↑ in the dominant hemisphere
Barton et al., 2010 [31]	13 healthy r-h English-literate individuals (5 ♀, 8 ♂; $\bar{x}$ age 28.1 ± 4.0 yrs, range 22-35 yrs) with normal or corrected-to-normal visual acuity	fMRI 3T, T2-weighted functional images with EPI sequences; ROI approach combined with whole-brain analysis; images plotted on T&TSA	Prtcs observed 10 words presented in 10 different handwriting styles across three conditions: no repetition (control), repeated words with different handwriting, and repeated handwriting with different words. Brain activity was measured to identify adaptation effects in regions like the VWFA, focusing on how repetition of words or handwriting influences neural responses	Significant fMRI adaptation for handwriting in both left and right VWFA; no adaptation for words right and left VWFA. Trend towards word adaptation only in left MTG. Subregional VWFA analysis confirmed handwriting adaptation in both anterior and posterior components, but no word adaptation	Abstract word representations might emerge at higher processing levels. VWFA primarily involved in perceptual text analysis, particularly handwriting, rather than abstract linguistic processing and is sensitive to handwriting, supporting a primary role in perceptual, rather than linguistic processing. Abstract word representations appear to arise in higher-order regions, such as the left MTG, suggesting a division of labour within the reading network. Findings challenge the notion of the VWFA as exclusively dedicated to linguistic functions, emphasising its contribution to visual and stylistic text analysis
Brownsett & Wise, 2010 [32]	3 healthy r-h (7 ♂, 6 ♀; $\bar{x}$ age 51.7 yrs, range 40-70 yrs)	PET, $H_2^{18}O$ rCBF; images analysed with SPM2	16 scans for each pts during the execution of randomic tasks. 1 st task: WrNa and SpNa, 3 scans each. 2 nd task: SpSyl, 2 scans each 2 spoken syllables. 3 rd task: WrG over the course of 3 scans. 4 th task: NmTsk, 3 scans	Bilateral ↑ activity in superior PCx and IPSs in writing, both WrNa and SpSyl. ↑ activity in S1 for the right upper limb, weakly in bilateral SII and in medial SSA. ↑ bilateral IPL, right > left, extending into right	Extensive parietal activity is associated with the planning, execution, and monitoring of writing, even for only a single letter. Limited involvement of the PL in the organisation, execution, and monitoring

				DLPFC, associated with SpSyl and WrG, matching activity of cortical regions involved in sustained attention. ↑ activity in left AG is a main effect of narrative. Bilateral activity in ventral half of the pre- and postcentral frontal gyri contiguous with activity along the length of both STG, including the <i>planum temporale</i> and S1. Narrative (WrNa+SpNa) associated with ↑ activity in frontal and parietal areas and AG, at left TPOJ; SpSyl+WrG/SpNa+WrNa contrast ↑ activation in bilateral PCx right>left and in PFC	of the movements of phonator muscles during speech. The PL contributes little to the planning, execution, and monitoring of articulation during normal spoken language production. Parietal activity for amodal linguistic or mnemonic processing confined to left AG. This posterior region was spatially insignificant compared with that associated with the execution of writing, but it is an area repeatedly observed in functional imaging studies of language
Purcell et al., 2011 [33]	17 healthy r-h English speakers (7 ♂, 10 ♀; $\bar{x}$ age 23.2 yrs, range 18-27 yrs)	fMRI, 3T; EPI sequences plus T1-weighted scans; images analysed with SPM5 and normalised according to MNI	Spelling and Reading conditions of two-word lists of 40 items each during scan. 30-sec blocks for each condition (10 stimuli × block), 4 blocks × condition. Spelling: type auditory words on a keyboard → fix cross → type other word (750 msec word → 2250 msec silent → 750 msec other word, in pseudorandom order) alternated with motor task: upon hearing the word motor, type a pre-learned sequence. Sequence similar to above. Reading: visual words, silently read 10 consecutive words → fix a cross → other word reading (2250 msec word → 750 msec silent → 2250 msec other word, in pseudorandom order) alternated with checkerboard: attending to all stimuli. In both conditions, blocks were never followed by blocks of the same type. Post scan control: prtcs saw 50 words, deciding whether they were presented during the experiment or not (25 yes, 25 no)	fMRI results: Typed Spelling (typing) > Reading: Frontal regions: Left IFG, MFG, SFG. Parietal regions: Left SPL, IPS. Temporal: Left STG, ITG. Ventral visual stream: More lateral activation for spelling compared to reading in IFG. Reading > Spelling: Left middle cingulate gyrus and bilateral cuneus	Typing activates a spelling network that is active conjointly with reading; the two circuits share activations in left IFG (BA44) and left FuG (BA37). The typing spelling includes a region near Exner's area, which is shared by handwriting. Lateral IFG activation associated with spelling was > reading, while in the medial portion there was no significant difference spelling <i>vs.</i> reading. The description of the experiment and the terminology used may create some confusion
Segal & Petrides, 2012 [34]	9 healthy r-h bilingual speakers (English-French or German or Chinese, 6 ♂, 3 ♀; $\bar{x}$ age 26 ±3.72 yrs)	fMRI, 1.5T, T2*-weighted BOLD aligned with T1-weighted scans to map according to the MNI co-ordinates	WT: prtcs completed 5-block trials, each lasting 4.5 sec, with 2.5-7.5 sec ITI, writing with a pencil on a paper pad placed out of view during fMRI scanning. In the WT, prtcs viewed images of everyday objects, silently generated their names, and wrote them. In the control condition, NmL required silently naming the pictured objects and circle each syllable instead of writing the name, while NmLL required two loops. The second task set included CpE, where prtcs silently read displayed English words and copied them. The control condition, RdL required silently reading English words and drawing loops for each syllable. Eventually, in CpNs prtcs read pseudo-English nonsense words, unfamiliar and meaningless to them, and copied them. Prtcs practised all tasks in a 15-min pre-scanning session. Stimuli presentation and task control were managed using the E-Prime Software 1.1	WT <i>vs.</i> NmL tasks showed ↑ activity in left hemisphere, particularly in area PE (rostral part of SPL), PreMCx, primary motor and sensory hand regions, cingulate motor areas, SII in the upper bank of the Sylvian fissure, the insula and cerebellum (right hemisphere). Same areas involved in CpE <i>vs.</i> RdL. During NmLL, similar SPL peaks, with ↓ sensorimotor activation, suggesting that SPL activation is related to writing rather than motor activities. CpE <i>vs.</i> CpNs ↑ activity in IPL (AG and SMG). Left area PE related to writing, whether words are visually presented or internally generated. WT: ↑ functional connectivity of SPL with STG, posterior SPL, IPS, anterior SMG, and motor-related regions in the central sulcus, supporting word retrieval and motor control. CpE: SPL showed greater connectivity with AG,	Area PE in the SPL of the language-dominant hemisphere is a critical high-level motor control region for writing. This area acts as an interface between cortical motor and language regions, coordinating hand actions required for producing written language

				Broca's area, and MTG (part of Wernicke's area), reflecting reading and comprehension in externally guided writing. WT <i>vs.</i> CpE revealed that writing involved stronger FC with dorsal motor/premotor, S1, SII, and bilateral SMG (motor planning). CpE <i>vs.</i> WT showed increased SPL coupling with AG, highlighting reading-related processes	
Shah et al., 2013 [35]	28 r-h prtcs (14 ♀, 14 ♂; $\bar{x}$ age 24.0±1.9 yrs) inexperienced in creative writing native German speakers	fMRI 3T, BOLD, T1-weighted, EPI, images analysed using SPM5 run on MATLAB 7.4 normalised to MNI	Prtcs received written instructions before entering the scan and then performed two blocks of four tasks; the writing tasks were carried out with a felt-tip pen on a sheet of paper placed on a lectern over prtcs' hips. For each task, separated by 20 sec fixing cross intervals, prtcs used new paper sheets. 2 ≈120-word texts were presented from Thomas Bernhard's "der Untergeher" in random order, which the prtcs read silently ×1 min and then copied in part (≈35 words) ×1 min → the first 30 words of the previously presented text ×1 min to induce brain storming about how to continue → write a creative but plausible continuation ×2 min 20 sec, either based on previous brain storming or not. Prtcs assessed setting appropriateness with VASs. Investigators and 5 independent judges assessed prtcs' creativity through a test and a VAS, respectively	Prtcs rated setting as acceptably appropriate and their concentration as moderately high, with no differences between the two texts. Reading → ↑ activation in a left lateralised brain network (Broca's area [BA44/45], bilateral STS, left Wernicke's area [BA22/40], and O-T region [BA19/37]), bilateral DLPFC [BA9/46], right ACC [BA24/32], right anterior insula, in the motor system (bilateral primary motor Cx, SMCx, and left precentral gyrus (BA4), SMA, PreMCx left putamen, thalami, cerebellar hemispheres and vermis, bilateral primary visual cortex. Copying → ↑ activation in primary motor Cx (BA4), SMCx (BA1/2/3), anterior part of bilateral SPL (BA7), and secondary motor areas (BA6, SMA, PreMCx), including posterior MFG end (at left, Exner's Area) and frontal eye field, left thalamus, left putamen, and cerebellum, bilateral visual cortex, bilateral O-T Cx, bilateral DLPFC (BA9/46), left insula, and right IFG (BA 44). Brainstorming → ↑ activation in left IFG (Broca's area [BA44/45, and BA47]), left anterior insula, left DLPFC (BA 9/46), and left lateral OFC (BA10), right IFG (BA44/45, and BA 47), right anterior insula and right orbital Cx (BA 11), bilateral dorsal PreMCx (BA6), left medial SMA (BA6), medial PFC (BA 8), dorsal ACC (BA24/32), left IPL (BA39/40, including Wernicke's area), STG (BA22 and STS), and temporopolar Cx (BA38), more circumscribed in right posterior STS, bilateral OL (BA17/18/19), right anterior and left posterior cerebellar hemispheres and vermis. Creative writing → ↑ activation motor-associated areas including primary motor	Brain-storming and creative writing engaged executive function cortices, besides other specific areas (motor circuit related to hand movement with creative writing, visual cortices with both). Creative writing and copying shared many brain activations and correlated with creativity indexes; hence, copying is not devoid of creative processes and their related brain activations, mostly the SFG-temporopolar focus. Since creativity is correlated with intelligence, some results could be biased, as intelligence was not measured in prtcs. Prtcs considered the 2 min 20 sec interval too short for writing a new story. Brain-storming involved novel and original idea generation and composition of the story concept through recruiting fronto-parieto-temporal circuits while some PreMCx activity could be involved in preparatory processes for writing activity. Creative writing combines handwriting with cognitive processes associated with writing, such as episodic memory, semantic integration, and text production linked to activation of a left fronto-temporal network including left IFG (BA45) and left temporopolar Cx (BA38)

				Cx (BA4) and corresponding S1 (BA1/2/3), and bilateral dorsal PreMCx, SMA, middle cingulum, bilateral SPL (BA7), left thalamus, and right anterior cerebellar lobe and vermis, bilateral O-T Cx (BA37, BA19) and bilateral OL (BA17/18), bilateral IFG (BA44), bilateral MFG (BA9), right DLPFC (BA9/46), and posterior STG and STS (BA22). Creative writing minus copying → highest activation in right MTG (BA38) and left temporopolar Cx (BA38). Differences in activations located in bilateral PCC (BA 31) and bilateral hippocampus. All regions lateralised to the right	
Longcamp et al., 2014 [36]	18 native French speakers (11 ♀, 7 ♂; $\bar{x}$ age 24 yrs, range 18-35 yrs), with normal audition and normal or corrected-to-normal vision	fMRI 3T, T1-weighted MP-RAGE sequence superimposed on T2*-weighted EPI, analysed with SPM8 on MNI template	7 numbers (1, 2, 3, 4, 6, 7, 9) and 7 consonants (B, C, L, M, Q, R, S), previously recorded by a male French speaker in an anechoic room, presented in 24 same-category pairs each, dictated during fMRI scanning one per trial, through MR-compatible headphones. Prtcs familiarised with task prior to fMRI. Numbers, letters, and control conditions performed in blocks of 4 trials (3.3 sec after an initial 100 msec signal). Prtcs heard a 100 msec signal and placed the pen at the centre of the tablet; 100 msec later they were presented with the stimulus pair for 300-600 msec; once identified the pair, prtcs wrote it on the tablet at a natural speed. In the control condition, they heard an 100 msec auditory signal and nothing else and they were required to place the pen on the tablet's tip and remain so for the rest of the trial. After this, there was a fixation cross randomly varying between 1 and 5.6 sec ($\bar{x}$ 1.94 sec). In all, 3 fMRI runs, each 6 blocks of each condition for a total of 72 trials for each condition, with each pair repeated thrice during the experiment. For each trial, writing duration, $\bar{x}$ length of trajectory, $\bar{x}$ writing velocity, and time between items (transition) were measured	Differing kinematic characteristics for numbers and letters; prtcs wrote letters faster. Significant activations in three regions corresponding to medial SFG, left SPS, and right anterior insula. As expected, two clusters observed in frontal regions belonging to the cortical motor system and corresponding functionally to the SMA and dorsal preMCx. Digits vs. Letters contrast activations in left insula and left AG (uncorrected, did not survive threshold). Conjunction between the contrasts letters <i>vs.</i> control and numbers <i>vs.</i> control, preferential activations for letters <i>vs.</i> numbers in MFG and cingulate. Writing velocity and Interval between items had no significant effect on BOLD signal at the specified FWE cluster-wise corrected threshold. Longer movement duration → ↑ activation in a broad network composed mainly of precentral, postcentral and superior parietal regions, subcortical and cerebellar structures, and parts of the visual system (FuG and MOG) and STS, strongly lateralised on the right hemisphere	Observed differences between Letters and Digits not related to low-level kinematic features. Writing engages an extended motor-perceptual network. Only two very restricted areas discriminate between letters and numbers. Dorsal preMCx is a fundamental brain network node for handwriting
Higashiyama et al., 2015 [37]	16 healthy r-h native Japanese speakers, skillful typists (9 ♂, 7 ♀; $\bar{x}$ age 27.8±3.1 yrs, range 23-34 yrs)	fMRI 3T, T1-weighted images MP-RAGE sequences analysed voxel-wise with FWE in MNI space using SPM8 implemented in MATLAB 7.7.0	Two conditions: typing and writing. Six tasks, three for each condition, i.e., PT, RT, and MT; 6 fMRI scanning sessions during typing/writing alternation. For each session, 5 20-sec blocks of stimuli, pseudorandomly ordered 2 PT, 2 MT, and 1 RT. During MT, a recording of which hand was used to press each key was made	Behavioural results: $\bar{x}$ 278.1±7.20 keys pressed during typing PT, keys pressed by right hand <i>minus</i> by left hand $\bar{x}$ -4.75±5.09, typing accuracy 96.34%±4.83. Keys pressed during typing-MT were $\bar{x}$ 419.9±86.8, right-left hand usage difference $\bar{x}$ 5.31±42.4. No linguistic structure or repeated bigrams in the output of the typing-MT. $\bar{x}$ typing speed: 2.56±1.20 keys/sec	The brain regions known as the “writing centre” are the same for typing. Scan comparisons of typing and writing showed the left posteromedial IPS to be typing-specific. Activity in the left MFG/SFG was more rostral in the typing than in the writing task, pointing to differences in motor planning

				for typing PT and $\bar{x}$ 5.83±0.07 keys/sec during typing-MT. ↑ number and speed of keys pressed in the typing-MT <i>vs.</i> typing PT. Due to these differences, no activation associated with writing movement and key pressing in the subtracted contrasts. Typing and writing were associated by activations in left anterior SPL, the left SMG, and the posterior part of the left MFG/SFG, near Exner's area	
Bisio et al., 2016 [38]	Enrolled 44 r-h prctcs, 22 (12 ♀, 10 ♂; $\bar{x}$ age 25 ± 5.6 years) in Experiment 1, 22 (14 ♀, 8 ♂; $\bar{x}$ age 24.2 ± 6.1 years) in Experiment 2, of which 7 underwent fMRI scanning (sex and $\bar{x}$ age not specified)	fMRI 1.5T, T2*-weighted single-shot EPI sequences normalised on MNI template analysed with SPM12	Thickness, length and duration of scripts were measured for written sentences under different conditions. Experiment 1 involved writing a simple sentence × 5 on a MR-compatible tablet and repeating the same task 30 days apart (test-retest reliability). Experiment 2 involved writing on the tablet another, simpler sentence × 3 outside the MR scanner and repeating the same task inside the scanner to test whether kinematic characteristics were maintained; 7 prctcs underwent fMRI to see whether the activated brain regions were the same as those engaged in handwriting. Such prctcs were required to alternate sessions of writing with control resting conditions	Thickness, length and duration of scripts were correlated in Experiment 1, corroborating test-retest reliability. Prctcs showed ↑ thickness, length and duration in the inside condition compared to the outside in Experiment 2. Prctcs undergoing fMRI showed significant activations in fronto-cortical, parietal and cerebellar areas, peaking with writing compared to resting state at precentral and post central gyri (BA3, BA4, and BA6), comprised left SFG and left MFG, left SPL (BA7) and right cerebellum	The tablet was reliable in capturing kinematic data across time, and fairly predictable under constrained MR conditions. fMRI identified activations in brain regions purportedly associated with handwriting in healthy people
Planton et al., 2017 [4]	16 healthy r-h native French (8 ♂, 8 ♀; $\bar{x}$ age 25.3±6.0 yrs)	fMRI 3T EPI sequences normalised and realigned on MNI template and analysed through SPM12b; VOI approach	2 identical 15-min fMRI runs of drawing a presented picture, writing and oral spelling tasks presented pseudorandomly and separated by a pause. 70 trials each task (in blocks of 5 [25 sec] 5 sec; 4 sec picture presentation → 1 sec cross fixation; each block preceded by a “draw”, “write” or “spell” order). Prctcs did not look at their hands while performing. Stimuli were 70 black-and-white drawings and were required to be sketched upon draw, written upon write, and spelled-out upon spell; in the first run, prctcs wrote 35 of these and spelled-out the other 35, in the second run they swapped tasks. They used a pen to write and draw on an MR-compatible digitising tablet	No between-task differences in reaction time and production duration. Writing <i>vs.</i> drawing contrasts ↑ activations in bilateral cuneus/precuneus, MTG, and AG, right cerebellum and right CF. Drawing <i>vs.</i> writing contrasts ↑ activations in bilateral SPL, IPL, and inferior, O-T and FSG, right ventral PreMCx and left cerebellum. Conjunction between writing and drawing showed a left lateralised network involving left primary motor and SMCx, left SPL, left SMA, left superior and ventral PreMCx, right cerebellum, bilateral OL and ventral O-T Cx. Writing <i>vs.</i> spelling contrasts ↑ activation in left postcentral gyrus (BA4)-right cerebellum, left thalamus, left caudate. Spelling <i>vs.</i> writing contrasts ↑ activation in a bilateral IFG/STG network. Conjunction between writing and spelling showed common activation ($p < 0.05$, FWE) in bilateral posterior cerebellum, OL, and SMA. Smaller clusters in left middle/ventral PremCx. Writing had main effects on SPL/IPs, GMFA and VWFA at left, which were greater than with drawing or spelling. Writing and	The ventral part of the precentral gyrus and the left IPL show a preference for writing, suggesting specialisation. Writing and oral spelling overlap with traditional language areas, like left IFG (Broca's area) and STG. Writing activates additional motor and visuospatial regions not involved in oral spelling. The left FuG, which is involved in visual word recognition and the SMA are crucial for integrating linguistic content with the gestures associated with writing. Brain areas associated with writing are relatively specialised, but share some functions with other grapho-motor and language areas. Results support a hierarchical model in which regions specific to writing overlap with more general circuits used for motor control and language. Findings are relevant to understanding writing disorders (e.g., dysgraphia) and designing therapeutic interventions

				drawing>motor and visuospatial areas show shared activation (↑ in O-T and PreMCx).	
Karimpour et al., 2018 [39]	12 r-h healthy Canadian adult graduates (5 σ, 7 ♀; $\bar{x}$ age 25)	fMRI 3T T2*-weighted BOLD analysed with SPM normalised on MNI template	WT: copying in cursive three tasks (a grocery list, phone numbers and a sentence) repeated 4 × in pseudo-random order via fMRI-compatible tablet including visual feedback of hand position and augmented reality display, while fMRI scanning; data of the entire fMRI session were collected during one 9-min-10-sec-session; each task was limited to 35 sec and an initial 10 sec fixation pause. Metrics extracted: $\bar{x}$ handwriting speed (pixels/sec), $\bar{x}$ stylus IAT and stylus contact F	Task completion times: grocery list $\bar{x}$ 23.1±4.6 sec, phone number $\bar{x}$ 23.0±5.4 sec, sentence $\bar{x}$ 26.2 ±4.1 sec with no significant differences in completion times between tasks. ↑ handwriting speed for sentence compared to phone number task ($p<0.01$). ↓ IAT for sentence compared to both phone number ($p<0.01$) and grocery list tasks ($p<0.002$). No differences in stylus contact F across tasks. fMRI showed consistent brain activation patterns across all tasks, especially in left-lateralised areas such as S1 and motor Cx, bilateral SMA, PreMCx, and visual areas. Sentence writing elicited ↑ activation than copying phone numbers or grocery list tasks in language and motor control areas like IFC, AG, and VWFA	Behavioural results confirm that IAT metrics successfully discriminated performance differences across tasks. Brain activity during the tasks aligned with existing fMRI literature, showing significant activation in regions traditionally associated with handwriting, including SPL, GMFA, and VWFA. VPMc regions have a role in guiding hand movements. Variations in brain activity across the three tasks reflected differing cognitive processing demands. The fMRI-compatible tablet VFHP) is adequate to investigate neural mechanisms of handwriting and may prove useful in patients with neurological disorders and impaired handwriting
Palmis et al., 2019 [40]	25 r-h native French speakers ($\bar{x}$ age 24, range 19-37); sex not specified	fMRI 3T, T2* BOLD and T1 MR superimposition analysed through SPM12. ROI	Prts were instructed to write single words under dictation as quickly and accurately as possible within a time limit. Writing performed on an MR-compatible digitising tablet during fMRI scanning. No visual feedback aimed to separate cognitive from motor processes of handwriting. 96 words to write, 32 REG, 32 IRB, 32 IRF; prts wrote in capital letters detaching penn from one letter to another; calculated latency between unechoic voice word presentation and writing initiation; time for total writing, beginning-to-end; duration of letter writing (segment); duration between segments (interval)	IRF>IRB>REG in latency; IRB and IRF>REG stroke duration; IRF=IRB=REG for total writing time. Left IFG and FuG sensitive to orthographic irregularities during handwriting. ↑ activations in motor-related regions, including the left SPL, left SFG, and right cerebellum for irregular <i>vs.</i> regular words	Core regions of the written language network, like left IFG and FuG, are sensitive to orthographic irregularities during writing. Motor-related regions, like SFG and SPL, exhibited ↑ activation for irregular words. Findings support dynamic interactive and parallel orthographic and motor processes during handwriting. Results help understanding developmental disorders like dysgraphia and dysorthographia, which often involve both linguistic and motor impairments (authors' opinion)
Bartoň et al., 2020 [41]	20 r-h healthy volunteers (9 ♀, 11 σ; $\bar{x}$ age 23±2.4 yrs)	fMRI 1.5T BOLD, EPI sequencing T1-weighted MRI analysed through SPM12 with normalisation on the MNI template. ROI approach	Prts were scanned using fMRI while performing two tasks of 6 min each (≈130 scans each) drawing simple dots and self-paced handwriting of single letters in alphabetical order. Both tasks were completed without visual feedback. Prts, after training outside, entered supine in scanner and instructed to fix their gaze on the line at the top of the MR gantry and keep their eyes open. They were instructed to write dots and letters every 20 sec and do not count the time, keeping constantly the optomechanical pen on the touch screen connected to the computer via a fibre optic cable. They switched between tasks after 6 min, when commanded by a voice from the computer. FC was assessed between 6 ROIs	↑ in task-induced FC observed within both cortico-striatal and cortico-cortical networks. ↑ synchronisation between the VWFA and frontoparietal motor regions is mediated by the striatum. Compared to dot writing, letter writing showed ↑ FC between SPL/anterior IPS and VWFA, sensorimotor striatum, motor Cx and SMA, ↑ FC between VWFA and Exner's area/PreMCx, and the sensorimotor striatum, and ↑ FC between the sensorimotor striatum and Exner's area/PreMCx	The striatum plays a crucial role in integrating stored letter-shape representations with motor planning and execution processes during handwriting. A writing-specific cortico-striatal network consists in the VWFA, SPL/anterior IPS, striatum, preMCx/Exner's area, and primary motor and SMA. Visuomotor integration during handwriting without visual feedback is facilitated by both increased cortico-cortical and cortico-striatal FC. The striatum is important in integrating letter shape information, selecting/retrieving abstract motor programs,

					and generating concrete motor commands
Askvik et al., 2020 [42]	12 r-h healthy school-aged children (4 ♂, 8 ♀; $\bar{x}$ age 11.83±0.39 yrs); 12 r-h healthy young adults (6 ♂, 6 ♀; $\bar{x}$ age 23.58±2.02 yrs)	hd EEG, 256-channel with electrodes distributed over scalp	A software generated 15 different Pictionary words of varying difficulty, from concrete to abstract, that were proposed to prtcs who used a digital pen to write and draw directly on the touch screen, and a keyboard to typewrite the presented words; additionally they described the object with sentences, copied the sentences, and copied the drawing. Words were presented in three varying conditions each for a total of 45 trials; after instruction 1-2 sec before picture presentation, prtcs had 25 sec to write them either by hand, draw, or type. Handwriting and drawing appeared on the screen, while typing did not. First 5 sec of each trial recorded by EEG. Data analysed off-line	ERS more prominent in the θ band (4–8 Hz) for handwriting and drawing, and for typing in higher frequencies (β [12–30 Hz], and γ [30–50 Hz]). ERS started ≈500 msec in adults and ≈1000 msec in adolescents, ended first in adults and after in adolescents for handwriting and drawing, while it started after 0-500 msec for both adolescents and young adults. ERD > prominent for ↑ frequencies (β and γ) for handwriting and drawing and for lower frequencies (θ and, to a lesser extent, α [8-12 Hz]) for typing; ERD started after ≈0 msec and lasted throughout the trial in both adolescents and young adults for handwriting, while for typing, it started ≈1000 msec and lasted throughout the trial in adults, while in adolescents, it started ≈500 msec and ended after ≈1500 msec. For young adults, handwriting and drawing elicited ERS in the θ band within parietal (left, midline and right), central, occipital and frontal regions, while typing triggered ERD in the β and γ bands in central and frontal areas. For drawing, areas in the parietal and central regions were dominated by ERD in α and β range and ERS in the θ range in the parietal midline. Similar patterns, albeit less pronounced, were observed in 12-year-old children	Handwriting and drawing are associated with memory and learning processes; there is different cognitive engagement between handwriting and drawing vs. typing. Findings underscore the importance of handwriting and drawing activities in early childhood education. Sensori-motor integration and fine motor skills involved in these activities contribute to the development of neural networks essential for learning and cognitive development. There is need to preserve handwriting and drawing practices in modern educational settings to optimise learning outcomes. Handwriting and typing differ in their brain fingerprints, with drawing being nearer to handwriting
Boyratz et al., 2021 [43]	26 r-h ♀ with MDD, age range 18-50 yrs	rs-fMRI 1.5T, T1-weighted MP-RAGE sequence for ROI analysis with CONN software using MATLAB-based SPM	Patients received pre-treatment rs-fMRI and underwent HAM-D, BDI, TAS-20, HPQ, and FAB, then 50 mg/day sertraline ×8 wks and randomised to no added intervention (N=13) or to add-on NHE (50 words/day to write with left hand) (N=13) and reperfomed rs-fMRI and neuropsychological/psychometric testing	↑ FC between right posterior STG and right pallidum and ↓ FC between left posterior TFus Cx and right cerebellum in non-NHE; in the NHE group, compared to the non-NHE, ↑ FC between right ICx and right anterior ITG, ↑ FC between right SFG and left COCx; ↑ FC between right posterior STG and left superior SPL; all treatment groups improved on depression and frontal performance, but not on alexithymia, with no differences between non-NHE and NHE, with the latter showing slightly better clinical results than the former	Adding NHE to standard treatment may be associated with modest improvements in symptoms of depression, despite significant differences between NHE and non-NHE in their FC changes
Van der Weel and Van der Meer, 2024 [44]	36 r-h prtcs in their early twenties; sex not specified	hd EEG, 256-channel with electrodes distributed over scalp	Prtcs had hd 256-electrode EEG recordings at 500 Hz while being presented words to write with a digital pen or to type using their right hands; 30 trials in random order. Prtcs had allowed 25 sec	Widespread θ/α coherence between hubs and nodes in parietal left, parietal middle, parietal right and central left, central middle, central	Authors did not distinguish between males and females and did not specify age precisely. ↑ FC between the various brain regions seems to be

			after Pictionary word presentation to write or type as many times they could the presented word. First 5 sec of each trial were recorded for FC analysis	right brain regions when writing by hand, but not when typing. Concentration of 16 significant connections for handwriting compared to typing. $\uparrow$ connectivity in the θ range compared to the α range	linked to the specific sensorimotor processes that are typical in handwriting. Spatial temporal patterns from visual and proprioceptive information during handwriting movements have a beneficial impact on brain's FC patterns related to learning and remembering
--	--	--	--	---	--

4. Discussione

Questa valutazione sintetizza le prove esistenti sui meccanismi neurali della scrittura a mano e della digitazione, con l'obiettivo di evidenziare i substrati neurali sia condivisi che distinti. La scrittura a mano e la digitazione sono modi distinti di comunicazione scritta che coinvolgono diversi processi neurali e cognitivi, con implicazioni significative per l'apprendimento, la memoria e lo sviluppo del cervello. Queste differenze derivano da variazioni nel controllo motorio, nell'integrazione sensoriale e nelle esigenze cognitive di ciascuna attività. Una distinzione primaria tra scrittura a mano e digitazione risiede nella diversa attivazione delle regioni cerebrali coinvolte nel controllo motorio, nell'elaborazione sensoriale e nelle funzioni cognitive di ordine superiore. Queste differenze nel coinvolgimento neurale hanno profonde implicazioni per i processi cognitivi associati a ciascuna modalità di scrittura.

La scrittura a mano comporta il complesso coordinamento di abilità motorie, in cui ogni lettera è formata individualmente attraverso movimenti deliberati della mano. Ciò coinvolge la corteccia sensorimotoria, che elabora il feedback tattile e il controllo motorio, nonché le aree visive per il riconoscimento delle lettere. L'atto di scrivere stimola il cervello a collegare le attività motorie con i processi cognitivi, migliorando l'attività neurale nelle aree associate alla memoria e al linguaggio. Al contrario, la digitazione si basa su movimenti ripetitivi delle dita su una tastiera. Mentre attiva le aree motorie, non richiede l'intricata integrazione sensoriale-motoria richiesta dalla scrittura a mano. Le vie neurali attivate durante la scrittura a mano si sovrappongono in modo significativo con quelle coinvolte nella lettura e nello spelling, sostenendo lo sviluppo dell'alfabetizzazione. Studi che utilizzano l'IRMf hanno dimostrato che la scrittura a mano coinvolge aree quali l'area di Broca, critica per la produzione del linguaggio, nonché i lobi parietali e temporali, che supportano l'integrazione visiva e uditiva. La digitazione, per contro, attiva meno regioni associate al linguaggio e si basa più sulla memoria procedurale per il posizionamento chiave. Per i bambini, l'apprendimento della scrittura a mano è stato collegato al miglioramento del riconoscimento delle lettere e della fluidità della lettura, e ha contribuito a sviluppare le competenze di base in materia di alfabetizzazione. Il ritmo più lento della scrittura a mano consente un pensiero più riflessivo e deliberato, favorendo la creatività e l'analisi critica. La digitazione, pur essendo più rapida e adatta al brainstorming, porta spesso a un compromesso cognitivo in cui la velocità della trascrizione inibisce a pensare più profondamente. Questa differenza può spiegare perché la scrittura a mano è spesso preferita per compiti che richiedono la risoluzione di problemi o la sintesi di idee.

Mangen e Velay hanno sottolineato il concetto di "percezione aptica", definita come combinazione di percezione tattile e movimenti volontari. La percezione aptica svolge un ruolo cruciale nei movimenti esplorativi delle mani e nella manipolazione degli oggetti, rendendola altamente rilevante per il gesto grafico. Gli autori sostengono che la scrittura trascende un processo puramente mentale, richiedendo l'integrazione di dati visivi, propriocettivi (aptici e cinestetici) e tattili, sviluppati attraverso due matrici interconnesse: percettiva e grafomotoria. Quando si scrive con una penna, il cervello riceve un feedback simultaneo di motricità e sensibilità, quest'ultimo derivante dal contatto delle dita con la penna e la carta. Al contrario, i nuovi strumenti di scrittura tecnologica alterano radicalmente i

movimenti della mano, modificando di conseguenza il feedback tattile e influenzando in modo significativo sulle capacità di scrittura. La digitazione su tastiera, al contrario di un'attività motoria, si basa sulla costruzione di uno schema rappresentativo che mappa le forme dei caratteri in posizioni chiave. Tuttavia, poiché la stessa “chiave” può essere attivata da vari movimenti delle dita, questo processo meccanico spesso interrompe la corrispondenza precisa tra un singolo gesto e il prodotto finale.

Con il rapido progresso della tecnologia, la scrittura a mano viene gradualmente rimpiazzata dalla digitazione. I bambini stanno imparando sempre più a digitare su computer e smartphone prima di padroneggiare la scrittura a mano. Dal punto di vista educativo, è fondamentale indagare quando e in quale misura le differenze tra queste due modalità di scrittura diventano significative, e quali potrebbero essere le implicazioni a breve e lungo termine, sia sul piano cognitivo che sociale. I risultati del nostro studio, come illustrato nella **Figura 2**, evidenziano differenze significative tra la scrittura a mano e la digitazione. Queste differenze hanno profonde implicazioni per l'apprendimento, la creatività e la memoria. La scrittura a mano e la digitazione condividono gli stessi processi di base collegati alla lettera: la memoria fonologica ed ortografica a lungo termine, il sistema semantico, la conversione dei fonemi in grafemi e i comandi motori manuali.

Figura 2. La battaglia della scrittura: battitura vs. colpi d'inchiostro.

1. Handwriting typically involves the use of one hand, while typing, in contrast, requires the use of both hands.
2. Handwriting limits attention to a specific space, whereas typing involves the interaction with both the keyboard and the screen.
3. Handwriting and typing activate different brain regions involved in motor control, sensory processing, and higher-order cognitive functions.
4. Handwriting, with its emphasis on sensorimotor coordination and tactile feedback, provides a more intimate engagement with the writing surface than the discrete keystrokes of typing.
5. Distinct learning processes are engaged during handwriting and typing, leading to unique learning outcomes.



1. La scrittura a mano tipicamente coinvolge l'uso di una sola mano, mentre la digitazione, al contrario, richiede l'uso di entrambe le mani.
2. La scrittura a mano limita l'attenzione ad uno spazio specifico, mentre la digitazione prevede l'interazione sia della tastiera che dello schermo.
3. La scrittura a mano e la digitazione attivano diverse regioni del cervello, coinvolte nel controllo motorio, nell'elaborazione sensoriale e nelle funzioni cognitive di ordine superiore.
4. La scrittura a mano, con la sua enfasi sulla coordinazione senso-motoria e il feedback tattile, fornisce un più intimo coinvolgimento con la superficie scritta rispetto alle distinte sequenze di tasti della digitazione.
5. Durante la scrittura a mano e la digitazione vengono coinvolti processi di apprendimento distinti, che portano a risultati di apprendimento unici.

Per quanto riguarda le differenze tra queste due modalità di scrittura, si possono trarre diverse distinzioni. In primo luogo, dal punto di vista dello strumento utilizzato, la scrittura a mano con penna e carta coinvolge principalmente una mano, impegnando una rete neurale prevalentemente lateralizzata a sinistra. Dato il ruolo dell'emisfero sinistro nell'elaborazione del linguaggio, si può ritenere che la scrittura a mano induca una maggiore attivazione neurale in relazione alla produzione di lettere. La digitazione, d'altra parte, richiede l'uso di entrambe le mani e può quindi contare su una maggiore attività neurale interemisferica.

Un'altra differenza fondamentale risiede nelle esigenze spaziali e temporali dei due compiti. La scrittura a mano richiede un'attenzione focalizzata su uno spazio limitato, che comprenda una piccola porzione della carta e della punta della penna, e richiede più tempo, poiché ogni lettera è formata da un movimento completo. La digitazione, d'altra parte, comporta l'attenzione a due spazi distinti: la tastiera per le azioni motorie e lo schermo per il feedback visivo. Richiede anche meno tempo, poiché le lettere digitate appaiono quasi istantaneamente. Tuttavia, il ritmo più lento della scrittura a mano può facilitare la memorizzazione di lettere e parole, portando a una maggiore conservazione. La maggiore attenzione alla scrittura a mano contribuisce anche ad un più alto livello di intensità dell'elaborazione cognitiva.

In termini di esperienza senso-motoria, la scrittura a mano, rispetto alla digitazione, permette allo scrittore di focalizzare l'attenzione su un singolo punto nello spazio e nel tempo. Questo perché il gesto grafico si dispiega in modo conciso all'interno di uno spazio molto limitato, ristretto alla punta della penna e al tracciato dell'inchiostro sulla carta. Inoltre, la scrittura a mano stabilisce un rapporto diretto ed esclusivo tra l'azione motoria dello scrittore e la risultante produzione grafica, che coinvolge un'esperienza corporea e sensoriale.

Per quanto riguarda i programmi motori, il processo di apprendimento differisce notevolmente tra i due. Come accennato in precedenza, la scrittura a mano richiede l'esecuzione e il controllo di un movimento che definisce completamente la forma di una lettera. Una volta appresa, c'è un'unica correlazione tra la lettera e il movimento che la produce, che richiede un livello più profondo di elaborazione attenzionale. La digitazione, d'altra parte, comporta anche l'apprendimento spaziale, in quanto gli individui devono costruire una mappa mentale della tastiera per individuare e premere con precisione ogni tasto. Diversamente dalla scrittura a mano, il movimento del dito richiesto per raggiungere e premere un tasto è più semplice e intuitivo, senza alcun componente grafo-motorio. Non ha alcun rapporto diretto con la forma della lettera.

L'assenza di elaborazione della forma nella digitazione ostacola lo sviluppo del sistema senso-motorio. Si tratta di un'abilità significativa: l'eccessiva digitazione al computer, rispetto alla scrittura a mano, comporta una ridotta precisione nei movimenti della mano e del braccio e, nel tempo, un declino di altre capacità motorie.

Sulla base delle esperienze sensoriali (visive e tattili) e motorie associate alla scrittura a mano, le tracce di memoria si formano e parzialmente riattivano durante il recupero. Questa prospettiva si applica anche al riconoscimento delle lettere: come abbiamo visto nel capitolo precedente, l'accoppiamento dell'azione motoria e del feedback sensoriale durante la scrittura a mano - più che digitando - facilita lo sviluppo di questa abilità. Si suppone quindi, da questo punto di vista, che una sola modalità sensoriale sia sufficiente per attivare l'intera distribuzione della rete coinvolta quando la lettera è stata inizialmente memorizzata. Infatti, nei bambini di quattro anni che non possono nominare o scrivere tutte le lettere dell'alfabeto, la formazione alla scrittura a mano contribuisce alla specializzazione della rete neurale percetto-motoria, consentendo loro di identificare le lettere. In questo senso, si può ipotizzare che cambiare le condizioni motorie utilizzando un metodo basato sulla digitazione mentre i bambini stanno imparando a scrivere influenzerebbe le prestazioni successive nella memorizzazione e nell'elaborazione delle lettere.

4.1. Controllo motorio e coinvolgimento cognitivo

La scrittura a mano è un compito estremamente complesso che comporta l'integrazione di capacità motorie fini, elaborazione visiva e funzioni cognitive legate alla memoria e all'apprendimento. Coinvolge le regioni del cervello responsabili della pianificazione motoria, quali l'area motoria supplementare (SMA) e la corteccia parietale posteriore (PPC), nonché le aree coinvolte nell'elaborazione visiva e linguistica, compresa l'area visiva della forma di parola (VWFA) e la corteccia motoria primaria (M1). La coordinazione di queste diverse regioni del cervello richiede uno sforzo cognitivo significativo, che, è stato dimostrato, facilita un coinvolgimento più profondo con il materiale e migliora la conservazione della memoria. Ad esempio, la ricerca di Longcamp et al. e Siebner et al. dimostra che la scrittura a mano attiva una rete più ampia di aree motorie e di elaborazione del linguaggio rispetto alla digitazione, suggerendo che il processo di scrittura a mano è intrinsecamente più impegnativo dal punto di vista cognitivo. La scrittura a mano, attraverso il suo requisito di esecuzione motoria fine e consapevolezza spaziale, sembra promuovere connessioni più forti tra funzioni visive, motorie e cognitive, rafforzando così la memoria e l'apprendimento. Tremblay et al. sostiene ulteriormente questo, indicando che la scrittura a mano migliora la capacità di riconoscere e ricordare le informazioni a causa della sua natura cognitiva più impegnativa.

Al contrario, la digitazione coinvolge principalmente la coordinazione motoria delle dita, un compito che è meno impegnativo dal punto di vista cognitivo rispetto al controllo motorio richiesto per la scrittura a mano. Higashiyama et al. hanno utilizzato la fMRI per confrontare i modelli di attivazione neurale della digitazione e della scrittura a mano e hanno scoperto che la digitazione attiva le aree motorie coinvolte in compiti automatici e ripetitivi, ma mostra un minore coinvolgimento nelle aree responsabili della pianificazione motoria complessa. Di conseguenza, la digitazione può favorire un impegno più passivo con il materiale, con una minore integrazione tra le funzioni motorie e cognitive.

Alcuni autori hanno sostenuto che il riconoscimento delle singole lettere è aumentato quando si impara a scrivere a mano piuttosto che su una tastiera, poiché le attività motorie fini inserite nella scrittura a mano contribuiscono al riconoscimento delle lettere stesse. Gli studi di imaging fMRI hanno chiarito il meccanismo alla base di queste differenze. Longcamp e colleghi hanno dimostrato che le cortecce motorie e premotorie sono attivate in modo significativamente più intenso durante la produzione di lettere scritte a mano rispetto alle lettere stampate. Risultati analoghi sono stati ottenuti da Wamain et al. studiando i potenziali correlati agli eventi (onde cerebrali che si formano automaticamente in risposta a stimoli esterni) a livello della corteccia occipitale (sede della percezione visiva) in un compito che riflette la "familiarità motoria" con le lettere osservate. Questi risultati indicano anche che le informazioni motorie contenute nelle lettere scritte a mano sono elaborate dal cervello e che questa elaborazione dipende dallo stato di attivazione della corteccia motoria corrispondente all'arto utilizzato nella scrittura. Ciò suggerisce un principio più generale secondo il quale l'osservazione e l'esecuzione di un'azione ne facilitano la sua percezione visiva.

4.2. Elaborazione Cognitiva: Memoria e risultati di apprendimento

Le implicazioni cognitive di questi modelli differenziali di attivazione sono particolarmente rilevanti per la memoria e l'apprendimento. Diversi studi suggeriscono che la scrittura a mano favorisce una maggiore conservazione della memoria rispetto alla digitazione, un fenomeno probabilmente legato al più ampio coinvolgimento neurale richiesto dalla scrittura a mano. Come Watanabe et al. osservano, la scrittura a mano attiva regioni del cervello associate alla memoria episodica e ai processi di codifica più profondi. La natura faticosa della scrittura a mano, che richiede la formazione di ogni lettera e

l'integrazione dei processi visivi, motori e cognitivi, aumenta la capacità del cervello di conservare le informazioni nel lungo periodo.

Statisticamente, la maggior parte degli studi sul rapporto tra scrittura a mano e memoria (compresi quelli condotti in Giappone, Norvegia e Stati Uniti) mostrano che le persone ricordano meglio le informazioni quando sono scritte a mano rispetto a quando sono digitate. Uno studio fondamentale di Longcamp et al. ha rilevato che gli individui che scrivevano i caratteri a mano dimostravano una migliore conservazione della memoria e un ricordo più rapido rispetto a quelli che digitavano gli stessi caratteri. Questo vantaggio è stato attribuito al maggiore carico cognitivo associato alla scrittura a mano, che ha promosso una codifica più efficace delle informazioni. Allo stesso modo, Barton et al. osservano che la scrittura a mano coinvolge l'area visiva della forma della parola (VWFA) in misura maggiore rispetto alla digitazione, suggerendo inoltre che la scrittura a mano porta ad un trattamento più profondo delle informazioni scritte.

Mentre la digitazione è innegabilmente più veloce e più efficiente, sembra attivare meno circuiti neurali legati alla memoria e all'apprendimento. La natura automatica della digitazione, richiedendo meno sforzo cognitivo, può spiegare perché la digitazione è spesso meno efficace per le attività che richiedono un'elaborazione dettagliata e una codifica della memoria. Barton et al. e Tremblay et al. suggeriscono che l'automaticità della digitazione riduce il livello di coinvolgimento neurale necessario per un'elaborazione cognitiva più profonda, portando potenzialmente a una minore conservazione della memoria rispetto alla scrittura a mano.

Dietro l'elusione della scrittura a mano, può esserci una motivazione più profonda: i giovani possono temere il giudizio dei loro coetanei o avere paura di distinguersi. In realtà, ciò che è evidente è la difficoltà che i giovani hanno di essere se stessi, una difficoltà che porta ad un desiderio di conformità a tutti i costi, che diventa poi anche un modo di scrivere. Il solo uso della scrittura digitale potrebbe quindi essere una rinuncia all'autenticità, una limitazione dell'espressività, con conseguenze quali un assottigliamento della personalità e la perdita di un patrimonio personale e unico. Mentre è necessario che i giovani imparino a rendere la loro scrittura più leggibile, gli esperti avvertono che è essenziale considerare la scrittura come la comunicazione specifica dell'individuo, un linguaggio il cui alfabeto è costituito, soprattutto nell'adolescenza, anche dal solco lasciato dalla penna, dalla disposizione delle parole nello spazio, per vedere come la persona si riconosce e si rappresenta attraverso il proprio segno. Da questo punto di vista, saper scrivere in corsivo sembra un traguardo e non un punto di partenza; un traguardo del soggetto "liberato" che si esprime in tutte le sue forme d'intelligenza, nelle sue emozioni, con le sue paure, perché la scrittura racconta la storia dello sviluppo del singolo soggetto in formazione.

4.3. Connettività funzionale e integrazione neurale

Uno degli aspetti più intriganti della scrittura a mano rispetto alla digitazione risiede nelle differenze nella connettività funzionale tra le regioni del cervello. La connettività funzionale si riferisce all'attivazione coordinata di diverse regioni del cervello durante un compito specifico. Gli studi suggeriscono che la scrittura a mano promuove una connettività funzionale più forte e diffusa in varie regioni del cervello, in particolare quelle coinvolte nel controllo motorio, nell'elaborazione sensoriale e nelle funzioni cognitive di ordine superiore. Questa maggiore connettività può spiegare perché la scrittura a mano è associata con migliori risultati di apprendimento e memoria. Una ricerca di Van der Weel et al. e Askvik et al. dimostra che le attività di scrittura a mano portano ad un aumento della sincronizzazione dei banda theta, che è legata all'elaborazione cognitiva e al consolidamento della memoria. Il più ampio coinvolgimento neurale durante le attività di scrittura a mano sembra favorire una più efficace integrazione delle informazioni sensoriali, motorie e cognitive, migliorando la codifica e il

recupero della memoria. Al contrario, la digitazione tende ad attivare meno regioni e mostra una connettività più limitata tra le aree motorie e cognitive, portando potenzialmente a un consolidamento della memoria meno robusto.

Il tracciamento manuale delle lettere corsive richiede un modello motorio più complesso, in quanto la forma di ogni carattere deve essere continuamente modellata per collegarla ai caratteri successivi. Questa sfida non si presenta quando si utilizzano dispositivi elettronici come i touch screen, che si basano su gesti più semplici e ripetitivi.

4.4. Implicazioni educative

Le distinzioni neurali e cognitive tra scrittura a mano e digitazione hanno importanti implicazioni per le pratiche educative, in particolare in termini di come gli studenti interagiscono con il materiale scritto. Dato il maggiore coinvolgimento cognitivo e la conservazione della memoria associati alla scrittura a mano, è fondamentale riconsiderare il suo ruolo nel processo di apprendimento, soprattutto in un'era in cui i dispositivi digitali dominano gli ambienti educativi. La ricerca suggerisce che l'atto della scrittura a mano può essere particolarmente utile per compiti che richiedono un pensiero critico, analisi e conservazione a lungo termine delle informazioni, settori in cui la digitazione potrebbe non offrire gli stessi vantaggi. Come suggerito da Askvik et al. e, van der Weer e van der Meer, il coinvolgimento neurale più profondo promosso dalla scrittura a mano può contribuire a migliorare i risultati dell'apprendimento, in particolare per le attività che richiedono un complesso processo cognitivo. Van der Weer e Van der Meer hanno esaminato le scansioni cerebrali di 36 giovani adulti iscritti all'università che svolgevano compiti di scrittura a mano. Gli autori hanno osservato che l'intero cervello era attivo durante la scrittura a mano, mentre aree molto più piccole erano attive durante la digitazione. Inoltre, lo studio ha riportato che parti differenti del cervello attivate durante la scrittura a mano comunicano attraverso le onde cerebrali associate all'apprendimento. Un'importante ricerca ha messo in luce il ruolo delle oscillazioni alfa e teta nell'apprendimento e nella memoria, e van der Weer e Van der Meer hanno rilevato che queste oscillazioni sono attive durante la scrittura a mano ma non durante la scrittura digitale. Alla luce di queste prove, gli educatori e i politici potrebbero considerare la possibilità di dare priorità all'insegnamento della scrittura a mano nei programmi scolastici, anche se le tecnologie digitali continuano a svolgere un ruolo crescente nell'istruzione.

Mangen e Velay hanno sottolineato l'importanza di porre l'accento sulle componenti percettive e sensoriali della lettura e della scrittura, nonché sul loro ruolo nei processi di apprendimento. Le loro scoperte suggeriscono che i gesti coinvolti nella scrittura a mano, a differenza della scrittura digitale, contribuiscono alla rappresentazione e alla memorizzazione dei caratteri, facilitando il riconoscimento visivo. Poiché il riconoscimento del grafema è un prerequisito fondamentale per l'acquisizione della lettura, è implicita una stretta relazione tra scrittura a mano e lettura. La scrittura e la lettura sono competenze indissolubilmente legate e interdipendenti, in quanto derivano dai processi mentali di codifica e decodifica dell'informazione. I bambini che non hanno imparato a scrivere bene possono avere difficoltà nella lettura, nel comprendere il significato generale di un testo, nel capire il contesto delle parole e delle frasi e nel padroneggiare l'ortografia. Problemi di scrittura o mancanza di controllo automatico possono ostacolare il progresso dei bambini, influire sulle loro capacità di prendere appunti e provocare problemi di concentrazione.

Graham et al. hanno dimostrato una forte correlazione tra la padronanza della scrittura a mano e la qualità dei testi scritti. Secondo questi ricercatori, l'insegnamento della scrittura a mano è associato ad una maggiore fluidità della comunicazione e ad una migliore qualità dell'output scritto. Una volta automatizzati i movimenti motori, gli studenti sono in grado di concentrarsi meglio sulla pianificazione

e l'organizzazione del pensiero necessari per una scrittura efficace. Al contrario, una scrittura povera è spesso associata a difficoltà di ortografia e a prestazioni inferiori nelle attività scritte, sia in termini di lunghezza che di contenuto. Graham et al. hanno inoltre osservato che la scrittura corsiva promuove lo sviluppo dell'autocontrollo ed è particolarmente efficace nel prevenire i capovolgimenti di lettere, un problema comune nei disturbi specifici dell'apprendimento. Infatti, quando si scrive liberamente a mano, soprattutto in corsivo, non solo si deve pianificare ed eseguire l'azione con maggiore precisione, ma anche la produzione risultante è altamente variabile. Questa variabilità intrinseca della scrittura serve da strumento di apprendimento. La produzione di una lettera imperfetta può aiutare i bambini a imparare a decifrare la variabilità di ogni lettera, riconoscendo ogni simbolo nelle sue innumerevoli forme. Questo è più efficace per la rappresentazione mentale della lettera che vedere ripetutamente lo stesso identico simbolo.

5. Conclusioni

La scrittura è un fenomeno complesso che richiede competenze diverse: percepire la penna e la carta, muovere lo strumento di scrittura e dirigere il movimento attraverso il pensiero. Usare una penna significa prestare attenzione ad aspetti motori come disegnare lettere in modo leggibile, controllare la pressione della punta sulla carta, seguire le linee e gli spazi sulla pagina e coordinare pensiero, azione e visione. Questa integrazione multisensoriale è alla base delle capacità di memoria. Inoltre, la scrittura a mano coinvolge una vasta gamma di materiali e supporti, tra cui penne, matite o gessetti su una lavagna, che offrono esperienze diverse e creano nuove attivazioni e abilità neurali.

Nonostante la condivisione di obiettivi e processi centrali simili, la scrittura a mano e la digitazione differiscono significativamente in termini di strumento utilizzato, di dimensioni spazio-temporali, di programma motore e di sviluppo della motricità fine. Rispetto alla scrittura a mano, che richiede più tempo e attenzione per l'apprendimento, la digitazione può essere considerata più semplice e veloce, in quanto consente di produrre un prodotto più facilmente leggibile ed omogeneo in meno tempo. Tuttavia, l'attenzione focalizzata e un tempo di elaborazione più lungo migliorano la conservazione della memoria e, una volta ottenuto il controllo automatico del gesto grafico, è necessario uno sforzo cognitivo minimo. Inoltre, i movimenti specifici memorizzati durante l'apprendimento della scrittura contribuiscono al riconoscimento visivo di forme grafiche e lettere, e secondariamente migliorano anche la capacità di lettura. In effetti, poiché la capacità di riconoscere le lettere è ampiamente riconosciuta nella letteratura come la prima fase della lettura, migliorarla attraverso la scrittura potrebbe influenzare efficacemente il modo in cui i bambini leggono.

Il confronto tra scrittura a mano e digitazione rivela importanti differenze nei loro impatti neurali e cognitivi. La scrittura a mano attiva una rete più ampia di regioni cerebrali coinvolte nell'elaborazione motoria, sensoriale e cognitiva, che contribuisce a un apprendimento più profondo, a una maggiore conservazione della memoria e a un coinvolgimento più efficace con il materiale scritto. La digitazione, pur essendo più efficiente e automatizzata, coinvolge meno circuiti neurali, con il risultato di un coinvolgimento cognitivo più passivo. Questi risultati suggeriscono che, nonostante i vantaggi della digitazione in termini di velocità e comodità, la scrittura a mano rimane uno strumento importante per l'apprendimento e la memorizzazione, soprattutto nei contesti educativi.

Possiamo considerare la scrittura a mano e la digitazione come modalità distinte ma correlate di comunicazione scritta, ciascuna delle quali coinvolge circuiti neurali sovrapposti ma specializzati. Le esigenze uniche della scrittura a mano rispetto alla digitazione determinano lo sviluppo cognitivo e l'attività cerebrale, radicati nella nostra storia evolutiva e nelle attuali abitudini tecnologiche. Le prove neuroscientifiche evidenziano i vantaggi cognitivi della scrittura a mano negli ambienti di

apprendimento, in particolare per gli studenti più giovani. Mentre la digitazione offre efficienza e accessibilità, l'impegno unico della scrittura a mano con il cervello sottolinea il suo valore duraturo in un mondo sempre più digitale. Un approccio equilibrato, che tenga conto sia della scrittura a mano che della digitazione, può massimizzare i benefici di ciascuna. Promuovendo la scrittura a mano, possiamo preservare una preziosa abilità e al tempo stesso sfruttare le opportunità offerte dalla tecnologia digitale. Il vecchio e il nuovo non sono reciprocamente esclusivi e possono coesistere. La chiave è trovare un equilibrio che ci permetta di abbracciare sia i metodi tradizionali che quelli digitali della scrittura.

Le ricerche future dovrebbero continuare ad esplorare i meccanismi neurali alla base della scrittura a mano e della digitazione, con particolare attenzione al modo in cui queste differenze possono influenzare i risultati dell'apprendimento nei diversi gruppi di età, culture e contesti. Le possibili tematiche di ricerca comprendono l'esame del carico cognitivo della scrittura a mano rispetto alla digitazione in diverse fasce d'età, gli effetti a lungo termine dell'affidarsi principalmente alla digitazione e come le differenze individuali, quali lo stile di scrittura a mano o la capacità di digitare, influenzino l'output cognitivo. Man mano che le tecnologie digitali continuano ad evolversi, è fondamentale non perdere di vista i benefici cognitivi associati alla scrittura a mano, in particolare nell'ambito dell'educazione e del consolidamento della memoria.

È importante approfondire la nostra comprensione di come i vantaggi della scrittura a mano possano essere integrati con le tecnologie digitali per creare metodi ibridi che combinino l'impegno cognitivo della scrittura a mano con l'efficienza della digitazione. Questo approccio potrebbe ottimizzare i risultati dell'apprendimento e migliorare le pratiche di scrittura nei contesti moderni.