

# L'integrazione somatosensoriale e sensomotoria tra i due emisferi cerebrali

Luigi Tamè

*Department of Psychological Sciences, Birkbeck, University of London, London, United Kingdom*

(Traduzione a cura del Centro Studi di Riabilitazione Neurocognitiva)

Parole chiave: tatto, parti del corpo, spazio, integrazione bilaterale, senso-motorio, visione

*In press*

## **Introduzione**

La coordinazione tra i due emisferi è fondamentale per i processi cognitivi e gioca un ruolo chiave nella percezione e nel controllo del nostro corpo.

Comprendere come i due emisferi cerebrali interagiscono per creare una percezione coerente del corpo e per determinare un comportamento motorio coordinato è una delle maggiori sfide delle neuroscienze cognitive.

L'espansione della conoscenza in questo campo permette di aprire nuovi approcci alla riabilitazione dell'intera popolazione di pazienti con danni cerebrali che hanno subito lesioni centrali o periferiche del sistema nervoso e hanno sperimentato deficit senso-motori che limitano la loro normale interazione con l'ambiente.

Queste patologie sono estremamente comuni e molto debilitanti per la vita della persona, arrivando a minare l'indipendenza e l'autonomia e costituiscono un pesante fardello per il sistema sanitario.

Molti di questi pazienti soffrono di un danno cerebrale lateralizzato. Quindi, la conoscenza dei meccanismi sottostanti la comunicazione senso-motoria interemisferica è importante perché può facilitare l'utilizzo di informazioni senso-motorie presenti nell'emisfero sano per favorire il recupero delle funzioni senso-motorie compromesse nel lato deficitario del corpo.

In questo articolo descriverò alcuni studi che ho presentato a novembre 2017 al Convegno Internazionale di Riabilitazione Neurocognitiva a Santorso (VI).

Comincerò descrivendo alcuni recenti studi che dimostrano come stimoli tattili su entrambi i lati del corpo sono integrati dai due emisferi, così come i principali fattori che influenzano la suddetta integrazione - ad esempio, la relazione spaziale e temporale tra gli stimoli così come il tipo di impegno cognitivo richiesto da un compito.

Successivamente, fornirò alcune evidenze neuropsicologiche riguardo all'ambito tattile che penso siano significative per capire meglio i meccanismi sottostanti all'integrazione inter-emisferica dei segnali sensori-motori.

Infine, discuterò alcuni studi - condotti su soggetti sani - inerenti l'integrazione sensori (i.e., tattile)-motoria tra i due lati del corpo con l'intento di fornire nuove conoscenze che possano risultare potenzialmente utili per la riabilitazione neurocognitiva.

### **Integrazione bilaterale di stimoli tattili tra i due lati del corpo attraverso lo spazio e il tempo**

Gli studi sulla comunicazione interemisferica nascono dagli interessi, in parte filosofici e in parte medici, per la spiegazione dell'unitarietà della percezione (Russel IS. e coll., 1979). L'interesse per questi argomenti si può far risalire agli studi pionieristici di Roger Sperry (premio Nobel, 1981) e colleghi (Stamm JS. e Sperry RW., 1957; Sperry RW., 1961; 1966) su pazienti con cervello diviso "split-brain". Questi studi hanno rivoluzionato la concezione dell'importanza funzionale della comunicazione interemisferica, attraverso il Corpo Calloso (CC), ai fini dell'integrazione dell'elaborazione dell'informazione tra i due emisferi e il ruolo di ciascun emisfero nell'esperienza cosciente e nel movimento volontario (Lepore F. e coll., 1986). Questi pazienti erano stati sottoposti a callosotomia parziale (Gazzaniga MS., 2005), una procedura chirurgica pensata per il trattamento dell'epilessia con lo scopo di prevenire la diffusione dell'attività epilettica da un emisfero all'altro (Van Wagenen WP., 1940). Tuttavia, nonostante l'efficacia di questa procedura sulla diminuzione degli episodi patologici convulsivi, vennero riscontrate delle anomalie nel comportamento dei pazienti. In particolare, la ricerca evidenziò presto come questi pazienti fossero in grado di eseguire compiti con uno solo degli emisferi, ma non con l'altro. Infatti, da ricerche successive è emerso che ciascun emisfero era dominante per alcune funzioni mentre l'altro lo era per altre (Gazzaniga MS., 2005). Questi studi clinici hanno fornito fondamentali informazioni su come questi due organi (i.e., gli emisferi cerebrali), in circostanze diverse, possono lavorare insieme ma anche in maniera indipendente (Gazzaniga MS., 2000).

La mia ricerca ha fornito evidenze su come i due emisferi possono collaborare per integrare stimoli sensoriali (tattili) applicati alle mani (Tamè L. e coll., 2016). A questo proposito, i miei colleghi ed io recentemente abbiamo sviluppato un modello di doppia stimolazione tattile simultanea (DSS;

Tamè L. e coll., 2011, 2013). Abbiamo chiesto ai partecipanti di rilevare stimoli tattili su un dito bersaglio pre-definito stimolato da solo o in concomitanza con un altro dito, sulla stessa mano o sulla mano opposta. I risultati hanno mostrato interferenza tra gli stimoli presentati simultaneamente, sia che questi fossero applicati all'interno della stessa mano, sia che fossero applicati alla mano controlaterale. Cosa ancora più interessante, l'interferenza era maggiormente dipendente dall'identità della parte del corpo stimolata (ad esempio quale dito era toccato) rispetto al lato del corpo (quale emilato del corpo era toccato). L'interferenza era paragonabile quando la stimolazione distraente era sul dito non omologo della stessa mano, e quando era su un dito non omologo della mano opposta rispetto al bersaglio. Quando, invece, lo stimolo distraente era applicato su un dito omologo della mano opposta, la quantità di interferenza era considerevolmente inferiore. Pertanto, a seconda della zona stimolata nei due lati del corpo, l'informazione viene elaborata in modo diverso e, per le parti omologhe, è processata come se provenisse dallo stesso lato del corpo.

Inoltre, altri studi hanno dimostrato che anche il tipo di compito richiesto può modulare la percezione tattile e l'elaborazione dell'informazione, così come le aree cerebrali coinvolte (Romo R. e coll., 2012; Pritchett LM. e coll., 2012; Tamè L. e Holmes NP., 2016). In particolare, l'interazione dito-specifica per stimoli tattili sui due lati del corpo avviene solamente quando i compiti tattili sono particolarmente complessi (come ad esempio, discriminazione tattile in un contesto go-no-go, localizzazione e discriminazione tattile) (Dempsey-Jones HE. e coll., 2015, Tamè L. e coll., 2016), ma non quando devono essere eseguiti compiti tattili semplici (ad esempio compiti di detezione tattile in scelta forzata a due intervalli; e.g., Tamè L. e coll., 2014).

In seguito, utilizzando tecniche di neuroimaging (risonanza magnetica funzionale: fMRI) abbiamo definito la base neurale di questi fenomeni e il loro profilo temporale (magnetoencefalografia: MEG). Abbiamo quindi dimostrato la presenza di diverse vie di comunicazione tra i due emisferi in funzione della parte del corpo stimolata (Tamè L. e coll., 2012) e del tempo che intercorre tra gli stimoli (Tamè L. e coll., 2015). In particolare, abbiamo mostrato come entrambe le aree corticali somatosensoriali - primaria (SI) e secondaria (SII) - possano integrare segnali ipsilaterali e controlaterali che originano da entrambe le mani. Nonostante la prevalente risposta controlaterale dell'area SI, il nostro approccio si è dimostrato sufficientemente sensibile da rivelare cambiamenti nell'attività delle aree corticali somatosensoriali a seguito di stimolazioni tattili bilaterali.

Al fine di superare la limitata risoluzione temporale della fMRI, in uno studio successivo i miei colleghi ed io abbiamo utilizzato la MEG per determinare come l'integrazione di informazioni tattili ipsilaterali o controlaterali in SI avvenga negli stadi precoci o tardivi dell'elaborazione tattile (Tamè L. e coll., 2015). I risultati hanno mostrato che quando il primo e il secondo stimolo erano su mani differenti, la risposta neurale era vincolata somatotopicamente, così come era minore per la

stimolazione di dita omologhe piuttosto che di dita non omologhe. È importante notare che la risposta neurale emergeva con un piccolo ritardo (25 ms) in SI tra gli stimoli tattili. Poiché la finestra temporale di integrazione è breve in SI (Maugiere F. e coll., 1997) e lunga in SII (Wühle A. e coll., 2011), riteniamo che l'interazione selettiva sia maggiormente compatibile con interazioni che avvengono in SI, piuttosto che con modulazioni top-down da vie di elaborazione di livello superiore. Questo profilo temporale del pattern di risposta in SI a seguito di stimolazioni bilaterali ha rivelato come, diversamente da quanto sostenuto da contributi precedenti (Jung P. e coll., 2012; Chung YG. e coll., 2014), la risposta a stimoli tattili bilaterali non può essere ascrivibile solo a processi di elaborazione di alto livello, come quelli che avvengono in SII. Questo risultato è compatibile con l'idea che gli input somatosensoriali provenienti dalla parte opposta del corpo possono interagire già a stadi precoci dell'elaborazione tattile, verosimilmente attraverso vie trans-callosali che connettono le corteccie somatosensoriali primarie (SI) dei due emisferi.

Complessivamente, queste evidenze mettono in discussione l'attuale convinzione che SI supporti le rappresentazioni tattili unilaterali, mentre strutture superiori a SI, in particolare SII, supportino rappresentazioni tattili bilaterali. Pertanto, i nostri studi contrastano l'idea che SI sia solamente controlaterale suggerendo una più stretta interazione tra i lati del corpo negli stadi di elaborazione precoci, come in SI, con una particolare rilevanza per le mani (Tame et al., 2016).

### **Alcune evidenze neuropsicologiche**

La comunicazione sensoriale interemisferica è stata studiata anche in pazienti con danni cerebrali, a partire dagli anni '40. Esempi chiari di interazione bilaterale nell'elaborazione di informazioni tattili sono i casi di estinzione tattile, in cui i pazienti sono in grado di percepire uno stimolo singolo sulla parte del corpo ipsilaterale o controlaterale alla lesione, ma non sono in grado di riportare la presenza di uno stimolo presentato nel lato controlesionale quando questo è accompagnato ad uno stimolo concorrente sul lato ipsilesionale (Bender MB., 1945).

Altri esempi neuropsicologici di interazione tattile bilaterale sono emersi come fenomeni di mislocalizzazione o di duplicazione che avvengono su entrambi i lati del corpo quando in realtà lo stimolo è presente su una sola parte del corpo. La mislocalizzazione di sensazioni tattili in diverse parti del corpo è definita "allochiria", mentre la duplicazione è definita "sinchiria". Esempi di allochiria sono stati descritti in pazienti che hanno subito l'amputazione di un arto e in pazienti con danni cerebrali con emiparesi e perdita di sensibilità. Questi pazienti possono dire di percepire stimoli tattili controlaterali all'arto fantasma (Ramachandran VS. e coll., 1995) o alla mano resa anestetizzata dall'ictus (Sathian K., 2000).

Un caso suggestivo di sinchiria tattile – un fenomeno più raro dell’allochiria – è stato riportato da Medina e Rapp (2008). Essi hanno descritto un individuo con un danno fronto-parietale sinistro che percepiva sensazioni tattili bilaterali a seguito di stimoli unilaterali (Medina J. e Rapp B., 2008). Questi autori hanno attribuito questa sensazione fantasma ad una normale interazione interemisferica, combinata con un deficit dei meccanismi inibitori che normalmente impediscono la percezione bilaterale. Questa intrigante interpretazione sostiene l’ipotesi che la stimolazione unilaterale possa, in effetti, produrre segnali bilaterali, di cui la componente ipsilaterale è inibita in condizioni di normalità.

Altre condizioni in cui emerge il riferimento tattile ad altre parti del corpo sono date da pazienti che mostrano movimenti a specchio tra parti del corpo omologhe. Per esempio, Farmer, Ingram e Stephens (1990) hanno studiato un paziente che soffriva della sindrome di Klippel-Feil, un’anomalia scheletrica che è tipicamente associata a movimenti a specchio dei muscoli delle mani (Bauman G., 1932), in cui l’attivazione volontaria di un muscolo è seguita da un identico movimento involontario nell’omologo muscolo della mano opposta. E’ interessante notare che gli autori hanno individuato che una stimolazione elettrica unilaterale del dito indice produce una risposta eccitatoria nella sede stimolata così come una risposta eccitatoria bilaterale quasi uguale per ampiezza e latenza, mentre nei soggetti sani questo tipo di risposta era presente solo nel lato stimolato (Farmer Sf. e coll., 1990).

### **Integrazione senso-motoria tra i due lati del corpo in individui sani**

Nella vita di tutti i giorni, la stimolazione tattile è comunemente accompagnata o causata dall’azione. I sistemi sensitivo e motorio sono intimamente legati, sia dal punto di vista anatomico, che funzionale, attraverso un continuo e reciproco scambio di informazioni (Swinnen SP. e Wenderoth N., 2004). A tale riguardo, usando tecniche di neuro-modulazione (transcranial magnetic stimulation: TMS), i miei colleghi ed io abbiamo trovato che l’attività nelle corteccie somatosensoriali a seguito di stimolazioni tattili ripetute (ad esempio doppie) elicitano anche attivazioni dito-specifiche nella corteccia motoria primaria, e questa modulazione varia in funzione delle relazioni temporali e spaziali tra gli stimoli afferenti (tattili) (Tamè L. e coll., 2015a). In questo studio, due stimoli elettro-cutanei consecutivi (separati da 30 o 125 ms) erano diretti sulle stesse oppure differenti dita della mano sinistra (ad esempio, il dito indice era stimolato due volte o il medio era stimolato prima del dito indice). L’eccitabilità corticospinale era modulata in modo diverso dalla stimolazione tattile dello stesso dito e di dita diverse solamente quando i due stimoli erano separati da 30 ms. In particolare, per latenze brevi, l’eccitabilità corticospinale riflette le informazioni inerenti alla presenza e alla localizzazione di eventi afferenti, mentre per latenze più lunghe la presenza di eventi afferenti multipli è comunicata

alla corteccia motoria, ma l'informazione di localizzazione viene persa. Questo fa pensare che l'informazione topologica presente nelle cortecce somatosensoriali possa essere trasferita alla corteccia motoria. L'esistenza di connessioni dirette tra le aree sensoriali nel giro post-centrale e le aree motorie del giro precentrale è stata dimostrata da Catani e colleghi i quali, usando la trattografia a diffusione, hanno rivelato la presenza di fibre a forma di U (U-shape) che connettono direttamente SI con la corteccia motoria (Catani M. e coll., 2012).

A partire dalle conoscenze appena descritte rispetto all'integrazione sensomotora sullo stesso lato del corpo, in uno studio comportamentale successivo, i miei colleghi ed io abbiamo dimostrato come l'integrazione sensomotora sia modulata dalla parte del corpo stimolata (Tamè L. e Longo MR., 2015), usando il paradigma di Poffenberger (Poffenberger A., 1912) [Per una revisione più recente di questo paradigma si veda Marzi CA., 1999]. Questo classico paradigma comportamentale è stato utilizzato per quantificare il trasferimento sensomotorio tra gli emisferi. È basato sul fatto che le persone hanno tempi di reazione più veloci (RTs) quando stimoli sensoriali (ad esempio, visivi, tattili o uditivi) sono presentati nell'emicampo o emicorpo ipsilaterale ("non crociato") alla mano usata per rispondere rispetto a quello controlaterale ("crociato"). È stato proposto che questa differenza nel tempo di reazione tra crociato-non crociato (CUD) rifletta il tempo richiesto al segnale cerebrale per trasmettersi tra i due emisferi cerebrali. La logica del paradigma di Poffenberger è che quando lo stimolo sensoriale e l'effettore motorio sono nello stesso lato del corpo, l'informazione sensomotora può essere integrata ed elaborata nello stesso emisfero (non crociato). Al contrario, se l'input sensoriale è presentato sul lato opposto all'effettore usato per rispondere, l'informazione deve essere integrata tra gli emisferi (crociato). Nel nostro lavoro abbiamo dimostrato come la differenza del tempo di elaborazione tra le condizioni crociato non-crociato era maggiore per le dita (~2.6 ms) e l'avambraccio (~1.8 ms) rispetto alla fronte (~0.9 ms). Questa piccola ma consistente differenza temporale è compatibile con la distribuzione delle connessioni callosali e la densità dei campi recettivi bilaterali (RFs) tra le regioni che rappresentano il corpo dalla periferia verso il centro (Pandya DN. e Vignolo LA. 1969; Caminiti R. e Sbriccoli A. 1985; Manzoni T. e coll., 1989; Iwamura Y. e coll., 1994; Iwamura Y., 2000) come pure con la capacità di conduzione del CC (Aboitiz F. e coll., 1992; Caminiti R. e coll., 2013). Questo risultato suggerisce che l'integrazione inter-emisferica degli stimoli sensomotori varia in funzione della forza delle connessioni callosali tra le parti del corpo.

La relazione tra il sistema sensitivo e motorio è particolarmente importante per compiti tattili nei quali esploriamo attivamente un oggetto (haptic tasks). In questa situazione il nostro cervello riceve simultaneamente segnali sensitivi dai movimenti e genera segnali motori per i movimenti. Questi input devono essere combinati per poter percepire l'oggetto esplorato. Recentemente, Dupin e colleghi (2015) hanno sviluppato un nuovo paradigma nel quale sono stati in grado di separare i

segnali sensitivi e motori tipicamente in relazione alla stessa parte del corpo (ad esempio, la mano) che, quando combinati, forniscono le caratteristiche spaziali di un oggetto durante l'esplorazione (haptic exploration) della forma e della dimensione dell'oggetto. Nel loro compito, ai partecipanti era stato detto di muovere una mano senza ricevere nessuna informazione tattile, mentre l'altra mano percepiva le conseguenze dell'azione senza produrre il movimento. Gli autori hanno trovato che i segnali sensitivi e motori provenienti dai due lati del corpo erano combinati come se provenissero dalla stessa mano. Questi risultati suggeriscono che, nella percezione di tattile attiva (haptic perception) il cervello compone i segnali sensitivi e motori usando una rappresentazione semplificata del corpo, nella quale le stimolazioni somatosensoriali che sono percepite come conseguenze del movimento sono trattate in maniera indipendente rispetto al lato del corpo in cui vengono percepite. Questo è evidente anche da uno studio più classico di Taub e Berman (1968). In questo studio gli autori hanno trovato che nelle scimmie che quando il feedback sensoriale è inibito in un braccio, gli animali non usano più quell'arto. Tuttavia, se il feedback sensitivo viene eliminato anche sull'arto controlaterale, l'animale inizia ad utilizzare nuovamente entrambi gli arti (Taub E. e Berman A., 1968) suggerendo che l'elaborazione degli input sensoriali bilaterali ha un forte impatto sul comportamento motorio.

## **Riassunto**

L'Autore descrive i vari aspetti che caratterizzano l'integrazione tattile e sensomotoria degli stimoli nei due lati del corpo. In primo luogo spiega come sia critico il ruolo della corteccia somatosensoriale primaria nel processo di integrazione dello stimolo tattile bilaterale dai due lati del corpo. In particolare, presenta recenti evidenze neurofisiologiche a supporto della nozione che SI media l'integrazione bilaterale negli stadi corticali precoci del processo di rappresentazione tattile. Infatti, viene proposto che questa integrazione avviene attraverso le connessioni trans-callosali tra SI degli emisferi destro e sinistro e questo varia in funzione della parte del corpo stimolata (ad esempio, omologhe o non omologhe) così come in funzione del tempo che intercorre tra gli stimoli tattili. Successivamente, presenta alcune evidenze neuropsicologiche che suggeriscono una certa specificità delle comunicazioni sensori-motorie tra parti omologhe dei due lati del corpo. Nella conclusione descrive l'intima relazione tra i sistemi sensitivo e motorio, con il loro continuo scambio reciproco di informazioni, fornendo evidenze rispetto alle diverse vie attraverso le quali tali stimoli sono elaborati in relazione alla regione del corpo stimolata – ad esempio, vicino alla linea mediana del corpo rispetto

alla periferia. L'Autore si augura che alcune nuove conoscenze presentate possano essere utili in una prospettiva riabilitativa neurocognitiva.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> La bibliografia è riportata alla fine della versione inglese