



**UNIVERSITA DEGLI STUDI DI MESSINA**  
Dipartimento di Science Cognitive, Psicologiche, Pedagogiche  
e degli Studi Culturali

---

**CORPOREITA' E AZIONE:**  
**AGENCY E OWNERSHIP A CONFRONTO**

**Dottoranda:**  
Anna Re

**Coordinatore**  
Prof.ssa Alessandra Falzone

**Supervisore**

Prof. Pietro Pereonti

S.S.D.

M-FIL/05

**CORPOREITA' E AZIONE**  
**AGENCY E OWNERSHIP A CONFRONTO**

# INDICE

Introduzione	p.6
<b>Capitolo 1. Coscienza e corporeità</b>	
1.1 Definire la coscienza	p. 9
1.2 Unità dell'esperienza cosciente	p. 11
1.3 Autocoscienza preriflessiva	p. 14
1.4 Sé Corporeo	p. 16
<b>Capitolo 2. Rappresentazione del corpo</b>	
2.1 Distinzione tra senso di azione e senso di proprietà del corpo	p. 23
2.2 Quale relazione tra azione e proprietà?	p. 28
2.3 Schema corporeo e immagine corporea	p. 34
2.4 Patologie della rappresentazione corporea	p. 37
2.5 Propriocezione e contributo cerebellare	p. 40
<b>Capitolo 3. Cervelletto e meccanismi di codifica predittiva</b>	
3.1 Introduzione generale	p. 43
3.2 Processi controllati e automatici	p. 44
3.3 Il ruolo del cervelletto	p. 49
3.4 Modelli interni cerebellari	p. 52
3.5 Cervelletto e cognizione	p. 55
<b>Capitolo 4. Il ruolo del cervelletto nel senso di azione e in quello di proprietà del corpo</b>	
4.1 Rubber Hand Illusion e Sé Corporeo	p. 61
4.2 Paradigma della Moving Rubber Hand Illusion	p. 62
Esperimento 1	
Protocollo sperimentale	p. 66

Procedura sperimentale	p. 67
Analisi dei dati	p. 75
Risultati	p. 77
Discussione	p. 90

## **Capitolo 5. L'azione è in grado di modulare la proprietà del corpo?**

5.1 Consapevolezza motoria e senso di azione	p. 94
Esperimento 2	
Partecipanti e metodi	p. 96
Condizioni sperimentali	p. 97
Analisi dei dati	p. 99
Risultati	p. 101
Discussione	p. 116
<b>Conclusioni</b>	p. 120
<b>Ringraziamenti</b>	p. 125
<b>Bibliografia</b>	p. 126



Non solo il mio corpo non è per me un semplice frammento dello spazio, ma per me  
non ci sarebbe spazio se non avessi un corpo (*Maurice Merleau Ponty*)

## INTRODUZIONE

Questo lavoro nasce dall'interesse teorico e scientifico verso gli studi sulla rappresentazione del corpo e sui relativi meccanismi cognitivi e neurali.

Si tratta di un lavoro interdisciplinare caratterizzato al suo interno da una breve parte dedicata al fenomeno della coscienza, con particolare riferimento alla dimensione corporea come nucleo fondante della consapevolezza di sé, mentre una parte sarà dedicata alla descrizione dei risultati di due differenti esperimenti.

Nel primo capitolo orienterò la mia attenzione sulla fenomenologia dell'autoconsapevolezza corporea, caratterizzata da una tacita modalità di funzionamento e dalla sensazione di familiarità che siamo soliti esperire nei termini di quell'unità più volte sottolineata nel corso di questo lavoro.

In accordo con Braun e colleghi (2018) è possibile affermare che, solitamente, diamo per scontato il fatto di possedere un corpo e di agire nel mondo, tuttavia, come facciamo a sapere che questo corpo è il *nostro corpo*?

Quando afferriamo un oggetto o guardiamo le nostre mani generalmente non mettiamo in discussione questo tipo di esperienza e siamo implicitamente consapevoli che non si tratta di un corpo qualsiasi bensì del nostro corpo.

Questa coscienza preriflessiva, come vedremo nel secondo capitolo, sembra basarsi su due componenti: il senso di proprietà (*Sense of Ownership* - SoO) e il senso di azione (*Sense of Agency* - SoA); mentre il primo può essere definito come la sensazione di certezza soggettiva che le parti del corpo appartengano a sé stessi (Gallagher 2000), il secondo è la sensazione di essere colui che inizia e controlla un'azione (Moore et al., 2012).

Il modo in cui l'azione genera e facilita l'auto-riconoscimento è importante per distinguere quali azioni sono da noi prodotte e quali, invece, sono indotte dall'esterno. Quando eseguo un semplice movimento, come afferrare un bicchiere o premere un pulsante, sperimento proprio questo tipo di sensazioni, diversamente da quando qualcuno afferra il mio braccio per scuoterlo e non ho alcun senso di azione su quel movimento.

Le rappresentazioni provenienti dallo schema corporeo e dall'immagine corporea contribuiscono a formare il senso di proprietà del corpo e quello di azione e vengono a costituirsi sulla base di comandi motori efferenti ed informazioni sensoriali afferenti.

L'esperimento classico *dell'illusione della mano di gomma* ha mostrato che è possibile percepire una mano artificiale come parte del proprio corpo purché la mano reale e quella artificiale si trovino in una posizione congruente e vengano strofinate in modo sincrono (Botvinick e Cohen, 1998 , Ehrsson et al., 2004).

Si tratta di un'illusione di appartenenza che alcuni soggetti sperimentano in modo molto vivido e che ha permesso di ampliare le conoscenze relative all'autocoscienza corporea.

Nella versione *dell'illusione della mano in gomma in movimento*, invece, il tipo di set up sperimentale consente un'indagine del senso di azione oltre che di quello di proprietà. L'aspetto interessante riguarda la possibilità di dissociare queste due componenti e mostrare come il *SoA* possa essere sperimentato anche quando la mano artificiale viene collocata in una posizione anatomicamente non plausibile con quella reale del partecipante.

Kalckert e Ehrsson (2012) hanno trovato risultati compatibili sia per la concezione separata di *SoO* e *SoA* sia per un possibile rinforzo; il modo in cui questo rinforzo accade è ancora oggetto di discussione, tuttavia, l'azione potrebbe essere un elemento fondamentale e i meccanismi di codifica predittivi descritti nel terzo capitolo di questo lavoro sembrano svolgere un ruolo importante nelle previsioni sensori-motorie.

In definitiva, lo scopo generale di questo lavoro di ricerca è quello di investigare la relazione tra *SoO* e *SoA* applicando il paradigma dell'illusione della mano di gomma in movimento (Kalckert e Ehrsson, 2012).

Nel primo esperimento verrà indagato il ruolo di una specifica struttura sottocorticale, il cervelletto, nel modulare il senso di proprietà e quello di azione attraverso l'utilizzo di una tecnica di stimolazione non invasiva che permette di inibire o eccitare il funzionamento di quest'area: il cervelletto sembra coinvolto non solo negli aspetti relativi al controllo motorio, ma anche nell'integrazione dei diversi



input sensoriali alla base dell'emergere del senso di proprietà del corpo.

Nel secondo esperimento verrà analizzata la relazione tra queste due componenti dell'autoconsapevolezza corporea: l'idea è che, se *SoA* e *SoO* coincidono con l'esperienza, la prima sensazione potrebbe rafforzare la seconda.

Al fine di comprendere questo aspetto verrà utilizzato un approccio cross-modale associando al movimento attivo del partecipante un preciso feedback acustico; verrà inoltre valutato il tempo di inizio della sensazione di proprietà nelle due condizioni congruenti attive allo scopo di capire se il senso di azione modula quello di proprietà nella modalità con feedback in modo diverso da quanto avviene nella modalità senza feedback acustico.

Per ogni condizione sperimentale e per ciascun esperimento abbiamo utilizzato un questionario per la valutazione di *SoO* e *SoA*, nonché la misura del *drift propriocettivo* intesa come una *misura implicita* legata agli aspetti propriocettivi. Una differenza significativa tra le due distinte sessioni dei rispettivi esperimenti sarebbe un risultato di notevole importanza e garantirebbe inoltre di rilevare eventuali inesattezze relative al questionario come *misura esplicita* (Haans et al, 2012).

## CAPITOLO I

### 1.1 Definire la coscienza

Pur non volendo assecondare l'idea che la coscienza sia un fenomeno circonfuso da un'aura di mistero non si può negare che, almeno in prima istanza, gli interrogativi sulla coscienza superano di gran lunga le risposte che studiosi e scienziati sembrano in grado di fornirci.

Nonostante gli sviluppi nelle metodiche di indagine cerebrale abbiano ampliato le conoscenze sul modo in cui funziona il nostro cervello, un certo scetticismo circa la possibilità di ricondurre la coscienza ad uno o più correlati neurali sembra trovare ragione nelle posizioni di chi ritiene che la ricerca di un ipotetico correlato non ci dice nulla circa la natura fenomenica della coscienza.

Si tratta indubbiamente di un fenomeno elusivo, fortemente ancorato alla prospettiva in prima persona e oggetto di discussione e dibattito in ambiti che vanno dalla filosofia alle scienze cognitive, dalle neuroscienze all'intelligenza artificiale.

Potremmo definire la coscienza come la consapevolezza che ciascuno ha di sé, dei propri stati mentali e del mondo esterno. Tale definizione rimanda agli aspetti qualitativi dell'esperienza cosciente e dunque, alla sua natura personale, immediata e soggettiva.

Il termine coscienza viene spesso identificato con quello di vigilanza ossia con la capacità di saper rispondere a determinati stimoli; sembra quindi che essere coscienti implichi un certo grado di attivazione e che non si possa parlare di coscienza senza riferirsi agli aspetti qualitativi e soggettivi che caratterizzano la nostra esperienza cosciente.

Ciò che colpisce è certamente il contrasto tra la familiarità e l'immediatezza che ciascuno di noi esperisce in quanto individuo dotato di coscienza e l'inafferrabilità del fenomeno.

La meravigliosa descrizione di Marcel Proust relativa ai ricordi riaccessi dall'aroma della madeleine intinta nel tè, unitamente alle caratteristiche qualitative che contraddistinguono questa esperienza, è uno degli esempi letterari più emozionanti

del modo in cui gli aspetti soggettivi si intrecciano tra loro per dar vita ad un'esperienza fenomenica. Questa sua descrizione, però, non è sufficiente a comunicarci il sapore delle sue madeleine poiché si tratta appunto di un'esperienza soggettiva, accessibile solo attraverso i resoconti formulati in prima persona.

Le risposte offerte dall'analisi sperimentale non riescono ancora a fornirci una spiegazione di cosa significhi provare una certa esperienza e le posizioni in merito sono differenti e per certi aspetti poco flessibili rispetto all'idea di far convergere l'analisi della coscienza verso una teoria esplicativa in grado di cogliere sia l'aspetto soggettivo che quello propriamente biologico e fisico.

Per tale ragione dovremmo domandarci quale sia la prospettiva che ci consenta di operare in questa direzione senza rinunciare né al carattere fenomenico dell'esperienza, né ad una possibile spiegazione, con il timore ingiustificato che in essa si dissolva la ricchezza della nostra vita cosciente.

In tal senso, sostenere *l'indagabilità* della coscienza non significa che ciò che ci caratterizza in modo così peculiare possa esclusivamente essere ricondotto a spiegazioni riduzioniste quanto aprirsi alla possibilità di un'integrazione disciplinare che non ostacoli il raggiungimento di conoscenze che troppo spesso ci si ostina a rifiutare a priori.

Mettendo da parte le controversie che emergono da campi di indagine differenti quando siamo chiamati a definire la coscienza e il suo carattere fenomenico, è pur vero che ogni nostra esperienza è sempre implicitamente legata ad un sé e non a qualcun altro. Tutte le esperienze che faccio e le sensazioni che sperimento implicano sempre una qualche forma di autoreferenzialità (cfr. Gallagher e Zahavi, 2009).

## **1.2 Unità dell'esperienza cosciente**

La coscienza, pur assumendo l'aspetto di un fenomeno unitario, è in realtà caratterizzata da elementi eterogenei, come ci dimostrano i risultati della ricerca neuroscientifica.

Come sostenuto da Berti (2010) la *sindrome dello split-brain* è stata una delle prime patologie che ha permesso di mettere in luce la struttura multiforme dei processi di

coscienza; infatti, in seguito alla resezione del corpo calloso (il fascio di fibre nervose che mette in collegamento i due emisferi cerebrali) quando un'informazione raggiunge un emisfero non può più essere trasmessa a quello controlaterale con il risultato che le informazioni vengono elaborate in modo distinto.

Il requisito dell'unità della coscienza di sé, pur rispecchiando il modo in cui facciamo esperienza di noi stessi, non sembra riflettersi sul piano del funzionamento neuronale.

Ciò avviene anche nel caso del *blindsight* (fenomeno della visione cieca) dove, in seguito ad una lesione a carico delle fibre che dalla retina giungono alla corteccia, un soggetto può andare incontro a cecità parziale o totale a seconda della gravità della lesione. Alcuni soggetti, però, hanno dimostrato di essere in grado di percepire e rispondere agli stimoli posti di fronte a loro pur sostenendo di non vedere nulla.

Tra le ipotesi che possono spiegare questo fenomeno una di queste fa riferimento alla possibilità che siano presenti delle capacità residue che nonostante la lesione risultano ancora operanti ma che, a causa del danneggiamento alle aree visive, non consentirebbero l'elaborazione cosciente dello stimolo al livello della soglia di attivazione necessaria (cfr. Berti, 2010, p. 54).

Molte delle azioni che seguiamo, infatti, non sono sempre oggetto della nostra attenzione esplicita nonostante «processi non consapevoli e di fondamentale importanza hanno luogo in ogni istante e condizionano le prime risposte che offriamo all'ambiente circostante [...]» (Gozzano, 2009, p.56).

La *negligenza spaziale unilaterale* costituisce un'ulteriore prova a favore dell'esistenza di processi di elaborazione non consapevole dell'informazione e di una dissociazione tra le due componenti dell'autocoscienza, il riconoscimento di sé e il ragionamento riflessivo.

Si tratta di una patologia che insorge dopo una lesione all'emisfero destro e si traduce in assenza di risposte agli stimoli presentati nell'emispazio controlaterale alla lesione o come perdita di consapevolezza di metà del proprio corpo.

Un paziente affetto da neglect presenta, infatti, tutta una serie di difficoltà comportamentali che lo conducono ad ignorare gli stimoli presenti in quella porzione

di spazio esterno, ad esempio, di un'intera parola, i soggetti con neglect, potrebbero leggere solo la stringa di lettere finali e non l'intera sequenza (cfr. Berti et al, 1994).

Keenan e colleghi (2005) hanno sottoposto dei soggetti al riconoscimento di alcune immagini utilizzando una tecnica non invasiva che consiste nell'addormentare un solo emisfero cerebrale. In seguito a questa procedura hanno scoperto che le informazioni relative al riconoscimento di sé vengono codificate nell'emisfero destro mentre quelle relative al riconoscimento dei volti nell'emisfero sinistro.

Gazzaniga, Volpe e LeDoux (1979) hanno studiato alcuni pazienti affetti da una particolare forma di neglect che presentavano delle difficoltà solo quando due stimoli venivano presentati simultaneamente. In questo caso i soggetti erano in grado di riconoscere solo lo stimolo presentato nel campo visivo destro ma l'elaborazione sembrava estendersi anche allo stimolo ignorato come confermato dal fatto che «se aiutati a indovinare le risposte, la loro accuratezza era elevatissima» (Berti, 2010, p. 74).

I disturbi presi in esame ci mostrano come alcuni stimoli possano essere elaborati anche in assenza di consapevolezza e che i nostri processi di coscienza tendono ad esprimersi nella forma unitaria che caratterizza la nostra esperienza.

Ci sono dei casi in cui un soggetto perde quell'abitudine corporea normalmente esperita, come avviene nel disturbo di depersonalizzazione caratterizzato dalla sensazione di distacco sperimentata nei confronti del proprio corpo o dei propri processi mentali. Più precisamente: «il sentimento di distacco e di estraneità vissuto dal soggetto nei confronti del proprio corpo si esprime attraverso la paura nei confronti di un modo di sentire che non corrisponderebbe al sentimento diretto e intimo che ciascuno di noi vive come tratto costitutivo del proprio mondo interiore, relazionale e identitario» (Re, 2017, p. 282).

Parnas (2003) ha riportato l'esperienza di alcuni soggetti che hanno avvertito un cambiamento nel modo abituale di fare esperienza di sé, in particolare, sul piano preriflessivo che normalmente caratterizza il nostro vissuto.

La sensazione di cambiamento associata a queste variazioni veniva espressa nei termini di un distacco o rallentamento dei propri processi mentali e in una riduzione

dell'*ipseità*, analogamente alle sensazioni riportate dai soggetti con disturbi dissociativi nei quali sembra venir meno l'esperienza in prima persona.

La perdita di questa familiarità può coinvolgere la consapevolezza che ciascuno ha del proprio corpo e intaccare a più livelli quel flusso di informazioni che ci permettono di percepire il nostro corpo dall'interno.

Alcuni disturbi sollevano importanti domande relative alla relazione tra il sé e il corpo e sulla comprensione dei vari aspetti dell'autocoscienza corporea che, come affermato da Bermúdez (1995) sembra costituirsi come la forma più basilare di coscienza di sé. Questa autocoscienza corporea non è solo quella di tipo spaziale che ci colloca nel mondo fisico ma anche quella del corpo *interno* con le sue variazioni fisiologiche che vengono esperite come sensazioni di fondo informative di stati del corpo più generali.

La propriocezione da un lato e l'interocezione dall'altro, possono essere rispettivamente definiti come due sistemi che strutturano l'esperienza corporea dando luogo a processi fenomenologicamente distinti ma integrati all'interno di uno schema corporeo unitario.

Gallagher e Zahavi (2009) sostengono che in condizioni normali il corpo non sperimenta alcun dualismo e la differenza tra corpo *vissuto* e corpo *oggetto* viene posta solo quando avviene un'interruzione o un cambiamento nell'esperienza preriflessiva del corpo e nella modalità di funzionamento fluido che normalmente caratterizza la nostra vita (cfr. Gallagher e Zahavi, p. 228).

## **2.1 Autocoscienza preriflessiva**

La consapevolezza di sé, nel modo in cui viene esperita dal singolo individuo, rappresenta una base identitaria importante ed è accompagnata da differenti stati qualitativi.

Cosa intendiamo invece con il termine autocoscienza? Bloch (1995) utilizza tale termine per riferirsi al lato riflessivo della coscienza mentre Perconti (2008) sostiene che la sensazione dell'autocoscienza è una caratteristica essenziale della nostra mente. A tal proposito afferma: «Dobbiamo abbandonare l'idea che essere consapevoli equivalga all'esito del lavoro di un sistema unitario della nostra mente

[...] che colora di coscienza quelle stesse esperienze che avremmo come automi, se solo fossimo animali inferiori o macchine» (Perconti, 2008, p.49).

Perconti (2008) effettua una distinzione tra quelle che definisce le due componenti dell'autocoscienza: il riconoscimento di sé, la forma più semplice di autocoscienza e una forma più complessa che trova il suo fulcro nel ragionamento riflessivo.

Si tratterebbe, secondo Perconti, di due componenti genuine dell'autocoscienza che operano in maniera indipendente e sono elaborate in regioni cerebrali differenti; difatti, esistono casi in cui il riconoscimento di sé può avvenire anche in assenza della capacità di ragionare su sé stessi e viceversa.

Secondo la prospettiva elaborata invece da Gallagher e Zahavi nel libro "*La mente fenomenologica*" la nozione di autocoscienza presuppone una «forma minima di autocoscienza come caratteristica strutturale costante dell'esperienza cosciente» (Gallagher e Zahavi, 2009, p.70).

Si tratta di un tipo di coscienza di primo grado, diretta e immediata, diversa da quella riflessiva in cui la consapevolezza dell'essere coscienti di qualcosa costituisce una coscienza di secondo grado. Secondo la prospettiva fenomenologica la struttura della coscienza è quindi composta da due forme di autocoscienza: quella preriflessiva, immediata, intrinseca e non concettuale, e quella riflessiva, che è invece concettuale. A proposito della nozione di autocoscienza preriflessiva Gallagher e Zahavi affermano:

Quando sono consapevole di un dolore, una percezione o un pensiero che sto avendo, l'esperienza in questione mi è data in maniera immediata, come mia, cioè senza il ricorso a inferenze o a criteri. Non si tratta del fatto che prima ho un'esperienza neutra o anonima, per poi inferire in un secondo momento che essa è mia. Nella fattispecie, se mi gira la testa non posso né dubitare né sbagliarmi su chi è il soggetto di tale esperienza [...] Infatti, tutte le mie esperienze sono implicitamente caratterizzate dalla caratteristica della mieità, cioè hanno tutte le qualità di essere esperienze alle quali io sono sottoposto o che sperimento. (Gallagher e Zahavi, 2009, p. 77).

Generalmente non sbagliamo nell'attribuire a noi stessi certi pensieri o proprietà ed è su questa linea che verranno sviluppate le successive argomentazioni.

L'autocoscienza preriflessiva, intesa come una forma primitiva di coscienza di sé, non avrebbe bisogno di alcuna riflessione ulteriore per divenire tale in quanto lo è già costitutivamente. Come afferma Jean Paul Sartre: «Questa coscienza di sé non va considerata come una nuova coscienza, ma come il solo modo di esistenza possibile di esistere per una coscienza di qualche cosa» (Sartre, 1943, p.20).

Baker (2000) sostiene che qualsiasi forma di consapevolezza di sé si basa sulla capacità linguistica di utilizzare il pronome "io" per riferirsi a sé stessi, mentre Bermúdez (1998) è contrario all'idea di ridurre tale fenomeno alla padronanza linguistica del pronome io e afferma l'esistenza di forme di autocoscienza di natura non concettuale che non dipenderebbero dal ragionamento interiore.

Un aspetto implicitamente legato a quanto appena affermato rimanda ad una considerazione relativa agli enunciati in cui il pronome "io" si colloca nella posizione di soggetto. Si tratta, in questi casi, di enunciati sempre immuni dagli errori di identificazione?

Solitamente, se sostengo di avere un dolore al braccio destro, non penso di sbagliarmi sull'attribuire a me stesso questo tipo esperienza ma potrebbero esserci dei casi in cui l'autoriferimento non è poi così scontato oppure fallisce, come nelle patologie caratterizzate dal rifiuto dei propri arti.

Tutte le esperienze che faccio sono generalmente caratterizzate da una sorta di auto-riconoscimento immediato e sarebbe arduo supporre l'esistenza di stati di coscienza senza un sé. Così: «se qualcuno mi chiedesse cosa sto facendo, pensando, vedendo, sentendo un attimo prima della domanda, sono generalmente capace di rispondere in maniera immediata, cioè senza inferenza né osservazione, perché sono *preriflessivamente* cosciente delle mie esperienze» (Gallagher e Zahavi, 2009, p. 84).

Legrand (2007) è in linea con le considerazioni svolte da Zahavi e Gallagher in merito alla nozione di autocoscienza preriflessiva come intrinsecamente soggettiva, sostenendo che la coscienza di sé resta sempre presente anche quando gli altri aspetti della coscienza fenomenica variano (cfr. Legrand, 2007, p.584).

Sempre Legrand (2006) ritiene che la proprietà dell'immunità da errori di auto-identificazione potrebbe essere estesa all'autoconsapevolezza corporea in quanto



anche le proprietà corporee vengono esperite sulla base della prospettiva in prima persona.

In definitiva, l'esperienza soggettiva del corpo vissuto e il senso di appartenenza che esperisco nell'essere un tutt'uno con il mio corpo, è una caratteristica essenziale dell'autoconsapevolezza corporea: un corpo dal quale non posso allontanarmi neppure quando lo vivo come estraneo, ostile, poco familiare, nella perdita di quell'immediatezza e unitarietà che sono solito esperire.

Ci rendiamo così conto della sua importanza quando i suoi limiti ci impediscono di essere al mondo con quell'abitudine che solitamente caratterizza la nostra esperienza o come afferma Toussaint « [...] quando i suoi limiti non si accordano più con le possibilità che io progetto» Toussaint B, 1976, p.176).

#### **1.4 Sé Corporeo**

Se un'indagine sulla coscienza sembra scontrarsi con innumerevoli ostacoli a causa del suo carattere ineffabile ed elusivo, l'indagabilità scientifica di alcuni aspetti della coscienza di sé appare una strada certamente più percorribile.

In accordo con Gallese e colleghi (2009), l'autoconsapevolezza corporea sembra configurarsi come la forma più basilare di coscienza di sé: si tratta di una forma di coscienza caratterizzata al suo interno da due componenti fondamentali che si esprimono nel senso di azione e in quello di proprietà del corpo.

Bermúdez afferma:

Esistono molti livelli diversi di coscienza di sé. Ne sono ovvi esempi la capacità di pensare al proprio corpo come proprio; di riconoscersi come portatori di stati mentali; di padroneggiare grammaticalmente l'uso del pronome in prima persona; di vedersi come un oggetto fra gli altri; di conservare ricordi del proprio passato; di costruire racconti autobiografici; di formulare progetti e ambizioni a lungo termine. Che si consideri l'una o l'altra di queste capacità, in ogni caso, si è tentati di concepirla come necessariamente dipendente da una forma di consapevolezza di sé più primitiva e pre-esistente. [...] Se è così, e se si vuole evitare una regressione (infinita), allora sembra lecito supporre che tutti questi livelli debbano, in ultimo, radicarsi in una forma di coscienza di sé abbastanza primitiva da non dipendere da una ancor più basilare (Bermúdez, 1995, p. 153).

Nella prospettiva tracciata da questo lavoro è indubbio che il corpo rivesta un'importanza fondamentale ma si tratta di un assunto di lavoro ancora lontano da elementi teorici e sperimentali definitivi.

L'autoconsapevolezza corporea sembra originare da segnali di diversa natura che si esprimono attraverso sensazioni corporee e modalità esperienziali che ci restituiscono un senso del corpo più globale e unitario.

Tutto ciò che sperimentiamo in termini di sensazioni, indizi posturali e movimenti corporei sembra restare sullo sfondo, almeno fino a quando la nostra attenzione non ricade sul corpo come avviene in seguito ad una postura errata mantenuta per un tempo troppo lungo. In quel caso diventiamo consapevoli del nostro corpo e continueremo a mantenere su di esso il nostro focus attentivo, o almeno fino a quando quelle sensazioni spiacevoli non saranno svanite.

Possiamo fare esperienza del nostro corpo dall'interno attraverso le sensazioni corporee e interocettive che ci forniscono informazioni sullo stato del corpo nel suo insieme o su una specifica parte, oppure possiamo fare esperienza del corpo dall'esterno, come quando tocchiamo con una mano una parte del nostro corpo e abbiamo un'esperienza di tipo tattile (cfr. De Vignemont, 2007).

Le fonti sensoriali che contribuiscono alla fenomenologia del sé corporeo sono di natura tattile, visiva, propriocettiva e interocettiva, affiancate a quelle vestibolari e nocicettive che interagendo ci permettono di acquisire informazioni sul corpo e di avere esperienze di vario tipo.

Armstrong (1962) effettua una distinzione tra le sensazioni corporee localizzate in una parte del corpo, come ad esempio quelle nocicettive che possono coinvolgere un distretto corporeo specifico, mentre altri tipi di sensazioni corporee rimandano a stati del corpo generalizzati come la tensione o la stanchezza. La nostra attenzione generalmente non verte su questo tipo di informazioni specifiche sul corpo nel senso che non è necessario rivolgere esplicitamente la nostra attenzione su esso se non in particolare casi.

La centralità del corpo è stata avanzata da Pfeifer a Bongard (2007) i quali sostengono che la corporeità assuma un ruolo importante per la cognizione.

La loro idea è che il corpo sia un prerequisito essenziale per qualsiasi forma di cognizione e non soltanto un mezzo di controllo che ci permette di realizzare ciò che la mente decide.

Quando vogliamo afferrare un oggetto, ad esempio, la nostra mano risulta *morfologicamente* adatta al compito da eseguire e gli stessi recettori sensoriali sono disposti in modo tale da garantire una prima elaborazione del segnale in entrata che poi verrà inviato al cervello. (cfr. Pfeifer e Bongard, 2007).

In che modo il corpo potrebbe influenzare il nostro comportamento e il modo stesso in cui pensiamo?

L'interazione con l'ambiente, resa possibile dal corpo e dalla sua particolare morfologia e configurazione, è essenziale per lo sviluppo delle capacità di categorizzazione e per distinguere determinati oggetti e situazioni. Attraverso questa interazione sensori-motoria impariamo con l'esperienza ad attribuire significato a determinati eventi. Inoltre, il nostro stesso stato corporeo potrebbe influenzare il modo in cui pensiamo ed elaboriamo alcune situazioni orientando le nostre azioni.

Tornando all'autocoscienza corporea, sembra che il modo in cui i diversi segnali sensoriali si integrano sia cruciale per il mantenimento di una rappresentazione corporea globale mentre il senso di azione potrebbe svolgere un ruolo importante nella costituzione di un sé corporeo coerente e unitario.

Questo tipo di autoconsapevolezza corporea, come verrà spesso sottolineato, non riflette un processo esplicito di auto-attribuzione e può essere compromessa a più livelli: lo schema corporeo può subire delle disfunzioni che ne alterano le performance, compromettendo così la capacità di eseguire azioni fluide e accurate con il risultato che quelle stesse azioni dovranno essere monitorate momento per momento e non saranno più sganciate dall'esercizio di un controllo costante.

L'integrazione dei differenti segnali sensoriali ci fornisce quindi una rappresentazione stabile e unitaria del corpo che in certe condizioni patologiche può risultare danneggiata e generare fenomeni di rifiuto nei confronti dei propri arti e di perdita di controllo rispetto alle proprie azioni.

Esistono più rappresentazioni del corpo ma tutte sembrano ruotare attorno all'esistenza di una modalità di funzionamento implicita, attribuita all'esistenza di

uno schema corporeo che opera in modo quasi automatico, e una modalità esplicita legata al concetto di immagine corporea relativa alle rappresentazioni corporee di natura emotiva e concettuale.

La necessità esperienziale del corpo è catturata dal rapporto che intratteniamo con l'ambiente che ci circonda nonché dalle azioni che quotidianamente svolgiamo e che hanno degli effetti sul mondo.

La ricerca filosofica sul corpo è stata progressivamente affiancata da quella empirica che ha portato a maggiori conoscenze sui meccanismi neurali alla base della nostra rappresentazione corporea e sulle patologie che intaccano la dimensione della corporeità.

E' all'interno della riflessione fenomenologica che la dimensione della corporeità ha assunto un ruolo centrale: infatti, partendo dalla distinzione operata da Husserl tra *Leib* (corpo proprio) e *Körper* (corpo oggetto) ci dirigiamo verso un recupero della dimensione vissuta della corporeità che fa del corpo il fulcro essenziale della nostra presenza nel mondo.

Il termine *Körper* viene utilizzato per riferirsi al corpo-oggetto con le sue proprietà fisiche mentre il *Leib* rimanda alla nozione di corpo-vissuto, a quell'esperienza soggettiva che trova proprio nel corpo il suo carattere immediato e originario.

L'indagine fenomenologica pone dunque la corporeità ad un livello di riflessione utile a tale scopo e mette profondamente in discussione l'idea che il corpo sia semplicemente qualcosa che possediamo.

Secondo l'analisi svolta da Merleau Ponty in "*Fenomenologia della percezione*" (2003) un oggetto percepito diviene tale quando quelli circostanti si collocano all'orizzonte di esso, all'interno di una prospettiva ancorata al corpo come punto di vista sul mondo.

In tal senso la conoscenza del mondo si sviluppa all'interno della dimensione percettiva di cui il corpo è il principale latore:

Io ho un corpo e in quanto agisco nel mondo attraverso questo corpo, lo spazio e il tempo non sono per me una somma di punti giustapposti, né d'altra parte una infinità di relazioni di cui la mia coscienza effettuerebbe la sintesi e nella quale essa implicherebbe il mio corpo; io non sono nello

spazio e nel tempo, non penso lo spazio e il tempo: inerisco allo spazio e al tempo, il mio corpo si applica ad essi e li abbraccia. (Merleau Ponty, 2003 p. 195).

La consapevolezza preriflessiva del corpo è *non osservazionale* e ciò si esprime nelle azioni che eseguiamo ogni giorno e alle quali raramente prestiamo attenzione; siamo in grado di individuare il fine delle nostre azioni nonostante la coscienza dell'azione resti sullo sfondo e non sia diretta all'analisi dei movimenti che realizziamo.

In questa prospettiva, l'esperienza del corpo si configura come fondamento preriflessivo della consapevolezza di sé e differisce da quella con qualsiasi altro oggetto esterno proprio perché ogni nostra azione è resa possibile attraverso il corpo.

La nozione di *corpo-vissuto* e quella di *corpo-oggetto* fanno riferimento a due distinte dimensioni della corporeità, rispettivamente, al corpo che siamo e che fa da sfondo alle nostre esperienze, e al corpo come cosa materiale.

Ciò appare evidente quando qualcosa intacca la relazione intima che intratteniamo con il nostro corpo e che, in quanto soggetti incarnati, ci rende vulnerabili a tutte quelle esperienze che causano un cambiamento nel modo abituale di vivere la nostra corporeità.

Questa esperienza incarnata è di tipo preriflessivo ed implica una modalità di funzionamento caratterizzata da processi che avvengono nel nostro corpo e nel mondo in modo trasparente, guidando le nostre azioni quotidiane.

Quando questa trasparenza smette di caratterizzare la nostra esperienza corporea, la relazione tra *corpo-oggetto* e *corpo-vissuto* non appare più così marcata e sembra trasformare il modo in cui sperimentiamo il nostro corpo e la nostra stessa esistenza.

Il corpo rappresenta il punto di riferimento per la collocazione di tutti gli altri oggetti del mondo e ci offre un ventaglio di possibilità che sono definite dalla sua posizione nello spazio circostante.

L'autoconsapevolezza corporea è, quindi, un tipo di coscienza preriflessiva perché quasi nessuna delle azioni che realizzo ricade sotto la mia attenzione. Non ci chiediamo se il corpo con il quale agiamo sia effettivamente il *nostro* corpo poiché si tratta di un'esperienza in prima persona, implicitamente legata al soggetto che ne fa esperienza.

Un caso interessante è quello del paziente IW descritto da Cole e Paillard (1995) che ha perso il senso della propriocezione e del tatto dal collo in giù e può eseguire alcuni movimenti solo attraverso un continuo monitoraggio visivo.

L'esperienza preriflessiva del corpo nel paziente IW è totalmente compromessa, come nel caso di Cristina discusso da Sacks (2011) e la capacità di compiere determinate azioni, seppur presente, necessita di un continuo monitoraggio visivo lungo tutto il loro decorso e le informazioni tattili e propriocettive, non più disponibili, vengono sostituite dalla visione che deve accompagnare ogni azione al fine di renderla possibile.

Non esiste esperienza, come quella del dolore, che più di ogni altra ci fa sentire che siamo esseri incarnati e che il nostro corpo, e le esperienze che rende possibili, possono essere improvvisamente limitate trasformando la stessa percezione che abbiamo di noi stessi.

Diversi studiosi hanno sostenuto l'importanza del corpo per la coscienza di sé (Berlucchi e Aglioti, 1997, Tsakiris, 2010) e questa prospettiva sembra implicitamente legata all'idea che non possa esserci cognizione senza corporeità.

Questo aspetto rimanda a quanto sostenuto dallo stesso Merleau Ponty (2003) che ritiene il corpo implicato nelle nostre funzioni cognitive, in virtù del suo essere costantemente in relazione con l'ambiente circostante.

Questo tipo di interazione è di tipo dinamico in quanto il corpo non riceve unicamente input di natura passiva ma risulta attivamente coinvolto attraverso l'azione (Gibson, 1977).

Anche la prospettiva di Varela (1991) è caratterizzata da una ridefinizione del rapporto *mente-corpo* e *individuo-ambiente* a favore di una visione che concepisca la mente incorporata e il mondo come qualcosa che si costituisce a partire dalla nostra esperienza e dalle nostre azioni.

Secondo Varela: «la cognizione, invece d'essere la rappresentazione di un mondo pre-dato, è l'evento congiunto di un mondo e di una mente a partire dalla storia delle diverse azioni che compie un essere nel mondo». (Varela et al, 1991, p.35).

In questo ultimo passaggio Varela evidenzia la stretta relazione tra cognizione ed azione sottolineando come la cognizione coincida con un'azione "*incorporata*" che,

in quanto tale, non può essere separata dal supporto che la rende possibile (cfr. Cappuccio, 2009, p.25).

In relazione a quanto affermato, l'ambiente si configura come uno spazio esterno che acquisterebbe valenza per l'individuo sulla base dell'esperienza senso-motoria e dell'interazione resa possibile dall'azione.

## CAPITOLO II

### 2.1 Distinzione tra senso di azione e senso di proprietà del corpo

Gallagher (2000) ritiene che l'esperienza del corpo sia caratterizzata da due forme di certezza corporea che si esprimono nella direzione del senso di proprietà e di quello di azione.

Generalmente esperiamo queste sensazioni in modo congiunto, nel senso che l'esperienza di essere colui che sta eseguendo una determinata azione, non è distinguibile o dissociabile dall'esperienza che è *il mio corpo* a muoversi.

Si tratta di sensazioni che possono essere ricondotte ad aspetti differenti in quanto posso avere la certezza relativa alla proprietà del corpo anche quando non ho alcun senso di azione sul movimento, come avviene ad esempio nei movimenti passivi o indotti dall'esterno.

Il senso di proprietà, infatti, può essere presente anche in assenza del movimento volontario mentre l'attribuzione del ruolo di sé come agente non può prescindere dalla sensazione che il corpo con il quale agisco sia *il mio* (cfr. Fugali, 2012).

Per introdurre la distinzione tra senso di azione (*sense of agency*) e senso di proprietà (*sense of ownership*) del corpo potremmo partire da questo esempio: stiamo intrattenendo una conversazione e, ad un certo punto, qualcuno, senza volerlo, ci spinge in avanti. Sappiamo che è il nostro corpo a muoversi perché sperimentiamo la sensazione di movimento ma non ci attribuiamo alcuna intenzionalità rispetto all'azione.

Se qualcuno tocca la mia gamba sono in grado di riconoscere il punto esatto nel quale è stata toccata e non ho dubbi sul fatto che si tratti della *mia* gamba e non della gamba di qualcun altro. Sono dunque consapevole che una parte del mio corpo è la *mia*, ma potrei perdere questa capacità in seguito ad alcune patologie che intaccano questa specifica dimensione della corporeità.

Il senso di azione e il senso di proprietà non sono fenomenologicamente distinguibili sul piano dell'agire motorio o lo sono solo in parte; ciò vale sia per le azioni che realizziamo in modo intenzionale sia per quelle che mettiamo in atto senza averne alcuna consapevolezza e che sembrano esibire un'intenzionalità implicita.



In realtà ci sono azioni che sono il risultato di una scelta intenzionale ma che non sembrano esibire un elevato grado di coscienza esplicita configurandosi come azioni preriflessive.

Il senso di proprietà può mantenersi ed essere presente anche in assenza del movimento come accade nel caso di alcuni movimenti o riflessi. Se il medico assesta un colpo al mio ginocchio e questo si muove, so che a muoversi è il mio corpo ma riconosco anche che l'azione non è voluta.

Il senso di azione, invece, si esprime nella sensazione di essere gli autori delle azioni che eseguiamo e nell'essere in grado di controllarle; di solito, se devo afferrare un oggetto, non concentro l'attenzione sulla corretta configurazione che le mie dita devono assumere. Ho la sensazione di muovermi sulla base di una consapevolezza preriflessiva che potremmo distinguere dall'attribuzione di agenzia che sembra richiedere un giudizio esplicito e riflessivo circa il fatto di attribuirmi o meno una certa azione (cfr. Gallagher e Zahavi, 2009, p.243).

La distinzione tra senso di azione e senso di proprietà si basa anche sulle vie sensoriali coinvolte: mentre il senso di azione sembra essere generato dai segnali efferenti che inviano le informazioni ai muscoli, quello di proprietà si basa sul feedback sensoriale afferente.

I segnali afferenti risultano determinanti per il senso di proprietà del corpo, mentre le informazioni efferenti svolgono un ruolo integrativo nella costituzione di un sé corporeo globale e unitario (Legrand, 2007).

Nel caso *dell'illusione della mano di gomma* i soggetti sperimentano l'illusione di proprietà verso oggetti a forma di corpo ma non verso oggetti di altra natura in quanto i diversi input sensoriali vengono elaborati e integrati all'interno di una rappresentazione del corpo preesistente. (Tsakiris e Haggard, 2005).

Nella vita di tutti i giorni questa distinzione appare sfumata in quanto non ci domandiamo se un'azione è stata da noi generata così come non prestiamo attenzione ai nostri movimenti.

Il senso di azione, nello specifico, sembra essere il risultato di elementi differenti che se non correttamente integrati possono essere danneggiati a più livelli: abbiamo un

senso di azione preriflessivo legato al movimento corporeo (Gallagher, 2000) e un senso di azione come attribuzione riflessiva di secondo ordine (Graham et al, 1994). L'intenzionalità dell'azione non è fenomenologicamente distinguibile dall'esperienza preriflessiva che ci fornisce la percezione dei movimenti corporei.

Ad un livello di base, tale processo ci permette di cogliere la differenza tra le nostre azioni e le azioni compiute da altri, mentre ad un livello superiore si collocano tutte le attribuzioni di natura concettuale. Come sostenuto da Gallagher e Zahavi:

se le azioni sono specificate sin dall'inizio e a livello base dell'esperienza come appartenenti ad agenti particolari, cioè se nell'esperienza di tutti i giorni non agiamo e poi consideriamo se quell'azione era nostra o di qualcun altro, questo ci dice che l'esperienza di livello base, preriflessiva e non concettuale dell'agenzia è primitiva rispetto alle ascrizioni metacognitive di azioni che coinvolgono risorse concettuali e linguistiche (Gallagher e Zahavi, p. 257, 2009).

Per sperimentare il senso di sé in quanto agente, nel corso di un movimento volontario, è necessario che il feedback afferente rifletta una contiguità temporale in linea con la previsione di movimento, mentre eventuali discrepanze temporali tra l'azione eseguita e il feedback sensoriale afferente possono influire sull'auto-attribuzione di proprietà e azione.

L'auto-attribuzione di un'azione, come vedremo, si basa sulla congruenza tra il movimento programmato e il feedback afferente e molti esperimenti che indagano il senso del corpo, manipolano questo feedback, ritardandolo rispetto al movimento eseguito dal soggetto (Haggard e Chambon, 2012).

Ciò genera un senso di azione meno saldo che mette in luce il ruolo svolto dal feedback sensoriale, laddove altri studi concentrano invece l'attenzione sul ruolo svolto dalle previsioni sensoriali che vengono confrontate con il feedback effettivo al fine di rilevare eventuali incongruenze.

I meccanismi di codifica predittiva, che verranno approfonditi nel prossimo capitolo, sembrano contribuire a generare l'esperienza soggettiva di consapevolezza dell'azione (Blakemore et al., 2003., Franklin e Wolpert, 2011).

Fourneret e Jannerod (1998) hanno dimostrato che non sempre abbiamo coscienza dei movimenti che eseguiamo; i loro risultati sperimentali sembrano convergere

verso l'ipotesi che la consapevolezza motoria non venga a costruirsi sul feedback sensoriale ma su un segnale che precede il movimento.

Nel caso *dell'anosognosia per l'emiplegia* questa ipotesi sembra essere confermata: si tratta di una patologia caratterizzata dall'assenza di consapevolezza del proprio deficit motorio al punto che i soggetti sostengono di poter muovere l'arto plegico anche quando «la mancata esecuzione di un movimento, traducendosi in un'assenza di cambiamento della situazione rispetto al contesto, dovrebbe informare il paziente che qualche cosa non ha funzionato nel suo comportamento» (Berti, 2010, p.120).

Secondo Berti e Pia (2006) questi soggetti sono ancora in grado di dare avvio ad un programma motorio ma non riescono a rilevarne la discrepanza con quella che è la loro realtà motoria. Non si tratta di difficoltà ascrivibili alle strutture cerebrali legate all'intenzionalità del movimento ma ad una struttura definita "*il comparatore*".

A tal proposito Berti afferma:

Proponemmo allora che queste aree potessero rappresentare le basi neurali di quel meccanismo di controllo motorio, il comparatore, che avrebbe il compito di confrontare la previsione di movimento con i feedback sensoriali. Un danno diretto al comparatore spiegherebbe come mai i pazienti non sono più in grado di distinguere tra la condizione di movimento e la condizione di non movimento [...]. In altre parole la nostra ipotesi è che i pazienti anosognosici potrebbero avere esperienza dei movimenti che intendono produrre grazie all'attività delle aree risparmiate dalla lesione coinvolte negli aspetti intenzionali del movimento, ma non sarebbero in grado di distinguere tra atto intenzionale e atto effettivamente compiuto a causa del danno al comparatore [...]. (Berti, 2010, pp.130-132).

I soggetti con *anosognosia per l'emiplegia* non riconoscono di non essere in grado di eseguire una certa azione ma continuano ad avere esperienza dei movimenti che vogliono svolgere. Un danno al comparatore potrebbe quindi giustificare la falsa credenza del paziente di essere ancora in grado di muovere gli arti controlaterali alla lesione (cfr Berti, 2010, pp.133-134).

Il modello del comparatore potrebbe essere utilizzato per spiegare alcuni aspetti del disturbo schizofrenico, in particolar modo i problemi che alcuni soggetti sperimentano quando sono chiamati a correggere un'azione senza la possibilità di

riferirsi al feedback esterno. Questi soggetti sentono di non essere gli autori delle azioni che eseguono e sostengono che i loro movimenti siano indotti da altri o dall'esterno a causa di una compromissione a carico di quel meccanismo sul quale verrebbe a costituirsi la sensazione dell'agente di essere tale.

I processi neurali alla base di questo meccanismo coinvolgono le aree implicate negli aspetti intenzionali dell'azione e non quelli legati alla performance come precedentemente osservato nel caso dell'anosognosia per l'emiplegia.

Nonostante il senso di proprietà e quello di azione differiscano sul piano della loro fenomenologia e dei correlati neurali che li sottendono, il modo in cui percepiamo il nostro corpo consta di entrambe le esperienze e rimanda ad un senso di sé unitario che può essere investigato sperimentalmente dissociando queste due componenti basilari del sé corporeo.

Sembra che il senso di proprietà possa essere sperimentato anche nei casi in cui viene sfruttato solo il canale propriocettivo attraverso la rimozione di input di natura visiva e tattile (Moseley et al.,2008).

Botvinick e Cohen (1998) attraverso il paradigma della Rubber Hand Illusion hanno mostrato che la rappresentazione corporea può essere modulata sfruttando la sincronia di informazioni tattili, visive e propriocettive, al punto che un soggetto può sentire la mano di gomma come parte del proprio corpo. Ma quali sono i fattori alla base dell'emergere del senso illusorio di proprietà nei confronti della mano di gomma?

A tal proposito è possibile distinguere due approcci differenti: il primo, quello *bottom-up*, ritiene che la sincronia e l'integrazione delle diverse informazioni sensoriali sia sufficiente a generare l'illusione, mentre l'altro, quello *top-down*, si basa sul ruolo svolto dalle mappe corporee preesistenti all'interno delle quali la mano di gomma verrebbe incorporata (Tsakiris, 2010).

Ehrsson e colleghi (2004) hanno rilevato che una minaccia diretta alla mano artificiale conduce ad una aumentata attivazione delle aree coinvolte nella consapevolezza corporea e che questa attivazione è maggiore nei soggetti che sperimentano una maggiore illusione di appartenenza.

Il senso di azione, ossia la sensazione fenomenica di essere colui che genera un determinato movimento, sembra scaturire dal comando motorio efferente mentre il feedback sensoriale che risulta dal movimento effettivo risulta importante per la rilevazione di eventuali errori connessi al movimento.

Il processo di auto-attribuzione di un'azione è quindi il risultato della corrispondenza tra il comando motorio e il feedback sensoriale (Tsakiris (2005)).

## **2.2 Quale relazione tra proprietà e azione?**

L'integrazione multisensoriale sembra contribuire all'autocoscienza corporea e risulta importante per il continuo e corretto aggiornamento della nostra rappresentazione corporea. Inoltre, a seconda delle azioni che eseguiamo, le diverse modalità sensoriali possono convergere o prevalere nell'analisi di specifici aspetti contestuali.

Nel paradigma dell'illusione della mano di gomma il sentimento soggettivo di proprietà e la deriva propriocettiva a favore della mano artificiale si basano sulla loro congruenza spazio-temporale delle diverse informazioni sensoriali. Alcune modalità sensoriali, come la visione, sembrano giocare un ruolo determinante per la proprietà del corpo mentre il contributo di altre modalità, come quelle vestibolari e interocettive, rimane in parte inesplorato.

Uno studio condotto da Lopez e colleghi (2010) ha mostrato che, nei casi di ambiguità sensoriale, la stimolazione vestibolare contribuisce a modulare i processi di integrazione multisensoriale a favore della visione riducendo la precisione delle informazioni di natura propriocettiva. Si tratta di un risultato interessante che suggerisce un ruolo non marginale del sistema vestibolare nell'elaborazione dei diversi segnali provenienti dal corpo.

Il senso di proprietà del corpo dipende anche da fonti interocettive che forniscono informazioni sullo stato fisiologico del corpo.

La sensazione che il mio corpo mi appartiene non viene a costituirsi solo sulla base di processi relativi a fonti esteroceettive ma anche su quelli legati a processi interni.

Quando un soggetto sperimenta il senso di proprietà nei confronti della mano artificiale, questa esperienza è spesso seguita da variazioni fisiologiche a carico della

mano reale che si esprimono in una riduzione della temperatura della pelle come dimostrato da Moseley e colleghi (2008).

Questo risultato suggerisce che nel momento in cui un soggetto incorpora l'arto artificiale all'interno della propria rappresentazione corporea, la mano reale tende a non essere più percepita come la propria.

L'interruzione del senso di proprietà, come conseguenza di specifiche variazioni fisiologiche, potrebbe essere alla base di molte delle sensazioni sperimentate da soggetti con neuropatie periferiche di vario tipo nonché di patologie caratterizzate dal rifiuto dei propri arti.

La relazione tra sistemi interocettivi ed esteroceettivi, e il loro specifico contributo all'autocoscienza corporea, è principalmente basato su processi che sembrano a contribuire a generare un sé corporeo più unitario e integrato (cfr. Tsakiris, 2017). L'interocezione, in particolar modo, risulta determinante per una rappresentazione stabile del corpo che poi verrebbe integrata da informazioni esteroceettive che nel loro insieme strutturano l'esperienza fenomenica del corpo *come il mio*.

Ricerche future potranno meglio chiarire il ruolo svolto dalle diverse informazioni sensoriali nella nostra percezione del corpo e sul modo in cui queste informazioni si integrano tra loro al fine di garantire una rappresentazione corporea costantemente aggiornata.

La consapevolezza che ognuno ha del proprio corpo è estremamente opaca nel senso che agiamo con il nostro corpo ma raramente la nostra attenzione verte su di esso.

Il senso di ownership (*SoO*) descrive la sensazione di appartenenza che sperimentiamo verso il nostro corpo e le parti che lo caratterizzano: quando affermiamo che *questa è la nostra mano* non facciamo altro che riferirci alla sensazione di certezza che contraddistingue questa esperienza.

Sappiamo che questa sensazione può essere manipolata attraverso diversi paradigmi sperimentali e quello più conosciuto è certamente l'illusione della mano di gomma di Botvinick and Cohen (1998).

Come precedentemente affermato, l'illusione di appartenenza nei confronti di una mano artificiale viene a costituirsi sulla base di differenti informazioni sensoriali che includono quelle di natura tattile, visiva e propriocettiva, ma affinché emerga il senso

di proprietà è importante che vengano soddisfatti dei vincoli di natura spaziale, anatomica e posturale.

Tsakiris (2008) ritiene sia possibile evocare il SoO verso oggetti a forma di corpo e che la distanza tra la mano del partecipante e la mano di gomma potrebbe influire sulla forza dell'illusione a prescindere dal tipo di set up utilizzato, sia esso di tipo orizzontale o verticale (Kalckert e Ehrsson, 2014).

Un altro aspetto importante riguarda la posizione della mano di gomma che deve trovarsi in una posizione congruente a quella del partecipante, infatti, come vedremo successivamente, quando la mano viene ruotata di 180° rispetto a quella del partecipante l'illusione non si realizza o si realizza debolmente (Braun et al., 2016., Kalckert e Ehrsson, 2012).

Il paradigma delle Rubber Hand Illusion (RHI) permette quindi di generare una sensazione illusoria di proprietà nei confronti della mano di gomma sfruttando la contiguità temporale di differenti input sensoriali (Botvinick e Cohen, 1998; Tsakiris e Haggard, 2005) mentre stimolazioni asincrone non generano alcun senso illusorio di proprietà.

Il senso illusorio di proprietà nei confronti della mano di gomma può svilupparsi diversamente tra i soggetti sottoposti al paradigma mettendo in luce alcune differenze individuali.

La suggestionabilità sensoriale, ad esempio, potrebbe aumentare il sentimento soggettivo di proprietà come indicato da uno studio condotto da Marotta e colleghi (2016) il quale ha mostrato che gli individui più suggestionabili tendono ad attribuire punteggi di proprietà più elevati rispetto agli individui poco suggestionabili.

Kalckert e Ehrsson (2012) hanno ideato un set up sperimentale nel quale una mano artificiale e la mano vera del partecipante sono collegate verticalmente con un elastico che fa muovere l'indice destro delle due mani in modo sincrono.

I movimenti sincroni eseguiti dal partecipante evocano un forte senso di proprietà e di azione sulla mano artificiale che è l'unica posizionata alla vista del soggetto mentre i movimenti passivi indotti dallo sperimentatore sopprimono il senso di azione ma non quello di proprietà.

Gli stessi studiosi (2017) hanno utilizzato questo paradigma, conosciuto con il nome di *Moving Rubber Hand Illusion*, allo scopo di indagare i tempi di insorgenza del senso di proprietà.

I risultati hanno mostrato un tempo maggiore per l'insorgenza dell'illusione nel caso della condizione passiva rispetto a quella di movimento attivo mentre, al contrario, nessun risultato significativo è emerso nella condizione di asincronia.

Ancora da esplorare l'influenza dei processi motori sulla propriocezione soprattutto alla luce dei risultati ottenuti che non evidenziano una significativa differenza di risultati in termini di proprietà nelle condizioni attive e passive, nonostante si rilevi uno spostamento propriocettivo a favore della mano di gomma non trascurabile (cfr. Kalckert e Ehrsson, 2017).

Sempre Kalckert e Ehrsson (2014) hanno condotto una ricerca finalizzata a valutare eventuali differenze nelle tre modalità previste dalla *Moving Rubber Hand Illusion*: movimento attivo, movimento passivo, stimolazione visuo-tattile.

I risultati delle tre diverse condizioni non mostrano risposte notevolmente differenti in quanto il livello di proprietà è generalmente lo stesso mentre per quanto concerne l'azione i movimenti attivi mettono in atto un meccanismo di copia, favorendo l'illusione.

La somiglianza tra i livelli di illusione nelle diverse modalità potrebbe indicare che non sussistono dei precisi segnali di afferenza alla base del funzionamento dell'illusione stessa, bensì, ciò che fa la differenza sarebbe la relazione spaziotemporale tra tutti i segnali disponibili (Kalckert e Ehrsson, 2014).

Ehrsson e colleghi (2005) puntano l'attenzione sulla versione somatica dell'illusione della mano di gomma in cui i soggetti sono bendati ed entrano in contatto con una mano destra di gomma attraverso la propria mano sinistra. In questo caso la visione non entra dunque in gioco eppure si ottiene l'illusione, esattamente come si sono riscontrati buoni risultati in un'altra versione dell'esperimento in cui venivano eliminati i segnali somatosensoriali provenienti dalla superficie epidermica attraverso l'anestetizzazione del dito, puntando invece sulla propriocezione e la percezione visiva (Walsh et al., 2011).



Non si tratta quindi di misurare la quantità di segnali disponibili quanto di garantire la congruenza tra gli stessi quando provengono da canali differenti.

Per quanto riguarda il senso di azione, ottenuto anche nelle condizioni di asincronia, probabilmente a giocare un ruolo fondamentale è stata l'intenzione volontaria che si manifesta prima del feedback esterno. Infine, la tendenza dei partecipanti a negare l'azione con meno forza nelle condizioni passiva e visuo-tattile sincrone rispetto a quelle asincrone suggerisce una correlazione tra il senso di proprietà e quello di azione (Ehrsson et al., 2005).

Nel paradigma dell'illusione della mano di gomma in movimento l'esecuzione da parte del soggetto del doppio tocco con l'indice della mano destra non ha limitato la deriva propriocettiva a favore della mano di gomma, che è stata alta nelle condizioni congruenti e bassa o nulla nelle condizioni incongruenti.

Uno studio di Braun e colleghi (2014) ha indagato l'effetto del legame intenzionale nelle azioni auto-generate rispetto alle azioni osservate, riscontrando un'influenza maggiore del fattore agente. Questo risultato potrebbe essere spiegato facendo riferimento all'esistenza di una differenza nei tempi di elaborazione delle azioni nelle quali un soggetto è o meno l'autore, come pure dal fatto di percepirle effettivamente come azioni auto-generate e dunque incarnate (cfr. Braun et al., 2014).

Un altro studio interessante è quello condotto da Marotta e colleghi (2017) su soggetti con disturbi funzionali del movimento sottoposti al paradigma dell'illusione della mano di gomma nella versione proposta da Kalckert e Ehrsson (2012).

Questi soggetti presentano gli stessi risultati del gruppo di controllo con aumento del senso di proprietà e di quello di azione nella condizione sincrone attiva, assenza di quest'ultimo nella condizione incongruente e soppressione dell'azione nelle condizioni passive.

Questi risultati dimostrano che il senso di azione e quello di proprietà risultano preservati nell'ambito dei disturbi motori di natura funzionale ipotizzando che l'azione sia preservata da una differente influenza di fattori cognitivi sui movimenti volontari (cfr. Marotta et al., 2017).

La relazione tra il senso di proprietà e quello di azione sarà oggetto di indagine di questo lavoro attraverso l'analisi dei risultati di un esperimento volto ad indagare questo specifico aspetto.

Sembrerebbe infatti che l'azione sia in grado di modulare la proprietà e che l'effetto di tale rinforzo produca un senso di *ownership* del corpo più forte, nel nostro caso, nei confronti della mano di gomma.

Questi risultati dimostrano che la capacità di controllare l'azione ha importanti effetti anche sulla proprietà del corpo, tuttavia, non esiste un accordo in tal senso in quanto queste due componenti del sé corporeo fanno capo a differenti network cerebrali e sono esperienze qualitativamente differenti seppur esperibili in modo congiunto.

Gli studi sperimentali condotti in merito all'ipotesi di una correlazione positiva tra movimento attivo e aumento del senso illusorio di proprietà nei confronti di un arto artificiale non convergono infatti verso risultati chiari e coerenti.

Kokkinara e Slater (2014) hanno rilevato un aumento del senso di proprietà nei confronti di una gamba virtuale nella condizione di movimento rispetto alla stimolazione visuo-tattile mentre Dummer e altri colleghi (2009) hanno riscontrato una maggiore tendenza in termini di illusione di proprietà nella condizione di movimento passivo.

La ragione di questi risultati potrebbe risiedere nelle misure utilizzate o nel set up sperimentale che influenzerebbe il tipo di indagine da svolgere, favorendo la rilevazione di aspetti legati a configurazioni statiche del corpo a discapito di quelle dinamiche, come i movimenti attivi, che risulterebbero piuttosto limitati e non concretamente valutabili. Per tale ragione, molti approcci puntano sulla realtà virtuale in quanto permettere di indagare la relazione tra azione e proprietà del corpo in modo più ampio e attraverso la simulazione con diversi oggetti virtuali (Vives et al., 2010., Ma e Hommel, 2013).

Lo scopo principale è dunque quello di indagare se i movimenti attivi siano in grado di generare un senso più forte di proprietà nei confronti della mano di gomma. Studi precedenti hanno mostrato che l'azione potrebbe modulare e rafforzare l'illusione di proprietà sperimentata nei confronti della mano artificiale mentre in assenza di

informazioni di natura efferente le informazioni di natura visiva e propriocettiva sono sufficienti a generare l'auto-attribuzione.

Entrambe queste due componenti possono quindi sussistere l'una senza l'altra ma le informazioni di natura efferente sembrano contribuire a modulare la proprietà e a generare un senso più globale di auto-attribuzione corporea (cfr. Tsakiris et al., 2007).

### **2.3 Schema corporeo e immagine corporea**

Quando svolgiamo qualche tipo di attività, come ad esempio suonare uno strumento musicale, non abbiamo bisogno di pensare alla corretta posizione che le nostre dita devono assumere per permetterci di eseguire un determinato tempo; se ciò accadesse, la nostra prestazione musicale non sarebbe efficiente.

Ciò è reso possibile dall'esistenza di uno schema corporeo caratterizzato da un insieme di conoscenze relative alla posizione del corpo nello spazio.

Una prima distinzione tra la nozione di schema corporeo e quella di immagine corporea fa riferimento alla natura olistica delle rappresentazioni che strutturano lo schema corporeo mentre quelle riferite all'immagine corporea sembrano fornirci una rappresentazione parziale del corpo e sono di natura riflessiva.

L'esigenza di distinguere tra diverse rappresentazioni corporee nasce dal fatto che la dimensione della corporeità appare a tratti connotata da processi che si svolgono al di fuori della consapevolezza mentre in altri casi diviene prepotentemente oggetto di riflessione e attenzione.

Il concetto di schema corporeo e quello di immagine corporea sono stati spesso usati in modo intercambiabile ma esiste un accordo nel ritenere che una possibile distinzione tra i due concetti sia da attribuire alla natura non cosciente delle rappresentazioni, le quali ricadono sotto la nozione di schema corporeo e la natura cosciente di quelle relative al concetto di immagine corporea.

L'informazione propriocettiva risulta determinante per l'aggiornamento della posizione del corpo nello spazio mentre quella visiva è alla base della percezione dell'immagine corporea (Paillard, 1997).

Oltre alle informazioni di natura propriocettiva anche quelle tattili e visive contribuiscono all'aggiornamento dello schema corporeo e ogni nuova informazione viene elaborata e utilizzata per rispondere alle esigenze del contesto d'azione allo scopo di mantenere una coerente organizzazione della rappresentazione corporea e garantire il corretto funzionamento dello schema corporeo.

Il concetto di schema corporeo e quello di immagine corporea possono dunque essere rispettivamente definiti come un insieme di processi sensori-motori e un set di rappresentazioni di tipo cognitivo-affettivo.

Secondo Head e Holmes (1911/1912) lo schema corporeo comprende al suo interno lo *schema posturale* relativo alla posizione del nostro corpo nello spazio, lo *schema superficiale*, coinvolto nella localizzazione degli stimoli sensoriali sulla superficie cutanea, e *l'immagine corporea* che fa riferimento alle rappresentazioni corporee di natura conscia che elaboriamo sul nostro corpo.

Le informazioni propriocettive provenienti da fonti cinestesiche, visive, muscolari, articolari e cutanee, così come dalle funzioni vestibolari e dell'equilibrio, contribuiscono a strutturare lo schema corporeo che risulta essenziale per muoversi, orientarsi, eseguire azioni, riconoscere parti del proprio corpo (Gallagher e Cole, 1995).

De Vignemont (2010) sostiene che lo schema corporeo è costituito da rappresentazioni sensori-motorie finalizzate all'azione e presenta capacità *di plasticità* in quanto può essere esteso per incorporare in sé strumenti, dispositivi protesici, oggetti incorporei. Inoltre, l'inclusione temporanea di oggetti all'interno del proprio schema corporeo è soggetta all'effettivo uso che se ne fa, infatti «lo strumento non è tale se non nella misura in cui "si lega" a un arto e nella misura in cui questo legame, per quanto non cinestetico, partecipa alle cinestesie dell'arto stesso» (Petit J.L, 2009, p.170).

Berlucchi e Agliotti (1997) suggeriscono l'esistenza di una conoscenza implicita della struttura del corpo che avrebbe origine innata a prova del fatto che già dopo alcune ore dal parto i neonati possono imitare i movimenti oro-facciali e della testa eseguiti da un adulto posto di fronte a loro, mentre Paillard (1999) opera una distinzione tra schema corporeo come rappresentazione finalizzata all'azione e

immagine corporea come quell'insieme delle conoscenze esplicite che si hanno sul proprio corpo.

Carruthers (2008) distingue tra rappresentazioni del corpo *on-line ed off-line*: le prime si basano sull'insieme delle informazioni tattili, vestibolari, cinestetiche e propriocettive, mentre le seconde si costituiscono sulla base delle conoscenze esplicite che abbiamo del nostro corpo.

Lo schema corporeo è importante per il controllo della postura e l'aggiornamento della posizione del corpo nello spazio mentre il concetto di immagine corporea fa riferimento ad una rappresentazione consapevole del corpo basata in prevalenza su informazioni di natura visiva.

Schilder (1995) utilizza i concetti di schema e immagine corporea in modo speculare riferendosi alla rappresentazione mentale che ognuno di noi costruisce sul proprio corpo mentre altri autori, come Gallagher (2005), effettuano delle differenze tra i due tipi di rappresentazione corporea sulla base del loro concettuale e non concettuale. L'immagine corporea è una rappresentazione cosciente relativa al proprio corpo mentre lo schema corporeo viene a costituirsi sulla base di rappresentazioni di carattere prevalentemente motorio.

Se provassimo a pensare alle innumerevoli azioni che compiamo quotidianamente e che ci vedono impegnati nello svolgimento di più attività, spesso in parallelo, potremmo domandarci quale grado di consapevolezza accompagna quelle esperienze. Lo schema corporeo, infatti, è il risultato dell'integrazione di input di diversa natura ed entra in gioco nell'ambito di tutte quelle azioni che sembrano svolgersi al di fuori della nostra attenzione cosciente. Con ciò, non si sta affermando che tutte le azioni che eseguiamo non richiedano processi coscienti quanto piuttosto che molti programmi motori, come vedremo nel prossimo capitolo, necessitano di attenzione cosciente sono nelle prime fasi e quasi sempre questo tipo di attivazione è di natura preriflessiva.

Siamo senz'altro consapevoli di agire ma l'accesso al contenuto di questi processi coscienti rimane nascosto e non è di natura riflessiva. In accordo con Gallagher (2005) lo schema corporeo funziona in modo pragmatico ed è quello che ci permette

di intrattenere una conversazione quando siamo alla guida di un'auto senza che ciò comprometta la nostra prestazione.

Riassumendo, lo schema corporeo opera in modo implicito e quasi automatico sebbene alcuni processi possano diventare oggetto della nostra attenzione consapevole; in condizioni normali lo schema corporeo opera in modo indipendente dalla volontà cosciente rendendo fluide e accurate le nostre performance (cfr. Gallagher, 2005).

### **2.3 Patologie della rappresentazione corporea**

Le due componenti del sé corporeo, il senso di azione e quello di proprietà, generalmente vengono esperite come facenti parte di un'unica dimensione globale ma possono essere intaccate a più livelli generando la sensazione di sentirsi disincarnati o modificando l'abituale modo di vivere le proprie sensazioni corporee.

Nel caso di un disturbo chiamato *somatoparafrenia* alcuni soggetti negano la proprietà dei loro arti e possono attribuirli ad un altro individuo mentre nell'*autotopoagnosia* un soggetto perde la capacità di individuare le parti del proprio corpo.

Nell'*emisomatoagnosia*, causata da una lesione cerebrale destra, i pazienti non sono più in grado di riconoscere come propria la metà sinistra del loro corpo (Bisiach et al., 1986) mentre nella sindrome della mano anarchica i pazienti riferiscono che la propria mano agisca al di fuori del loro controllo e della loro volontà.

Esiste una condizione nella quale un soggetto ha la sensazione di possedere più arti (*arti soprannumerari*), condizione che potrebbe essere determinata dalla non corretta integrazione del comando motorio con il feedback afferente (Wolpert et al., 1995).

Tutti questi disturbi esprimono una compromissione nella rappresentazione del proprio corpo che si traduce nell'impossibilità di far uso di determinate informazioni sensoriali necessarie per mantenere un adeguato controllo motorio e una corretta rappresentazione spaziale.

Generalmente le aree cerebrali coinvolte sono quelle implicate nell'integrazione di tutte le informazioni sensoriali che ci permettono di percepire il nostro corpo momento per momento in modo fluido (Bruno et al., 2010).

Uno studio condotto da Park e colleghi (2011) su alcuni soggetti con disturbo schizofrenico sottoposti al paradigma dell'illusione della mano di gomma ha mostrato una maggiore suscettibilità a sviluppare un senso di proprietà illusorio nei confronti della mano artificiale rispetto a quello sperimentato da soggetti sani. In questi casi l'illusione sembra radicarsi all'interno di una rappresentazione corporea più malleabile, espressione di un senso di sé corporeo più debole e meno saldo.

Potrebbe anche accadere che, in seguito ad un incidente che comporta l'amputazione di un arto, un soggetto continui ad avvertire la presenza sperimentando dolore e fastidio. Come si spiega un simile fenomeno?

Ramachandran (2011) ha concentrato la propria attenzione su questa particolare sindrome ipotizzando che alla base delle sensazioni sperimentate da un soggetto che ha perso un arto vi sia una riorganizzazione nel cervello delle connessioni nervose. Le informazioni sensoriali relative al corpo vengono elaborate nella corteccia somatosensoriale localizzata nel lobo parietale dove è presente una mappa somatotopica del corpo.

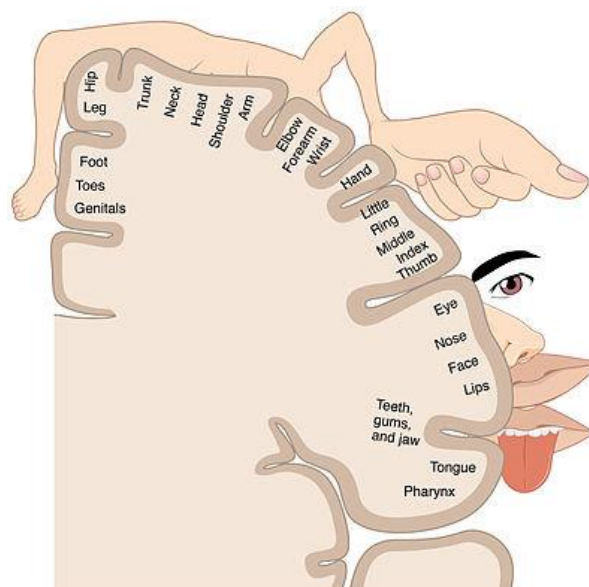


Fig. 1. *Homunculus somatosensoriale*

[https://en.wikipedia.org/wiki/Cortical\\_homunculus](https://en.wikipedia.org/wiki/Cortical_homunculus)

Per via della vicinanza, in questa mappa somatotopica, tra l'area della mano e l'area del volto, quando un braccio viene amputato e non riceve più segnali gli stimoli provenienti dalla pelle del viso si estendono nello spazio corticale lasciato libero dall'arto mancante e i segnali provenienti dal volto vengono erroneamente interpretati come provenienti dall'arto mancante (cfr. Ramachandran, 2011, p.18).

Sembra che il segnale efferente possa generare la sensazione di movimento nell'arto fantasma in quanto i comandi motori vengono comunque utilizzati per aggiornare la posizione dell'arto mentre l'assenza del feedback afferente può condurre nel tempo ad un adattamento alla nuova condizione e condurre il paziente a non sperimentare più la presenza dell'arto amputato.

Ramachandran ha suggerito l'esistenza nel nostro cervello di importanti meccanismi di plasticità delle mappe corporee, come peraltro osservato nel fenomeno della paralisi appresa. Tale fenomeno è stato dimostrato attraverso un esperimento che consiste nell'utilizzo di uno specchio che riflette la mano destra del soggetto nel punto esatto dove dovrebbe trovarsi l'arto mancante, con la richiesta di compiere alcuni movimenti sotto controllo visivo. Tale procedura si è dimostrata in grado di generare la motilità dell'arto fantasma e di ridurre le sensazioni spiacevoli ad esso associate (cfr. Ramachandran, 2011, p. 21).

Questo esperimento dimostra come l'autocoscienza corporea, che si esprime in termini di coscienza prerenale per la maggior parte della nostra vita quotidiana, sia il risultato dell'integrazione di input di diversa natura che ci forniscono un continuo aggiornamento sullo stato funzionale delle diverse parti del corpo.

Un altro caso interessante è quello riportato da Sacks (2011) in riferimento alla storia di un uomo che una mattina, svegliandosi, trovò nel letto una gamba che sembrava perfettamente umana ma che era *strana e fredda*. Provò a gettarla fuori dal letto senza successo, ed esclamò, rivolgendosi al Dottor Sacks:

La guardi! Non è orribile? [...] Sembra attaccata e me! (Così afferrò la gamba con le mani cercando con violenza di strapparsela dal corpo). Sacks lo interruppe: Adagio! Calma! Non si agiti così. Fossi in lei non prenderei a pugni così quella gamba. E perché no? Chiese lui



stizzito. Perché è sua, non riconosce la sua gamba? [...] Mia Dottore? Non crede che uno dovrebbe saper riconoscere la sua gamba? (Sacks, 2011, p. 85).

L'uomo ha perso la capacità di riconoscere la gamba come parte del proprio corpo e appare infastidito dal tentativo del medico di attribuirgli il possesso di qualcosa che lui non è più in grado di percepire come appartenente a sé.

L'autocoscienza corporea, quale fondamento preriflessivo della coscienza di sé, può infatti essere compromessa a più livelli sulla base della localizzazione della lesione.

Questi casi riflettono le considerazioni svolte in precedenza sul senso di proprietà e su quello di azione che verrebbero a costituirsi sulla base delle informazioni provenienti dallo schema corporeo e dall'immagine corporea.

Queste due forme di certezza corporea, pur esprimendosi nella forma unitaria che caratterizza l'esperienza di sé così come la viviamo ordinariamente, sono articolate al loro interno secondo un complesso livello di organizzazione ma si integrerebbero successivamente sotto forma di "*flusso unitario*" per determinare il modo in cui quotidianamente facciamo esperienza di noi stessi.

## **2.5 Propriocezione e contributo cerebellare**

L'esperimento di Libet (1985) è uno dei più citati nell'ambito degli studi sulla coscienza perché ha permesso di scoprire che l'attivazione cerebrale durante l'esecuzione di un compito, precede di qualche millisecondo l'insorgere della sensazione cosciente connessa all'intenzionalità del movimento.

La tecnica utilizzata è l'EEG che prevede l'applicazione di due elettrodi per registrare l'attività del cervello e le variazioni dell'attività cerebrale durante lo svolgimento di un compito; i risultati dell'esperimento hanno rilevato che le aree deputate all'esecuzione del movimento si attivano circa mezzo secondo prima che ne diventiamo consapevoli.

Ciò ha avuto importanti ripercussioni in merito alla questione del libero arbitrio seppure sia possibile considerare che il tempo soggettivo di risposta potrebbe anche non corrispondere a quello misurato con le metodiche d'indagine utilizzate negli studi neuroscientifici.

Spostando l'attenzione sul piano dei processi automatici sembra che le informazioni propriocettive giochino un ruolo determinante: immaginiamo di compiere ogni azione con il vincolo di dover prestare attenzione ad ogni singolo movimento; probabilmente falliremmo in qualsiasi altra azione volessimo eseguire in parallelo e la nostra performance non risulterebbe efficiente perché costretta all'esercizio di un continuo controllo cosciente. Fortunatamente gran parte delle nostre azioni è controllata da processi sub personali che rientrano nello schema corporeo e si collocano al di sotto della soglia della coscienza. (Gallagher e Zahavi, 2009).

Il sistema propriocettivo è una delle principali basi di funzionamento dello schema corporeo e una sua compromissione potrebbe alterarne la normale funzionalità; sapere dove il nostro corpo e le sue parti si trovano ci permette di eseguire azioni accurate senza doverle monitorare da un punto di vista attentivo.

La propiocezione è un sistema sensoriale che opera in modo implicito, in un continuo scambio di informazioni tra le varie parti del nostro corpo e il nostro cervello. I risultati di questo scambio continuo ci informano sulla posizione del nostro corpo nello spazio permettendoci di mettere in atto tutta una serie di accorgimenti posturali senza esserne di fatto coscienti.

Il legame tra propiocezione e contributo cerebellare è stato indagato soprattutto nei casi di pazienti con lesioni o anomalie del cervelletto e che presentano deficit nel controllo dei movimenti e nella capacità di percepire la posizione del proprio corpo e prevedere le conseguenze sensoriali del movimento. Più precisamente quando un comando motorio viene inviato dal cervello ai muscoli, una copia di quel segnale, detta *copia efferente*, viene contemporaneamente inviata ad un sistema chiamato comparatore che ha il compito di confrontare la previsione di movimento con il feedback sensoriale proveniente dalla periferia.

Se le aspettative di feedback non vengono violate, nel senso che tra la stima compiuta dal modello della copia efferente e quanto effettivamente eseguito non si rilevano discrepanze, l'azione procederà senza problemi; in caso contrario il cervelletto rileverà eventuali errori ed invierà alle strutture responsabili del movimento le informazioni necessarie per la sua corretta esecuzione.

Tutto ciò sarà accompagnato da un aumento dell'attività cerebellare (Blakemore et al., 2001) mentre i movimenti autoprodotti, al contrario, non determinano alcun aumento dell'attività cerebellare (Blakemore et al., 1999).

Uno studio molto recente ha preso in esame la relazione tra il senso di proprietà del corpo e l'attenuazione somato-sensoriale derivante dalla previsione basata sulla copia efferente del modello avanzato (Kilteni et al., 2017).

I risultati sono stati interessanti in quanto hanno mostrato che l'attenuazione somato-sensoriale è un indicatore della proprietà del corpo in quanto avviene solo in riferimento alle previsioni sensoriali relative ai movimenti del proprio corpo e non a quelli generati da altri.

Il tocco della nostra mano con l'altra, ad esempio, risulta meno intenso di quello che potrebbe scaturire dal tocco con un'altra mano e ciò avverrebbe perché il cervelletto è in grado di prevedere le conseguenze sensoriali del movimento e le sensazioni che ne scaturiscono risultano attenuate (Kilteni et al., 2017).

La capacità di percepire noi stessi è un aspetto fondamentale in quanto ci permette di differenziare il nostro corpo dall'ambiente rispetto agli stimoli ai quali siamo costantemente sottoposti; ciò avviene in seguito ad una complessa integrazione di segnali multisensoriali che portano alla formazione di una rappresentazione di sé e del proprio corpo nello spazio.

Il fenomeno dell'attenuazione sensoriale che scaturisce dalle previsioni basate sulla copia efferente riflette uno dei meccanismi base del controllo motorio che vede nell'esecuzione accurata e rapida dei nostri movimenti un meccanismo essenziale per effettuare una stima relativa alla posizione del corpo momento per momento.

## CAPITOLO III

### 3.1 Introduzione generale

Alcuni aspetti del nostro comportamento sono caratterizzati da processi che potremmo definire rapidi, automatici e realizzati in modo non conscio, mentre altri sono lenti, deliberati e attuati in modo consapevole.

Molte delle azioni che svolgiamo presentano componenti automatiche e vengono realizzate senza la necessità di un controllo cosciente.

In questo capitolo prenderò in esame il rapporto tra processi controllati e automatici con particolare riferimento al ruolo del cervelletto e alla componente procedurale che sembra accomunare processi cognitivi e motori, generalmente messi in contrapposizione.

L'interesse crescente sulla funzionalità cerebrale ha portato molti studiosi ad interessarsi allo studio delle aree che si attivano durante l'esecuzione di precisi compiti, prendendo in considerazione le possibili interazioni tra i diversi sistemi coinvolti. Si è notato che l'attivazione di una o più aree, era spesso associata all'esecuzione di processi cognitivi avviati in modo consapevole, mentre l'esecuzione di compiti che non richiedevano attenzione o sforzo cognitivo attivava aree differenti.

Lo studio della coscienza, da sempre considerato un fenomeno elusivo, ha visto negli ultimi anni convergere l'attenzione verso lo studio di quei comportamenti che ciascuno di noi adotta in modo automatico e non consapevole ma che si rivelano ugualmente efficienti nel contesto di realizzazione.

Quando svolgiamo una determinata azione avvengono tutta una serie di eventi simultaneamente e solo una piccolissima parte di questi è accessibile al soggetto.

L'attenzione svolge qui un ruolo importante e possiamo distinguerne due tipologie differenti, una endogena e l'altra esogena; l'attenzione endogena è quella che viene attivata da ciascuno di noi in modo intenzionale mentre quella esogena risponde alla capacità dell'organismo di attivarsi in modo automatico in relazione a stimoli esterni che catturano la nostra attenzione.

Secondo Perconti «questo tipo di esempio si verifica similmente al monitoraggio che mettiamo in atto mentre dormiamo, ma allo stesso tempo siamo comunque reattivi agli stimoli percettivi» (Perconti, 2015, p.47).

La ricerca neuropsicologica ci dimostra che molte lesioni possono compromettere l'elaborazione cosciente di uno specifico processo senza però danneggiare la coscienza per altri processi simili (cfr. Berti, 2010, p.26).

Molte informazioni vengono elaborate in modo del tutto automatico e gli studi svolti nell'ultimo decennio stanno comportando una vera e propria revisione scientifica non solo del rapporto tra azione e cognizione, ma anche del ruolo funzionale di aree cerebrali superiori e inferiori.

### **3.2 Processi controllati e automatici**

Schneider e Shiffrin (1977) hanno proposto una distinzione tra processi controllati e automatici sostenendo che i primi sono lenti e vincolati all'utilizzo di risorse cognitive, mentre i secondi sono più rapidi e svincolati dalla necessità di una costante attenzione e supervisione.

Quando vogliamo imparare ad andare in bicicletta, inizialmente dedichiamo molta attenzione ad ogni nostro atto, dal mantenimento dell'equilibrio al controllo dei movimenti; con il passare del tempo tutti questi passaggi saranno automatizzati e non avremo bisogno di prestare attenzione a ciò che stiamo facendo.

Il risultato di una pratica costante permette, quindi, il passaggio da processi di elaborazione consapevole e controllata a processi via via sempre più automatici che rientrano nella sfera procedurale.

Nella fase di apprendimento iniziale di una qualsiasi pratica, le prestazioni risultano caratterizzate da una maggiore lentezza e non sono immuni da frequenti errori che si riducono notevolmente dopo ripetuti tentativi.

Il fenomeno dell'elaborazione automatica permette un risparmio di risorse cognitive che potrebbero essere utilizzate per svolgere altri compiti o più compiti contemporaneamente.

Logan (1988) sostiene che i processi automatici vengono a costituirsi nel tempo perché la pratica costante con uno stimolo specifico lascia delle tracce mnestiche che ne consentono il rapido recupero in caso di nuova esposizione.

Alcuni processi automatici non richiedono alcuna iniziazione intenzionale e operano in modo indipendente dal nostro controllo cosciente; si tratta di processi che possono essere avviati da stimoli di cui non siamo ancora coscienti o da stimoli di cui siamo stati recentemente coscienti e non lo sono più (Bargh 1994).

Molti dei nostri comportamenti quotidiani sono automatici: sappiamo ad esempio che stiamo guidando verso casa ma non abbiamo bisogno di prestare attenzione ad ogni atto della guida in quanto l'esecuzione di un processo automatico non implica il coinvolgimento di risorse attentive e non interferisce con altri compiti cognitivi in corso.

Per comprendere meglio questo aspetto occorre riferirsi al segnale motorio che genera il movimento volontario innescato nella corteccia cerebrale, precisamente nella corteccia motoria. Quando questo segnale viene trasmesso ai muscoli, attraverso il midollo spinale, una copia di quel segnale viene inviata al cervelletto che riceve feedback sensoriali da varie parti del corpo.

Il passaggio dal movimento volontario a quello automatico avviene quindi con l'instaurarsi di una certa pratica motoria e le abilità padroneggiate sono memorizzate e riprodotte in modo automatico pur essendo possibile richiamarle volontariamente alla coscienza.

La coscienza dell'agente di essere tale, rispetto alle sue azioni, può comunque comportare un certo grado di intenzionalità implicita che resta sullo sfondo.

Come afferma Anna Berti: «Se, da un lato, è vero che alcuni aspetti automatici del comportamento vengono eseguiti in una condizione di relativa inconsapevolezza, è anche vero che [...] possiamo individuare in ogni momento l'intenzione che ci ha portati a eseguirla» (Berti A, 2010, p.110).

Quando camminiamo per dirigerci verso un determinato luogo o verso un oggetto, solitamente non esercitiamo alcun controllo sul movimento e non siamo consapevoli dei movimenti nei loro minimi dettagli.

Saremmo però capaci di attribuirci una certa azione sulla base di un'intenzionalità che è pur sempre presente anche se non in modo esplicito e consapevole (cfr. Gallagher, 2005).

Ma quali potrebbero essere i vantaggi di un sistema automatico caratterizzato da una modalità rapida e non consapevole di elaborazione degli stimoli?

Sicuramente l'efficienza e la capacità di operare senza spreco di risorse attentive insieme alla possibilità di generare risposte veloci e appropriate al contesto. Tra gli aspetti negativi l'assenza di flessibilità e di controllo rispetto alle risposte generate.

Di seguito viene brevemente riportata una caratterizzazione generale definita sulla base della distinzione tra i due sistemi (Evans, 2008).

#### **Sistema 1 (Riferito ai processi automatici)**

Non Consapevole
Implicito
Procedurale
Parallelo
Non concettuale
Pragmatico
Percettivo

#### **Sistema 2 (Riferito ai processi controllati)**

Consapevole
Esplicito
Dichiarativo

Seriale
Concettuale
Logico
Riflessivo

Diversi autori nei loro lavori scientifici (Fodor 2001., Schneider e& Schiffrin 1997., Evans 2006) hanno fatto riferimento a questa duplice modalità di funzionamento e alla differenza tra processi che sono rapidi, non coscienti, automatici, ed altri che sono deliberati, coscienti e lenti.

Un'altra differenza tra le caratteristiche dei sistemi sopra indicati viene posta in merito alla natura filogenetica dei processi che li caratterizzano. Il Sistema 1 viene definito come il più antico da un punto di vista evolutivo, mentre il Sistema 2 sarebbe il più recente anche in quanto comunemente associato con funzioni quali il pensiero, la coscienza, e il linguaggio (Evans, 2008).

Schneider e Shiffrin (1977) ritengono che *“l’automaticità”* sia il risultato della pratica costante nell’ambito di un compito che implica una coerente relazione tra stimoli e risposta e che un processo può definirsi automatico quando è svincolato dal requisito di un monitoraggio costante.

Bargh e Chartrand (1999) affermano che i processi automatici non possono essere unicamente confinati a processi percettivi di basso livello in quanto attività cognitive molto complesse possono svolgersi al di fuori della nostra consapevolezza cosciente. A tal proposito, uno dei nodi problematici nella distinzione appena operata risiede proprio nel fatto che molti processi cognitivi definiti di alto livello possono comunque svolgersi in modo implicito, infatti: «processi non consapevoli e di fondamentale importanza hanno luogo in ogni istante e condizionano le prime risposte che offriamo all’ambiente circostante [...]» (Gozzano, 2009, p.56).



Le teorie sull'esistenza di una duplice modalità di elaborazione delle informazioni sono aumentate nel corso degli ultimi anni, ma già nel 1890 James osservò come l'elaborazione automatica sia in grado di liberare la mente per altri compiti.

Nei lavori di Shiffrin, già a partire dagli anni '70, è stata posta molta attenzione allo sviluppo di un quadro teorico capace di fornire una spiegazione rispetto alle caratteristiche dei processi controllati e automatici.

Che i due processi interagiscano tra loro e che ciò implichi il coinvolgimento di differenti meccanismi neurali al fine di soddisfare le mutevoli e sempre diverse condizioni ambientali è da considerarsi, da una prospettiva evolutiva, largamente ipotizzabile.

L'elaborazione controllata è di tipo seriale e richiede il coinvolgimento di particolari risorse cognitive mentre quella automatica è di tipo parallelo, non risente di fattori connessi con l'affaticamento ed è poco flessibile ai cambiamenti. Ciò significa che se un compito verrà appreso, tenderà a svolgersi in modo automatico e in caso di modifiche nelle modalità di esecuzione occorrerà *ripristinare* il controllo cosciente attraverso un processo di monitoraggio.

Le prime volte che ci troviamo alla guida di un'auto prestiamo molta attenzione ai nostri movimenti e ne siamo perfettamente consapevoli, ma dopo un certo periodo di tempo acquisiamo la capacità di guidare e pensare alle cose da fare durante la giornata, all'amico da chiamare o alla lista della spesa da fare. In pratica, svolgiamo molte operazioni congiuntamente e tutto avviene senza un'attenzione consapevole rivolta alla guida.

Nel prossimo paragrafo prenderò in esame una serie di studi sul ruolo del cervelletto in ambito cognitivo soprattutto alla luce dei risultati che mostrano come quest'area cerebrale, da sempre considerata implicata nel controllo del movimento, svolga un ruolo rilevante anche per il funzionamento cognitivo.

### **3.3 Il ruolo del cervelletto**

La distinzione tra processi automatici e controllati, oltre che al livello di attenzione e consapevolezza richiesto, può essere posta anche in merito alle strutture cerebrali che vedono il cervelletto implicato in compiti di apprendimento procedurale.

Il cervelletto è collocato nella fossa posteriore della scatola cranica e la sua peculiarità risiede nel fatto che, nonostante non occupi molto spazio all'interno del sistema nervoso centrale, contiene più neuroni di tutto il resto del cervello. È diviso in due emisferi detti emisferi cerebellari e presenta diverse porzioni che si sono sviluppate progressivamente durante il corso dell'evoluzione.

La sua architettura risulta piuttosto uniforme ed è caratterizzata da uno strato granulare, uno strato piriforme costituito dalle cellule del Purkinje e uno strato molecolare dove troviamo i dendriti delle cellule del Purkinje.

Il ruolo originariamente attribuito al cervelletto è quello del controllo motorio: il cervelletto infatti risulta essenziale per la realizzazione di movimenti fluidi e accurati e ci permette di svolgere in modo rapido e veloce tutti quei movimenti che acquisiamo in seguito alla pratica ripetuta.

Masao Ito (1993) ha ipotizzato un coinvolgimento del cervelletto negli aspetti di apprendimento procedurale motorio in contrapposizione alle strutture cerebrali attive in compiti di apprendimento dichiarativo, come il lobo temporale medio e l'ippocampo.

Da sempre considerata un'area quasi prevalentemente specializzata nel controllo motorio il cervelletto sembra oggi trovare una nuova collocazione alla luce delle ricerche svolte da numerosi studiosi. Il suo coinvolgimento, infatti, sembra estendersi a domini che vanno dal linguaggio alla memoria, dall'attenzione al comportamento, fino ad includere processi di pensiero di ordine superiore.

La separazione tra azione e cognizione e più nello specifico, tra processi motori di ordine inferiore e processi cognitivi di ordine superiore, sembra quindi non trovare una valida ed esauriente spiegazione in virtù della constatazione che aree deputate al controllo motorio sembrano invece essere implicate anche in compiti di natura cognitiva.

Ciò è reso possibile dalle importanti connessioni anatomiche tra il cervelletto, la corteccia prefrontale e le aree associative da sempre considerate alla base dell'attività cognitiva intesa come l'insieme di quei processi grazie i quali siamo in grado di comunicare, interagire con gli altri, prestare attenzione, pianificare e ragionare.

Nonostante ciò, la separazione tra movimento e pensiero sembra però persistere forse in parte anche oggi a causa dei modelli dualistici che vedono contrapporre la mente al corpo contribuendo al mantenimento di un modello concettuale certamente superabile.

Il cervelletto interviene nelle fasi di acquisizione delle capacità motorie ossia nella fase in cui un movimento inizialmente oggetto di attenzione cosciente diviene via via sempre più rapido ed efficiente.

Uno dei modelli più influenti a tal proposito è quello di Marr (1969), il quale ritiene che quando un movimento generato a livello della corteccia cerebrale viene appreso e codificato nei circuiti cerebellari anche una debole attivazione sarà sufficiente a provocarne l'esecuzione.

L'analogia tra pensiero e movimento, proposta da Ito (2008) si baserebbe sulla capacità del cervelletto di creare modelli interni che simulano le caratteristiche degli "oggetti" controllati a livello cosciente, indipendentemente dalla loro natura. Questo processo simulativo permetterebbe al cervelletto di codificare questi modelli all'interno dei propri circuiti cosicché la corteccia sia in grado di esercitare il proprio controllo senza la necessità di affidarsi al feedback esterno e di conseguenza, in modo più veloce al di fuori del controllo cosciente (cfr. Ito, 2008).

Il cervelletto è una delle parti evolutivamente più antiche del cervello ha, come detto, più neuroni che tutto il resto del cervello combinato ed è una delle aree più attive come dimostrato dalle varie metodiche di scansione cerebrale.

Doya (1999) sostiene che il ruolo computazionale del cervelletto sia quello di acquisire attraverso l'apprendimento modelli interni non dipendenti dal contesto mentre secondo Leggio e Molinari (2015) il cervelletto ci permetterebbe di imparare modelli di comportamento in grado di anticipare efficacemente tutte quelle situazioni ripetitive.

Quest'ultimo riceve informazioni dai vari organi di senso e risulta fortemente connesso con molte aree del sistema nervoso centrale e periferico (Grafman, 1992). Il cervelletto rileva inoltre eventuali discrepanze tra l'azione progettata e quella reale, modificando il segnale motorio in uscita qualora vi fossero differenze tra il movimento programmato e quello effettivamente realizzato.

Secondo Akshoomoff (1992), il cervelletto codificherebbe da un punto di vista temporale tutte quelle sequenze di informazioni relative ad eventi interni ed esterni e la lettura di queste sequenze fornirebbe una prima informazione anticipatoria non consapevole.

Leiner e colleghi (1993) hanno ipotizzato che, nel corso dell'evoluzione, il cervelletto sia aumentato in termini di dimensioni e connessioni e che i circuiti modellati all'interno del cervelletto per la funzione motoria siano stati adattati anche per compiti cognitivi.

Il suo sviluppo filogenetico è avvenuto parallelamente a quello di aree corticali associative e l'idea che il cervelletto possa configurarsi esclusivamente come un dispositivo di controllo motorio appare riduttiva.

Le ricerche di Venditti e Barton (2014) hanno dimostrato che a differenza di altre aree cerebrali il cervelletto si è sviluppato più velocemente e potrebbe essere implicato in funzioni diverse da quelle gli vengono comunemente attribuite.

Sempre Barton (2012) suggerisce un'interessante ipotesi sensori-motoria delle capacità cognitive sostenendo che l'evoluzione cognitiva e quella motoria non sono separabili e che i circuiti cortico-cerebellari ne consentono il controllo e l'organizzazione.

Schmahmann e Sherman (1998) hanno riportato casi di pazienti con manifestazioni cognitivo-affettive e lesioni circoscritte al cervelletto. In seguito ai risultati ottenuti mediante diversi esami neurologici giunsero all'individuazione della sindrome cerebellare cognitivo-affettiva caratterizzata da deficit nelle funzioni esecutive, nella memoria di lavoro, nel linguaggio, nell'attenzione e nel comportamento.

Si tratta di sintomi generalmente attribuibili a lesioni corticali che fanno presupporre l'esistenza di connessioni anatomiche tra aree corticali e sottocorticali. Il cervelletto

quindi coordina i movimenti ma il suo ruolo sembra estendersi anche ad altri domini come dimostrato dal suo coinvolgimento nel controllo di alcuni compiti cognitivi.

Castrogiovanni e Lucarelli (2000) ritengono che il cervelletto possa configurarsi come un sistema in grado di rendere più veloci ed efficienti diverse operazioni mentali; nello specifico il cervelletto coordinerebbe varie funzioni al fine di rendere ogni attività cognitiva e motoria più fluente ed accurata.

Secondo Ito (2008) ciò sarebbe possibile grazie alla formazione di modelli interni che agirebbero codificando continuamente le relazioni tra le informazioni relative ai comandi motori e alle loro conseguenze.

L'idea che il cervelletto sia anche coinvolto nella regolazione delle funzioni cognitive attraverso l'esercizio di un'azione di controllo sull'attività svolta da aree corticali superiori appare certamente interessante, ma non sappiamo ancora come ciò possa avvenire da un punto di vista legato ai meccanismi neurofisiologici.

### **3.4 Modelli interni cerebellari**

Il cervelletto potrebbe espletare alcune delle sue funzioni modulando il comportamento al di sotto del livello di coscienza.

Si ipotizza che in seguito a pattern ripetuti di attivazione "*simili*" il cervelletto crea quelli che sono conosciuti come modelli interni, ossia rappresentazioni neurali che riproducono i movimenti di una parte del corpo o le caratteristiche di un particolare processo di pensiero. Di seguito una breve esemplificazione delle fasi di acquisizione di un modello interno cerebellare riferito a processi motori e cognitivi.

<b>Tipologia di funzione</b>	<b>Motoria</b>	<b>Cognitiva</b>
<b>Elementi di composizione del modello interno</b>	<b>Sequenze di azioni</b>	<b>Processi di pensiero</b>

<b>Risultato acquisizione del modello interno</b>	<b>Abilità motorie</b>	<b>Credenze, idee</b>
---	------------------------	-----------------------

Un sistema che funziona in questo modo presenta dei vantaggi: ci permette di snellire il carico cognitivo al quale saremmo sottoposti se dovessimo *imparare ex novo* ogni processo legato a determinate prestazioni motorie o a specifici compiti cognitivi. Idealmente potremmo immaginare questo tipo di dinamica funzionale: ci troviamo per la prima volta di fronte ad un nuovo compito e la prima cosa che facciamo è concentrarci su di esso tenendo a mente le informazioni che lo riguardano. Una volta che quel compito è stato acquisito, mediante ripetuti passaggi e attraverso diversi tentativi ed errori, non richiederà più alcuna attenzione consapevole e potremo dedicarci ad altro. Diremmo che quel compito è stato automatizzato e sarà dunque sganciato dall'esigenza di un controllo consapevole.

Immaginiamo due macrosistemi per esigenze esplicative:

Il sistema 1) deputato ad una prima elaborazione delle informazioni, funziona attingendo a risorse cognitive e attentive richiedendo quindi attenzione cosciente.

Il sistema 2) opera in modo non consapevole e senza richiedere al soggetto alcuna attenzione.

Generalmente in molte competenze acquisite ciò che avviene è il passaggio dal primo al secondo sistema in seguito ad un processo di apprendimento.

Secondo diversi studiosi questa struttura sottocorticale svolge un processo di apprendimento supervisionato: il cervelletto nelle prime fasi di apprendimento di un compito risulta molto attivo perché simulerebbe il processo in quel momento controllato e manipolato a livello della corteccia cerebrale.

Questa simulazione verrebbe realizzata attraverso la codifica, all'interno dei propri circuiti, di modelli interni che replicano quanto avviene a livello cosciente.

A livello del vissuto fenomenologico non esiste alcuna differenza tra il modo in cui esperiamo noi stessi da un punto di vista fisiologico e il modo in cui funzionerebbero

i nostri processi automatici; si tratta in ogni caso di processi che restano sullo sfondo e che non interferiscono con il nostro funzionamento generale.

Detto in altri termini, quando un comportamento viene automatizzato si colloca ad un livello di base che rispecchia, in modo molto generale, quello rappresentato dai nostri processi più basilari e fisiologici.

Così come alcune variazioni fisiologiche sono informative di un cambiamento nel nostro flusso interocettivo e possono segnalarci alterazioni della temperatura corporea o del battito cardiaco, allo stesso modo certi processi automatici possono diventare oggetto della nostra attenzione cosciente in quanto informativi di uno schema appreso che deve essere riadattato al nuovo contesto.

Ciò che è simile è che, in entrambi i casi, si tratta di processi *sotto-soglia* che da un punto di vista fenomenologico si svolgono ad un livello di funzionamento preriflessivo. Questi processi diventano oggetto di attenzione cosciente quando avviene una modificazione delle nostre condizioni corporee o quando un comportamento appreso deve essere modificato oppure riadattato al nuovo compito e contesto.

Tornando al ruolo del cervelletto, sono diversi gli studiosi che hanno sostenuto un suo coinvolgimento nell'ambito delle funzioni cognitive superiori basando le proprie considerazioni sulla stretta interconnessione tra il cervelletto e la neocorteccia e sul fatto che queste connessioni supportino un'ampia gamma di funzioni (Leiner et al., 1993).

L'uniformità anatomica della corteccia cerebellare potrebbe far pensare che il cervelletto sia implicato in un'unica e specifica funzione. In realtà questa uniformità anatomica, come sostenuto da Schmahmann (1991) rileva delle analogie nel tipo di operazione che il cervelletto esegue rispetto ad ambiti funzionali molto diversi tra loro.

Altri studiosi hanno analizzato il contributo cerebellare alla cognizione prendendo in esame alcune funzioni cognitive tra le quali il linguaggio: lesioni cerebellari possono generare deficit analoghi a quelli dell'afasia di Broca per via del legame strutturale e funzionale tra la corteccia frontale e quella cerebellare e la capacità di accedere al lessico mentale può risultare compromessa in seguito ad un danno cerebellare (Fiez

et al., 1992). La *fluenza* verbale invece è uno dei deficit maggiormente riscontrabili in bambini sottoposti all'asportazione di tumori cerebellari (Riva et al, 2000).

L'idea è che quelle che definiamo funzioni cognitive superiori altro non siano che un'estensione dei meccanismi di controllo motorio per mezzo dei quali siamo capaci di anticipare non solo quelle che sono le conseguenze di un movimento ma anche il comportamento altrui nell'ambito della cognizione sociale (cfr. Leggio e Molinari, 2015).

Il cervelletto sembra essere la struttura chiave di questo processo perché eseguirebbe la medesima operazione sulle informazioni indipendentemente dalla loro origine (Ito, 2011). Al contempo, la capacità di pensare in anticipo è caratterizzata da meccanismi di previsione e anticipazione e ciò appare in linea con quanto sostenuto da Ito quando afferma che quello che il cervelletto fa per il movimento, lo fa anche per il pensiero (cfr. Ito, 2008).

Uno dei meccanismi di controllo che il cervelletto utilizza nell'ambito dell'apprendimento motorio è conosciuto con il nome di *Forward Model*.

Si tratta di un modello di controllo motorio che permette di effettuare una stima delle possibili conseguenze sensoriali di un movimento sulla base delle informazioni precedentemente acquisite. Il feedback sensoriale viene successivamente utilizzato per migliorare e ottimizzare il movimento attraverso continui aggiustamenti e ripetuti tentativi. Una volta appreso, il movimento potrà realizzarsi in modo del tutto automatico, rapido e privo di errori, grazie alla creazione di un modello interno capace di riprodurre la dinamica dei movimenti del corpo senza doversi riferire al feedback sensoriale esterno (Ito, 2008., Ito, 2011).

### **3.5 Cervelletto e cognizione**

La capacità del cervelletto di creare modelli interni per il controllo non consapevole del comportamento potrebbe essere estesa anche al piano della cognizione come già sostenuto in precedenza.

Secondo diversi studiosi questi stessi meccanismi sono stati selezionati in quanto capaci di regolare e automatizzare il comportamento attraverso un feedback sensoriale anticipato (Koziol et al, 2012, Wolpert e Miall, 1996).



Il modello interno viene costantemente modificato, ad esempio durante l'acquisizione di una specifica abilità motoria, al fine di correggere eventuali sequenze e attraverso un processo di rilevazione degli errori. Quando quello specifico pattern motorio sarà acquisito, il modello interno codificato nel cervelletto verrà inviato alle aree corticali responsabili del movimento e ciò permetterà l'esecuzione di azioni più veloci e precise.

Vandervert (2016) propone un'interessante teoria che vede il progresso della cultura come il risultato dell'apprendimento di modelli interni cerebellari. Il cervelletto apprenderebbe questi modelli attraverso ripetuti miglioramenti nel controllo dei modelli interni cerebellari e ciò spiegherebbe i progressi legati all'avanzamento della cultura.

La prospettiva elaborata da Vandervert potrebbe inserirsi in continuità con quella di Ito (2011) che vede il cervelletto come implicitamente legato al senso di sé anche in virtù del fatto che svolge il suo ruolo al di fuori della consapevolezza cosciente.

Se all'inizio l'apprendimento per svolgere compiti motori o cognitivi si realizza sotto controllo cosciente, quando questi processi saranno raffinati attraverso la pratica ripetuta la consapevolezza sarà assunta dai modelli interni cerebellari (Ito, 2008).

L'esistenza di meccanismi in grado di velocizzare il comportamento in termini di efficienza e risparmio di risorse cognitive costituisce certamente un vantaggio e questa ipotesi negli ultimi anni è andata ad affiancarsi alla possibilità che un tale modello di funzionamento sia replicabile sul piano dei processi di pensiero.

Schmahmann (1991) è uno dei più noti sostenitori delle funzioni cognitive del cervelletto e ritiene che questa particolare area cerebrale utilizzi gli stessi meccanismi implicati nella nel controllo dell'attività motoria anche per funzioni definite di ordine superiore (Schmahmann, 1999, 1997, 2000); inoltre, un deficit circoscritto al cervelletto può portare a quella che viene definita sindrome cerebellare cognitivo-affettiva.

Anche altri studiosi hanno indagato il ruolo del cervelletto in ambito cognitivo ipotizzando un suo coinvolgimento nella modulazione del comportamento in funzione del contesto (Bloedel e Bracha, 1997).

I pazienti con lesioni cerebellari spesso presentano un quadro clinico caratterizzato da deficit quali dismetria, disartria e atassia, tuttavia, i danni cerebellari provocano in alcuni casi anche deficit delle funzioni superiori come la memoria, il linguaggio, il ragionamento, la capacità pianificatoria.

Schmahmann e Sherman (1998) coniarono il termine sindrome cerebellare cognitivo-affettiva per indicare un quadro clinico in cui pazienti con lesioni cerebellari manifestavano anomalie nelle funzioni esecutive, nella fluenza verbale, nella memoria di lavoro e in quella visuo-spaziale, associati a cambiamenti nella personalità del soggetto come appiattimento emotivo e comportamento inappropriato. In particolar modo le aree di connessione con le regioni associative e prefrontali permetterebbero al cervelletto di intervenire modulando l'attività di specifiche aree a più livelli funzionali.

E' stato anche dimostrato attraverso varie indagini sperimentali che in diversi casi l'apprendimento procedurale risulta preservato in caso di lesioni compromettono quello esplicito o dichiarativo (Molinari et al., 1997).

Per tale ragione negli ultimi anni la letteratura sul cervelletto è cresciuta in modo esponenziale e le teorie che suggeriscono che il cervelletto sia anche coinvolto nelle funzioni cognitive evidenziano il fatto che questa struttura sottocorticale contiene più della metà di tutti i neuroni del resto del cervello.

Queste considerazioni ci dicono che il cervelletto ha un ruolo ben definito nell'ambito del controllo motorio ma è anche coinvolto nella modulazione degli aspetti cognitivi ed emotivi del nostro comportamento.

Lesioni del cervelletto possono causare diversi disturbi, come la sindrome cerebellare cognitivo-affettiva, con risvolti importanti sul piano delle funzioni esecutive, dell'affettività e delle competenze cognitive.

Sono, ad oggi, sempre più numerosi gli studi che indicano un coinvolgimento cerebellare nel disturbo schizofrenico con riduzioni a carico del verme cerebellare ed un ridotto afflusso di sangue al cervelletto (Katsetos et al., 1997).

Tra questi, uno studio recente (2017) svolto da un gruppo di ricercatori dell'Università di Oslo, ha indagato attraverso metodiche di imaging cerebrale il volume del cervelletto in soggetti affetti da schizofrenia.

Dallo studio è emerso che in un'altissima percentuale di casi il cervelletto era l'area maggiormente interessata dal disturbo (Moberget et al., 2017).

Un'interessante ipotesi sul contributo cerebellare alla cognizione, che potrebbe spiegare anche alcuni sintomi del disturbo schizofrenico, è quella della copia efferente.

Come abbiamo già avuto modo di affermare nel paragrafo precedente, saper distinguere tra movimento auto-prodotto e movimento causato dall'esterno rappresenta un aspetto fondamentale della nostra esistenza e si esprime nella capacità di saper predire le conseguenze sensoriali di un'azione.

La previsione di movimento viene utilizzata per attenuare gli effetti conseguenti ad un movimento auto-generato e differenziarlo da altri tipi di input o sensazioni che possono giungere dall'esterno: se accarezzo l'indice della mia mano sinistra le sensazioni tattili associate risultano attenuate rispetto a quelle che potrebbero scaturire dal contatto con un'altra mano in quanto il feedback effettivo non è associato ad alcun modello di previsione.

Sembra che lo stesso meccanismo si verifichi sia quando eseguiamo un movimento sia quando intratteniamo certi pensieri o contenuti perché verrebbe a realizzarsi un calcolo neurale che ci informa circa la fonte di quello specifico processo. Una eventuale alterazione a carico di questo meccanismo potrebbe spiegare i sintomi della schizofrenia come la sensazione di essere inseriti dall'esterno (cfr. Jerillyn, 2017).

Soggetti psicotici possono fallire nei processi di auto-riconoscimento del proprio corpo e nell'attribuzione di azioni auto-prodotte come dimostrato da uno studio che applica il paradigma classico *dell'illusione della mano di gomma in movimento*.

Lozuolo e colleghi (2015) non hanno riscontrato differenze nei punteggi relativi al senso di azione nel confronto tra condizioni attive e passive in soggetti con disturbi psicotici.

Una possibile spiegazione a questo risultato risiederebbe in una maggiore propensione e reattività ai segnali sensoriali esterni anche in assenza di intenzioni motorie, nonché a previsioni motorie deboli che impedirebbero una corretta rappresentazione del proprio corpo basata su segnali interni ed esterni.

I meccanismi di codifica predittiva cerebellari svolgono quindi un importante ruolo nell'ambito del controllo motorio ma sembra che il cervelletto sia anche implicato nell'elaborazione degli stimoli visivi, tattili e propriocettivi alla base del senso di proprietà del corpo (Baumann et al., 2015).

Le basi neurali del senso di azione (*SoA*) e del senso di proprietà (*SoO*) coinvolgono differenti aree cerebrali ma l'interazione tra queste due funzioni è ancora oggetto di indagine. Difatti non esistono studi esaustivi sul ruolo del cervelletto nel *SoA* e nel *SoO* nonostante venga ipotizzato un suo coinvolgimento in entrambe queste funzioni. Nel prossimo capitolo verrà riportato un esperimento condotto presso il Dipartimento di Neuroscienze, Biomedicina e Movimento dell'Università di Verona.

Obiettivo dello studio è stato quello di indagare il ruolo del cervelletto nel senso di azione (*SoA*) e nel senso di proprietà del corpo (*SoO*) attraverso il paradigma della *Moving Rubber Hand Illusion* associato alla stimolazione transcranica a corrente diretta (*tDCS*) offline (*anodica o sham*) allo scopo di analizzare il ruolo del cervelletto nelle funzioni oggetto di studio.

## **PARTE SPERIMENTALE**

## CAPITOLO IV

### 4.1 Rubber Hand Illusion e Sé Corporeo

Il senso di proprietà (SoO) e il senso di azione (SoA) sono due componenti fondamentali del sé corporeo. La relazione tra queste due funzioni non appare ancora chiara ma nella nostra esperienza quotidiana tendono ad esprimersi in modo correlato.

Il paradigma della *Rubber Hand Illusion* (RHI) ideato da Botvinick e Cohen (1998) è una procedura sperimentale nella quale alcuni soggetti sperimentano un'illusione di appartenenza nei confronti di una mano di gomma.

Questo paradigma ha permesso di indagare il senso di proprietà del corpo in soggetti ai quali veniva nascosta alla vista la loro mano sinistra, nello specifico, stimolando simultaneamente con un pennello le dita della mano sinistra del partecipante e quelle di una mano finta opportunamente posizionata e visibile, il soggetto potrebbe avere la sensazione illusoria che la mano di gomma gli appartenga.

Sembra che a giocare un ruolo determinante nel generare l'illusione di appartenenza sia il conflitto multisensoriale *vista-tatto-propriocezione*, tuttavia, tale illusione non si realizza quando le due mani vengono strofinate in modo leggermente asincrono (Botvinick e Cohen, 1995), (Tsakiris e Haggard, 2005).

Per misurare l'illusione soggettiva di appartenenza verso la mano di gomma ai soggetti è stato somministrato un questionario con 9 domande verso le quali erano chiamati ad esprimere il loro grado di accordo o disaccordo attraverso una scala Likert a 7 punti da -3 (punteggio negativo) a +3 (punteggio positivo).

Il *drift propriocettivo* verso la mano di gomma, considerato un indicatore implicito della presenza dell'illusione (Tsakiris e Haggard, 2005), veniva misurato chiedendo ai soggetti di indicare la posizione del loro indice destro su un metro posto di fronte a loro prima e dopo ogni condizione sperimentale.

La visione di una mano di gomma collocata in una posizione congruente a quella reale e una stimolazione sincrona delle due mani è in grado di evocare l'illusione di

appartenenza; la già citata illusione si riduce e lo spostamento propriocettivo non si realizza se le due mani vengono stimulate in modo asincrono oppure se la dimensione della mano finta appare ridotta o ingrandita (Pavani et al., 2000).

Alcuni studiosi hanno indagato i correlati neurali del senso di azione e hanno individuato un'attivazione della corteccia parietale, dell'insula, del cervelletto e del giro angolare (Blakemore et al., 2001; Farrer et al., 2002) mentre il senso di proprietà del corpo sembra coinvolgere aree cerebrali differenti, tra queste, la corteccia premotoria ventrale e quella intraparietale importanti per l'integrazione di informazioni di natura visiva, tattile e propriocettiva (Kalckert e Ehrsson, 2012).

#### **4.2 Moving Rubber Hand Illusion**

Il paradigma della *Moving Rubber Hand Illusion* (Kalckert e Ehrsson, 2012) è una variante del classico paradigma della Rubber Hand Illusion di Botvinick e Cohen (1998) nel quale però mancava la componente legata all'azione.

Questo paradigma permette di indagare il senso di proprietà del corpo, il senso di azione e la loro possibile dissociazione e/o correlazione attraverso differenti condizioni sperimentali.

Il set up della mHRI prevede 1) l'utilizzo di una scatola e di una mano di gomma, 2) l'esecuzione da parte del soggetto di un doppio tocco con l'indice della propria mano destra oppure 3) l'induzione passiva del movimento da parte dello sperimentatore.

I partecipanti all'esperimento devono posizionarsi di fronte alla scatola inserendo la propria mano destra (non visibile) all'interno, mentre la mano finta viene collocata sopra la scatola alla vista del soggetto. Nella punta dell'indice destro del soggetto viene inserito un copri-dito collegato con l'indice del modello della mano di gomma e un telo nero viene applicato a copertura della lunghezza che va dalla spalla al polso del partecipante.

L'esperimento prevede una fase di training per l'esecuzione del doppio tocco ad un ritmo di circa  $1\text{ Hz}$  mentre le diverse condizioni sperimentali vengono manipolate al fine di un confronto tra condizioni sincrone vs. asincrone, attive vs. passive, congruenti vs. incongruenti.

Nel primo confronto (*condizione sincrona vs. asincrona*) la coerenza temporale tra i movimenti dell'indice del partecipante e quelli della mano di gomma viene condizionata dallo sperimentatore che scollega le due mani attraverso la separazione in due parti del bastoncino di collegamento; ciò causa un ritardo di circa 500 ms rispetto al movimento svolto dal partecipante generando la sensazione di non essere l'autore del movimento.

Il confronto tra *condizioni attive vs. passive* prevede che il movimento si svolga in sincronia tra le due mani. Per tale motivo è stato mantenuto il collegamento meccanico tra le dita chiedendo al soggetto di rilassare la propria mano nella condizione passiva e di non eseguire alcun movimento.

Nella condizione incongruente la mano di gomma viene ruotata di 180° rispetto a quella del partecipante mantenendo la connessione meccanica tra le dita e richiedendo al soggetto l'esecuzione del doppio tocco con l'indice della mano destra. Ciascuna condizione sperimentale dura 90 secondi e tra ogni prova è previsto un break di 30 secondi con rilassamento delle braccia e delle mani. Per misurare l'esperienza soggettiva dell'illusione viene utilizzato un questionario composto da 16 affermazioni associate alla misura del drift propriocettivo che consiste nel chiedere al soggetto, ad occhi chiusi, prima e dopo ciascuna prova, di indicare la posizione del proprio indice destro attraverso quello di sinistra. La rilevazione del drift consiste nell'eseguire un movimento di puntamento su un pannello collocato lateralmente alla scatola.

Per quanto concerne il questionario, le affermazioni adottate riflettono quelle utilizzate da Botvinick e Cohen (1998) e fanno riferimento al sentimento di proprietà, a quello di azione e ai loro rispettivi controlli.

I risultati ottenuti da Kalkert e Ehrsson (2012) indicano che i partecipanti hanno sperimentato alti livelli di proprietà nella condizione sincrona attiva rispetto alla condizione asincrona e che questa differenza riguardava anche il senso di azione.

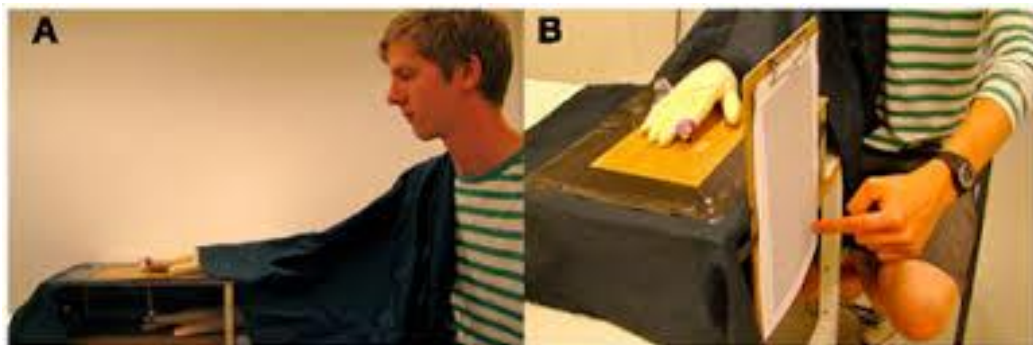
Nella condizione congruente passiva viene mantenuta la proprietà ma negato il senso di azione mentre in quella incongruente i soggetti affermano l'azione ma non la proprietà. Inoltre, confrontando i punteggi di proprietà e azione con i loro rispettivi controlli per ciascuna condizione è emerso che gli item sperimentali erano



significativamente più alti dei rispettivi item di controllo. Per quanto riguarda i risultati del drift propriocettivo è stato osservato che lo spostamento dell'illusione verso la mano di gomma era maggiore nelle condizioni congruenti, indipendentemente dalla passività o meno del movimento, piuttosto che in quelle incongruenti.

L'esperimento svolto da Kalchert e Ehrsson (2012) ha dimostrato che il senso di azione e il senso di proprietà possono essere dissociati sperimentalmente e che i soggetti tendono a sperimentare l'illusione di proprietà con maggiore intensità nelle condizioni in cui la mano di gomma si trova in una posizione anatomicamente congruente a quella reale piuttosto che nelle condizioni in cui la mano di gomma si trova in una posizione anatomicamente incongruente (ruotata di 180°).

Il senso di azione invece non risente dei vincoli imposti dalla posizione anatomica della mano di gomma per cui una discrepanza tra questa e la propria mano non elimina la sensazione di essere l'autore del movimento, al contrario, il movimento passivo può ridurre il senso di azione ma non compromettere quello di appartenenza. Questi studi dimostrano che queste due componenti, pur interagendo, possono essere danneggiate in modo selettivo e coinvolgono sistemi cerebrali differenti.



*Fig. 1. Set up sperimentale della mHRI di Kalckert e Ehrsson (2012) e misura della deriva propriocettiva*



*Fig. 2. Nella figura di sinistra il soggetto è coinvolto nell'esecuzione di movimenti attivi; in quella di destra il movimento, passivo, è indotto dallo sperimentatore*

### **Sede della ricerca**

Laboratorio Azione-Percezione, Sezione di Scienze Motorie, Dipartimento di Neuroscienze, Biomedicina e Movimento, Università di Verona (Via Casorati, 43).

### **Obiettivo**

L'obiettivo del nostro studio è stato quello di indagare il ruolo di una specifica struttura sottocorticale, il cervelletto, nel modulare il senso di proprietà del corpo (SoO) e il senso dell'azione (SoA) due componenti fondamentali della rappresentazione del corpo. Queste due componenti sono state indagate utilizzando il paradigma dell'illusione della mano di gomma in movimento (mRHI) in associazione ad una tecnica di stimolazione cerebrale non invasiva (tDCS) attraverso la quale è stato possibile modulare l'attività dell'emisfero cerebellare destro. La tDCS, anodica o sham, è stata applicata offline per 25 minuti con un'intensità di 2mA per il cervelletto (Galea et al., 2009).

## **Il protocollo sperimentale**

Il paradigma utilizzato è quello della “*Moving Rubber Hand Illusion*” di Kalckert e Ehrsson (2012) che permette di indagare il senso di azione che mancava nella versione classica dell’esperimento di Botvinick e Cohen (1998) ma nel nostro esperimento abbiamo deciso di utilizzare un set up di tipo verticale collocando la mano di gomma e quella del soggetto l’una accanto all’altra.

La scatola di legno è stata costruita delle dimensioni di 50x50 cm con un piano di appoggio alto 5cm per consentire l’inserimento del meccanismo utilizzato per muovere simultaneamente le due mani, quella del soggetto e quella di gomma. Nel piano di appoggio della scatola sono stati creati due fori distanziati di 20cm per permettere il passaggio dei chiodi sui quali incollare l’anello in velcro per l’inserimento del dito indice delle due mani.

Per rendere neutro il set up sperimentale l’intera scatola è stata pitturata di nero in aggiunta alla copertura mobile utilizzata per nascondere la mano del soggetto durante il compito sperimentale mentre nelle parti laterali della scatola è stato attaccato un telo nero per coprire il soggetto e nella parte superiore abbiamo un pannello adatto a consentire l’apertura e la chiusura della scatola.

Per costruire la mano di gomma è stato utilizzato un guanto in lattice riempito di cellulosa e incollato in un foglio di plastica nero adatto ad essere attaccato e staccato al variare delle condizioni sperimentali.



*Fig. 3. Scatola di legno costruita per l'esperimento*

### **Procedura sperimentale**

Abbiamo reclutato 25 soggetti sani destrimani (13 femmine, 12 maschi età media= 22,04, SD=  $\pm$  3.38, range 19-33) e lo studio è stato approvato dal Comitato etico dell'Università di Verona.

I criteri di esclusione sono stati la presenza di alterazioni neurologiche e/o psichiatriche, emicrania, epilessia, presenza di oggetti metallici o elettrici nel corpo e presenza significativi problemi di vista.

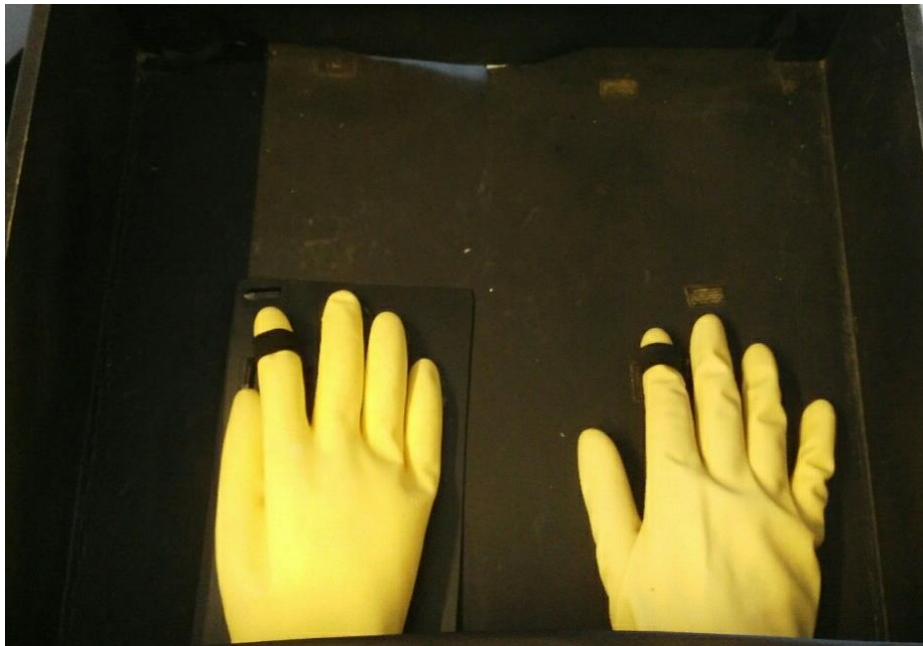
Ai partecipanti viene chiesto di sedersi di fronte ad un tavolo posizionandosi con la linea mediana del corpo in corrispondenza dell'estremità della scatola (sx) mentre lo sperimentatore inserisce la mano destra all'interno della scatola e l'indice della mano destra nell'anellino collegato al meccanismo sottostante.

La mano destra del partecipante viene nascosta alla vista con la copertura mobile e il compito richiesto consiste nell'eseguire dei doppi tocchi ad intervalli irregolari con l'indice della propria mano destra concentrando l'attenzione sulla mano di gomma e sulle sensazioni provate.

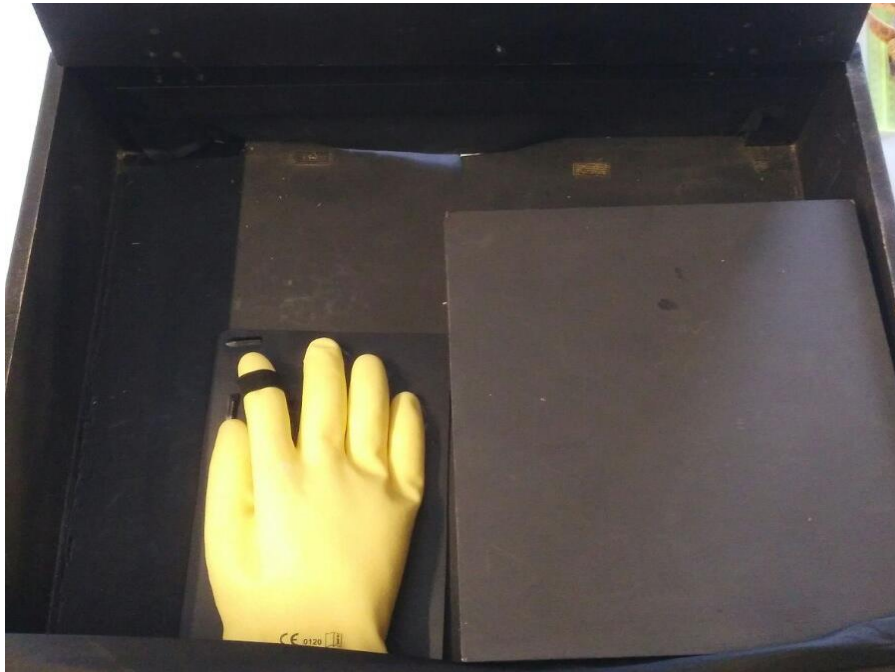
L'esperimento ha previsto una fase di training durante la quale il soggetto poteva esercitarsi nell'esecuzione del doppio tocco ad un ritmo dettato da un metronomo.

Le tre condizioni sperimentali sono di seguito descritte:

**Condizione Sincrona attiva:** in questa condizione il dito indice del partecipante e della mano artificiale sono collegati con due anelli attaccati ad un'asticella di legno. La mano artificiale è allineata con la mano del partecipante che dovrà muovere attivamente il proprio dito per 90 secondi causando un movimento sincrono del dito della mano artificiale visibile. Tipicamente, questa condizione induce un forte SoA e SoO sulla mano artificiale (Kalckert e Ehrsson, 2012).



*Fig. 4. A sinistra si trova la mano di gomma mentre a destra viene posizionata la mano destra del partecipante*



*Fig. 5. L'immagine riflette la prospettiva del partecipante durante il compito sperimentale*



*Fig. 3. Condizione Sincrona Attiva*

**Condizione Congruente passiva:** in questa condizione il dito indice del partecipante e della mano artificiale sono collegati tramite l'asticella di legno. La mano artificiale è allineata a quella del partecipante e il soggetto è invitato a rilassare il proprio dito. Lo

sperimentatore muoverà il dito del partecipante e quello della mano artificiale per 90 secondi servendosi del meccanismo di collegamento tra i due.

Questo movimento ne causerà uno sincrono nel dito della mano artificiale favorendo l'emergere del SoO.



*Fig. 7. Condizione congruente passiva: il movimento è indotto dallo sperimentatore*

**Condizione Incongruente attiva:** in questa condizione il dito indice del partecipante e quello della mano di gomma sono collegati attraverso l'asticella di legno. La mano artificiale è ruotata di 180° rispetto alla mano del partecipante che dovrà muovere attivamente il proprio dito per 90 secondi. Questo movimento ne causerà uno sincrono del dito della mano artificiale. Tipicamente tale condizione induce un forte SoA (a causa del movimento sincrono e attivo) ma non SoO, poiché la posizione della mano artificiale non coincide con quella della mano del partecipante.



*Fig. 4. Condizione incongruente attiva con la mano ruotata di 180° rispetto a quella del partecipante che si trova sotto la copertura mobile a destra.*

Prima e dopo ogni condizione il soggetto è chiamato a giudicare la posizione della propria mano destra, nascosta alla vista, servendosi di un metro: la differenza tra la posizione stimata e quella reale viene utilizzata per calcolare il drift propriocettivo.

Questa misura quantitativa dell'illusione indica uno spostamento nella percezione della propria mano verso quella artificiale, inoltre, dopo ogni condizione al partecipante è stato chiesto di compilare un questionario volto a valutare l'esperienza soggettiva dell'illusione SoA e SoO (Kalckert e Ehrsson, 2012). Nello specifico, due domande erano riferite al SoA e due al SoO mentre altre quattro domande erano utilizzate come controllo.

Per le affermazioni del questionario è stata utilizzata una versione breve basata su quella elaborata da Kalckert e Ehrsson (2012).

Affermazioni relative all'ownership con i rispettivi item di controllo:

1. Mi sembrava come se stessi guardando la mia mano
2. Mi sentivo come se la mano di gomma fosse la mia mano
3. Sembrava come se avessi più di una mano destra
4. Mi sentivo come se non avessi più la mano destra, come se la mia mano destra



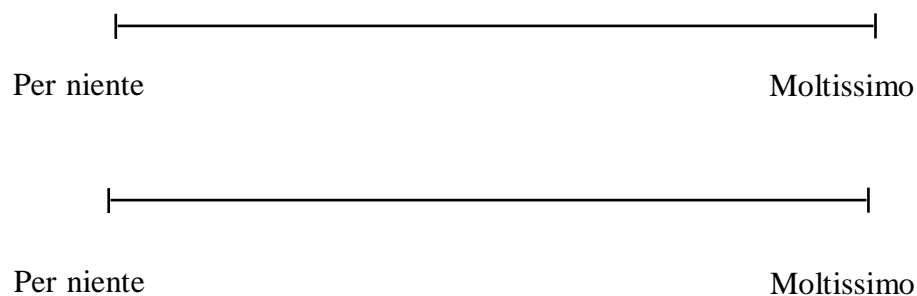
fosse scomparsa.

Affermazioni relative all'Agency con i rispettivi item di controllo:

5. La mano di gomma si muoveva proprio come io volevo, come se stesse obbedendo alla mia volontà
6. Mi sentivo come se stessi causando i movimenti della mano di gomma
7. Mi sentivo come se la mano di gomma stesse controllando i miei movimenti
8. Mi è sembrato di percepire il movimento da qualche parte tra la mia mano e la mano di gomma

Sia per l'ownership che per l'agency le prima due affermazioni fanno riferimento all'esperienza soggettiva di proprietà e azione mentre le altre due vengono utilizzate per controllare altri fattori come la suggestionabilità e l'effetto del compito (Kalckert e Ehrsson, 2012).

Al fine di rilevare le sensazioni associate alle affermazioni del questionario e dopo ciascuna condizione abbiamo utilizzato una scala Vas chiedendo al soggetto di indicare un punto lungo la scala che riflettesse l'intensità delle sensazioni sperimentate durante il compito.



*Tab. 1. Scala utilizzata dai partecipanti per rispondere alle affermazioni del questionario in riferimento alle sensazioni provate durante il compito sperimentale.*

La sessione sperimentale ha previsto due distinte giornate dedicate all'applicazione

dei due tipi di stimolazione tDCS anodica e sham di controllo realizzate in doppio cieco.

### **Stimolazione Transcranica a corrente diretta continua (tDCS)**

La *tDCS* è una tecnica di stimolazione non invasiva che consiste nell'applicazione di una corrente elettrica ad una intensità da 0.5 a 2mA attraverso l'utilizzo di due elettrodi che possono inibire o eccitare il funzionamento neuronale.

Gli elettrodi vengono inseriti in un tessuto precedentemente imbevuto di soluzione fisiologica al fine di aumentare la conduttanza e limitare possibili effetti negativi quali fastidio, pizzicore e prurito ai quali il soggetto potrebbe andare incontro. Gli elettrodi hanno una superficie che varia dai 25 ai 35 cm<sup>2</sup> e vanno applicati in modo da creare un circuito chiuso. Il posizionamento del catodo nell'area di interesse iperpolarizza i neuroni di quell'area causando un'inibizione neurale. Al contrario, posizionando l'anodo nell'area che si vuole stimolare i neuroni vengono depolarizzati e ciò determina un'eccitazione neurale.

La tDCS può essere considerata una tecnica di neuro-modulazione in grado di modificare l'eccitabilità dei tessuti e i suoi effetti si protraggono oltre il tempo della stimolazione permettendo lo svolgimento di sessioni sperimentali sia in modalità online che offline. La stimolazione sham viene utilizzata come condizione di controllo in quanto non produce alcun effetto.

Il soggetto viene infatti stimolato solo all'inizio e alla fine della sessione per pochi secondi ma difficilmente riesce a distinguere la stimolazione reale da quella placebo (Nitsche et al.,2008). Nel nostro esperimento abbiamo utilizzato due elettrodi di 4cm x 4cm allo scopo di stimolare il cervelletto. I soggetti sono stati sottoposti a due tipi di stimolazione:

**Stimolazione Attiva:** In questa sessione sperimentale al soggetto veniva applicata una corrente elettrica per 25 minuti ad una intensità di 2mA.

**Stimolazione Sham:** In questa sessione sperimentale il soggetto non riceveva alcuna stimolazione se non all'inizio e alla fine dei 25 minuti.

L'anodo viene posizionato sul cervelletto destro misurando con un metro una distanza di 3 cm dall'osso cranico inion, mentre il catodo viene posizionato sulla guancia destra, più precisamente sul muscolo buccinatore.



*Fig. 9. Posizionamento dell'anodo sul cervelletto destro*



*Fig. 10. Posizionamento del catodo sul muscolo buccinatore*

I soggetti coinvolti nell'esperimento sono stati reclutati presso l'Università di Verona e nessuno di loro era a conoscenza del paradigma della mRHI. Abbiamo stabilito dei criteri di inclusione per la partecipazione all'esperimento, ossia: avere un'età compresa tra i 18 e i 35 anni, essere destrimani, non soffrire di emicrania, epilessia o alterazioni di tipo neurologico e psichiatrico, non avere rilevanti problemi di vista e oggetti metallici nel corpo.

### ***Analisi dei dati***

Le risposte al questionario sono state raggruppate in quattro punteggi complessivi:

- 1) Agency: media degli item sperimentali specifici per l'agency.,
- 2) Ownership: media degli item sperimentali specifici per l'ownership.,
- 3) Agency controllo: media degli item di controllo specifici per l'agency.,
- 4) Ownership controllo: media degli item di controllo specifici per l'ownership.,

Il drift propriocettivo è stato misurato prima e dopo ciascuna condizione sperimentale

e la differenza tra il giudizio iniziale e quello finale è stata utilizzata al fine di rilevare lo spostamento propriocettivo verso la mano di gomma, considerato un indicatore implicito della presenza dell'illusione (Tsakiris e Haggard, 2005).

Le analisi di normalità eseguite tramite test di *Shapiro-Wilk*, hanno rilevato che i dati non erano distribuiti normalmente ( $p < 0.05$ ). Per questo motivo, le analisi sono state condotte attraverso test non parametrici. I dati del questionario e del drift propriocettivo sono stati analizzati separatamente. Valori di  $P < 0.050$  sono stati considerati come statisticamente significativi.

Per quanto riguarda il questionario abbiamo utilizzato il test di *Wilcoxon* per svolgere dei confronti a coppie tra item sperimentali e di controllo separatamente per ciascuna condizione e modalità di stimolazione (*tDCS attiva e tDCS sham*) al fine di 1) verificare l'attendibilità del paradigma confrontando le variabili di ownership ed agency con i loro rispettivi controlli, separatamente per ciascuna condizione; 2) valutare eventuali differenze tra agency e ownership confrontando i punteggi dei soli item sperimentali; 3) rilevare eventuali differenze tra condizioni nell'evocare agency e ownership confrontando i punteggi dei soli item sperimentali di agency e ownership in riferimento alle tre diverse condizioni sperimentali; 4) rilevare eventuali effetti modulatori della tDCS confrontando i punteggi degli item sperimentali di agency e ownership nelle due stimolazioni, attiva e sham.

### **Questionario**

Al fine di verificare l'attendibilità del paradigma è stato utilizzato il test di *Wilcoxon* per un confronto a coppie tra item sperimentali (Agency e Ownership) e di controllo (Agency controllo e Ownership controllo), separatamente per ciascuna condizione e modalità di stimolazione.

Le differenze tra agency e ownership in ciascuna condizione sono state analizzate separatamente per ciascuna modalità di stimolazione effettuando dei confronti a coppie utilizzando il test di *Wilcoxon*.

Per esplorare la differenza tra condizioni (sincrona attiva, congruente passiva e incongruente attiva) nell'evocare ownership ed agency, separatamente per ciascuna modalità di stimolazione (attiva e sham) abbiamo utilizzato il test di *Friedman*. In

caso di significatività statistica, si è proceduto ai confronti a coppie post hoc con il test di Wilcoxon applicando la correzione Bonferroni per confronti multipli ( $p=0.016$ ).

Infine, allo scopo di verificare eventuali differenze tra modalità di stimolazione (attiva e sham) abbiamo eseguito dei confronti a coppie, separatamente per ciascuna condizione e funzione cognitiva.

### *Analisi dei dati*

#### **Drift propriocettivo**

Per l'analisi del drift nelle condizioni delle due diverse modalità (attiva/sham) è stato utilizzato il test di Friedman. In caso di significatività ( $p=0.05$ ), sono stati eseguiti dei confronti a coppie tra tipi di condizione, applicando la correzione di Bonferroni per confronti multipli ( $p=0.016$ ) e attraverso il test di Wilcoxon, verificando eventuali differenze tra modalità (attiva/sham) in ciascuna condizione.

#### **Risultati del questionario**

##### *Attendibilità del paradigma della Moving Rubber Hand Illusion*

Da un confronto tra item sperimentali e item di controllo riferiti all'ownership è emerso che nella condizione *sincrona attiva* i partecipanti all'esperimento tendevano ad attribuire punteggi più alti alle domande sperimentali rispetto a quelle di controllo in entrambi i tipi di stimolazione (tDCS attiva ownership sincrona vs. tDCS attiva ownership control sincrona  $Z= -4.373$ ,  $p<0.001$ ), (tDCS sham ownership sincrona vs. tDCS sham ownership control sincrona  $Z= -4.292$ ,  $p<0.001$ ).

Per quanto riguarda i livelli di agency i soggetti attribuivano anche in questo caso punteggi più alti alle domande sperimentali rispetto a quelle di controllo (tDCS attiva agency sincrona vs. tDCS attiva agency control sincrona  $Z=-4.130$ ,  $p<0.001$ ), (tDCS sham agency sincrona vs. tDCS sham agency control sincrona  $Z=-4.090$ ,  $p<0.001$ ).

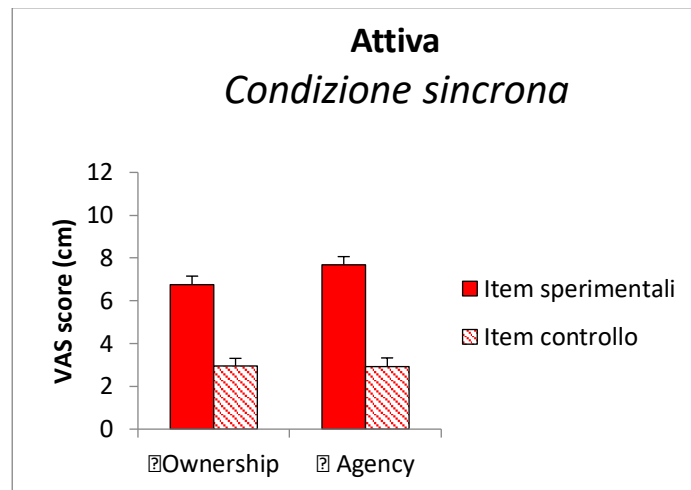


Fig. 11. Confronto tra item sperimentali e item di controllo nella condizione sincrona della stimolazione attiva

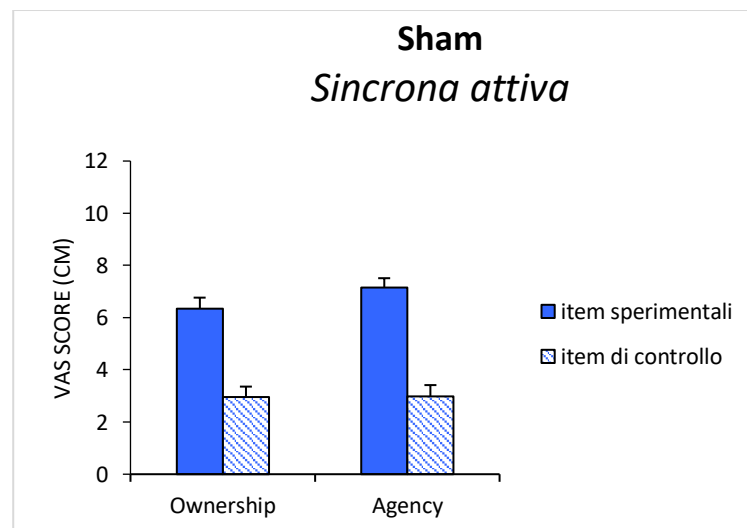
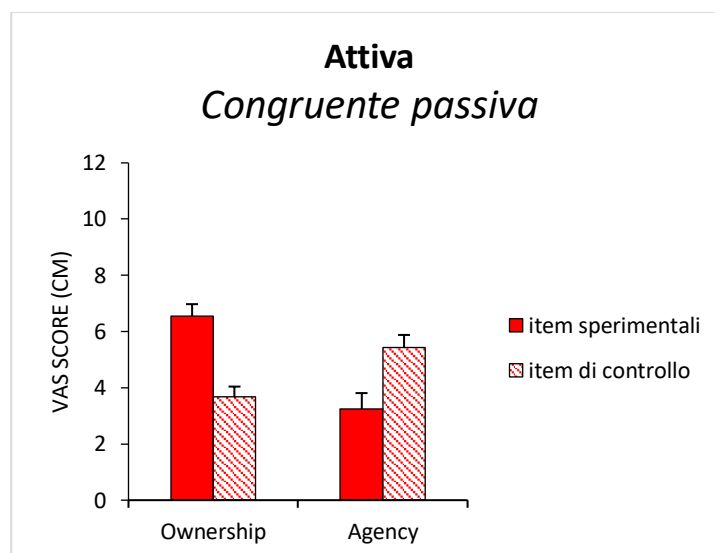


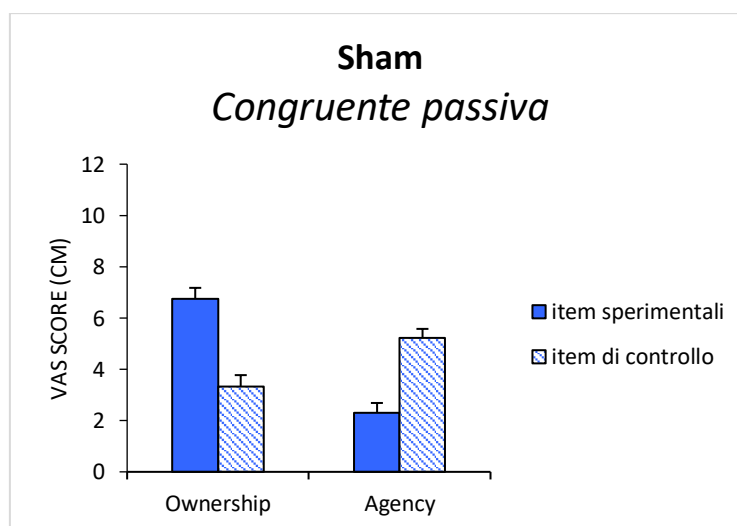
Fig. 12. Confronto tra item sperimentali e di controllo nella condizione sincrona attiva della stimolazione sham

Nella condizione *congruente passiva* gli item sperimentali riferiti all'ownership presentavano punteggi più alti rispetto a quelli di controllo in entrambi i tipi di stimolazione (tDCS attiva ownership congruente vs. tDCS attiva ownership control congruente  $Z = -4.319$ ,  $p < 0.001$ ), (tDCS sham ownership congruente vs. tDCS sham ownership control congruente  $Z = -3.290$ ,  $p < 0.001$ ) mentre gli item sperimentali

relativi all'agency presentavano punteggi più bassi se comparati agli item di controllo in entrambi i tipi di stimolazione (tDCS attiva agency congruente vs. tDCS attiva agency control congruente  $Z= -2.449$ ,  $p=0.014$ ), (tDCS sham agency congruente vs. tDCS sham agency control congruente  $Z=-3.983$ ,  $p<0.001$ ).



*Fig. 13. Confronto tra item sperimentali e item di controllo nella condizione congruente passiva della stimolazione attiva*

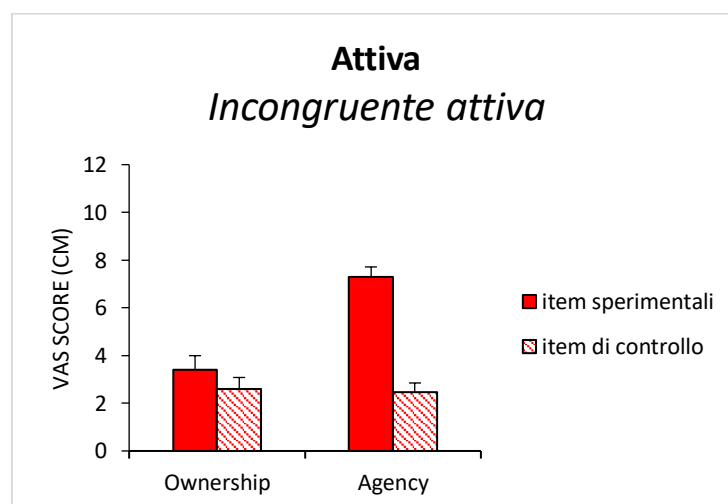


*Fig. 14. Confronto tra item sperimentali e di controllo nella condizione congruente passiva della stimolazione sham*



Da un confronto tra item sperimentali e di controllo riferiti all'ownership nella condizione *incongruente attiva* abbiamo riscontrato una tendenza alla significatività nel confronto tra item sperimentali e di controllo nella stimolazione attiva (tDCS attiva ownership incongruente vs.tDCS attiva ownership control incongruente ( $Z=-1.962$ ,  $p= 0.050$ ). Non sono emerse, invece, differenze significative nella sham (tDCS sham ownership incongruente vs. tDCS sham ownership control incongruente  $Z=-1.080$ ,  $p=0.280$ ).

Per quanto riguarda l'agency abbiamo riscontrato punteggi più alti per gli item sperimentali rispetto a quelli di controllo in entrambi i tipi di stimolazione (tDCS attiva agency incongruente vs. tDCS attiva agency control incongruente ( $Z=-3.480$ ,  $p= 0.001$ ), (tDCS sham agency incongruente vs. tDCS sham agency control incongruente ( $Z= -4.063$ ,  $p<0.001$ ).



*Fig.15. Confronto tra item sperimentali e item di controllo nella condizione incongruente della stimolazione attiva*

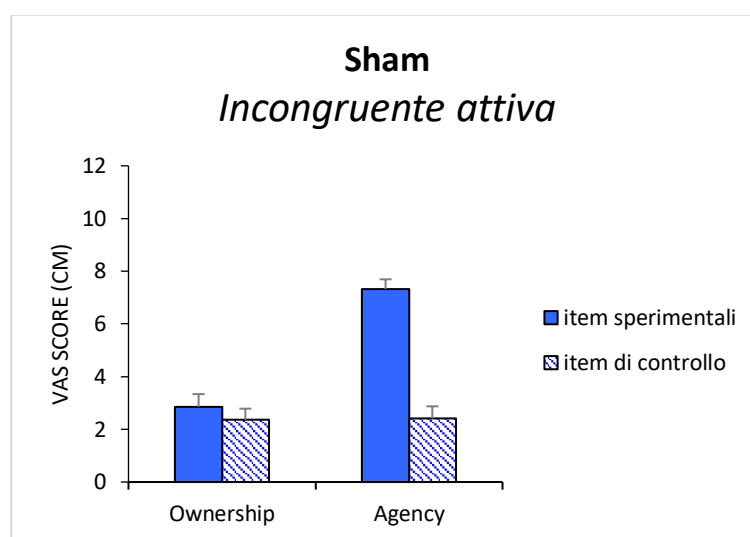


Fig.16. Confronto tra item sperimentali e di controllo nella condizione incongruente attiva della stimolazione sham

#### ***Differenze tra agency ed ownership in ciascuna condizione***

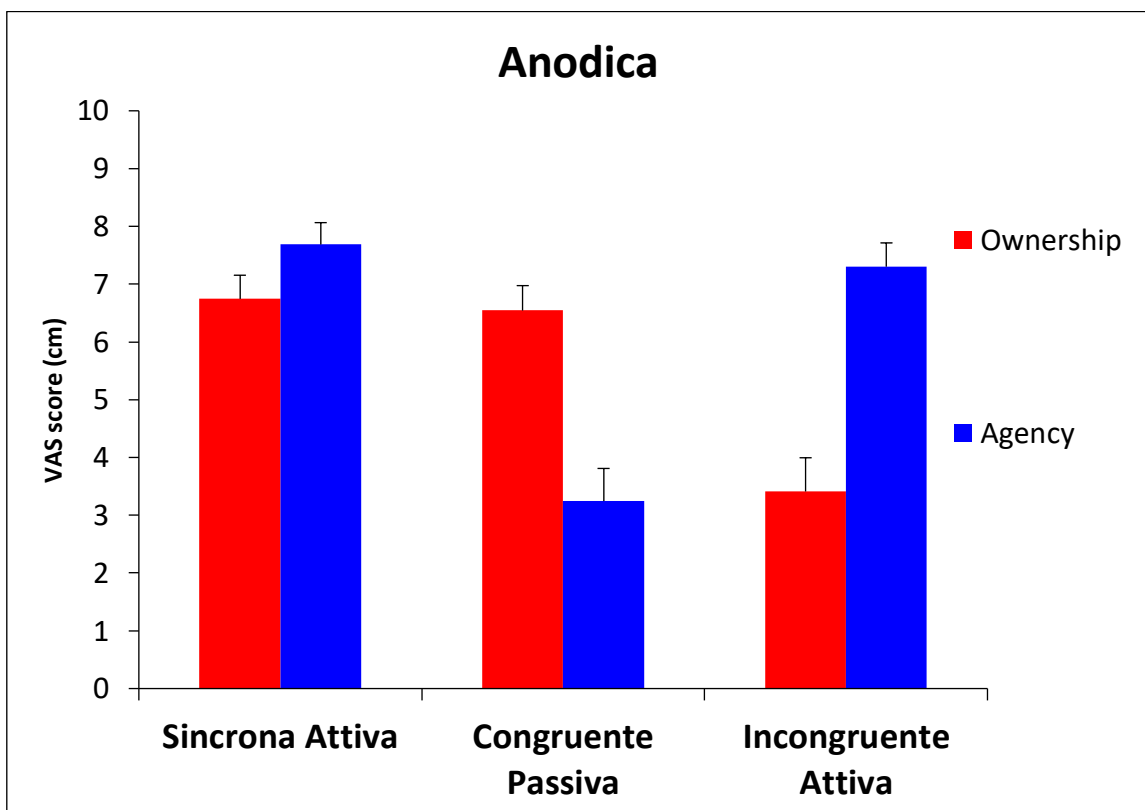
Le differenze tra agency e ownership in ciascuna condizione sono state analizzate separatamente per ciascuna modalità di stimolazione effettuando dei confronti a coppie tramite il test di Wilcoxon.

Confrontando i punteggi di agency e ownership nella ***stimolazione attiva*** e in ciascuna condizione è emerso che i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'agency rispetto che a quelle relative all'ownership nella condizione incongruente attiva ( $Z = -4.229$ ,  $P < 0.001$ ). Analogamente, i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'agency nella condizione sincrona attiva ( $Z = -2.500$ ,  $P = 0.012$ ). Al contrario, nella condizione congruente passiva i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'ownership ( $Z = -3.955$ ,  $P = 0.001$ ).

Anche il confronto tra i punteggi di agency e ownership nella ***stimolazione sham*** e in ciascuna condizione ha evidenziato che i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'agency rispetto che a quelle relative all'ownership nella condizione incongruente attiva ( $Z = -4.076$ ,  $P < 0.001$ ). Nella condizione congruente passiva i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'ownership ( $Z = -4.286$ ,  $P < 0.001$ ). Non sono emerse differenze significative tra i

punteggi di agency e ownership nella condizione sincrona attiva ( $Z=-1.734$ ,  $P=0.083$ ).

Questi risultati confermano che affinché si realizzi il senso di proprietà che i partecipanti sperimentano nei confronti della mano di gomma è necessario che vengano soddisfatti dei requisiti legati alla congruenza spazio-temporale tra la mano finta e quella reale. Tale illusione solitamente non si realizza nella condizione incongruente attiva quando la mano del partecipante è ruotata di 180 gradi.



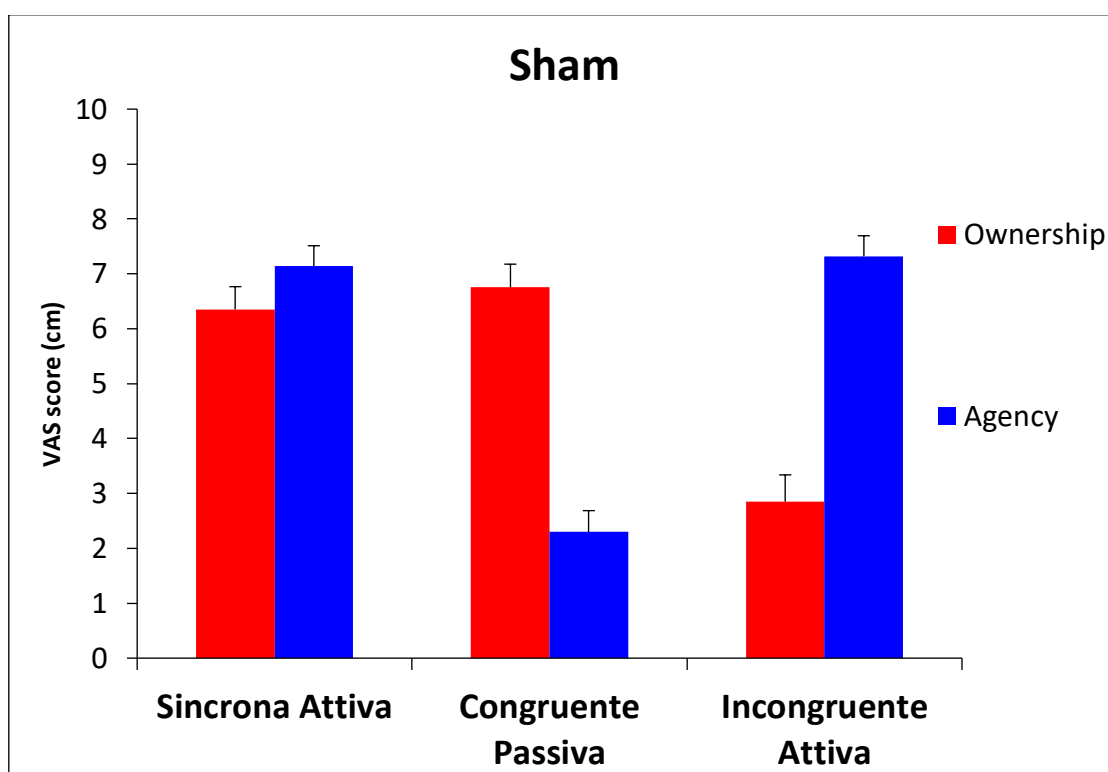


Fig. 17. Grafici di confronto delle differenze nei punteggi medi degli item sperimentali di Ownership ed Agency rispetto alle tre condizioni sperimentali e per entrambi i tipi di stimolazione tDCS Attiva e Sham

#### ***Differenze tra condizioni nell'evocare agency e ownership***

La sensazione di ownership variava in modo significativo tra le 3 condizioni sperimentali in entrambi i tipi di stimolazione (**Attiva:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 26.894, p < 0.000$ ) – (**Sham:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 16.362, p < 0.000$ ).

Anche per quanto concerne i punteggi di agency abbiamo osservato una differenza significativa tra le 3 condizioni sperimentali (**Attiva:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 31.909, p < 0.000$ ) – (**Sham:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 27.083, p < 0.000$ ).

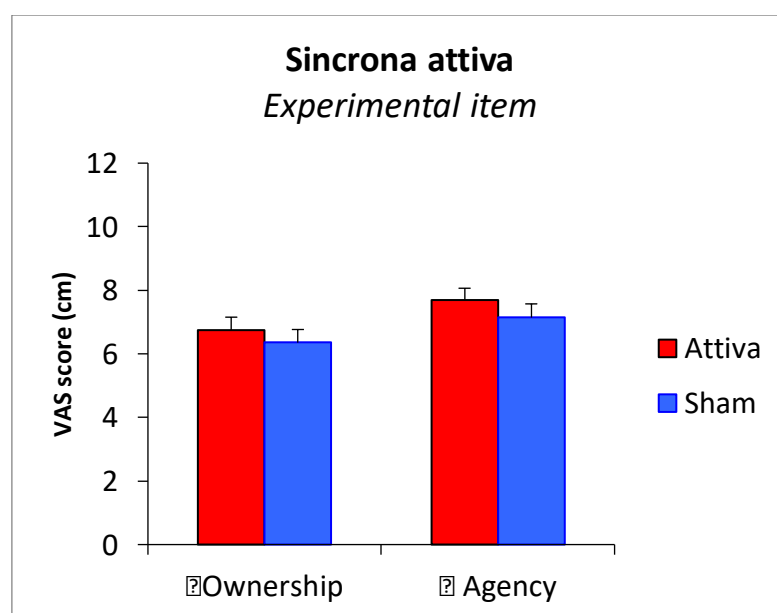
Abbiamo rilevato che i soggetti tendevano ad attribuire punteggi più elevati di ownership nelle due condizioni congruenti (sincrona attiva e congruente passiva) rispetto a quelle incongruenti a prescindere dalla passività o meno del movimento, per entrambi i tipi di stimolazione **tDCS attiva** (sincrona vs. incongruente:  $Z = -3.878, p = 0.001$ ; congruente vs. incongruente  $Z = -3.743, p < 0.001$ ); **tDCS sham**

(sincrona vs. incongruente  $Z=-4.029$ ,  $p<0.001$ ; congruente vs. incongruente  $Z= -4.101$ ,  $p<0.001$ ).

Non sono emerse differenze significative tra la condizione sincrona e quella congruente nella tDCS attiva ( $Z= -0.572$ ,  $p= 0.568$ ) e in quella sham ( $Z= -1.817$ ,  $p= 0.069$ ).

Abbiamo inoltre valutato se l'agency poteva modulare l'ownership aumentando i livelli di proprietà nella condizione sincrona attiva rispetto a quella passiva. Abbiamo riscontrato una differenza significativa nella stimolazione attiva (sincrona attiva vs. congruente passiva  $Z= -4.143$ ,  $p= 0.001$ ) e anche in quella sham (sincrona attiva vs. congruente passiva  $Z=-4.198$ ,  $p= 0.000$ ). Sembra quindi che i movimenti attivi abbiano avuto un effetto nel modulare i livelli di ownership in questa condizione.

Alti punteggi di agency sono stati riportati dai partecipanti all'esperimento nella condizione sincrona e incongruente attiva, in linea con le nostre aspettative, ma non nella congruente passiva. I punteggi relativi all'agency infatti non hanno mostrato differenze significative nel confronto tra la condizione sincrona e incongruente nella stimolazione anodica ( $Z=-1.526$ ,  $p=0.127$ ) e nella stimolazione sham ( $Z= -1.430$ ,  $p=0.153$ ), mentre il confronto tra le condizioni congruenti e quelli incongruenti è stato significativo per entrambi i tipi di stimolazione (tDCS attiva  $Z= -3.914$ ,  $p< 0.001$ ), (tDCS sham  $Z= 4.168$ ,  $p<0,001$ ).



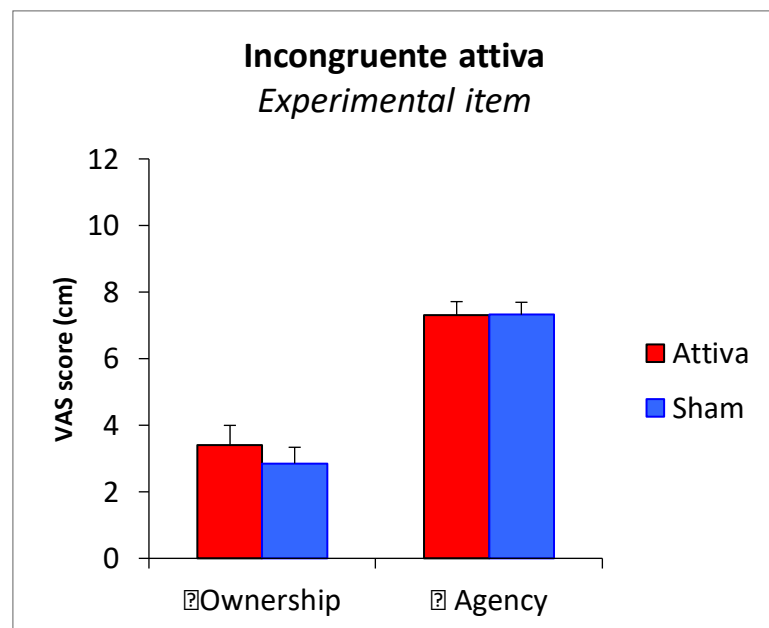
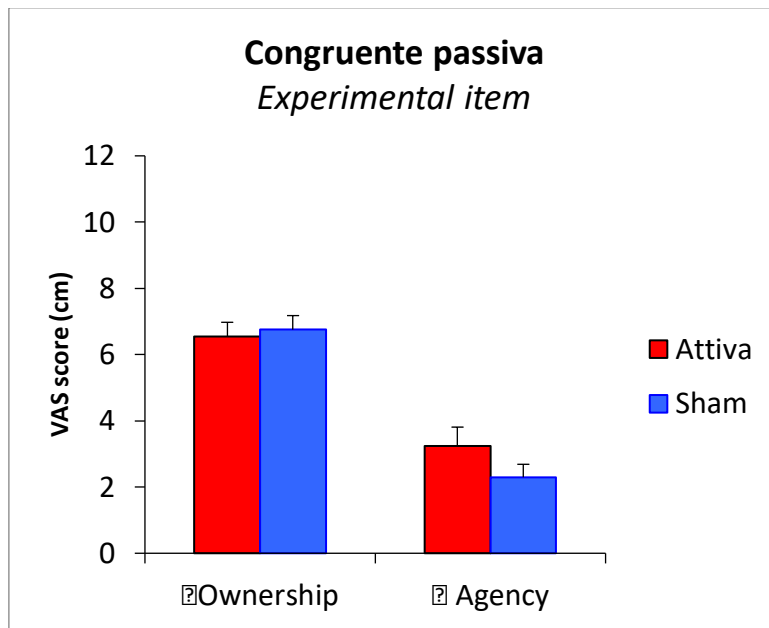


Fig.18. Grafici di confronto delle differenze tra condizioni nell'evocare Ownership ed Agency.

**Effetto della stimolazione sulla funzione**

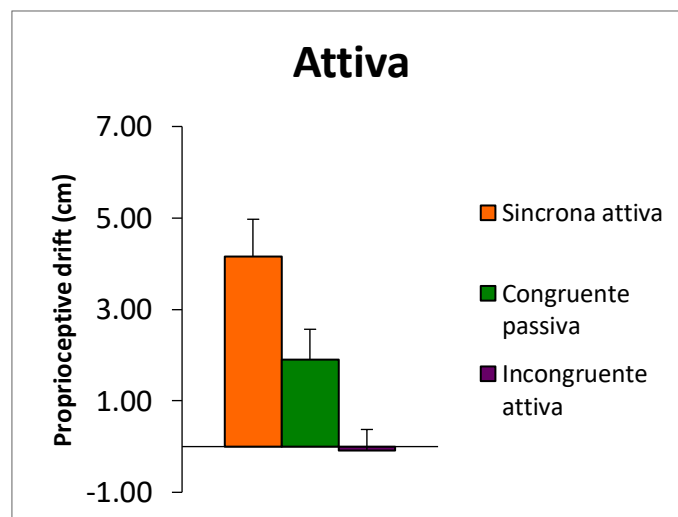
Per quanto riguarda l'agency non si rilevano significative differenze tra stimolazione attiva e sham nella condizione attiva sincrona ( $Z = -1.250$ ,  $p = 0.211$ ) nella congruente

passiva ( $Z = -1.072$ ,  $p = 0.284$ ) e nell'incongruente attiva ( $Z = 0.714$ ,  $p = 0.475$ ); analogamente nel caso dell'ownership la differenza tra stimolazioni non è significativa nell'attiva sincrona ( $Z = -1.944$ ,  $p = 0.052$ ) nella congruente passiva ( $Z = -0.834$ ,  $p = 0.404$ ) e nella condizione incongruente attiva ( $Z = -1.014$ ,  $p = 0.310$ ).

### ***Drift propriocettivo***

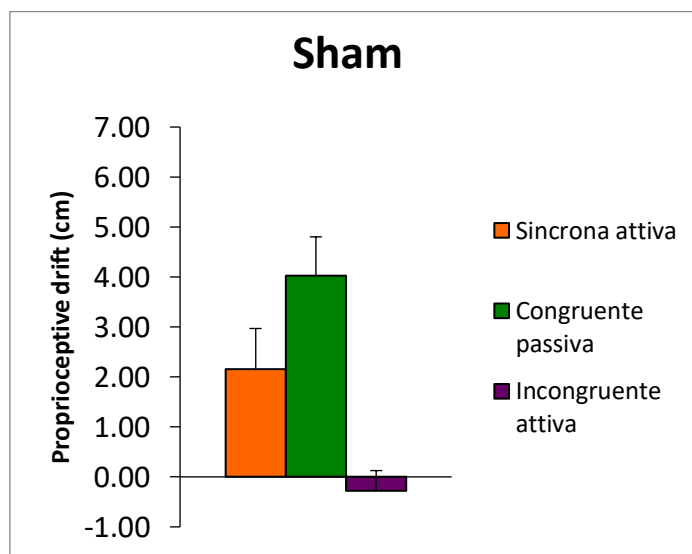
Per quanto concerne i risultati del drift abbiamo utilizzato il test di Friedman per un confronto tra condizioni. In entrambi i casi questo confronto è risultato significativo. (**Stimolazione Attiva:** test di Friedman:  $\chi^2 [3] = 15.175$ ,  $p < 0.001$ ; (**Stimolazione Sham:** test di Friedman:  $\chi^2 [3] = 12,835$ ,  $p < 0.002$ ).

Dai confronti post-hoc sono emerse differenze significative tra la condizione sincrona attiva e congruente passiva ( $Z = -2.647$ ,  $P = 0.008$ ), con un drift maggiore nella prima rispetto alla seconda condizione. Anche il confronto tra sincrona e incongruente ( $Z = 3.352$ ,  $P = 0.001$ ) e tra congruente e incongruente ( $Z = 2.722$ ,  $P = 0.006$ ) è risultato significativo, ad indicare che il drift era minore nella condizione incongruente rispetto sia alla condizione congruente passiva che sincrona attiva.



*Fig. 19. Nel grafico i dati relativi al drift propriocettivo nella stimolazione attiva nelle condizioni sincrona, congruente passiva e incongruente attiva.*

Nella stimolazione sham invece non sono emerse differenze significative nel confronto tra la condizione sincrona attiva e congruente passiva ( $Z= - 2.334$ ,  $P= 0.020$ ) e in quella tra sincrona e incongruente attiva ( $Z= 1.608$ ,  $P=0.108$ ). Risulta significativo quello tra congruente e incongruente ( $Z= 3.447$ ,  $P=0.001$ ).

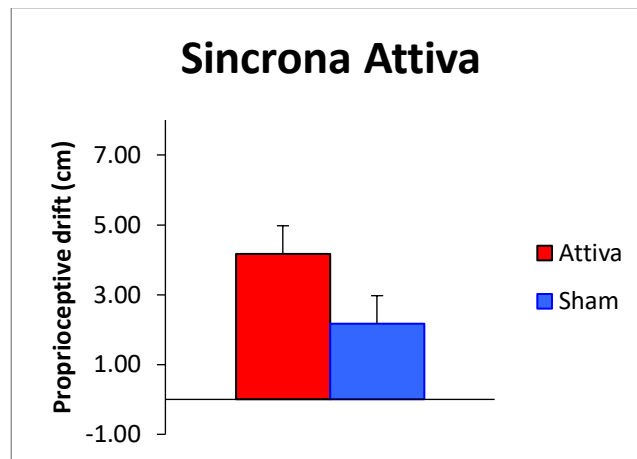


*Fig. 20. Nel grafico i dati relativi al drift propriocettivo nella stimolazione sham nelle condizioni sincrona, congruente passiva e incongruente attiva.*

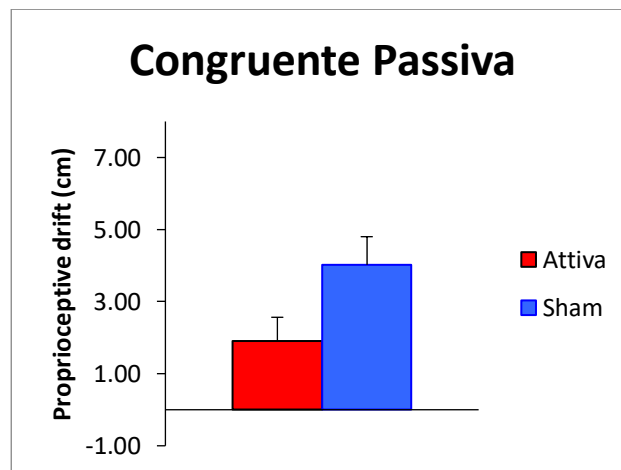
#### ***Confronto tra i due tipi di stimolazione attiva e sham***

Confrontando le due modalità di stimolazione, è emersa una differenza significativa nella condizione sincrona ( $Z=-2.417$ ,  $P= 0.016$ ), dovuta a un maggior drift in seguito a tDCS attiva rispetto a tDCS sham. Non sono emerse altre differenze significative (tDCS attiva, congruente passiva vs. tDCS sham, congruente passiva,  $Z=-2.075$ ,  $P=0.038$ ) e confronto tra tDCS attiva, incongruente attiva vs tDCS Sham, incongruente attiva ( $Z= -0.949$ ,  $P= 0.343$ ).

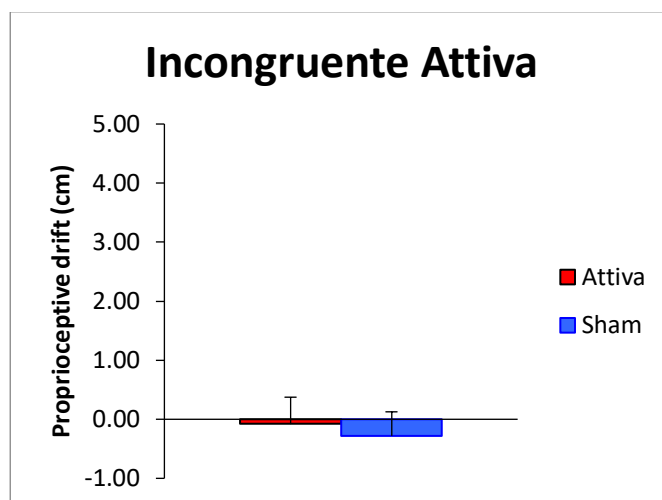




*Fig. 21. Confronto del drift propriocettivo nella condizione sincrona attiva della stimolazione attiva e sham.*



*Fig. 22. Confronto del drift propriocettivo nella condizione congruente passiva della stimolazione attiva e sham.*



*Fig. 23. Confronto del drift propriocettivo nella condizione incongruente attiva della stimolazione attiva e sham.*

#### ***Questionario sulle sensazioni indotte dalla tDCS Attiva***

A conclusione di ciascuna delle due sessioni sperimentali ai partecipanti all'esperimento è stato chiesto di compilare un questionario sugli effetti indotti dalla tDCS e di indicare se la stimolazione alla quale erano stati sottoposti era reale o placebo.

Dei 25 partecipanti all'esperimento solo uno ha risposto di non aver ricevuto alcuna stimolazione nella sessione dedicata alla tDCS attiva, e un soggetto ha risposto di non aver ricevuto alcuna stimolazione durante tDCS sham. Tutti gli altri hanno ritenuto di essere stati stimolati in modo reale in entrambe le sessioni sperimentali (Vedi grafico).

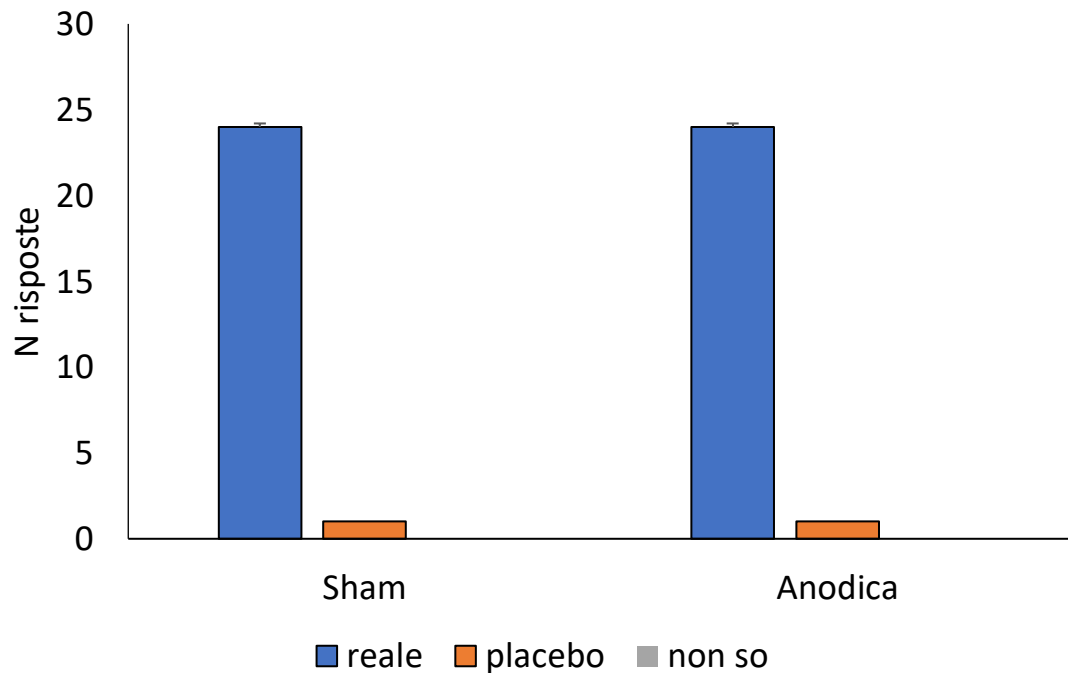


Fig. 24. Grafico relativo alle sensazioni indotte dalla tDCS.

### ***Discussione***

Lo scopo di questo primo esperimento è stato quello di indagare il ruolo del cervelletto nel senso di azione e in quello di proprietà del corpo.

La scelta del set up orizzontale rispetto al classico set up verticale dell'esperimento di Kalckert e Ehrsson (2012) ha confermato che queste due componenti, seppur tra loro distinte, possono essere evocate in modo differente in base al tipo di condizione sperimentale.

Dai risultati emersi nelle sensazioni soggettive del questionario non sono state rilevate differenze significative tra i due tipi di stimolazione attiva e sham, mentre nella misura implicita del drift propriocettivo la tDCS attiva del cervelletto ha evidenziato punteggi più alti nella condizione sincrona attiva rispetto a quelli ottenuti nella tDCS sham. Al contrario, in quest'ultima stimolazione, il drift propriocettivo è stato maggiore nella condizione congruente passiva rispetto alla condizione sincrona attiva.

Questo risultato potrebbe essere stato influenzato dall'assenza di controllo sul movimento dell'indice della propria mano destra durante il movimento passivo indotto dallo sperimentatore favorendo uno spostamento nella percezione della propria mano verso la mano di gomma e rendendo la localizzazione propriocettiva più malleabile rispetto ad altre condizioni sperimentali.

Si tratta di un'ipotesi da considerare ma questi risultati potrebbero anche dipendere da altri fattori, ad esempio, la congruenza spazio-temporale tra la mano finta e quella reale, potrebbe essere il fattore principale a determinare il senso di proprietà a prescindere dalla passività o meno del movimento.

Una possibile spiegazione ai risultati del drift propriocettivo nella tDCS attiva rispetto alla sham potrebbe convergere verso l'ipotesi che la stimolazione cerebellare aumenti la ricalibrazione implicita degli stimoli verso la mano di gomma.

Il cervelletto, inoltre, sembra essere coinvolto nella rilevazione di eventuali discrepanze tra il movimento programmato e quello effettivamente eseguito nonché nell'aggiornamento delle previsioni sensoriali (Roth et al., 2013).

Ciò potrebbe spiegare perché nella tDCS attiva il drift nella condizione congruente passiva si riduce: il cervelletto, infatti, ha il compito di comparare la previsione di movimento con il feedback sensoriale esterno e in questa specifica condizione la discrepanza tra il movimento dell'indice indotto dallo sperimentatore e l'assenza di auto-movimento non conduce a sperimentare il senso di azione perché non viene a crearsi alcuna previsione legata al movimento.

In altre parole la deriva propriocettiva verso la mano di gomma verrebbe contenuta dalla rilevazione di una discrepanza che rimanda ad un movimento osservato ma non effettivamente eseguito.

I modelli avanzati del cervelletto, infatti, forniscono delle predizioni durante il movimento auto-generato. Quando il soggetto muove il suo dito indice, come avviene nella condizione sincrona attiva, il cervelletto crea un modello che prevede le conseguenze sensoriali del movimento e le confronta con il feedback sensoriale esterno (*muovendo il dito indice anche quello della mano che ho di fronte si muove*).

Nel caso della tDCS cerebellare attiva questo processo potrebbe svolgersi in modo da generare una ricalibrazione maggiore nei confronti della mano di gomma mentre

nella condizione congruente passiva lo spostamento propriocettivo sarebbe contenuto dalla rilevazione di una discrepanza (*l'indice della mano che ho di fronte si muove ma io non sto eseguendo alcun movimento*).

Il cervelletto quindi opererebbe effettuando una distinzione tra movimento auto-prodotto e input che giungono dall'esterno rilevando eventuali incongruenze tra le conseguenze sensoriali previste e il feedback sensoriale esterno (Wolpert et al., 1995., Blakemore et al., 1998, 2001).

Per stimare la posizione dell'arto il cervelletto mette insieme tutta una serie di informazioni sensoriali di natura tattile, visiva e propriocettiva, ma quelle visive sembrano giocare un ruolo determinante nel generare l'illusione di appartenenza (Ehrsson et al., 2014, 2017). In particolar modo sembra esistere un'importante correlazione tra l'attività cerebellare e la forza visiva dell'illusione nonché tra attivazione cerebellare e sincronia dei movimenti (Ehrsson et al., 2004). Gli emisferi cerebellari inoltre integrano diversi input sensoriali di natura tattile, visiva e propriocettiva legati al corpo (Liu et al., 2003).

Potrebbe essere interessante per gli studi futuri valutare se il tempo di inizio dell'illusione nella condizione sincrona attiva possa essere modulato dalla tDCS anodica cerebellare al fine di spiegare le differenze tra tDCS anodica e sham rilevate in questa condizione e che sembrano convergere verso questa ipotesi.

Se la stimolazione cerebellare facilita la ricalibrazione implicita degli stimoli nella condizione sperimentale sincrona attiva ciò potrebbe evocare in misura maggiore l'emergere dell'esperienza soggettiva di proprietà della mano di gomma a differenza di quanto avverrebbe nella tDCS sham che al contrario evoca un drift minore.

L'illusione di proprietà evocata dalla tDCS cerebellare anodica potrebbe suggerire un coinvolgimento del cervelletto nell'integrazione di segnali multisensoriali provenienti dal corpo, in associazione al lavoro di altre aree cerebrali quali quelle premotorie e parietali.

Indipendentemente dal tipo di stimolazione applicato, il senso di proprietà espresso nella misura del drift propriocettivo è stato osservato quando la mano di gomma si trovava in una posizione anatomicamente congruente ma non quando veniva a mancare questo requisito. Al contrario, il senso dell'azione è stato riportato nelle

condizioni in cui il partecipante eseguiva dei movimenti attivi con l'indice della propria mano destra a prescindere dal fatto che la mano si trovava in una posizione anatomicamente plausibile.

Queste osservazioni riflettono in parte quanto messo in luce dagli studi che indagano il senso del corpo nelle due direzioni del senso di azione e di quello di proprietà.

Tuttavia, nel presente paradigma della mRHI, i risultati emersi andranno confrontati con studi futuri che indaghino il ruolo del cervelletto nella modulazione di queste due componenti del Sé corporeo.

## CAPITOLO V

### 5.1 Consapevolezza motoria e senso di azione

I dettagli delle nostre azioni non sono basati sull'osservazione del nostro corpo in movimento in quanto si tratta di processi perlopiù automatici e non coscienti. Chiedersi quale gamba muovere per prima nell'affrontare un determinato percorso o controllarne visivamente gli effetti non ci conduce verso una migliore performance, al contrario, quegli stessi movimenti non avrebbero la stessa efficienza e la nostra prestazione motoria non sarebbe così fluida e accurata.

La sensazione relativa ai movimenti eseguiti non è dunque di tipo cosciente nonostante ciascuno sperimenti in modo prerafflessivo la sensazione che quell'azione stia avendo un qualche effetto sul mondo. Il senso di azione sembra coinvolgere livelli differenti, da quello propriamente legato all'elaborazione sensori-motoria (Tsakiris e Haggard, 2005) a quello di ordine superiore che include l'intenzione e il giudizio retrospettivo (Stephens e Graham 2000).

Il primo livello è quello prerafflessivo e si esprime in una forma di coscienza di sé non concettuale che caratterizza le azioni che normalmente eseguiamo senza alcun controllo cosciente mentre il secondo livello è di tipo concettuale e riflette un processo di attribuzione esplicita dell'azione come nei casi in cui un'azione è guidata da un'intenzione esplicita.

Il senso di azione e quello di proprietà sono due forme di consapevolezza corporea delle quali possiamo avere esperienza in modo distinto, ma sembra che il senso di azione possa contribuire a generare un senso di proprietà più fluido e integrato (Tsakiris et al., 2007). In tal senso, se moduliamo l'*agency*, potremmo aspettarci che l'*ownership* aumenti di conseguenza.

Ci sono delle situazioni nelle quali ci troviamo di fronte all'esigenza di riconoscere una parte del corpo come appartenente a noi stessi; ad esempio, se al risveglio avvertiamo un senso di intorpidimento al braccio la prima cosa che facciamo è muoverlo, come a voler ripristinare più velocemente un senso di proprietà temporaneamente interrotto.

Sull'insorgenza del senso di proprietà, le neuroscienze hanno appoggiato un approccio di tipo sia *bottom-up*, legato alla multisensorialità nonché all'integrazione, sia *top-down*, puntando invece sui modelli interni, per cui, affinché l'illusione della mano di gomma si verifichi, è necessario tenere in considerazione la configurazione corporea (Braun et al., 2018). Questo si traduce in un'attenzione specifica al setup per cui la mano di gomma deve rispettare i dovuti accorgimenti in termini di posizionamento.

Per quanto riguarda invece la multisensorialità, alcuni esperimenti hanno portato a interrogarsi circa una possibile influenza dei processi motori sulla propriocezione (Kalckert e Ehrsson, 2017) per cui andrebbe attenzionato in tale senso il confronto tra condizioni di svolgimento differenti e il modo in cui il senso di azione influisce sulla percezione corporea puntando soprattutto su misure implicite come il drift propriocettivo e riconoscendo i punti deboli di quelle esplicite (Haans et al, 2012).

La *Moving Rubber Hand Illusion* con inclusione del movimento indaga gli effetti della stimolazione visuo-tattile in termini di sincronia e con confronto tra condizione attiva e passiva: sperimentalmente, si è riscontrato un maggiore senso di proprietà nella condizione attiva, e si è portati dunque alla conclusione che l'azione volontaria possa influire sul senso di appartenenza. L'esperimento di Kalckert e Ehrsson (2012) ha indagato le possibili correlazioni includendo condizioni di sincronia: i risultati hanno mostrato la possibilità di concepire separatamente il senso di azione e quello di proprietà, ma anche il rinforzo reciproco; come questo rinforzo avvenga è ancora oggetto di discussione.

### **Sede della ricerca**

Dipartimento di Scienze Cognitive, Psicologiche, Pedagogiche e degli Studi Culturali, Università di Messina.

### **Obiettivo**

Il senso di azione (SoA) e il senso di proprietà corporea (SoO) sono due componenti fondamentali della consapevolezza di sé che possono essere danneggiati in modo

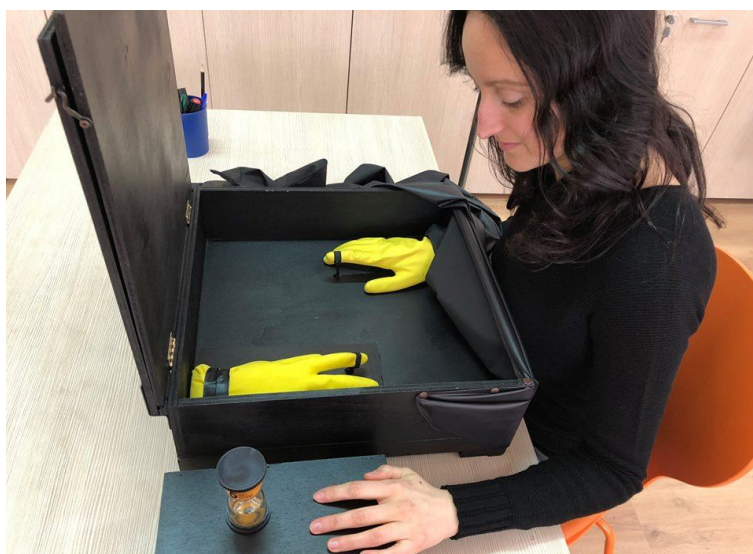


distinto e selettivo in seguito ad una lesione cerebrale. Questo esperimento ha come obiettivo quello di indagare l'interazione tra queste due funzioni attraverso il paradigma dell'illusione della mano di gomma in movimento (Kalckert e Ehrsson, 2012) al fine di comprendere se esista un possibile effetto di promozione del SoA (senso di azione) sul SoO (senso di proprietà del corpo) utilizzando un approccio teorico cross-modale attraverso l'associazione di un preciso *feedback sensoriale* associato all'azione che consiste nell'esecuzione di un doppio tocco con il dito indice della mano destra. Valuteremo inoltre i tempi di insorgenza del senso di proprietà per rilevare eventuali differenze tra le due modalità (*feedback/no feedback*) nella condizione sincrona attiva.

### **Il protocollo sperimentale**

Il paradigma utilizzato per l'esperimento è lo stesso del precedente studio ossia quello della *Moving Rubber Hand Illusion* di Kalckert e Ehrsson (2012).

La scatola di legno è stata costruita delle medesime dimensioni e nel piano di appoggio della scatola sono stati gli stesso fori, distanziati di 20 cm, per permettere l'uscita dei chiodi sui quali incollare l'anello in velcro da utilizzare per l'inserimento del dito indice delle due mani. Per la mano di gomma è stato utilizzato anche in questo caso un guanto in lattice riempito di cellulosa e successivamente attaccato ad un foglio di plastica nero.



*Fig. 1 Prova del up sperimentale della Moving Rubber Hand Illusion (identico a quello utilizzato nel precedente esperimento).*

### **Partecipanti e metodi**

La procedura prevede due sessioni sperimentali, distinte tra loro solo dalla presenza/assenza di un feedback acustico associato all'azione, svolte su uno stesso campione di 21 soggetti (13 femmine, 8 maschi, età media=25.29, SD=  $\pm$  4.44, range 21-33) provenienti dall'Università degli Studi di Messina. I soggetti hanno firmato un modulo di consenso informato prima dello svolgimento dell'esperimento.

Entrambe le sessioni sperimentali prevedono l'applicazione del paradigma in tre condizioni (sincrona attiva., congruente passiva., incongruente attiva) che seguiranno a una prima fase di training in cui il soggetto si eserciterà con il doppio tocco che dovrà essere privo di una frequenza regolare al fine di non sviluppare un movimento abitudinario che influirebbe sui risultati degli esperimenti.

Prima e dopo ogni condizione il soggetto dovrà giudicare la posizione della propria mano al fine di calcolare il drift propriocettivo. A conclusione di ciascuna condizione al partecipante viene chiesto di compilare un questionario volto a valutare l'esperienza soggettiva dell'illusione con una valutazione delle risposte tramite scala Likert a 7 punti.

Dopo l'esecuzione delle tre condizioni si procede ad una doppia misurazione del tempo di insorgenza dell'ownership nella condizione sincrona attiva: il soggetto dovrà verbalmente dichiarare il momento in cui inizia ad avvertire un senso di appartenenza nei confronti della mano di gomma, rilevato attraverso l'utilizzo di un cronometro.

L'ordine di esecuzione delle due sessioni è randomizzata tra i partecipanti mentre per ogni soggetto rimane invariato l'ordine di somministrazione delle tre condizioni con lo scopo di isolare il più possibile la variabile rappresentata dal feedback acustico, valutando con più certezza possibile le implicazioni.

---

<b>Proprietà</b>	1	<i>Mi sentivo come se stessi guardando la mia mano</i>
	2	<i>Mi sentivo come se la mano di gomma fosse parte del mio corpo</i>
	3	<i>Mi sentivo come se la mano di gomma fosse la mia mano</i>
<b>Controllo della proprietà</b>	4	<i>Sembra come se avessi più di una mano destra</i>
	5	<i>Sembrava come se non avessi più la mano destra, come se la mia mano destra fosse scomparsa</i>
	6	<i>Mi sentivo come se la mia mano reale stesse diventando di gomma</i>
<b>Agenzia</b>	7	<i>Mi sentivo come se stessi causando i movimenti della mano di gomma</i>
	8	<i>Mi sentivo come se potessi controllare i movimenti della mano di gomma</i>
	9	<i>La mano di gomma si muoveva proprio come volevo, come se stesse obbedendo alla mia volontà</i>
<b>Controllo dell'agenzia</b>	10	<i>Mi sentivo come se la mano di gomma stesse controllando la mia volontà</i>
	11	<i>Sembrava che la mano di gomma avesse una propria volontà</i>

*Tabella 2. Affermazioni del questionario utilizzato dal partecipante dopo ogni condizione sperimentale (tradotto da Kalckert e Ehrsson, 2012).*

### **Le condizioni sperimentali**

L'esperimento consiste di due sessioni, ciascuna delle quali composta dalle stesse tre condizioni: l'unica differenza tra le due sessioni è l'effetto della manipolazione di una specifica variabile, ossia il feedback acustico associato al doppio tocco. Le tre condizioni sperimentali sono le stesse utilizzate per il precedente esperimento e sono identificate a partire da tre caratteristiche: la presenza/assenza del feedback acustico, il tipo di movimento e la posizione della mano di gomma rispetto al corpo del soggetto.

La prima condizione è la sincrona attiva: in questo caso, il soggetto esegue il doppio tocco, il movimento della mano di gomma è sincrono rispetto alla mano del soggetto e la mano di gomma è in una posizione congruente. Ricerche precedenti hanno rilevato in tale condizione un forte senso di proprietà e azione, dovuto rispettivamente alla posizione della mano di gomma e al movimento sincrono.

La seconda condizione è la congruente passiva, simile alla prima condizione ma in questo caso il soggetto non deve eseguire alcun movimento, limitandosi solo a osservare: il doppio tocco, infatti, è eseguito dallo sperimentatore, che è posizionato dietro la scatola e manipola il meccanismo sotto la stessa al fine di muovere il dito della mano del soggetto e della mano di gomma. Il doppio tocco osservato sarà sempre sincrono, ma a causa dell'assenza del movimento attivo da parte del soggetto, in questo caso ci si aspetta un abbassamento del senso di azione, mentre quello di proprietà rimane più o meno allo stesso livello della prima condizione.

L'ultima condizione è l'incongruente attiva, dunque in questo caso il doppio tocco è eseguito dal soggetto e il movimento è sincrono: questa volta, però, la mano di

gomma è ruotata di 180° rispetto al soggetto, dunque si verifica una riduzione del senso di proprietà in quanto il soggetto percepisce, attraverso la visione, che la mano osservata non può essere la propria.

### ***Analisi dei dati***

Come per il precedente esperimento le risposte al questionario sono state raggruppate in quattro punteggi complessivi:

- 1) Agency: media degli item sperimentali specifici per l'agency;
- 2) Ownership: media degli item sperimentali specifici per l'ownership;
- 3) Agency controllo: media degli item di controllo specifici per l'agency;
- 4) Ownership controllo: media degli item di controllo specifici per l'ownership.

Anche in questo caso il drift propriocettivo è stato misurato prima e dopo ciascuna condizione sperimentale e la differenza tra il giudizio iniziale e quello finale è stata utilizzata al fine di rilevare lo spostamento propriocettivo verso la mano di gomma, considerato un indicatore implicito della presenza dell'illusione (Tsakiris e Haggard, 2005).

Le analisi di normalità eseguite attraverso *Shapiro-Wilk* hanno rilevato che i dati non erano distribuiti normalmente ( $p < 0.05$ ).

Per tale ragione, le analisi sono state condotte attraverso test non parametrici. I dati del questionario e del *drift propriocettivo* sono stati analizzati separatamente. Valori di  $P < 0.050$  sono stati considerati come statisticamente significativi.

Per l'analisi dei dati è stato utilizzato un piano simile a quello utilizzato in precedenza.

Rispetto al questionario abbiamo proceduto al fine di: 1) verificare l'attendibilità del paradigma confrontando le variabili di agency e ownership con i loro rispettivi controlli, separatamente per ciascuna condizione; 2) valutare eventuali differenze tra agency e ownership confrontando i punteggi dei soli item sperimentali; 3) rilevare eventuali differenze tra condizioni nell'evocare agency e ownership confrontando i punteggi dei soli item sperimentali di agency e ownership in riferimento alle tre diverse condizioni sperimentali; 4) rilevare eventuali effetti modulatori del feedback confrontando i punteggi degli item sperimentali di agency e ownership nelle due

modalità, feedback/no feedback. 5) valutare eventuali differenze nei tempi di insorgenza dell'ownership relativi alla condizione sincrona attiva nelle due modalità (feedback/no feedback).

## **QUESTIONARIO**

Al fine di verificare l'attendibilità del paradigma è stato utilizzato il test di Wilcoxon per un confronto a coppie tra item sperimentali (agency e ownership) e di controllo (agency controllo e ownership controllo), separatamente per ciascuna condizione e modalità.

Le differenze tra agency e ownership in ciascuna condizione sono state analizzate separatamente per ciascuna modalità effettuando dei confronti a coppie utilizzando il test di Wilcoxon.

Per valutare la differenza tra condizioni (sincrona attiva, congruente passiva e incongruente attiva) nell'evocare agency e ownership è stato utilizzato il test di Friedman separatamente per ciascuna modalità (feedback/no feedback). In caso di significatività statistica, si è proceduto ai confronti a coppie post hoc con il test di Wilcoxon, applicando la correzione di Bonferroni per confronti multipli ( $p=0.016$ ).

Le eventuali differenze tra le due modalità sono state analizzate effettuando dei confronti a coppie con Wilcoxon, separatamente per ciascuna condizione e funzione. Analogamente, per l'analisi dei tempi di insorgenza dell'ownership nella condizione sincrona attiva delle due modalità (feedback/no feedback) abbiamo utilizzato il test di Wilcoxon per un confronto a coppie. Per quanto concerne quest'ultima analisi abbiamo deciso di sottoporre alla rilevazione dei tempi di insorgenza dell'ownership solo quei soggetti che nel questionario ottenevano punteggi di proprietà pari a  $\geq 1$ .

Le affermazioni al questionario venivano valutate utilizzando una scala Likert da -3 (fortemente in disaccordo) a +3 (fortemente d'accordo). Ai soggetti veniva chiesto di riportare verbalmente il momento in cui iniziavano a sviluppare un senso di appartenenza nei confronti della mano di gomma e questa misura veniva rilevata dallo sperimentatore attraverso l'utilizzo di un cronometro. Questo stesso compito veniva ripetuto per due volte al fine di calcolare una media per ciascun partecipante

con una pausa di circa 50 secondi tra le due rilevazioni (Cfr. Kalckert e Ehrsson, 2017).

## **DRIFT**

Per la misura del drift propriocettivo abbiamo deciso di utilizzare il test di Friedman per il confronto tra condizioni separatamente in ciascuna delle due modalità (feedback/no feedback), procedendo poi con confronti a coppie tra condizioni attraverso Wilcoxon, considerando statisticamente significativi valori compatibili con l'opportuna correzione di Bonferroni ( $p=0.016$ ).

## **Risultati del questionario**

### ***Attendibilità del paradigma della Moving Rubber Hand Illusion***

Da un confronto tra item sperimentali e item di controllo riferiti all'ownership è emerso che nella condizione *sincrona attiva* i partecipanti all'esperimento tendevano ad attribuire punteggi più alti alle domande sperimentali rispetto a quelle di controllo in entrambi i tipi di modalità (feedback ownership sincrona vs. feedback ownership control sincrona  $Z= -3.923$ ,  $p<0.001$ ), (no feedback ownership sincrona vs. no feedback ownership control sincrona  $Z=-3.888$ ,  $p<0.001$ ).

Per quanto riguarda i livelli di agency i soggetti attribuivano anche in questo caso punteggi più alti alle domande sperimentali rispetto a quelle di controllo (feedback agency sincrona vs. feedback agency control sincrona  $Z=-4.019$ ,  $p<0.001$ ), (no feedback agency sincrona vs. no feedback agency control sincrona  $Z=-4.028$ ,  $p<0.001$ ).

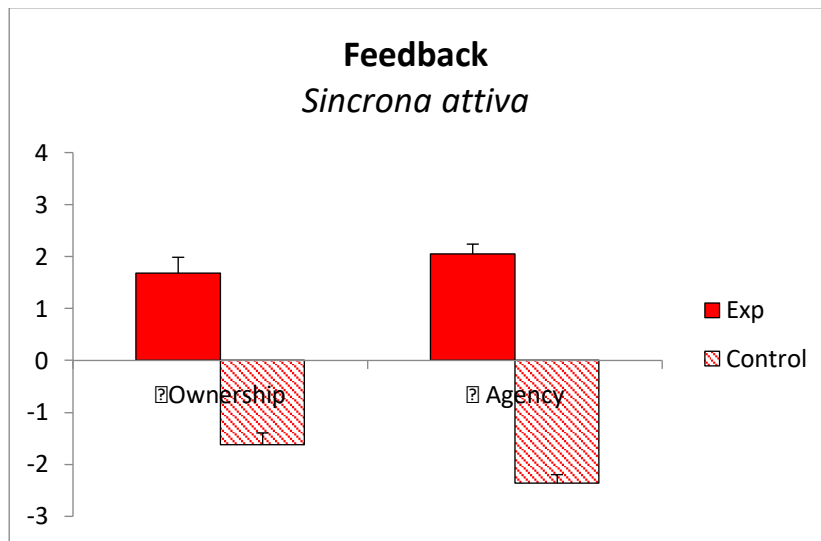


Fig. 2 Confronto tra item sperimentali e item di controllo nella condizione sincrona con feedback

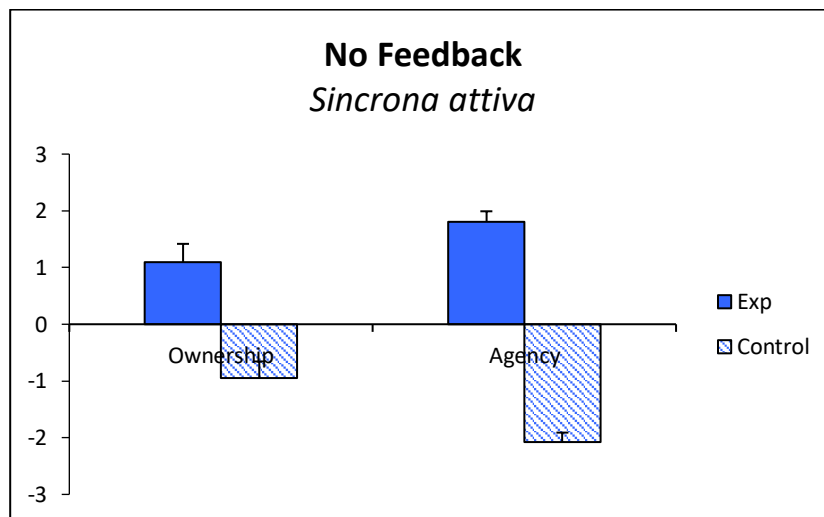


Fig. 3 Confronto tra item sperimentali e di controllo nella condizione sincrona attiva senza feedback

Nella condizione *congruente passiva* gli item sperimentali riferiti all'ownership presentavano punteggi più alti rispetto a quelli di controllo in entrambi i tipi di modalità (feedback ownership congruente vs. feedback ownership control congruente  $Z = -3.564, p < 0.001$ ), (no feedback ownership congruente vs. no feedback ownership



control congruente  $Z=-3.737$ ,  $p<0.001$ ) mentre gli item sperimentali relativi all'agency presentavano punteggi più bassi se comparati agli item di controllo in entrambi i tipi di modalità (feedback agency congruente vs. feedback agency control congruente  $Z=-1.756$ ,  $p=0.079$ ), (no feedback agency congruente vs. no feedback agency control congruente  $Z=-1.983$ ,  $p=0.047$ ).

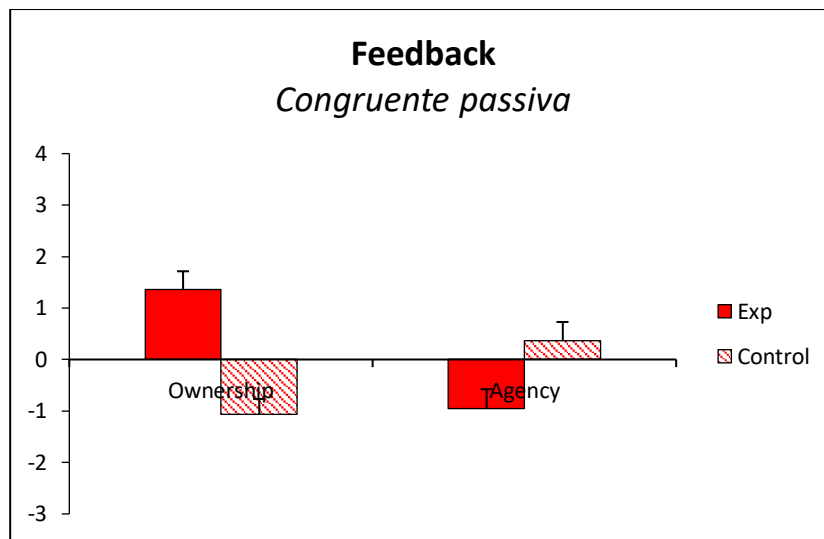


Fig. 4 Confronto tra item sperimentali e item di controllo nella condizione congruente passiva con feedback

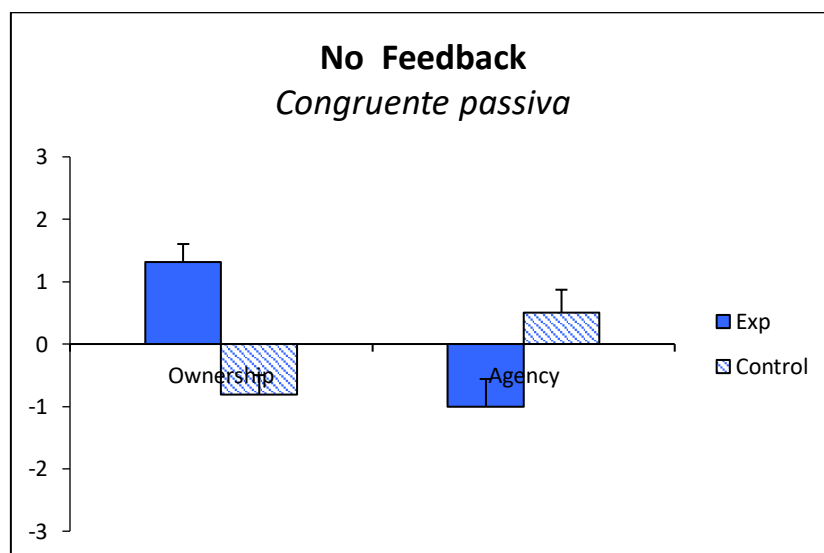
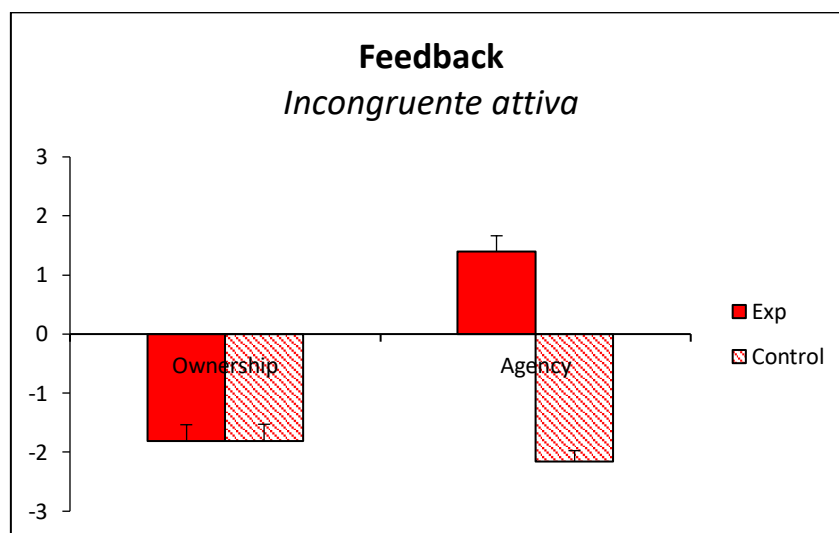
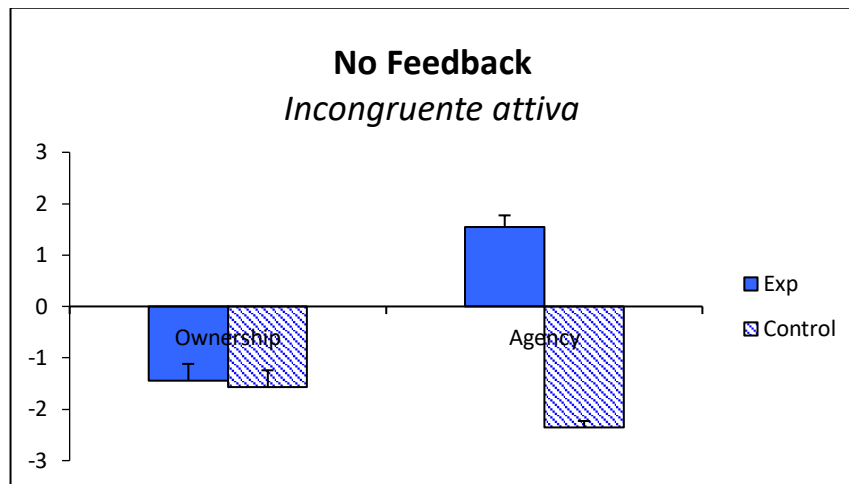


Fig. 5 Confronto tra item sperimentali e di controllo nella condizione congruente passiva senza feedback

Nella condizione *incongruente attiva* abbiamo riscontrato punteggi più alti nell'agency per gli item sperimentali rispetto a quelli di controllo in entrambi i tipi di modalità (feedback agency incongruente vs. feedback agency control incongruente  $Z=-4.020$ ,  $p=0.001$ ), (no feedback agency incongruente vs. no feedback agency control incongruente  $Z= -4.019$ ,  $p<0.001$ ). Non abbiamo riscontrato differenze significative nel confronto tra item sperimentali e item di controllo riferiti all'ownership nelle due modalità (feedback ownership incongruente vs. feedback ownership control incongruente  $Z=-0.031$ ,  $p=0.975$ ) (no feedback ownership incongruente vs. no feedback ownership control incongruente  $Z=-0.190$ ,  $p= 0.849$ ) nonostante la rotazione di 180 gradi della mano di gomma.



*Fig. 6 Confronto tra item sperimentali e item di controllo nella condizione incongruente con feedback*



*Fig. 7 Confronto tra item sperimentali e di controllo nella condizione incongruente attiva senza feedback*

### ***Differenze tra agency ed ownership in ciascuna condizione***

#### **Feedback**

Da un confronto tra i punteggi di agency ed ownership nella condiziona sincrona non sono emerse differenze significative ( $Z = -0.818$ ,  $P = 0.414$ ) mentre al contrario queste differenze si evidenziano nelle altre due condizioni.

Nella condizione congruente passiva infatti i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'ownership rispetto all'agency ( $Z = -3.854$ ,  $P < 0.001$ ) mentre nella condizione incongruente attiva i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'agency ( $Z = -3.784$ ,  $P < 0,001$ ).

#### **No Feedback**

Da un confronto tra i punteggi di agency ed ownership in ciascuna condizione è emerso che i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'agency rispetto che a quelle relative all'ownership nella condizione incongruente attiva ( $Z = -3.810$ ,  $P < 0.001$ ). Nella condizione congruente passiva i partecipanti attribuivano punteggi maggiori alle domande relative all'ownership ( $Z = -3.486$ ,  $P < 0.001$ ) mentre nella condizione sincrona attiva non abbiamo riscontrato differenze significative tra agency e ownership ( $Z = -1.484$ ,  $P = 0.138$ ).

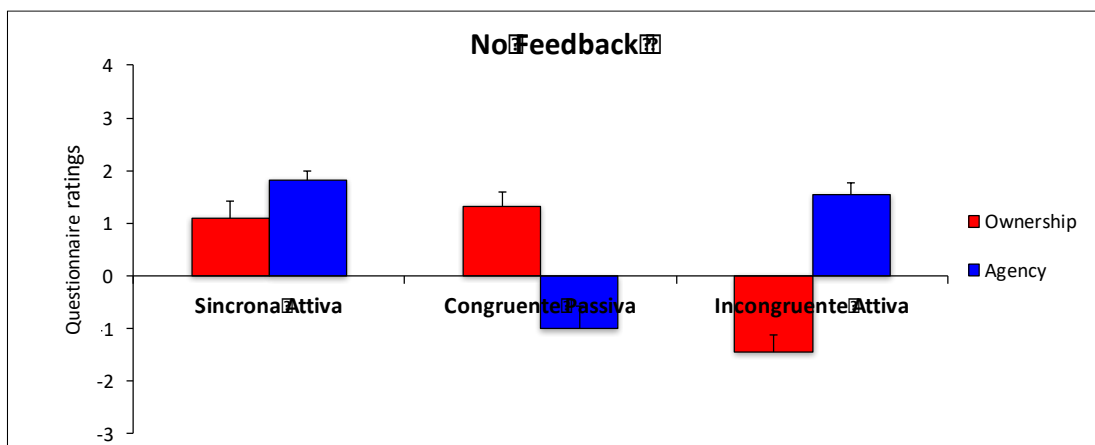
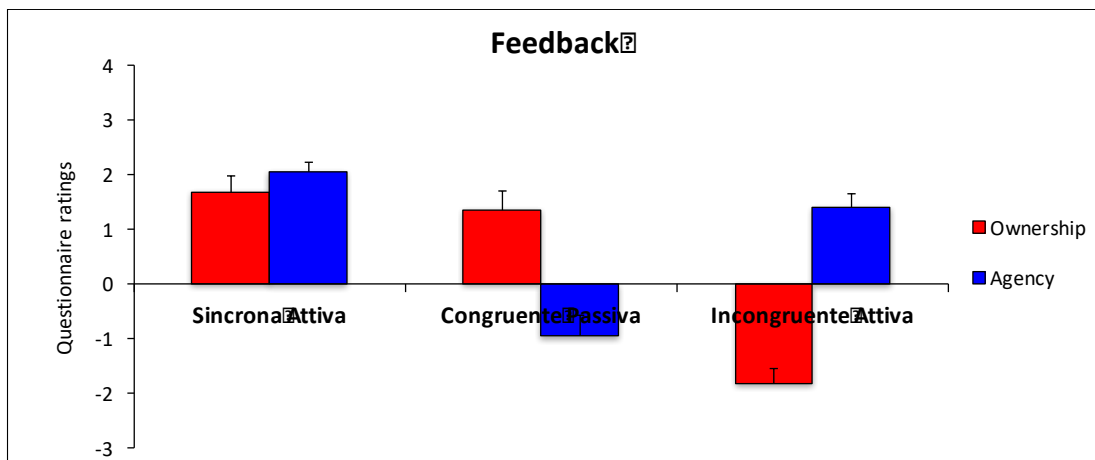


Fig. 8. Grafici di confronto delle differenze nei punteggi medi degli item sperimentali di Ownership ed Agency rispetto alle tre condizioni sperimentali e per entrambi i tipi di modalità feedback/no feedback.

### **Differenze tra condizioni nell'evocare agency e ownership**

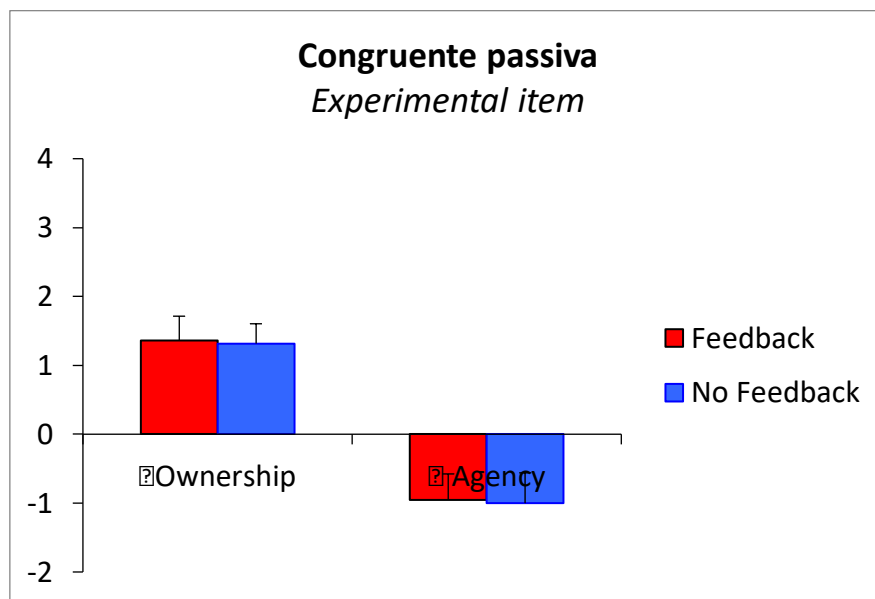
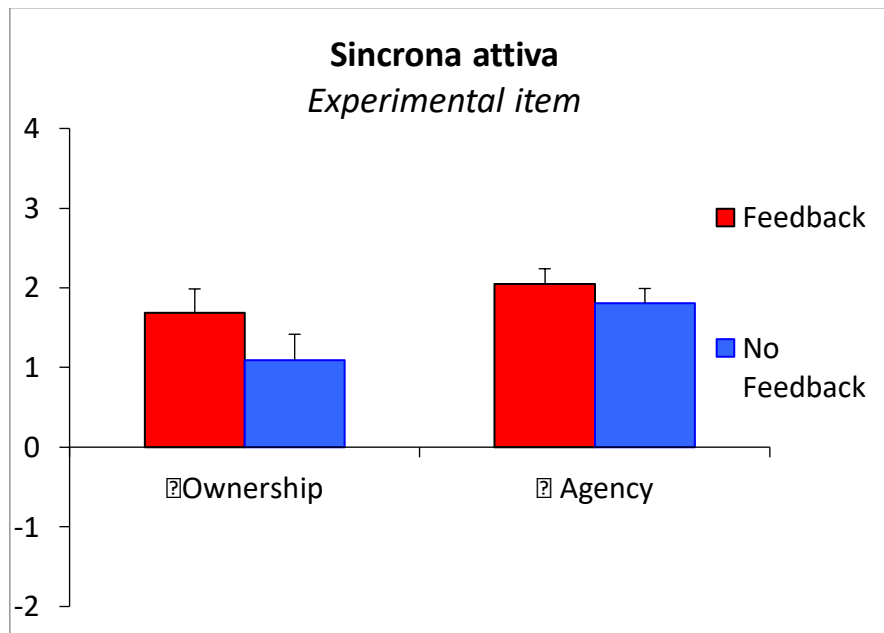
La sensazione di ownership variava in modo significativo tra le 3 condizioni sperimentali in entrambe le modalità (**Feedback:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 31.808$ ,  $p < 0.001$ ) – (**No feedback:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 26.152$ ,  $p < 0.001$ ).

Per quanto riguarda i punteggi di agency abbiamo osservato una differenza significativa tra le 3 condizioni sperimentali sia nella modalità con feedback

(**Feedback:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 24.308$   $p < 0.001$ ) che in quella senza feedback (**No feedback:** test di Friedman;  $\chi^2 [3] = 8$   $p < 0.012$ ).

Abbiamo rilevato che i soggetti tendevano ad attribuire punteggi più elevati di proprietà nelle due condizioni congruenti rispetto a quelle incongruenti per entrambe le modalità (sincrona feedback vs. incongruente feedback:  $Z = -3.926$ ,  $p < 0.001$ ) (congruente feedback vs. incongruente feedback  $Z = -3.826$ ,  $p < 0.001$ ) (sincrona no feedback vs. incongruente no feedback  $Z = -3.833$ ,  $p < 0.001$ ) (congruente feedback vs. incongruente no feedback  $Z = -3.866$ ,  $p < 0.001$ ). Non abbiamo invece rilevato differenze significative nell'ownership tra la condizione sincrona e quella congruente nella modalità con feedback ( $Z = -1.369$ ,  $p = 0.171$ ) e in quella senza feedback ( $Z = -0.336$ ,  $p = 0.737$ ).

Abbiamo riscontrato una differenza significativa nella modalità con feedback (sincrona feedback vs. congruente feedback  $Z = -3.914$ ,  $p < 0.001$ ) e anche in quella senza feedback (sincrona no feedback vs. congruente no feedback  $Z = -3.428$ ,  $p = 0.001$ ). I movimenti attivi sono quindi in grado di modulare i livelli di ownership nella condizione sincrona attiva per entrambe le modalità. I punteggi di agency nella modalità senza feedback hanno mostrato una differenza significativa tra la condizione congruente passiva e incongruente attiva ( $Z = -2.988$ ,  $p = 0.003$ ) ma non tra la sincrona e l'incongruente ( $Z = -1.200$ ,  $p = 0.230$ ).



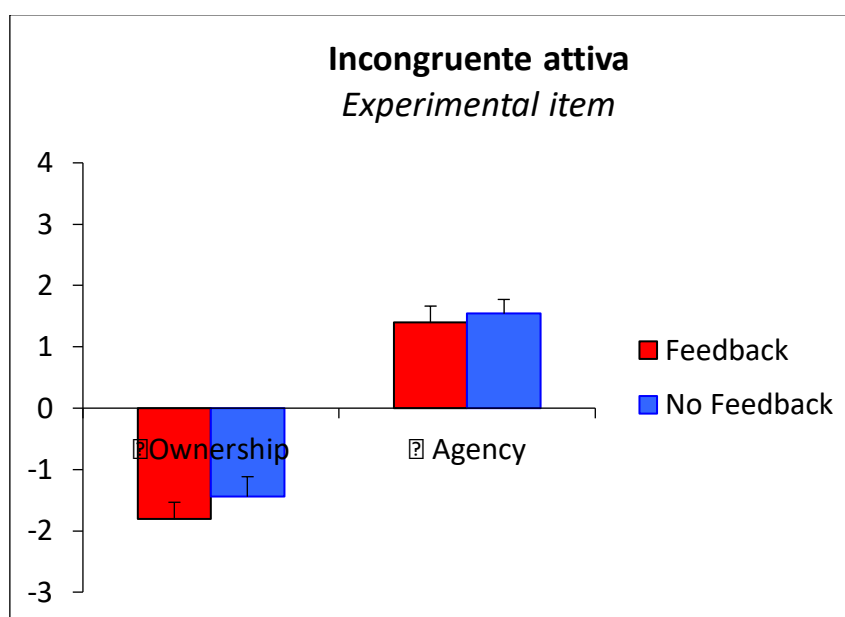


Fig. 9. Grafici Di confronto delle differenze tra condizioni nell'evocare Ownership ed Agency.

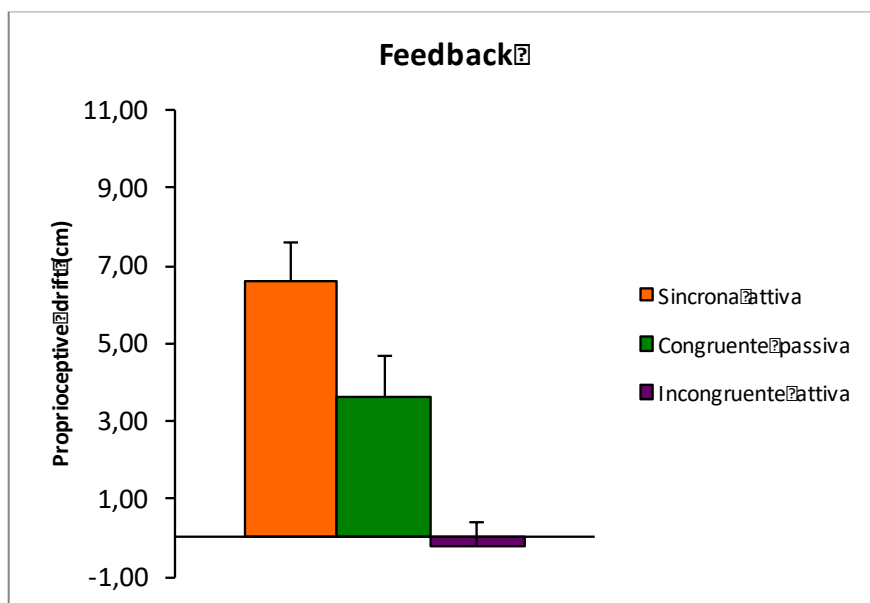
#### ***Effetto della modalità sulla funzione***

Per quanto riguarda l'agency non si rilevano significative differenze tra la modalità con feedback e quella senza feedback nella condizione sincrona attiva ( $Z = -1.070$ ,  $p = 0.285$ ) nella congruente passiva ( $Z = -0.235$ ,  $p = 0.814$ ) e nell'incongruente attiva ( $Z = 0.052$ ,  $p = 0.958$ ); analogamente nel caso dell'ownership la differenza tra modalità non è significativa nella congruente passiva ( $Z = -0.261$ ,  $p = 0.794$ ) nell'incongruente attiva ( $Z = -1.091$ ,  $p = 0.275$ ) mentre risulta significativa nella condizione sincrona attiva ( $Z = -2.254$ ,  $p = 0.024$ ).

#### ***Drift propriocettivo***

Per quanto concerne i risultati del drift abbiamo utilizzato il test di Friedman per un confronto tra condizioni. In entrambi i casi questo confronto è risultato significativo. (**Feedback** test di Friedman:  $\chi^2 [3] = 21.342$ ,  $p < 0.001$ ) – (**No Feedback** test di Friedman:  $\chi^2 [3] = 9.975$ ,  $p < 0.007$ ).

Confrontando i risultati del drift nella condizione sincrona attiva e congruente passiva della modalità con feedback sono emerse differenze significative ( $Z = -2.439$ ,  $P = 0.014$ ). Anche il confronto tra sincrona e incongruente ( $Z = -3.685$ ,  $P < 0.001$ ) così come quello tra congruente e incongruente ( $Z = -2.946$ ,  $P < 0.001$ ) risulta significativo.



*Fig. 10 Grafico dei dati relativi al drift propriocettivo della stimolazione attiva nelle condizioni sincrona, congruente passiva e incongruente attiva.*

Confrontando i risultati del drift nella condizione sincrona attiva e congruente passiva della modalità senza feedback non sono emerse differenze significative ( $Z = -1.188$ ,  $P = 0.235$ ). Tali differenze si evidenziano nel confronto tra sincrona e incongruente ( $Z = -2.619$ ,  $P = 0.009$ ) e tra congruente e incongruente ( $Z = -3.273$ ,  $P = 0.001$ ).



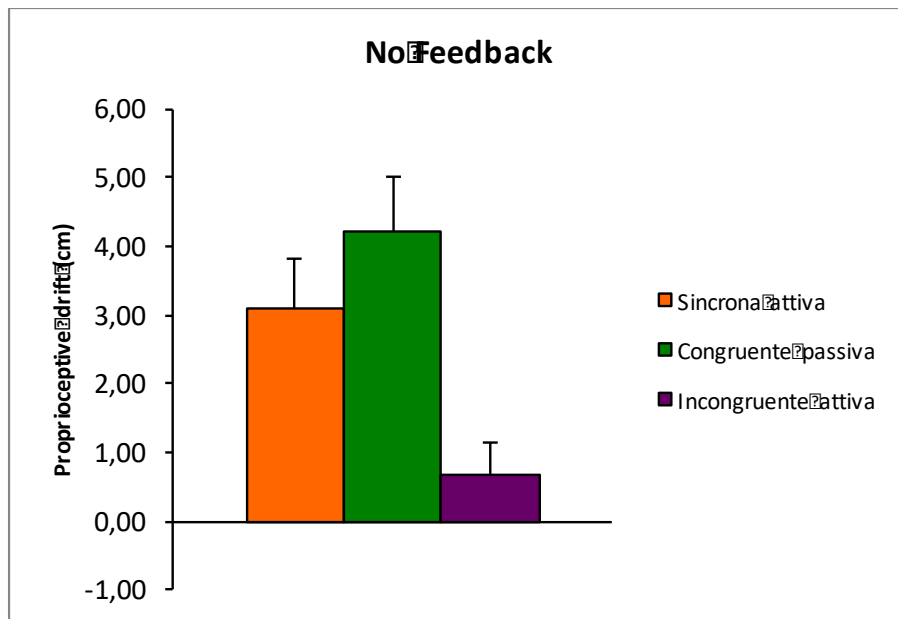
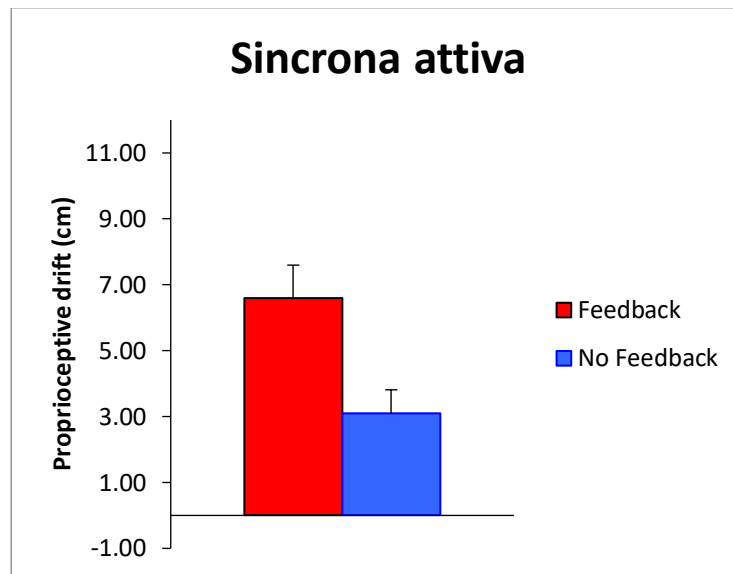


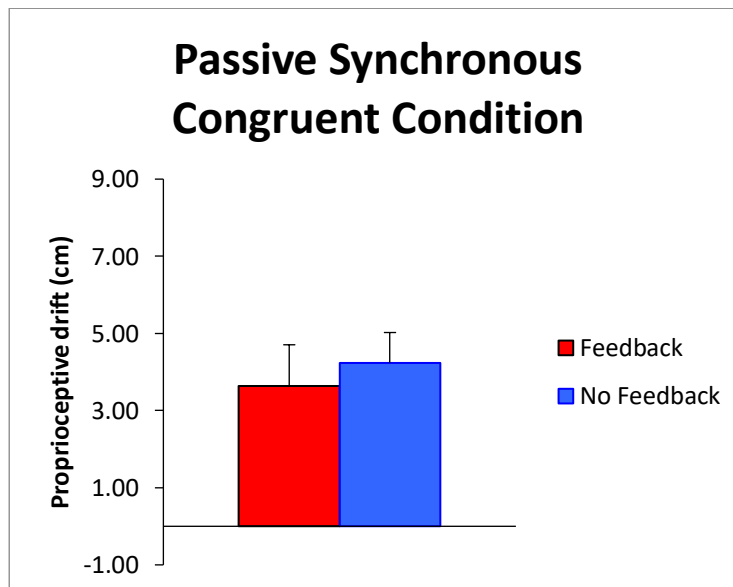
Fig 11. Grafico relativo ai dati del drift propriocettivo della stimolazione sham nelle condizioni sincrona, congruente passiva e incongruente attiva.

#### ***Confronto tra i due tipi di modalità Feedback-No Feedback***

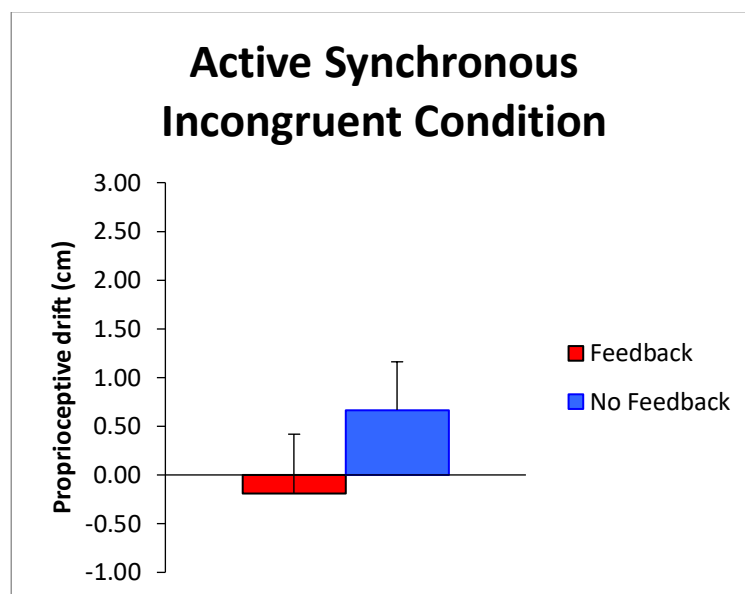
Confrontando i punteggi del drift propriocettivo nella condizione sincrona attiva delle due modalità abbiamo ottenuto una differenza significativa ( $Z=-3.641$ ,  $p<0.001$ ). Gli altri due confronti non risultano significativi (confronto tra congruente passiva feedback vs. congruente passiva no feedback  $Z= -0.403$ ,  $p=0.687$ ) e confronto tra incongruente attiva feedback vs. incongruente attiva cuffie  $Z= -1.112$ ,  $p= 0.266$ ).



*Fig. 12. Confronto del drift propriocettivo nella condizione sincrona attiva nella modalità con e senza feedback*



*Fig. 13. Confronto del drift propriocettivo nella condizione congruente passiva nella modalità con e senza feedback*

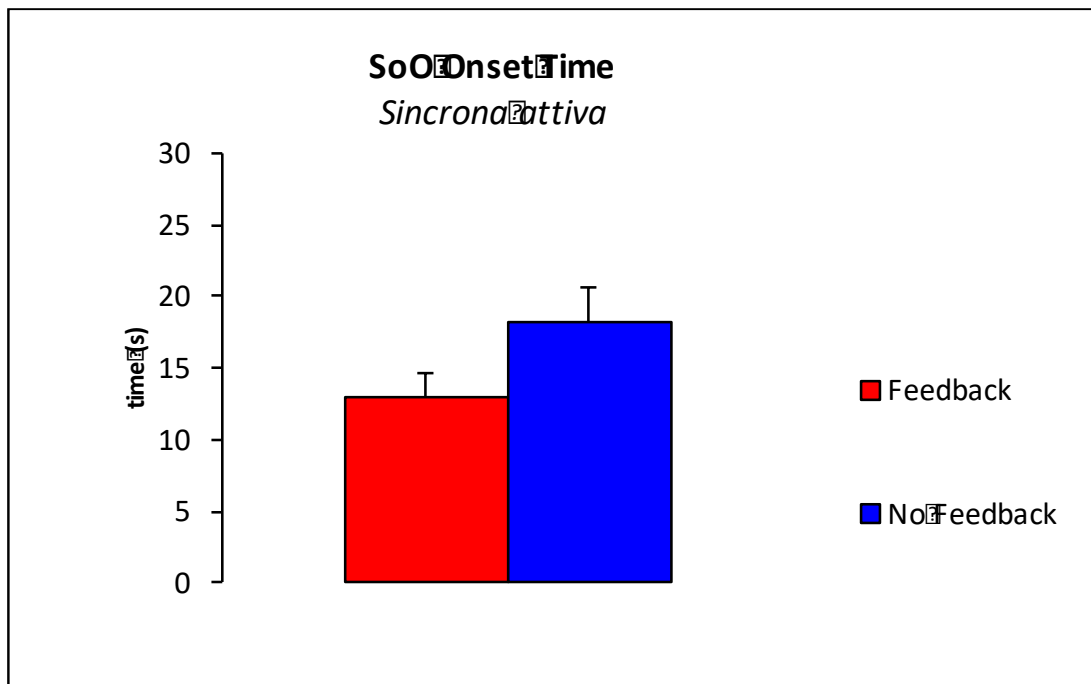


*Fig. 14. Confronto del drift propriocettivo nella condizione incongruente attiva nella modalità con e senza feedback.*

### ***Tempi di insorgenza del senso di Ownership***

Da un confronto tra i tempi di insorgenza dell'ownership nella condizione sincrona attiva delle due modalità (feedback/no feedback) è emerso che i partecipanti hanno sperimentato l'illusione di appartenenza nei confronti della mano di gomma più velocemente nella modalità con feedback acustico rispetto alla modalità senza feedback (sincrona attiva feedback vs. sincrona attiva no feedback  $Z = -2.920$ ,  $p = 0.004$ ).

Nello specifico i risultati hanno mostrato che nella condizione sincrona attiva con feedback l'illusione di appartenenza nei confronti della mano gomma ha richiesto circa 12,95 secondi per emergere mentre in quella senza feedback 18,14 secondi.



*Fig. 15. Grafico relativo ai tempi di insorgenza dell'ownership nella condizione sincrona attiva tra modalità con e senza feedback.*

Al fine di individuare eventuali influenze nell'ordine di somministrazione delle due modalità (feedback/no feedback) abbiamo deciso di analizzare i risultati ottenuti separando i soggetti in due gruppi distinguendoli proprio a partire dall'ordine in cui sono state eseguite le due modalità; sostanzialmente, si tratta di vedere se, al momento di eseguire le condizioni nella prima modalità, entra in gioco una sorta di "effetto a sorpresa" tale da potenziare gli effetti dell'illusione, fenomeno che, per ovvi motivi, verrebbe a mancare nella seconda modalità, avendo avuto il soggetto un precedente confronto con il set up e con l'esperimento in generale.

Abbiamo deciso di prendere in considerazione solo la condizione sincrona attiva delle due modalità perché è quella che soddisfa i criteri relativi alla congruenza tra le

due mani e il soggetto è coinvolto nell'esecuzione del movimento che consiste in un doppio tocco con l'indice della mano destra.

Da un confronto tra i due gruppi, però, è stato possibile escludere ogni tipo di influenza della prima modalità eseguita sulla seconda. Di seguito si riportano i risultati ottenuti nel drift della condizione sincrona attiva nelle due modalità, denominando con "gruppo 1" i soggetti che hanno eseguito come prima modalità quella con feedback e con "gruppo 2" i soggetti che hanno iniziato l'esperimento con la modalità senza feedback.

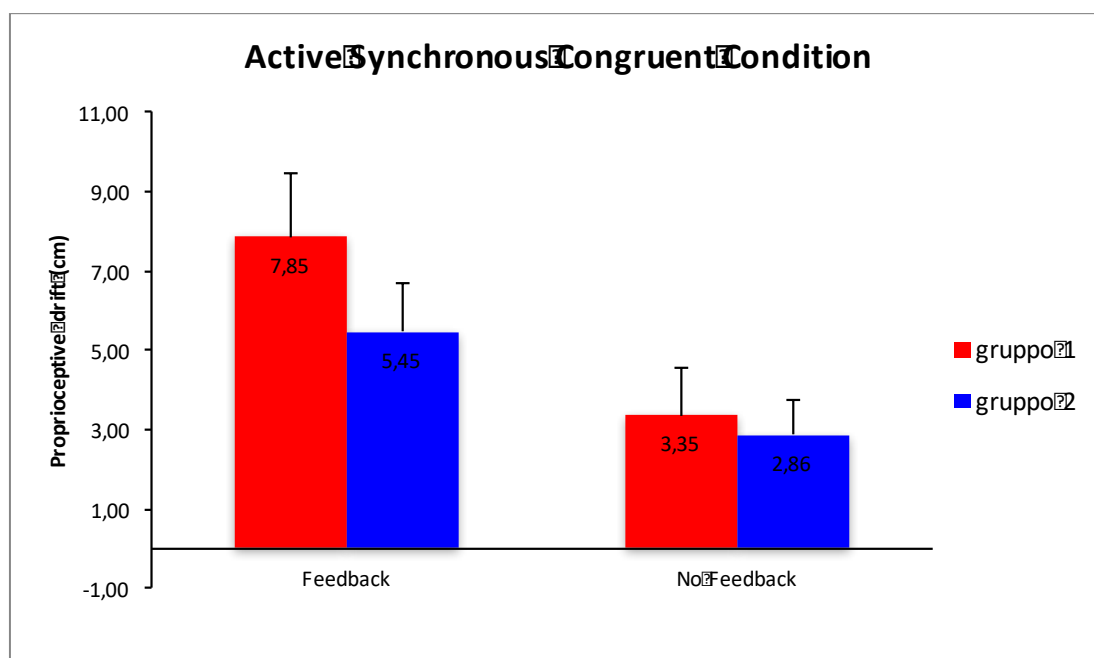


Fig. 16. Grafico relativo ai valori del drift propriocettivo della condizione sincrona attiva tra i due gruppi.

Come è possibile vedere nei grafici sopra, il gruppo 1 ha riportato valori di drift maggiori nella modalità con feedback (dunque la prima che è stata eseguita), esattamente come nel caso del gruppo 2 (che ha eseguito prima la modalità senza feedback): i risultati ottenuti con il gruppo 2 permettono di escludere ogni influenza

relativa all'ordine delle modalità sui valori ottenuti, poiché il drift si è comunque mostrato più forte nella modalità con feedback.

Di conseguenza è possibile affermare con più certezza che il feedback acustico di potenziamento dell'azione è, in effetti, proprio la variabile che in base alla sua presenza o meno, influisce sui risultati sperimentali, confermando ulteriormente un possibile effetto modulatore dell'azione sulla proprietà.

### ***Discussione***

Il paradigma sperimentale della *Moving Rubber Hand Illusion*, come già ampiamente dimostrato, permette di dissociare l'azione e la proprietà e di valutare la loro possibile correlazione; al contempo, entrambe le funzioni possono essere sperimentate simultaneamente e coesistere.

La decisione di utilizzare due misure differenti per quantificare l'illusione di proprietà risiede nella possibilità di affidarsi a parametri di valutazione in grado di cogliere sia gli aspetti relativi ai giudizi espliciti e soggettivi che quelli di natura implicita.

I nostri risultati, sia nella misura esplicita del questionario che in quella implicita del drift propriocettivo, sembrano suggerire che l'azione è in grado di modulare la proprietà nella modalità con feedback acustico, vale a dire quando il senso di azione è rinforzato. In questa sessione sperimentale, infatti, il drift propriocettivo risulta più alto nella condizione sincrona attiva rispetto a quella congruente passiva, mentre nella sessione senza feedback il drift è maggiore nella condizione passiva, anche se in questo ultimo confronto la differenza non risulta essere statisticamente significativa.

Per quanto concerne i risultati del questionario, comparando i punteggi agli item sperimentali di azione e proprietà abbiamo riscontrato una differenza significativa rispetto alle modalità feedback/no feedback: nella misura soggettiva del questionario, infatti, i partecipanti hanno sperimentato alti livelli di *ownership* nella condizione sincrona attiva della modalità con feedback e questo risultato è in linea con quanto osservato in precedenza nella misura del drift propriocettivo.

Al fine di comprendere la possibile relazione tra queste due componenti abbiamo deciso di misurare i tempi di insorgenza della proprietà chiedendo ai soggetti di riportare verbalmente il momento in cui iniziavano a sperimentare un senso di proprietà nei confronti della mano di gomma. A tale scopo, abbiamo proceduto a misurare eventuali differenze nei tempi di insorgenza tra le due modalità (feedback/no feedback) solo nel caso della condizione sincrona attiva, condizione nella quale i soggetti sono coinvolti nell'esecuzione del doppio tocco con l'indice della propria mano destra. Abbiamo trovato una differenza significativa tra le due sessioni con una riduzione dei tempi di insorgenza della proprietà nella sessione con feedback acustico.

I nostri risultati sembrano suggerire che i movimenti attivi sono in grado di indurre un senso di proprietà più forte e globale e che quindi l'azione facilita l'auto-riconoscimento come sostenuto in precedenza anche da altri studiosi (Cfr. Tsakiris et al., 2007).

Alla luce dello studio finora condotto, la modulazione dell'azione sulla proprietà non implica comunque alcuna relazione causale. In termini di correlazione tra le due variabili, non sono stati infatti rilevati risultati statisticamente significativi e in ogni caso una possibile causalità non sarebbe compatibile con i risultati ottenuti nella condizione congruente passiva che manifesta lo sviluppo della proprietà senza la presenza dell'azione.

L'approccio cross-modale, del resto, si fonda sull'elaborazione di uno stesso stimolo a partire da canali differenti, integrando così i risultati dell'elaborazione ottenuta tramite convergenza: a tale proposito, Nava e colleghi (2018) hanno messo in luce le modalità di costruzione del sé (legato allo sviluppo di un senso di appartenenza corporea) attraverso l'azione sottoponendo allo stesso esperimento un gruppo di adulti e uno di bambini di età prescolare. Nei bambini lo sviluppo della proprietà del corpo è strettamente legata all'azione in quanto l'età dei soggetti è troppo bassa per manifestare un senso di appartenenza corporea indipendentemente dall'azione, in linea ancora una volta con la cross-modalità che, in questo caso, affianca a una rappresentazione corporea sensoriale una di tipo motorio.

Wen e colleghi (2016) si sono serviti della realtà virtuale per applicare la Moving Rubber Hand Illusion allo scopo di studiare eventuali relazioni tra il senso di azione e quello di proprietà a partire dagli effetti del ritardo del movimento della mano virtuale rispetto al movimento della mano del soggetto: i risultati ottenuti hanno mostrato che la proprietà risulta influenzata dal ritardo solo indirettamente, in quanto sarebbe l'azione a mostrare una correlazione significativa con il ritardo stesso.

Nella condizione incongruente attiva i dati del questionario hanno mostrato risultati particolari per quanto riguarda l'azione che sembra manifestarsi maggiormente nella modalità senza feedback. Intuitivamente ci saremmo aspettati una maggiore *agency* nella modalità con feedback (essendo dotata del meccanismo acustico di rinforzo), eppure sembra che per l'incongruente attiva sia entrato in gioco qualche processo in più.

La spiegazione potrebbe risiedere nel comportamento dei partecipanti: abbiamo avuto modo di notare, infatti, che durante l'esecuzione dell'incongruente attiva senza feedback i soggetti tendevano a eseguire il doppio tocco con più forza, quasi come se fossero alla ricerca di una certezza maggiore di essere autori del movimento osservato, non potendo contare neanche sul feedback acustico in quel caso assente. Di fronte ad una condizione di mancata congruenza che richiede un movimento attivo da parte del soggetto, quest'ultimo non può fare altro che concentrarsi maggiormente sul movimento eseguito, mettendoci più "forza". L'aspetto della forza legata all'esecuzione di un'azione non è da sottovalutare: alcuni studi hanno dimostrato che è possibile modulare il giudizio di auto-attribuzione ritardando il feedback sensoriale afferente, ma anche che la condizione di ritardo connessa all'azione può essere influenzata dallo sforzo intenzionale.

Nello specifico, uno studio condotto da Minohara e colleghi (2016) ha indagato l'effetto della forza relativa ad un atto intenzionale che consiste nel premere 3 diversi pulsanti che differiscono nel tipo di forza richiesta per il loro uso. I risultati di questo studio hanno mostrato che la forza connessa allo sforzo intenzionale è in grado di migliorare l'auto-attribuzione nei casi in cui la congruenza tra un'azione e le sue conseguenze viene manipolata, tuttavia, ciò sembra avvenire solo nei casi in cui la condizione di ritardo è di 700 millisecondi e non oltre. In questa specifica



condizione, infatti, quando al partecipante veniva richiesto di premere il pulsante più duro la percentuale di risposte relativa all'attribuzione dell'azione è stata modulata positivamente dallo sforzo intenzionale.

Questo risultato ha dimostrato che il feedback tattile connesso al pulsante più duro ha influenzato il giudizio relativo al senso di azione quando la relazione tra un'azione e i suoi effetti è stata modificata (cfr. Minohara et al., 2016).

Il modello di Frith e colleghi (2000) suggerisce che la sensazione soggettiva di essere gli iniziatori dei propri movimenti volontari emerga sulla base delle previsioni generate dalla copia efferente mentre Moore e Fletcher (2012) focalizzano la propria attenzione sull'integrazione di diversi segnali, sia interni che esterni.

Queste considerazioni potrebbero essere estese ai risultati che abbiamo ottenuto nel nostro studio nella condizione incongruente attiva: un maggiore sforzo nell'azione potrebbe implicare lo sviluppo di un'agency maggiore, giustificando così i risultati ottenuti in questa specifica condizione: non potendo contare sulla congruenza della mano di gomma rispetto al proprio corpo, i partecipanti all'esperimento hanno puntato sull'azione e sui segnali di previsione interni.

Riassumendo, la dissociazione tra SoA (senso di azione) e SoO (senso di proprietà) è stata resa possibile dal tipo di set up sperimentale e i risultati ottenuti mostrano che il senso di appartenenza è stato modulato in senso positivo dall'azione oltre che dal fattore posizione. Potremmo affermare che siamo più inclini a percepire una parte del corpo come appartenente a noi stessi se muovendola accade qualcosa o se l'azione *ha qualche effetto* sul mondo.

Per quanto riguarda la ricerca futura l'obiettivo è concentrarsi maggiormente sui tempi di insorgenza al fine di comprendere se effettivamente l'azione è in grado di modulare la proprietà, sostenendo così concetti tipici della cognizione incarnata come l'affordance di Gibson, secondo i quali il nostro essere-nel-mondo è, prima di tutto, delineato dalle possibilità di azione.

## CONCLUSIONI

Il sentimento di proprietà del corpo è un aspetto peculiare dell'autocoscienza corporea e ci permette di distinguerlo dagli altri oggetti del mondo esterno; normalmente, infatti, non sperimentiamo questo tipo di sensazione verso oggetti differenti dal nostro stesso corpo, tuttavia, il paradigma *dell'illusione della mano di gomma* ha consentito di combinare tra loro una serie di input sensoriali al fine di generare la sensazione di proprietà su una mano artificiale.

Questo risultato ha permesso di rivedere i vecchi modelli esplicativi circa l'emergere della proprietà delle parti del corpo e ha dato avvio a diverse ricerche finalizzate ad indagarne i sottostanti meccanismi neurali.

La nostra rappresentazione corporea è estremamente malleabile e dipende dai diversi input sensoriali e dalla loro integrazione in un'unità coerente.

La nozione di schema corporeo, come spesso sottolineato, fa riferimento a quell'insieme di informazioni sensoriali essenziali per l'esecuzione del movimento e l'aggiornamento della postura secondo una modalità tacita di funzionamento che non richiede alcuna attenzione cosciente.

Molte delle azioni che eseguiamo sono il risultato di una scelta non sempre innescata da scopi e obiettivi espliciti ma ogni azione ha effetti sul mondo esterno e le possibilità pragmatiche che questo ci offre modulano costantemente le interazioni con ciò che ci circonda.

Sembra che il senso di azione contribuisca alla costruzione di un senso di proprietà più ampio che non coinvolge unicamente singoli distretti corporei ma si estende all'intero corpo che viene percepito come un'unità globale e integrata. Un'alterazione a carico dei meccanismi sensoriali efferenti potrebbe compromettere anche la proprietà del corpo e l'esperienza soggettiva del corpo come *il proprio*.

Il paradigma della *Moving Rubber Hand Illusion* adottato in questo lavoro di ricerca ha permesso di indagare la relazione tra il senso di azione e quello di proprietà confermando i risultati del classico paradigma di Botvinick e Cohen (1998) ma permettendo di estendere l'indagine sul sé corporeo anche al senso di azione.

Le conclusioni che si possono trarre scaturiscono principalmente dagli esperimenti svolti, entrambi finalizzati ad una maggiore comprensione della relazione tra il senso di azione e quello di proprietà del corpo.

Un aspetto da tenere presente, per l'interpretazione dei risultati, risiede nella constatazione che il tipo di movimento svolto dal soggetto – che consiste nell'esecuzione di un doppio tocco con l'indice della mano destra - non è finalizzato ad alcuno scopo specifico; questo potrebbe limitare in parte la rilevazione di alcuni aspetti legati all'*agency* rendendo possibile cogliere la sua influenza sull'*ownership* solo in parte.

L'effetto di un movimento diretto ad un obiettivo rispetto ad un movimento su richiesta che seppur di natura intenzionale, non risponde ad alcuno scopo, potrebbe non consentire un'indagine accurata dei vari livelli del senso di azione.

Nonostante le *intenzioni motorie* vengano a crearsi anche nel caso dell'esecuzione del doppio tocco, la congruenza tra i comandi motori e il feedback sensoriale afferente potrebbe essere maggiormente influenzata da quei movimenti diretti ad un obiettivo o realizzati in contesti di azione.

Nel *primo esperimento* abbiamo ottenuto una riduzione del *drift* propriocettivo nella condizione congruente passiva durante la stimolazione attiva.

Una spiegazione a questo risultato è da ricercare nel ruolo funzionale attribuito al cervelletto che è quello di effettuare delle previsioni relative alle conseguenze sensoriali di un movimento e confrontarle con quelle effettive.

Qualora vi fossero delle discrepanze tra movimento programmato e movimento eseguito, il cervelletto invia queste informazioni alle aree motorie deputate alla loro correzione. Se le conseguenze sensoriali relative ad un movimento corrispondono invece al feedback sensoriale afferente, viene a generarsi la sensazione che il movimento sia stato autoprodotta e non causato dall'esterno. (Crapse e Sommer, 2008).

La principale differenza tra la condizione di *movimento attivo* e quella di *movimento passivo* indotto dallo sperimentatore sembra quindi risiedere nell'assenza di intenzioni motorie finalizzate all'azione.

Ciò potrebbe spiegare perché l'illusione di proprietà nei confronti della mano di gomma si riduce in questa specifica condizione: la stimolazione cerebellare, infatti, potrebbe generare una ricalibrazione minore degli stimoli a favore della mano artificiale nonostante venga soddisfatto il requisito legato alla congruenza spazio-temporale tra le due mani.

Al contrario, la ricalibrazione implicita degli stimoli verso la mano di gomma viene evidenziata dalla stimolazione cerebellare nella condizione di movimento attivo attraverso un significativo drift propriocettivo.

Per quanto concerne il *secondo esperimento*, il feedback acustico associato al movimento attivo sembra aver avuto un effetto modulatorio anche sul senso di proprietà del corpo in quanto l'illusione si sviluppa con maggiore forza nella modalità con feedback, quando il senso di azione è rinforzato.

Le informazioni efferenti sembrano quindi contribuire a migliorare il processo di auto-riconoscimento influenzando come rinforzo anche per il senso di proprietà (Gallagher, 2000).

E' importante sottolineare che nei nostri esperimenti abbiamo osservato un'influenza dell'azione sulla proprietà solo quando la prima è stata modulata attraverso il feedback acustico o quando abbiamo stimolato il cervelletto tramite tDCS attiva. Nelle altre modalità di controllo (*no feedback e stimolazione sham*) l'illusione di proprietà nei confronti della mano di gomma si è sviluppata con maggiore forza nella condizione passiva, quando il movimento è stato indotto dallo sperimentatore.

Questo risultato conferma che nel paradigma della *mano di gomma in movimento* l'insorgere dell'illusione dipende dalla congruenza spazio-temporale tra le due mani come nella versione classica del paradigma di Botvinich e Cohen (1998).

I movimenti attivi nelle modalità di controllo non sembrano rinforzare il senso di proprietà mentre questo rinforzo sembra realizzarsi nel caso del feedback acustico associato al movimento e nella stimolazione cerebellare attiva.

Questi risultati sollevano alcune importanti questioni legate all'effettivo contributo dei movimenti attivi nel generare un'illusione di proprietà più forte nei confronti della mano di gomma.

Una spiegazione ai risultati ottenuti nelle modalità di controllo (*no feedback/sham*) potrebbe essere riferita ai canali sensoriali coinvolti.

Come già sottolineato nel corso di questo lavoro di ricerca, l'assenza di controllo sul movimento indotto dallo sperimentatore potrebbe generare una maggiore illusione di appartenenza in quanto la localizzazione propriocettiva verrebbe modulata in misura maggiore dalla visione. Nella condizione *congruente passiva* il soggetto utilizza il canale visivo osservando la mano di gomma posta di fronte a lui ma non è il protagonista attivo del movimento e ciò potrebbe generare uno spostamento propriocettivo maggiore dalla sua mano verso la mano di gomma e un aumento del drift.

In seguito a stimolazione cerebellare, invece, questo spostamento si riduce a favore di un aumento del drift nella condizione sincrona attiva in quanto l'aggiornamento delle previsioni sensoriali e la stima relativa alla posizione della propria mano verrebbe modulata con maggiore forza e velocità dalla tDCS attiva del cervelletto sfruttando differenti canali sensoriali.

Sia nel *primo* che nel *secondo* esperimento, nonostante i risultati ottenuti nella modalità di controllo mettano in evidenza delle differenze tra movimento attivo e passivo, queste stesse differenze non sono significative da un punto di vista statistico mentre abbiamo rilevato dei risultati statisticamente significativi nel confronto tra modalità (*feedback vs. no feedback/attiva vs. sham*).

Nel *secondo esperimento* il feedback acustico associato al movimento ha generato un maggiore drift propriocettivo verso la mano di gomma e un ridotto sviluppo dei tempi di insorgenza dell'ownership in questa specifica modalità. Questo risultato è a favore dell'ipotesi relativa ad un possibile effetto modulatore del senso di azione su quello di proprietà che sembrerebbe guidare l'auto-riconoscimento del proprio corpo in modo più saldo.

L'interazione tra queste due funzioni, infatti, sembra essere a favore di un modello che suggerisce un effetto di rinforzo dell'agency sull'ownership ma occorre investigare meglio questo aspetto anche alla luce dei risultati emersi nelle modalità che non riflettono alcuna influenza dell'azione sulla proprietà e sembrano convergere verso un modello esplicativo indipendente.

Per tale ragione, e al fine di indagare con maggiore precisione il contributo di queste funzioni nell'ambito oggetto di interesse di questo studio potrebbe essere utile, in futuro, pensare alla progettazione di set up sperimentali e misure comportamentali in grado di coglierne il rispettivo rinforzo in maniera più chiara e mirata.

Sarebbe inoltre interessante estendere alla realtà virtuale l'indagine sul sé corporeo focalizzando maggiormente l'attenzione sull'ipotesi relativa al contributo dei movimenti attivi nella promozione di un sé corporeo più globale e integrato, come peraltro suggerito dai risultati sperimentali sull'argomento.

## RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare il mio supervisore, il Prof. *Pietro Perconti*, per la fiducia che ha sempre riposto nei miei confronti e la mia amica e collega, la Dott.ssa *Sonia Malvica*, che ha contribuito a questo lavoro e mi ha sempre supportata.

Un ringraziamento speciale è rivolto alla Prof.ssa *Mirta Fiorio* che mi ha dato la possibilità di lavorare all'interno del suo gruppo di ricerca e alla Dott.ssa *Angela Marotta*, persone disponibili e sempre pronte a chiarire ogni mio dubbio.

## BIBLIOGRAFIA

Akshoomoff N.A, Courchesne E. (1992) *A new role for the cerebellum in cognitive operations*. Behav Neurosci. Oct; 106(5):731-8.

Armostrong, D.M. (1968) *A materialist Theory of the Mind*. Routledge and kegan Paul, London.

Baker, L. R. (2000) *Persons and Bodies*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bargh J.A., Chartrand T.L. (1999) *The unbearable automaticity of being*. Am Psychol 54:462.

Bargh, J.A., Gollwitzer, P.M., Lee-Chai, A.Y., Barndollar, K. (2001). *The automated will: Nonconscious activation and pursuit of behavioral goals*, Journal of Personality and Social Psychology, 81, 1014–1027.

Barton R. A. (2000) *Ecological and social factors in primate brain evolution*. In *On the move: how and why animals travel in groups* (eds Boinski S., Garber P., editors.), Chicago, IL: Chicago University Press.

Barton R.A. (2012) *Embodied cognitive evolution and the cerebellum*, Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2012 Aug 5; 367(1599): 2097–2107.

Barton R.A., Venditti C. (2014) *Rapid evolution of the cerebellum in humans and other great apes*, Current Biology, 24, 2440-4.

Baumann, O., Borra, R. J., Bower, J. M., Cullen, K. E., Habas, C., Ivry, R. B., Leggio, M., et al. (2014). Consensus Paper: the role of the cerebellum in perceptual processes. *Cerebellum*, 14, 197–220.

Berlucchi S., Agliotti, G. (1997) *The body in the brain: neural bases of corporeal awareness*, Treds Neurosciences, 20, 560-564.

Bermùdez J. L. (1998) *The paradox of Self-Consciousness*, MIT Press, Cambridge.



Berti, A., Rizzolatti, G. (1994) *Is neglect a theoretically coherent unit?* Neuropsychological Rehabilitation, 4, 111-114.

Berti, A., Pia, L. (2006). *Understanding Motor Awareness Trough Normal and Pathological Behavior*. Current Directions in Psychological Science, pp. 245-250.

Berti, A. (2010) *Neuropsicologia della coscienza*, Bollati Boringhieri, Torino.

Bisiach, E. (1996) *Negligenza spaziale unilaterale ed altri disordini unilaterali di rappresentazione*. In: G. Denes, L. Pizzamiglio Normalità e patologia dei processi cognitivi. Zanichelli, 639-661.

Blakemore, S.J., Frith, C. D., Wolpert, D. W. (1999). *Spatiotemporal prediction modulates the perception of selfproduced stimuli*. Journal of Cognitive Neuroscience, 11, 551–559.

Blakemore, S.J., Frith, C. D., Wolpert, D. W. (2001). *The cerebellum is involved in predicting the sensory consequences of action*. NeuroReport, 12(9), 1879–1885.

Blakemore, S. J., Oakley, D. A., Frith, C. D. (2003). *Delusions of alien control in the normal brain*. Neuropsychologia, 41(8), 1058–1067.

Bloch Ned. (1995) *On a Confusion about a Function of Consciousness*, in «Behavioral and Brain Sciences», 18, 2, pp.230-247.

Bloedel, J.R, Bracha V. (1997) *Duality of cerebellar motor and cognitive functions*, Int Rev Neurobiol 41: 613-634.

Botvinick, M., Cohen, J. (1998). *Rubber hands 'feel' touch that eyes see*. Nature 391, 756.

Braun, N., Thorne, J. D., Hildebrandt, H., Debener, S. (2014). *Interplay of agency and ownership: The intentional binding and rubber hand illusion paradigm combined*. PLoS One, 9(11).

Cappuccio, M. (2009) (ed). *Neurofenomenologia. Le scienze della mente e la sfida dell'esperienza cosciente*, Milano: Bruno Mondadori.

Carruthers G. (2008) *Types of body representation and the sense of embodiment*, in *Consciousness and Cognition*, vol. 17:1302-1316.

Castrogiovanni P., Lucarelli L. (2000) *Il cervelletto. Dalle funzioni cognitive alla psicopatologia*, Collana "Progressi in Psichiatria, Società Editrice Europea, Firenze.

Chalmers, D. (1999). *La Mente Cosciente*, Milano: McGraw-Hill.

Crapse, T. B., Sommer, M. A. (2008). *Corollary discharge across the animal kingdom*. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(8), 587-600.

Cole, J., e Paillard, J. (1995). *Living without touch and peripheral information about body position and movement: Studies with deafferented subjects*. In J. L. Bermúdez, A. J. Marcel, N. Eilan (Eds.), *The body and the self* (pp. 245-266), Bradford Books.

De Vignemont F. (2007) *Habeas Corpus: The Sense of Ownership of One's Body Own*, in *Mind and language*, vol. 22, n. 4.

De Vignemont F. (2010) *Body Schema and Body Image - Pros and cose*, in *Neuropsychologia* 48, 669-680.

Dummer, T., Picot-Annand A., Neal T., Moore C. (2009). *Movement and the rubber hand illusion*. *Perception* 38 271–280.

Ehrsson, H. H., Spence, C., Passingham, R. E. (2004). *That's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb*. *Science*, 305(5685), 875– 877.

Ehrsson, H. H., Holmes, N. P., Passingham, R. E. (2005). *Touching a rubber hand: Feeling of body ownership is associated with activity in multisensory brain areas*. *The Journal of Neuroscience*, 25, 10564 – 10573.

Ehrsson, H. H. (2012). *The concept of body ownership and its relation to multisensory integration*. In: *The New Handbook of Multisensory Processes*. Stein, B.E. (Eds). Cambridge, MA: MIT Press.

Evans J. St. B.T. (2006), *The heuristic-analytic theory of reasoning: extension and evaluation*. *Psy- chon. Bull. Rev.* 13(3):378–9.

Evans J. St. B.T. (2008), *Dual-Processing Accounts of Reasoning, Judgment, and Social Cognition*. *Annual Review of Psychology*, 59, 255-278.

Fiez J.A., Petersen S.E., Cheney M.K., Raichle M.E. (1992) *Impaired non-motor learning and error detection associated with cerebellar damage. A single case study*, *Brain* Feb;115 Pt 1:155-78.

Farrer, C., Frith, C. D. (2002). *Experiencing Oneself vs Another Person as Being the Cause of an Action: The Neural Correlates of the Experience of Agency*. *NeuroImage* 15, 596-603.

Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C. D., Decety, J., Jeannerod, M. (2003). *Modulating the experience of agency: a position emission tomography study*. *NeuroImage* 18, 324-333.

Fodor J. (2001) *The Mind Doesn't Work That Way*, Cambridge, MA: MIT Press.

Fourneret, P., Jeannerod, M. (1998). *Limited conscious monitoring of motor performance in normal subject*. *Neuropsychologia*, vol. 36 (11), pp.1133-1140.

Franklin, D. W., Wolpert D.M. (2011) *Computational mechanisms of sensorimotor control*. *Neuro* 72 (3): 425-42.

Frith, C.D., Blakemore S.J., Wolpert D.M (2000). *Explaining the symptoms of schizophrenia: abnormalities in the awareness of action*. *Brain Res. Rev.* 31 357-363.

Fugali, E. (2012) *I limiti del mio corpo sono i limiti del mio mondo. Il tema del corpo proprio nella riflessione filosofica contemporanea e nella scienza cognitiva incarnata*, *Reti, Saperi, Linguaggi*, Anno 4, N. 2.

Galea, J.M., Jayaram G, Ajagbe L., Celnik P. (2009) *Modulation of cerebellar excitability by polarity-specific noninvasive direct current stimulation*. *J Neurosci*; 29:9115–9122.

Gallagher, S., Cole J. (1995) *Body Image and Body Schema in a deafferented Subject*, *Department of Philosophy and Cognitive Science, Canisius College, New York*.

Gallagher, S. (2000), *Phenomenological and experimental research on embodied experience*, Phénoménologie et Paris, Cognition Research Group CREA.

Gallagher, S., (2005) *How the Body Shapes the Mind*, Oxford University Press.

Gallagher, S., Zahavi D. (2009). *La mente fenomenologica*, Milano, Raffaello Cortina Editore.

Gallese, V., (2009) *Neuroscienze e Fenomenologia*, "Treccani Terzo Millennio" Vol. I, pp. 171-181.

Gallese, V., Sinigaglia C. (2010) *The bodily self as power for action*, "Neuropsychologia" 48(3), pp. 746-755.

Gazzaniga, M.S., Ivry R.B., Mangun G.R. (2015), *Neuroscienze Cognitive*, Bologna, Zanichelli.

Gibson, J. J. (1977). *The ecological approach to visual perception*. Taylor & Francis. Lawrence Earlbaum Associates. New Jersey, USA.

Grafman, J., et al. (1992), *Cognitive planning deficit in patients with cerebellar atrophy*, in *Neurology*, 42(8): 1493-1496.

Graham, G., Stephens, G. L. (1994) *Mind and mine*. In G. Graham and G. L. Stephens (eds.), *Philosophical Psychopathology* (pp. 91-109). Cambridge, MA: MIT Press.

Gozzano S. (2009) *La coscienza*, Carocci, Roma, p. 56.

Haans, A., Kaiser, F.G., Bouwhuis, D.G., IJsselstein, W.A. (2012). *Individual differences in the rubber-hand illusion: Predicting self-reports of people's personal experiences*, *Acta Psychologica*, Vol. 141, Issue 2, pp. 169-177.

Haggard, P., Clark, S. (2003). *Intentional action: Conscious experience and neural prediction*. *Consciousness and Cognition* 12, 695-707.

Haggard, P. (2005). *Conscious intention and motor cognition*. Trends in Cognitive Sciences 9, 290-295.

Haggard, P., Chambon, V. (2012) *Sense of Agency*, In: Current Biology, vol. XXII, n. 10.

Head, H., Holmes, H. G. (1911/1912). *Sensory Disturbances from Cerebral Lesions*. Brain, 34, 2-3, 102-254.

Humphrey, N. (1998) *Una storia della mente*, Instar, Torino, pp. 101-103.

Jerillyn, K. (2017) *Investigating the role of cerebellar abnormalities in dysfunctional predictive coding in individuals with schizophrenia*, <http://grantome.com/grant/NIH/F32-MH112334-01A>.

Ito, M. (1982) *Experimental verification of Marr-Albus plasticity assumption for the cerebellum*. Acta Biol. Acc. Sci. Hung. 33: 189-199.

Ito, M, Sakurai, M, Tongroach, P. (1982) *Climbing fibre induced depression of both mossy fibre responsiveness and glutamate sensitivity of cerebellar Purkinje cells*. J Physiol (London) 324:113–134.

Ito, M. (1984). *The Cerebellum and Neural Control*. Raven Press, New York.

Ito, M. (1992) *From Neurons to brain mechanisms through studies of cerebellum*, In: Samson F., Adelman G., Eds, Neurosciences, path of discovery, II, 241-257.

Ito, M. (2006) *Cerebellar circuitry as a neuronal machine*. Prog Neurobiol 78: 272-303.

Ito, M. (2008) *Control of mental activities by internal models in the cerebellum* Nature Reviews Neuroscience 9, 304-313.

Ito, M. (2011) *The cerebellum: brain for an implicit self*. Upper Saddle River: FT Press.

Kalckert, A., Ehrsson, H. H. (2012). *Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency*. Frontiers in Human Neuroscience 6, 1-14.

Kalckert, A., Ehrsson H.H. (2014). *The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership*, Consciousness and Cognition 26, pp. 117-132.

Kalckert, A., Ehrsson H.H. (2017). *The Onset Time of the Ownership Sensation in the Moving Rubber Hand Illusion*, Frontiers in Psychology 8:344.

Katsetos, C.D., Hyde T.M., Herman M.M. (1997) *Neuropathology of the cerebellum in schizophrenia--an update: 1996 and future directions*, Biol Psychiatry. 1997 Aug 1;42(3):213-24.

Keenan, J.P., Rubio, J., Racioppi, C., Johnson, A., Barnacz, A. (2005). *The right hemisphere and the dark side of consciousness*. Cortex, 41, 695-704.

Kilteni, K., Ehrsson, H. H. (2017) *Body ownership determines the attenuation of self-generated tactile sensations*, Proceedings of the National Academy of Sciences Aug 2017, 114 (31) 8426-8431.

Kokkinara, E., Slater, M. (2014). *Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion*. Perception, 43(1), 43–58.

Koziol, L. F., Budding, D. E., Chidekel, D. (2012). *From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum*. Cerebellum 11, 505–525.

Leiner, H.C., Leiner A.L., Dow R.S. (1986) *Does the cerebellum contribute to mental skills?*. Behavioural Neuroscience, 100: 443-454.

Leiner, H. C., Leiner A. L., Dow R.S. (1989), *Reappraising the cerebellum: What does the hindbrain contribute to the forebrain?*, in Behavioral Neuroscience, 103(5) 998-1008.

Leiner, H. C., Leiner, A. L. Dow, R. S. (1993) *Cognitive and language functions of the human cerebellum*. Trends Neurosci. 16, 444-447.

Legrand, D. (2006) *The bodily self. The sensori-motor roots of pre-reflexive self-consciousness*. In Phenomenology and the Cognitive Sciences, 5, pp.89-118.

Legrand, D. (2007) *Pre-reflective-self-as-subject from experiential and empirical perspectives*, *Consciousness and Cognition* 16 (3):583-599.

Leggio, M., Molinari M. (2015) *Cerebellar Sequencing: a Trick for Predicting the Future*, *Cerebellum.*, 14(1), 35-38.

Libet, B. (2007) *Mind Time. Il fattore temporale della coscienza*, Milano: Raffaello Cortina.

Louzolo A., Kalckert A., Petrovic P. (2015). *When passive feels active - Delusion proneness alters self-recognition in the moving rubber hand illusion*. *PLoS ONE* 10:e0128549.

Lopez, C., Lenggenhager, B., Blanke, O. (2010). *How vestibular stimulation interacts with illusory hand ownership*. *Conscious. Cogn.* 19, 33–

Ma, K., Hommel, B. (2013). *The virtual-hand illusion: Effects of impact and threat on perceived ownership and affective resonance*. *Frontiers in Psychology*, 4, 604.

Marotta A., Bombieri F., Zampini M., Schena F., Dallocchio C., Fiorio M., Tinazzi M. (2017) *The Moving Rubber Hand Illusion Reveals that Explicit Sense of Agency for Tapping Movements Is Preserved in Functional Movement Disorders*, *Frontiers in Human Neuroscience* (2017) 11.

Marr, D. (1969) *A theory of cerebellar cortex*, *J. Physiol.*, 202:437-470.

Merleau-Ponty, M. (2003), *Fenomenologia della percezione*, [trad.it] Bonomi A., Milano, Bompiani.

Minohara, R., Wen., W, Hamasaki S., Maeda, T., Kato, M., Yamakawa, H., et al. (2016) *Strength of intentional effort enhances the sense of agency*. *Front Psychol*;7:1165.

Moberget, T., Doan, T.N. (2018) *Cerebellar volume and cerebellocerebral structural covariance in schizophrenia: a multisite mega-analysis of 983 patients and 1349 healthy controls*, *Molecular Psychiatry*. 23 (6), 1512.

Molinari, M., Leggio M.G., Solida A., Ciorra R., Misciagna S., Silveri M.C., Petrosini L., (1997) *Cerebellum and procedural learning evidence from focal cerebellar lesions*, Brain: 120 (10) 1753-1762.

Moore, J. W., Middleton, D., Haggard, P., Fletcher, P. C. (2012). *Exploring implicit and explicit aspects of sense of agency*. *Consciousness and Cognition*, 21(4), 1748–1753.

Moseley. G.L., Olthof, N., Venema, A., Don, S., Wijers, M., Gallace, A., Spence, C. (2008) *Psychologically induced cooling of a specific body part caused by the illusory ownership of an artificial counterpart*. *Proc Natl Acad Sci USA*;105:13,169–13,173.

Nava E., Gamberini C., Berardis A., Bolognini N. (2018) *Action Shapes the Sense of Body Ownership Across Human Development*, *Front Psychol.* 2018; 9: 2507.

Nitsche, M. A., Schauenburg, A., Lang, N., Liebetanz, D., Exner, C., Paulus, W., et al. (2003). *Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human*. *J. Cogn. Neurosci.* 15, 619–626.

Paillard, J. (1997) *Divided Body Schema and Body Image in Deafferented Patients*. In: *Brain and Movement*, Gurfinkel & Yu. S, Levik (Eds). Institute for Information and Transmission problems RAS Moscow.

Paillard J. (1999) *Body Schema and Body Image. A double dissociation in deafferented patient*, in G. N. Gantechev, S. Mori, J. Massion (a cura di), *Motor Control, Today and Tomorrow*, Accademy Publishing House.

Parmegiani A., Bersani G. (2001), *Un caso di sindrome cerebellare cognitivo-affettiva*, *Journal of Psychopathology*, Vol 7, n. 1.

Parnas, J. *Self and Schizophrenia: A phenomenological perspective*. In Kircher, T., David, A. (a cura di), *The Self in Neuroscience and Psychiatry*, Cambridge University Press, pp.217-241.

Pavani, F., Spence, C., Driver, J. (2000). *Visual Capture of Touch: Out-of-the-Body Experiences With Rubber Gloves*. *Psychological Science* 11, 353-359.



Perconti, P., *L'autocoscienza. Cosa è, come funziona, a cosa serve*, Laterza, Roma-Bari, 2008.

Perconti, P., *La prova del budino: Il senso comune e la nuova scienza della mente*, Mondadori, 2015.

Pfeifer R, Bongard J. (2007) *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press

Ramachandran, V. S. (2011) *Che cosa sappiamo della mente*, Mondadori, Milano.

Ramachandran, V. S. (2012) *L'uomo che credeva di essere morto e altri casi clinici sul mistero della mente umana*, Mondadori, Milano.

Re, A., *Autoconsapevolezza Corporea*, in Nuovi sguardi sulle Scienze Cognitive, (a cura di M. Cruciani e E. Tabacchi), Corisco Edizioni, pp. 277-285.

Riva D., Nichelli F., Devoti M. (2000) *Developmental aspects of verbal fluency and confrontation on naming in children*. Brain Lang. tion naming in children. Brain and Language, 71, 267–284.

Roth, M. J., Synofzik, M., Lindner, A. (2013). *The cerebellum optimizes perceptual predictions about external sensory events*. Current biology, 23, 930–935.

Sanchez-Vives, M. V., Spanlang, B., Frisoli, A., Bergamasco, M., Slater, M. (2010). *Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations*. PloS One, 5(4), e10381.

Sartre J. P., *L'essere e il nulla*, Tr. it. Laterza, Roma –Bari.

Schilder P. (1950) *The image and appearance of the human body*, International Universities Press, New York, Trad.it Franco Angeli, Milano, 1973.

Schmahmann, JD. (1991) *An emerging concept. The cerebellar contribution to higher function*, Arch Neurol. 48 (11): 1178-87.

Schmahmann, J.D., Sherman J.C. (1998) *The cerebellar cognitive affective syndrome*. *Brain*; 121: 561–79.

Schmahmann J.D. (2000) *The role of the cerebellum in affect and psychosis*. *J Neurolinguistics*, 13:189–214.

Schmahmann, J.D. (2004) *Disorders of the cerebellum: ataxia, dysmetria of thought, and the cerebellar cognitive affective syndrome*, *J.Neuropsychiatry Clinical Neurosci*. 16(3):367-78.

Schmahmann, J.D. (2010) *The role of the cerebellum in cognition and emotion: personal reflections since 1982 on the dysmetria of thought hypothesis, and its historical evolution from theory to therapy*. *Neuropsychol Rev*. Sep;20(3):236-60.

Schneider W., Shiffrin R.M. (1977) *Controlled and automatic human information processing I: detection, search and attention*. *Psychol. Rev*. 84:1–66.

Thakkar, K.N., Nichols, H.S., McIntosh, L.G., Park, S. (2011). *Disturbances in body ownership in schizophrenia: evidence from the rubber hand illusion and case study of a spontaneous out-of-body experience*. *Plos ONE* 6, e27089.

Tillmann B., Justus T., Bigand E. (2008) *Cerebellar patients demonstrate preserved implicit knowledge of association strengths in musical sequences*, *Brain Cogn*. Mar;66(2):161-7. Epub 2007 Sep 18.

Toussaint B. (1976) Comments on C.H. Seibert's paper: *On the body phenomenon in Being and Time*. In *Proceedings of the Heidegger Circle*. DePaul University, diffusione privata, pp.175-178.

Tsakiris, M., Haggard P. (2005). *The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution*, *Journal of Experimental Psychology* 31(1), pp. 80–91.

Tsakiris, M., Schütz-Bosbach, S., Gallagher, S. (2007). *On agency and body ownership: Phenomenological and neurocognitive reflections*. *Consciousness & Cognition*, 16, 645–660.

Tsakiris, M. (2008) *Looking for myself: current multisensory input alters self-face recognition*, *PloS one*, 3(12), e4040.

Tsakiris, M. (2010). *My body in the brain: A neurocognitive model of body ownership*. *Neuropsychologia*, 48, 703–712.

Tsakiris M. (2017) *The multisensory basis of the self: From body to identity to others*, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 70, No. 4, 01.04.2017, p. 597-609.

Vandervert, L. (2016) *The prominent role of the cerebellum in the learning, origin and advancement of culture*, *Cerebellum Ataxis* , May 5;3:10.

Varela, F. (1991) *Organism: A meshwork of selfless selves*. In: Tauber A. (ed.) *Organism and the origin of self*. Kluwer, Dordrecht: 79–107.

Varela F., Thomson E., Rosh E. (1991), *The Embodied Mind*, The MIT Press, Cambridge (MA). Trad. It. *La via di mezzo della conoscenza*, Feltrinelli, Milano, 1992.

Vilayanur S. Ramachandran, (2012) *L'uomo che credeva di essere morto e altri casi clinici sul mistero della natura umana*, Milano, Mondadori.

Walsh, L. D., Moseley, G. L., Taylor, J. L., Gandevia, S. C. (2011). *Proprioceptive signals contribute to the sense of body ownership*. *The Journal of Physiology*, 589(12), 3009–3021.

Weiskrantz L., Warrington E. K., Sanders M.D., Marshall J. (1974) *Visual capacity in the hemianopic field following a restricted occipital ablation*, in «Brain», 97, pp. 709-728.

Wen, W., Yamashita, A., Asama, H. (2016) *How agency influences ownership and body representation*. The 1st International symposium on embodied-brain system science (EmboSS2016), Tokio, Japan, May 8-9, 2016.

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., Jordan, M. I. (1995). *An internal model for sensorimotor integration*. *Science*, 269(5232), 1880-1882.

Wolpert D. M., Miall R. C. (1996) *Forward models for physiological motor control*. *Neural Netw.*9:1265–1279.