



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DEL SISTEMA NERVOSO E DEL COMPORTAMENTO
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN PSICOLOGIA

LA FLESSIBILITÀ DELLA RAPPRESENTAZIONE
CORPOREA
L'ATTENUAZIONE PROPRIOCETTIVA ATTRAVERSO LA
COMBINAZIONE DELL'ADATTAMENTO PRISMATICO E
DELLA RUBBER HAND ILLUSION

RELATORE:
PROF. GERARDO SALVATO

CORRELATORE:
Dr. Damiano Crivelli

Tesi di Laurea di
Laura Graziano
509289

Anno Accademico 2023/2024

Alla mia famiglia, la parte più vera della mia anima

*“Come può uno scoglio
arginare il mare
anche se non voglio
torno già a volare”*

Lucio Battisti

INDICE

ABSTRACT	2
1. INTRODUZIONE	4
1.1. IL CORPO E LA SUA RAPPRESENTAZIONE	4
1.1.1. L'evoluzione della rappresentazione corporea.....	4
1.1.2. Le tassonomie neuropsicologiche e il modello Percezione e Azione....	8
1.1.3. Un modello più dinamico.....	11
1.1.4. Le diverse parti della rappresentazione corporea.....	15
1.1.5. Le basi neurali della rappresentazione del corpo.....	22
1.1.6. <i>Body ownership</i>	29
1.1.7. <i>Rubber Hand illusion</i>	32
1.2. LA RAPPRESENTAZIONE DELLO SPAZIO	39
1.2.1. Come la mente rappresenta lo spazio.....	39
1.2.2. L'adattamento prismatico.....	45
1.2.3. Un modello che unisce, il <i>precision control</i> per una rappresentazione del corpo flessibile	51
1.3. L'IPOTESI	55
2. MATERIALI E METODI	58
2.1. Partecipanti.....	58
2.2. La <i>Rubber Hand illusion</i>	58
2.3. L'adattamento prismatico nell'esperimento.....	61
2.4. Il questionario di <i>embodiment</i>	64
2.5. La procedura.....	65
2.6. Piano di analisi statistica.....	70
3. RISULTATI	72
3.1. PA.....	72
3.2. RHI.....	77
4. DISCUSSIONE	80
BIBLIOGRAFIA	89

ABSTRACT

Le rappresentazioni mentali del corpo vengono generalmente definite come quelle strutture cognitive implicate nella codifica e nel tracciamento dello *stato* del proprio corpo. Queste, sono alla base di un'ampissima varietà di fenomeni connessi alla nostra vita mentale e, in accordo con la letteratura, hanno un carattere *flessibile e multicomponentiale*. Il presente studio va a indagare la veridicità di un recente modello Bayesiano delle neuroscienze cognitive, il quale ipotizza che sia possibile aumentare la *flessibilità* delle rappresentazioni visuo-proprioceptive del corpo per mezzo di una modulazione contestuale *top-down* dei processi sensoriali. A partire da tale modello è stato formulato il seguente quesito sperimentale: se fosse possibile quanto proposto, inducendo un adattamento visuo-motorio prima, attraverso l'*adattamento prismatico* (PA), ed eseguendo immediatamente dopo la procedura di *Rubber Hand Illusion* (RHI), si dovrebbe osservare un effetto dell'illusione più forte del normale. Allo scopo di verificare tale ipotesi è stato adoperato un disegno di ricerca *2 per 2* e sono stati reclutati 18 soggetti sani, sottoposti a 4 sessioni sperimentali che prevedevano una diversa combinazione delle condizioni di PA, prismi ottici o lenti di controllo, e RHI, sincrona o asincrona. In particolare, l'ipotesi prevedeva che a seguito di un adattamento visuo-motorio indotto attraverso l'uso di prismi ottici orientati a destra, il soggetto avrebbe mostrato un effetto dovuto alla *Rubber Hand Illusion*, quantificato in termini di *drift proprioceptivo*, significativamente più forte di quello registrato nella condizione nella quale, durante l'adattamento, il soggetto indossava lenti di controllo. I risultati ottenuti vanno nella direzione dell'ipotesi: è stato rilevato un *drift proprioceptivo* maggiore nella condizione in cui i partecipanti avevano precedentemente effettuato la procedura di adattamento con prismi orientati a destra,

rispetto a quelli rilevati dopo l'uso di lenti di controllo. Tuttavia, i risultati, a tratti controversi, aprono a una serie di nuovi quesiti e ipotesi alternative da esplorare.

1. INTRODUZIONE

1.1. IL CORPO E LA SUA RAPPRESENTAZIONE

1.1.1. L'evoluzione della rappresentazione corporea

La rappresentazione mentale del corpo umano svolge un ruolo cruciale nella vita quotidiana di ognuno di noi, rendendo possibile un'ampia gamma di attività, a partire dalla pianificazione di una semplice azione fino all'attuazione di comportamenti finalizzati di estrema complessità.

Come sostenuto nella fenomenologia di Merleau-Ponty, la rappresentazione del corpo non costituisce solo un prodotto della cognizione, bensì una condizione necessaria affinché essa si realizzi (Carman, 1999). L'importanza riconosciuta a tale costrutto spiega l'enorme interesse suscitato da esso nella comunità scientifica dei primi decenni del ventesimo secolo, quando numerosi scienziati posero le basi per le attuali concettualizzazioni della rappresentazione corporea (Chatterjee & Coslett, 2014). Fino al tardo XIX secolo la *consapevolezza* del corpo veniva prevalentemente ricondotta alla sfera anatomofisiologica dell'esperienza e quindi risolta nel concetto di *cenestesi*¹, dove costituiva l'esito di un "fascio di sensazioni interne" (de Vignemont, 2010). Da un punto di vista storico, i primi tentativi di teorizzare l'esistenza di una rappresentazione mentale del corpo risalgono, come già accennato, agli inizi del secolo scorso, quando l'osservazione clinica e lo studio di pazienti con danni cerebrali associati a una qualche forma di alterazione della rappresentazione corporea, portò alla nascita di un ampio apparato teorico relativo al concetto di *schema corporeo*. Nel

¹ In medicina definita come una sensazione indeterminata connessa con lo stato generale del corpo e risultante da impressioni varie inerenti ai processi della vita organica; è avvertita dalla coscienza solo quando la sua tonalità viene turbata, manifestandosi con un senso particolare di benessere (variazione positiva) o di malessere (variazione negativa). Tale concetto è stato rinominato in ambito scientifico con il termine *interocezione* e si riferisce genericamente al senso della condizione fisiologica e omeostatica del corpo (Berlucchi & Aglioti, 2010).

1905 Pierre Bonnier, medico francese vissuto tra la fine del XIX e la prima metà del XX secolo, fu il primo a ricorrere al termine *schema* in riferimento a un'idea di rappresentazione topografica delle sensazioni corporee (Bonnier, 2009). Egli definì l'individuo come dotato di un *senso dello spazio* relativo a tutti gli aspetti della sensibilità, sia periferici che centrali, i quali occorrerebbero a definire tanto l'orientamento oggettivo quanto quello soggettivo. L'accostamento dell'espressione *schema* alla dimensione spaziale del sentire il proprio corpo permise a Bonnier di descrivere numerose condizioni patologiche nelle quali alcune parti di esso venivano esperite come più grandi o più piccole del normale, o dove il soggetto attribuiva loro un'erronea localizzazione (Poeck & Orgass, 1971). Da questo momento in avanti la maggior parte dei neurologi concordò circa l'esistenza di rappresentazioni mentali del corpo, perlopiù chiamate *schema* e *immagine* (de Vignemont, 2010).

Henry Head e Gordon Morgan Holmes (1911/12) distinsero tra due tipologie di schema corporeo: *posturale* e *superficiale*. Nel primo caso gli autori concepirono lo schema come un'operazione di comparazione continua attraverso la quale ogni cambiamento nella posizione o nuovo movimento del corpo, prima di divenire parte della coscienza, viene confrontato con uno standard da loro definito *combinato*². Questa forma di schema si dispiegherebbe a un livello preconsciouso dove opera un processo di continuo aggiornamento della rappresentazione corporea attraverso l'attività delle cortecce cerebrali, le quali, a loro volta, integrano le nuove sensazioni prodotte dalle modificazioni del corpo con le precedenti. Se quello posturale è uno schema plastico e dinamico, quello superficiale fa invece riferimento alla capacità del soggetto di localizzare la posizione di uno stimolo sulla superficie del proprio corpo

² In questo ambito la parola *combinato* si riferisce all'idea che ogni posizione o movimento del corpo viene confrontato a livello preconsciouso con ogni posizione o movimento immediatamente precedenti (Poeck & Orgass, 1971).

(Poeck & Orgass, 1971), permettendo la costruzione di una *mappatura somatotopica* derivata dalle informazioni tattili (Paillard, s.d.). In questo quadro teorico, l'immagine corporea costituisce una rappresentazione parte dell'esperienza cosciente e avente un'origine corporale, poiché derivata da informazioni tattili e motorie (Paillard, s.d.). Arnold Pick (Semenza & Delazer, 2002), neurologo e psichiatra austriaco che operò nello stesso periodo di Head e Holmes, basò i suoi studi su una particolareggiata analisi clinica individuale; a partire dal lavoro dei due contemporanei, egli si focalizzò sulla diversa importanza attribuita agli input sensoriali nel contribuire alla costruzione dello schema corporeo. Nello specifico Pick affermava che lo standard *combinato* al quale costantemente il nostro sistema cognitivo confronta i cambiamenti nella postura e nel movimento, sia un'immagine visiva e non un'informazione somatosensoriale, come invece sostenuto da Head e Holmes. In riferimento all'idea di rappresentazione corporea Pick ricorse all'espressione *consapevolezza del corpo*, riportando così il fenomeno da un piano preconsciouso e automatico a uno strettamente connesso al pensiero cosciente, quello della visione (Poeck & Orgass, 1971).

Sarà Paul Schilder a dare maggiore sistematicità alla dottrina della rappresentazione del corpo, ponendo sotto l'espressione "disturbi dello schema corporeo" un insieme di sintomi associati all'orientamento delle proprie membra. Data l'esistenza di un corpus sintomatologico comune, egli assunse che vi fosse una funzione psicologica unitaria definita come "*l'immagine³ spaziale tridimensionale che ognuno di noi ha di sé stesso*", lo schema corporeo. Similmente a Pick, Schilder considerava lo schema come un'immagine visiva delle varie parti del corpo e delle loro relazioni spaziali (Poeck & Orgass, 1971), ma implementò il costrutto connotandolo di una sfumatura sociologica. In questo senso l'immagine corporea

³ Si tenga presente l'iniziale poca chiarezza e univocità nell'uso dei termini, in ambito neuropsicologico la parola *immagine* in riferimento al corpo assume oggi un significato differente.

individuale era pensata come la *somma* delle immagini e delle relazioni tra esse condivise da una comunità. Questo passaggio permise di traslare la rappresentazione del corpo su una dimensione semantica, Gordon H. Wright introdusse il concetto di *immagine corporea linguistica* (Wright, 1956), ovvero una forma di consapevolezza delle parti di sé espressa da una comunità attraverso la frequenza di utilizzo di uno stesso termine nel riferirsi a esse. Sarebbe un grave errore considerare il corpo come scisso dal contesto sociale nel quale è inserito, oltre all'immagine, è stato dimostrato come anche il loop sensorimotorio connesso allo schema corporeo sia ampiamente modellato dal contesto sociale (Tewes et al., 2017).

Avvicinandoci ai giorni nostri possiamo affermare che la rappresentazione mentale del corpo sia un costrutto che si articola su una moltitudine di dimensioni, a partire da quella viscerale fino a giungere a quella sociale. Come emerge da quest'introduzione, in un primo momento del dibattito scientifico vi fu una certa confusione nell'uso dei termini relativi al costrutto, si pensi all'interscambiabilità attribuita da Schilder ai concetti di *schema* e *immagine*. Oggi, la comunità scientifica riconosce alle rappresentazioni dei vari domini del corpo nomi specifici e non intercambiabili poiché riferiti a elementi differenti nella loro funzione e connotazione. Nel presente paragrafo sono stati percorsi alcuni dei passaggi teorici che hanno permesso di articolare gli attuali modelli di rappresentazione del corpo (Sattin et al., 2023), proseguendo nell'introduzione verranno proposte le *tassonomie neuropsicologiche*, basate sul principio delle doppie dissociazioni⁴, dopodiché si affronterà il modello *Percezione e Azione delle rappresentazioni corporee* per poi

⁴ In neuropsicologia si osserva una doppia dissociazione se un paziente, o gruppo di pazienti, mostra un deficit in A ma non in B, e se un altro paziente, o gruppo di pazienti, manifesta un deficit in B ma non in A. Se A e B sono due compiti relativi al corpo, allora dovranno esserci due sistemi indipendenti di processamento delle informazioni corporee, che potranno essere dissociati da un punto di vista funzionale con delle lesioni (de Vignemont, 2010).

illustrarne uno più dinamico derivato dal meccanismo dell'inferenza Bayesiana applicata all'integrazione multisensoriale.

1.1.2. Le tassonomie neuropsicologiche e il modello Percezione e Azione

Nella comunità scientifica vi è ampio consenso nel ritenere che esistano diversi livelli di rappresentazione cognitiva della struttura corporea. Sirigu e collaboratori (1991) sostengono che la *rottura* dello schema corporeo possa verificarsi a particolari stadi o livelli di elaborazione della conoscenza relativa al proprio corpo, e come questo supporti l'idea di un'*immagine corporea* composta da diverse rappresentazioni (Sirigu et al., 1991). A rafforzare tale posizione vi sarebbe inoltre l'estrema varietà riscontrabile nei disturbi, sia neurologici che psichiatrici, che riguardano il corpo (de Vignemont, 2010).

Le tassonomie neuropsicologiche, la *dyadic taxonomy* e la *triadic taxonomy*, costituiscono i modelli dominanti della rappresentazione corporea e si basano su tre principali criteri a cui ogni autore attribuisce un peso differente: ruolo funzionale (azione versus percezione), dinamica (breve versus lungo termine) e disponibilità alla coscienza (inconscio versus conscio). La *dyadic taxonomy* distingue tra schema e immagine corporea, il primo consiste in una rappresentazione sensorimotoria derivata dall'integrazione delle afferenze ed efferenze provenienti dal corpo e ha la funzione di guidare le azioni. Diversamente, la seconda comprende tutte le altre rappresentazioni del corpo non usate per l'azione e quindi relative ad aspetti percettivi, concettuali ed emotivi. A supporto di tale modello sono state riscontrate numerose doppie dissociazione come quella tra deafferentazione, causata da un'interruzione dello schema corporeo, e intorpidimento, associato all'interruzione dell'immagine corporea (de Vignemont, 2010).

La *triadic taxonomy* mantiene la nozione di schema, alla quale riconosce una natura sensorimotoria, ma attribuisce al concetto di immagine un'eccessiva eterogeneità; per tale ragione, in questo modello, essa viene scissa in due distinte rappresentazioni: la *body structural representation* (BSR) e la *body semantics* (SEM). Nel primo caso l'immagine assume una connotazione visuo-spaziale, la BSR costituisce infatti una sorta di mappa del corpo primariamente basata sulla visione e sulla percezione somatica in grado di fornire una descrizione strutturale del corpo e delle sue parti, nonché delle relazioni tra esse, e di definire i confini e la posizione degli arti. Come affermato alla fine del precedente paragrafo, la rappresentazione del corpo approda a una dimensione semantica dove assume una natura concettuale e linguistica; in questo senso la SEM consiste nella descrizione semantica delle funzionalità delle parti del corpo e delle relazioni *categoriali*⁵ tra esse. Come già fatto notare, questa tassonomia trova supporto in studi condotti attraverso il paradigma della doppia dissociazione, dove la si osserva tra aprassia, derivata da un'alterazione dello schema corporeo; autotopagnosia, nella quale è coinvolta la descrizione strutturale del corpo (BSR), e l'afasia corpo-specifica, condizione che inficia la componente semantica della rappresentazione corporea. Se entrambe le tassonomie concordano circa l'esistenza di uno *schema*, definito come una rappresentazione sensorimotoria del corpo della quale sottolineano la rilevanza ai fini dell'azione, la stessa coesione non si riscontra in merito all'*immagine*, alla quale sembra siano state *sommariamente* attribuite tutte le proprietà che non rientrano nel concetto di schema.

Il modello *Percezione e Azione delle rappresentazioni corporee* si basa sull'applicazione di una dicotomia anatomo-funzionale, teorizzata rispetto alla visione, al fenomeno della rappresentazione del corpo. Nello specifico Paillard

⁵ Ad esempio, la categorizzazione relativa a parti del corpo che svolgono una stessa funzione: "polso e caviglia sono entrambe articolazioni" (de Vignemont, 2010).

suggerisce come la localizzazione delle parti del corpo, rappresentata nello *schema corporeo*, possa essere processata diversamente rispetto alla sua identificazione percettiva, che invece confluisce nell'*immagine del corpo*. Come ampiamente dimostrato in letteratura, uno stesso stimolo visivo può essere elaborato in modo distinto in base al compito nel quale è coinvolto, Ungeleider e Mishkin distinsero una via ventrale del *What*, dedicata al riconoscimento degli oggetti, e una via dorsale del *Where*, coinvolta invece nella loro localizzazione spaziale. In questa cornice teorica, Goodale e Milner fornirono uno dei più grandi contributi per la comprensione del sistema visivo quando proposero il modello *Percezione e Azione* (PAM) (Goodale & Milner, 1992); circa trent'anni fa i due utilizzarono un diverso approccio allo studio della visione categorizzandola in base alla sua funzione (Coelho & Gonzalez, 2024) in sistema del *What*, avente la stessa mansione attribuitagli da Ungeleider e Mishkin, e dell'*How*, dedicato alle azioni guidate visivamente. Paillard (1991), fortemente influenzato da tale modello, lo adattò all'analisi delle rappresentazioni corporee (de Vignemont, 2010). Coerentemente con la posizione di Ungeleider e Mishkin, egli differenziò inizialmente il *corpo identificato* e il *corpo situato*, per poi affinare la sua posizione; propose così una distinzione tra il *sapere dove*⁶ e il *sapere come arrivare dove*⁷, postulando l'esistenza di una distinta e discreta rappresentazione corporea specificatamente implicata nell'azione. Paillard sosteneva inoltre che vi fossero due modalità di processamento spaziale distinte, le quali inevitabilmente confluiscono nel dominio cognitivo della rappresentazione del corpo: una modalità sensorimotoria e una modalità rappresentazionale. La prima riguarda quella parte del mondo fisico con cui la persona entra in contatto diretto attraverso il suo apparato sensomotorio, tale

⁶ In questo contesto riconducibile allo schema corporeo.

⁷ In questo contesto ci si riferisce all'insieme di funzionalità cognitive e neurali implicate nell'esecuzione dell'azione.

interazione contribuirebbe al continuo aggiornamento di una mappatura centrata sul corpo o extracorporea. La seconda, ovvero la modalità rappresentazionale, sarebbe deputata invece all'esplorazione e al consulto delle rappresentazioni interne dell'ambiente fisico, inclusa la posizione del corpo in relazione alla statica cornice ambientale (Paillard, s.d.).

Rispetto alla rappresentazione corporea, De Vignemont fa notare come il modello *Percezione e Azione* sia criticabile sia sul versante empirico che teoretico, tuttavia ne riconosce come vero elemento di rottura non tanto l'ipotesi di due distinti percorsi, quanto la possibilità che questi possano lavorare in maniera isolata.

1.1.3. Un modello più dinamico e nuovi orizzonti

Le tassonomie neuropsicologiche affrontate si soffermano primariamente sull'esito del processamento dell'informazione corporea, trascurando gli stadi computazionali sottostanti e non fornendo spiegazioni circa i criteri che guidano la costruzione delle rappresentazioni (de Vignemont, 2010). De Vignemont, nell'articolo *Body schema and body image—Pros and cons*, dopo aver illustrato i modelli dominanti presenti in letteratura, ne propone uno più dinamico basato sul meccanismo inferenziale Bayesiano applicato all'integrazione multimodale delle informazioni sensoriali alla base della rappresentazione del corpo.

Secondo de Vignemont (2010) le fonti sensoriali dalle quali provengono le informazioni relative al nostro corpo, a cui quotidianamente ci troviamo esposti, interagiscono costruendo differenti rappresentazioni. Tale interazione avverrebbe in due modalità differenti: la *combinazione* e l'*integrazione sensoriale*; la prima permette di descrivere le interazioni tra i segnali sensoriali *non ridondanti*, mentre la seconda descrive le interazioni tra i segnali *ridondanti*. Al fine di poter essere integrate è

necessario che le informazioni sensoriali siano parte di uno stesso sistema di riferimento e relative a un medesimo aspetto del corpo, così da poter dare origine a una robusta e coerente rappresentazione (de Vignemont, 2010). A questo scopo, il modello Bayesiano, fornisce un insieme di regole che consentono di combinare in maniera ottimale gli input sensoriali a partire da una conoscenza a priori circa il funzionamento di un sistema entro i suoi *vincoli* biologici e ambientali (de Vignemont, 2010).

In tale modello si postula che il processo sottostante la costruzione delle rappresentazioni mentali si basi sull'abilità della mente di elaborare probabilità statistiche. In questo scenario, essa opera al fine di produrre, come esito dei suoi processi cognitivi, l'output *più probabile* sulla base dei *cues* disponibili (Ataria et al., 2021). La mente Bayesiana è una mente che tenta di inferire le cause delle sensazioni corporee basandosi su un modello generativo del mondo, tale teoria ha infatti un ruolo centrale nelle neuroscienze computazionali (Friston, 2012). Essa, applicata in questo contesto, consiste in una gerarchia di probabilistiche rappresentazioni o *credenze* che consentono al soggetto di inferire *come* le sensazioni corporee vengano generate (Limanowski, 2022). Tali credenze confluiscono in una distribuzione di probabilità a priori circa la struttura e i parametri di un *modello*, in questo caso la rappresentazione del corpo, permettendo di computare la *plausibile* localizzazione delle diverse parti di esso sulla base di un calcolo di probabilità.

Il paradigma Bayesiano produce una *probabilità* definita *a posteriori*, ovvero il grado di fiducia dell'ipotesi a priori, basata sulle credenze possedute dal soggetto, condizionata dall'osservazione delle evidenze ed esperienze sensoriali (de Vignemont, 2010). La probabilità a posteriori è quindi proporzionale al prodotto tra la probabilità a priori e la funzione di *verosomiglianza*, intesa come la plausibilità e la precisione dei

dati sensoriali forniti dall'ipotesi di partenza. Nel sopracitato articolo, de Vignemont (2010) propone un passaggio efficace al fine di comprendere il modello: *“per esempio, esso rappresenta la relativa plausibilità delle diverse posizioni della mano. Il modello mira a calcolare la probabilità a posteriori, che consiste nel grado di fiducia nell'ipotesi a priori condizionata dall'osservazione delle evidenze sensoriali. La probabilità a posteriori è proporzionale alla funzione di verosomiglianza (...) ovvero la probabilità dei dati secondo l'ipotesi. Essa rappresenta tutto ciò che un soggetto conosce circa il processo che trasforma lo stato del mondo in informazione sensoriale. Una volta calcolata la probabilità a posteriori, il sistema ha una stima della posizione della mano. La decisione presa dal sistema circa la posizione della mano (...) richiede ulteriori computazioni che utilizzano funzioni di guadagno e perdita. Per ogni decisione, ci sono conseguenze che dipendono dalla vera posizione della mano, conseguenze che possono essere positive e negative. La regola Bayesiana della decisione mira a massimizzare il guadagno atteso data la probabilità a posteriori”*.

Ogni volta che la mente produce una rappresentazione setta un insieme di regole che integrano i *cues* ambientali rilevanti (Ataria et al., 2021). In merito alle rappresentazioni del corpo la mente ha a disposizione due tipologie di informazioni, citando Ataria: *“da una parte, vengono integrati i segnali provenienti dai diversi distretti sensoriali. Dall'altra, i passati tentativi di costruire rappresentazioni corporee servono come precedenti per quelle future, in questo modo le rappresentazioni vengono costruire alla luce di quelle passate. Il peso delle rappresentazioni precedenti viene aggiustato, in base alla corrispondenza tra le presenti e le passate circostanze.”*. Il paradigma Bayesiano evidenzia come l'aspetto funzionale possa influenzare il contenuto delle rappresentazioni corporee, mostrando chiaramente quanto esse siano *compito-dipendenti*. De Vignemont fa inoltre notare

come il peso attribuito agli input si modifichi sulla base della variabilità dei *cues* ambientali⁰, i quali a loro volta dipendono fortemente dal contesto. Il dinamismo domina questo modello nel quale si osserva una reciproca influenza tra il peso attribuito ai segnali sensoriali, fortemente volubili, e le regole decisionali associate alle sopracitate funzioni di guadagno e perdita, il tutto dipendente dal compito nel quale il soggetto si trova coinvolto.

L'orizzonte che si profila in quest'ambito della speculazione scientifica contempla modelli dicotomici, per lo più derivati dalla contrapposizione tra schema e immagine corporea, e concezioni nelle quali le rappresentazioni divengono l'esito di un processo multidimensionale. Si delineano così, in questa cornice, nuovi approcci teorici e pratici (Berlucchi & Aglioti, 2010) come quello di Carruthers (2008), dove il modello dicotomico supera la contrapposizione tradizionale tra schema e immagine per approdare a una distinzione basata sulla modalità di costruzione delle rappresentazioni. Egli pone da una parte le rappresentazioni corporee *online*, le quali vengono costruite e rinnovate momento per momento al fine di *concordare* con la percezione del corpo così come è nell'istante attuale, e dall'altra parte le rappresentazioni corporee *offline* le quali assumono un carattere di relativa stabilità e *descrivono* il corpo per come è *normalmente*. Le prime vengono costruite sulla base degli *input* sensoriali, compresi quelli visivi, e hanno un contenuto esplicito di carattere conscio; mentre le seconde si presuppone siano state costruite in parte sulla base delle informazioni sensoriali attuali e in parte sulla base delle memorie. (Berlucchi & Aglioti, 2010). Berlucchi e Aglioti evidenziano come il concetto di rappresentazione *offline*, aggiornata attraverso un processo diacronico, possa essere utile al fine di spiegare il fenomeno di inclusione di oggetti non corporei, aventi una relazione

sistematica con il corpo, entro i plastici confini di esso, come dimostrano Iriki et al. (1996).

Nel successivo paragrafo verrà illustrato il *sistema* delle rappresentazioni multiple che include: lo schema corporeo, l'immagine corporea e la descrizione strutturale del corpo. In riferimento a tale sistema le evidenze provenienti dai pazienti neurologici offrono un supporto notevole, ma non è ancora stato possibile determinare con chiarezza la misura e il modo nei quali queste rappresentazioni vengono tradotte in specifiche operazioni cerebrali (Berlucchi & Aglioti, 2010).

1.1.4. Le componenti della rappresentazione corporea

Come già affermato, coerentemente con un ampio capitolo della letteratura scientifica relativo agli studi sulla rappresentazione corporea, nonché alle patologie in cui essa è implicata, è possibile affermare che esistono diversi livelli di rappresentazione cognitiva della struttura corporea (Buxbaum, Coslett 2001; Sirigu et al., 1991). Generalmente le rappresentazioni mentali del nostro corpo vengono definite come quelle strutture cognitive implicate nella codifica e nel tracciamento dello *stato* del corpo (Vignemont, 2018) che agiscono a molteplici livelli di esperienza. Tali rappresentazioni, derivate dall'integrazione di informazioni sensori-motorie, visuo-spaziali e semantiche, sono tra loro relativamente indipendenti ma possono comunque interagire le une con le altre (Sirigu et al., 1991).

Chatterjee e Coslett, nella loro opera *The Roots of Cognitive Neuroscience: Behavioral Neurology and Neuropsychology*, basandosi sulle teorizzazioni di Head e Holmes e Pick, e facendo riferimento al contributo di Sirigu e collaboratori (Chatterjee & Coslett, 2014), individuarono in ultima istanza tre distinte tipologie di *presunte*⁸

⁸ Termine utilizzato dagli autori nell'opera a cui si fa riferimento.

rappresentazioni: lo schema corporeo, l'immagine corporea e la descrizione strutturale del corpo. Di seguito, queste verranno descritte e per ciascuna saranno illustrate alcune delle evidenze scientifiche provenienti da studi condotti su pazienti aventi lesioni cerebrali associate ad alterazioni nelle diverse rappresentazioni (Chatterjee & Coslett, 2014).

Alla luce del breve excursus teorico e dei modelli più attuali presentati nei precedenti paragrafi, è possibile definire lo schema corporeo come una rappresentazione dinamica e costantemente aggiornata delle relative posizioni delle parti del corpo, derivata dall'integrazione di input sensoriali di natura variegata: propriocettivi, vestibolari, tattili e visivi; i quali interagiscono con il nostro sistema motorio nella genesi dell'azione (Chatterjee & Coslett, 2014). La conoscenza della posizione del corpo nello spazio, ottenuta attraverso i feedback provenienti dai sistemi sensoriali e dalle informazioni motorie, è infatti fondamentale per la corretta esecuzione dei movimenti (Schwoebel et al., 2001). Lo schema corporeo supporta le azioni coordinate fornendo una rappresentazione propriocettiva delle condizioni iniziali del movimento (Costantini & Haggard, 2007), Gallagher (2006) pensava a esso come a un sistema di processi sensorimotori volti, in maniera continuativa, a regolare la postura e il movimento. Esso funzionerebbe al di là della consapevolezza riflessiva e senza necessità di un monitoraggio percettivo (Gallagher, 2006), diventando così un processo attivo a un livello implicito; in generale, infatti, si osserva la tendenza ad attribuire allo schema corporeo una funzione primariamente connessa all'azione e quindi non strettamente legata all'esperienza cosciente.

Cole e Gallagher in *Body Image and Body Schema in a Deafferented Subject* (1995) descrissero il caso di un paziente che aveva subito un grave danno allo schema corporeo (Gallagher & Cole, 1995). Ian Waterman, colpito da un'acuta neuropatia

periferica, all'età di 19 anni manifestò una deafferentazione⁹ dal collo in giù a causa della quale perse il senso del tatto e della propiocezione al di sotto di esso, domini dai quali provengono afferenze sensoriali fondamentali nella costruzione dello schema corporeo. Dopo l'esordio della malattia, nei mesi iniziali sperimentò una completa perdita della postura e del movimento: Ian non era in grado di sedersi o muovere gli arti in maniera controllata, nonostante potesse percepire visivamente il suo corpo. A seguito di un percorso riabilitativo, nel corso dei successivi due anni egli riacquistò un controllo motorio utile a nutrirsi, camminare e scrivere (Gallagher & Cole, 1995). Queste conquiste furono possibili poiché Ian poneva le diverse parti del suo corpo entro il campo visivo in modo da *concettualizzare* posture e movimenti, infatti, in assenza di informazioni tattili e propriocettive egli poteva sapere dove si trovavano i suoi arti solamente guardandoli ed elaborandone cognitivamente la posizione. In questo particolare caso, lo schema corporeo e la postura ad esso associata divengono un'attività volontaria piuttosto che un processo automatico (Gallagher & Cole, 1995). Di fronte a una deafferentazione lo schema danneggiato può venire rimpiazzato da un'immagine corporea *riflessiva* (Sattin et al., 2023), quindi derivata dall'elaborazione cognitiva degli stimoli visivi associati al corpo. Citando Gallagher e Cole: *“in termini di distinzione tra immagine corporea e schema, IW ha perso la maggior parte degli aspetti funzionali del suo schema corporeo, e in tal modo la possibilità di non dover custodire i movimenti. Egli è forzato a compensare questa perdita dipendendo dalla sua immagine corporea in un modo in cui i soggetti normali non fanno”*. I due autori ribadiscono come la propiocezione sia la maggiore fonte di informazione nel mantenimento della postura e nel controllo dei movimenti, ma non l'unica. Il caso di Ian dimostra infatti come nonostante un danno alla funzione propriocettiva sia

⁹ Deprivazione degli input sensoriali provenienti, in questo caso, dalle parti del corpo al di sotto del collo.

possibile ricostruire parzialmente lo schema corporeo, compensando con l'immagine del corpo (Gallagher & Cole, 1995). Successivamente sarà lo stesso Gallagher a riconoscere alla visione un ruolo fondamentale nel processo di schematizzazione del corpo (Ataria et al., 2021) affermando: “*il senso della vista è una fonte d'informazione vitale per la postura e il movimento*” (Gallagher, 1986). La propriocezione e la cinestesia visiva sono strettamente e direttamente correlate con lo schema corporeo e coinvolgerebbero un tacito processamento dell'informazione visiva relativa ai movimenti del corpo in relazione all'ambiente (Ataria et al., 2021). Nel caso di Ian la visione è divenuta la principale fonte di informazione circa il proprio corpo ed è stato possibile uno straordinario riallineamento tra visione e controllo cognitivo dei movimenti (Gallagher & Cole, 1995).

Il costrutto di immagine corporea ha suscitato e continua a suscitare numerose controversie relative alla sua definizione, la quale a tutt'oggi resta *da farsi*. Sempre coerentemente con la posizione di Gallagher e Cole, è possibile delinearla come: “*un complesso set di stati intenzionali - percezioni, rappresentazioni mentali, credenze e atteggiamenti - in cui l'oggetto (...) è il proprio corpo*” (Gallagher & Cole, 1995). Tale definizione implica un'intenzionalità riflessiva in cui l'immagine corporea viene coinvolta in tre differenti modalità: l'esperienza *percettiva* che il soggetto fa del proprio corpo; la comprensione *concettuale* che il soggetto possiede circa il corpo nel complesso; e l'atteggiamento *emotivo* nei confronti del proprio corpo. Condividendo una visione multidimensionale del costrutto è possibile aggiungere alle suddette modalità un'ulteriore componente, quella *comportamentale*, connessa alle azioni aventi come oggetto il proprio corpo, quali, ad esempio, il guardarsi allo specchio o il vestirsi (Sattin et al., 2023). Inoltre, come accennato nel paragrafo iniziale, va considerata la rilevanza dei fattori sociali e culturali che influiscono sulla percezione,

concettualizzazione ed emotività relative alla propria immagine corporea (Gallagher & Cole, 1995). Essa è infatti dinamica e oggetto di innumerevoli cambiamenti nel corso dello sviluppo, anche in relazione al proprio umore (King, 2018) o ad aspetti connessi alla quotidianità. L'immagine corporea implica così una dimensione identitaria non associata allo schema, il quale, come già detto, svolge un ruolo primariamente connesso all'azione.

Alla luce di quanto affermato, gli aspetti patologici legati all'immagine corporea possono essere considerati come un complesso multidimensionale di sintomi relativi ai vari elementi che la compongono (Sattin et al., 2023). Sattin et al. (2023) hanno classificato i disturbi ad essa connessi in due macrocategorie, quelli legati all'aspetto percettivo e quelli associati alla sua natura concettuale. Mentre i primi sono connessi a un fallimento nella valutazione delle dimensioni corporee, come nel caso della distorsione, i secondi consistono nei sentimenti e pensieri negativi legati al proprio corpo, i quali esitano in un'immagine corporea negativa. Quest'ultima, sempre secondo la definizione fornita da Sattin et al. (2023), si fonderebbe sull'insoddisfazione legata al proprio corpo o a parti di esso, a sua volta derivata da una discrepanza tra il corpo percepito e quello idealizzato.

Muovendosi nell'ambito dei disturbi percettivi relativi all'immagine corporea è possibile osservare una particolare patologia citata da de Vignemont e Pitron (2017) nell'articolo *Beyond differences between the body schema and the body image: insights from body hallucinations*, la *Alice in Wonderland syndrome*. Tale sindrome è stata descritta come un disturbo della percezione causato da una *rottura* dell'immagine corporea nella quale il soggetto sperimenta allucinazioni che lo portano a mispercepire le dimensioni di una o più parti del proprio corpo, quindi a esperirle come più grandi o più piccole del reale (Pitron & de Vignemont, 2017, p. 20). I due autori hanno

riportato una serie di particolari casi, tra questi quello di una paziente la quale, mentre camminava, percepiva il suo corpo come estremamente corto e “*vicino al terreno*” (Pitron & de Vignemont, 2017). Va notato come il soggetto riportato nell’articolo non manifestasse alcuna alterazione del movimento connessa all’allucinazione; ne consegue, come sostenuto da Pitron & de Vignemont (2017), che lo schema corporeo non sia intaccato dalla patologia e che le due rappresentazioni mantengono funzioni distinte rispettivamente connesse all’azione e alla percezione.

Tornando alle tre componenti della rappresentazione corporea proposte da Chatterjee & Coslett (2014), troviamo infine la *descrizione strutturale del corpo*. Sirigu et al. in *Multiple representations contribute to body knowledge processing* (1991) proposero un modello della *conoscenza del corpo* nel quale ipotizzarono l’esistenza di una rappresentazione in grado di fornire una descrizione strutturale mediata da specifiche categorie visuo-spaziali possedute dall’individuo, circa il proprio e altrui corpo. Tali rappresentazioni consisterebbero in una dettagliata matrice delle posizioni delle singole parti sulla superficie del corpo e dei confini che le delimitano (Sirigu et al., 1991). Nel modello proposto da Sirigu et al. (1991) si osserva una stretta correlazione tra questo livello di rappresentazione e le informazioni provenienti dai sistemi sensoriali visivi e somatici. Tuttavia, vi sarebbe un altrettanto stretto legame con la dimensione semantica e lessicale, la quale consente al soggetto di dare nomi, individuare categorie relative alle parti del corpo, alla loro funzionalità e ai differenti usi di esse in base ai contesti (Berlucchi & Aglioti, 2010). Inoltre in accordo con Buxbaum e Coslett (2001), diversamente dallo schema, la descrizione strutturale del corpo parrebbe essere meno connessa al sistema motorio, e quindi all’azione. Essa definirebbe la posizione delle parti del corpo in relazione alle altre in

un “*formato percettivo*”, piuttosto che verbale e proposizionale (Buxbaum & Branch Coslett, 2001).

Sirigu et. al (1991) al fine di supportare l’ipotesi di molteplici livelli di elaborazione della rappresentazione corporea, illustrarono il caso di un soggetto affetto da *autotopagnosia*. Si tratta di una condizione patologica nella quale si osserva l’incapacità di localizzare parti del corpo su sé stessi o sugli altri (Buxbaum & Branch Coslett, 2001), a fronte del mantenimento della capacità di eseguire con successo comandi verbali non connessi al corpo. Nel già citato articolo, gli autori si discostarono dalla definizione originariamente fornita da Pick (1922) che concepiva l’autotopagnosia come: “*il riflesso di un’alterazione nel meccanismo coinvolto nella generazione e mantenimento della rappresentazione spaziale del corpo o dello schema corporeo*”, sostenendo invece che si tratti di un deficit associato al sistema visuospatiale responsabile della descrizione strutturale del corpo del soggetto e dei corpi in generale, nonché alla terza componente della rappresentazione corporea descritta nel presente paragrafo. Buxbaum e Coslett (2001), in accordo con la posizione di Sirigu et al., illustrarono il caso di un paziente di 48 anni il quale, a seguito di un importante infortunio alla testa dovuto a un incidente stradale, e in assenza di danni ai sistemi sensoriali, manifestava un’autotopagnosia che lo rese incapace di indicare parti del corpo a comando o per imitazione. Tale caso, secondo il parere degli autori, fu fondamentale al fine di estendere le precedenti definizioni della patologia, poiché il soggetto manifestava un particolare pattern di prestazioni gravemente deficitarie. Egli non era in grado di imitare una serie di posizioni statiche e prive di significato in cui la mano sinistra era posata in svariate configurazioni rispetto alla bocca, alle orecchie, al mento e alla testa (Buxbaum & Branch Coslett, 2001). Ad esempio, nell’imitare sul suo corpo la postura dell’esaminatrice la quale posava la

mano accanto al proprio orecchio sinistro, il soggetto poneva la mano alla sinistra del suo naso (Buxbaum & Branch Coslett, 2001). Inoltre, manifestava difficoltà maggiori se prima della risposta gli veniva impedito di vedere il suo corpo ed era incapace di correggere gli errori posturali a fronte di un tempo illimitato di esposizione agli stimoli visivi proposti. Fu proprio questa sua incapacità a elicitare negli osservatori l'ipotesi di un danno a una qualche forma di rappresentazione corporea (Buxbaum & Branch Coslett, 2001). Infatti, coerentemente con il modello proposto da Sirigu (1991), gli autori sostenevano che nell'autotopagnosia la conoscenza semantica legata al corpo e alle sue parti fosse preservata, così come lo schema corporeo. Ad essere danneggiata sarebbe stata la descrizione strutturale del corpo la quale, sempre secondo gli autori, non solo è strettamente connessa alla visione, ma costituisce una rappresentazione multimodale alla quale contribuiscono aspetti motori, propriocettivi e visivi, nonché aspetti implicati nell'esecuzione di compiti che richiedono una trasformazione spaziale dell'informazione relativa alle parti del corpo (Buxbaum & Branch Coslett, 2001).

1.1.5. Le basi neurali della rappresentazione del corpo

Nell'affrontare l'aspetto relativo alle basi neurali delle rappresentazioni corporee è opportuno, alla luce della moltitudine di modelli presentati fino a ora, fare il *punto* della situazione. È infatti lecito, da parte del lettore, percepire poca chiarezza nell'uso della terminologia in riferimento al costrutto della rappresentazione corporea. Questa scarsa chiarezza rilette, in un certo senso, una confusione concettuale che ha accompagnato in maniera particolare i primi decenni della speculazione scientifica in quest'ambito, come già affermato in precedenza. Quando all'inizio del secolo scorso Head e Holmes (1911/1912) tentarono di rispondere ai quesiti relativi al come la mente *processa* il suo stesso corpo proponendo il modello sopradescritto, secondo il

neurologo inglese Macdonald Critchley (Berlucchi & Aglioti, 2010) incorsero in un'ingenua confusione linguistica. A suo dire i due aprirono un vaso di Pandora dal quale fuoriuscì un'ondata di termini relativi al corpo, perlopiù usati in maniera interscambiabile e non univoca (Berlucchi & Aglioti, 2010). Tale confusione, seppur in maniera meno evidente, perdura fino ai giorni nostri ed esita nei numerosissimi modelli tassonomici presenti in letteratura. Preso atto del *caotico stato delle cose* Berlucchi e Aglioti (2010) decisero di adottare un'espressione onnicomprensiva di tutto ciò che riguarda la dimensione corporea, inclusi gli aspetti emotivi e affettivi oltre a quelli percettivi e concettuali, ovvero la *consapevolezza corporea*. Affrontare la discussione della conoscenza del corpo attraverso una "*categoria mentale unitaria*" (Berlucchi & Aglioti, 2010) facilita l'analisi e la descrizione delle evidenze scientifiche disponibili coerentemente con la nozione di *neuromatrice* di Melzack (2005), ovvero di un sistema cerebrale distribuito e integrato da un punto di vista funzionale in grado di generare un sentimento unitario del corpo seppur connotato da differenti qualità nei vari momenti della vita. Per la ragione appena menzionata, nell'illustrare le basi neurali delle rappresentazioni corporee, verrà generalmente fatto riferimento alla dimensione di consapevolezza, piuttosto che alle specifiche componenti descritte in precedenza. Nel loro lavoro "*The Body in the brain revisited*" Berlucchi e Aglioti (2010) individuarono tre macroaree del nostro cervello implicate nella consapevolezza del corpo: la corteccia occipito-temporale, l'insula e la corteccia parietale.

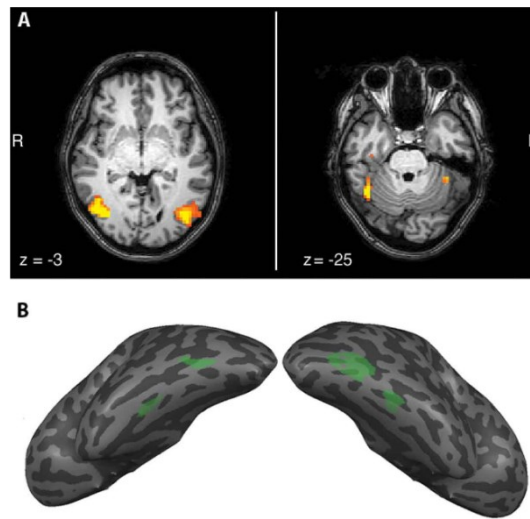
Attraverso studi condotti con il paradigma della risonanza magnetica funzionale (fMRI) è stato possibile individuare all'interno dei lobi temporali alcune delle basi neurali sottostanti la percezione corporea, in particolare sono due le regioni localizzate in quest'area che mostrano un'attivazione altamente selettiva per gli stimoli

relativi al corpo umano: l'*extrastriate body area* o EBA, e la *fusiform body area* o FBA. Furono Downing et al. (2001) a individuare nell'area occipito-temporale della corteccia cerebrale, all'altezza del solco temporale posteriore inferiore, una distinta regione a livello bilaterale che mostrava una risposta significativamente più forte alla visione di immagini del corpo umano e parti di esso, rispetto a quella prodotta alla vista di differenti stimoli non relativi al corpo, come oggetti inanimati o volti, ovvero l'*extrastriate body area*. Quest'evidenza permise di postulare l'esistenza di un sistema neurale altamente specializzato nella visione del corpo (Downing et al., 2001), ipotesi che trovò supporto in studi successivi svolti con un diverso approccio sperimentale (Peelen & Downing, 2007).

Un'altra area fortemente, e selettivamente, implicata nell'elaborazione di stimoli connessi al corpo umano è la *fusiform body area* o FBA, situata ventralmente nel giro fusiforme. Questa, sempre scoperta attraverso studi di neuroimmagine condotti con fMRI, diversamente dall'EBA mostra un'attivazione più specifica per le *raffigurazioni* del corpo umano prive di volto, piuttosto che per le immagini di esso (Peelen & Downing, 2005). Downing e Peelen (2011) sostengono che entro queste due regioni abitino popolazioni neurali deputate alla codifica degli aspetti relativi alla forma e alla postura dei corpi (Downing & Peelen, 2011). Coerentemente con la loro posizione l'*extrastriate* e la *fusiform body area*, operando congiuntamente, creano una: "*dettagliata ma cognitivamente non elaborata rappresentazione visiva dell'aspetto del corpo umano*" (Downing & Peelen, 2011). In questo senso la rappresentazione generata, da loro definita *infrastruttura percettiva*, conterrebbe gli aspetti espliciti degli stimoli relativi al corpo o a parti di esso, compresa, come già detto, la forma e la postura nel dettaglio, ma non fornirebbe informazioni di livello superiore circa le persone (Downing & Peelen, 2011).

Rispetto alla percezione corporea, la rilevanza funzionale di questa due aree è stata dimostrata anche attraverso studi condotti su pazienti, il lavoro di Moro et al. (2008) ha permesso di scoprire che *performance* deficitarie in compiti percettivi con stimoli relativi al corpo erano associate a lesioni in aree corrispondenti all'EBA e all'FBA, o a connessioni tra queste due. I due autori, basandosi su un'accurata revisione delle evidenze presenti in letteratura, sostenevano che le due aree considerate contribuiscono nel rappresentare le caratteristiche visive del corpo, come la forma e la postura, ma non partecipino ad un'ulteriore elaborazione delle informazioni (Downing & Peelen, 2011). EBA e FBA sarebbero coinvolte in un'ampia gamma di compiti associati ad aspetti della percezione del corpo umano o di parti di esso, ma le evidenze che supportano un loro coinvolgimento in attività di ordine superiore, come la rappresentazione dell'identità, delle emozioni, dei movimenti o delle azioni, oppure ancora nel controllo del comportamento motorio, sono davvero limitate (Downing & Peelen, 2011). L'attivazione rilevata attraverso studi condotti con risonanza magnetica funzionale rifletterebe quindi la presenza di una popolazione neuronale che risponde selettivamente a *caratteristiche visive* tipiche del corpo o parti di esso. Tale popolazione coopererebbe, secondo Downing e Peelen (2011), nella formazione di una rappresentazione delle percezioni relative al corpo umano e alle sue parti, rendendola *utilizzabile* da altre regioni. Le due aree analizzate, primariamente individuate a livello bilaterale, manifesterebbero inoltre una maggiore responsività alle immagini corporee nella regione emisferica destra rispetto alla controparte sinistra, secondo quanto

dimostrato da Aleong e Paus (*Neural Correlates of Human Body Perception* | *Journal of Cognitive Neuroscience* | MIT Press, s.d.).



La seconda regione a cui Berlucci e Aglioti (2010) hanno

Figura 1. Localizzazione delle regioni occipitotemporal corpo-selettive (extrastriate body area: EBA; fusiform body area: FBA). (A) EBA (sinistra) e FBA (destra) (Downing & Peelen, 2011).

ricosciuto un ruolo fondamentale rispetto alla consapevolezza corporea è l'insula. Tale struttura, situata all'altezza dell'intersezione dei lobi frontali, temporali e parietali (Simmons et al., 2013), si apprese essere strettamente implicata nell'interocezione, quando, nel 1955, il neurochirurgo canadese Wilder Penfield scoprì che la stimolazione elettrica della corteccia insulare originava una serie di sensazioni e movimenti viscerali (Hu et al., 2023). L'interocezione rappresenta, da un certo punto di vista, l'evoluzione del concetto di *cenestesi* toccato nel primo paragrafo e consisterebbe nel “senso della condizione fisiologica omeostatica del corpo” (Berlucci & Aglioti, 2010). Essa è servita da percorsi neurali dedicati che partono dal midollo spinale e dal tronco encefalico per arrivare fino alla corteccia insulare, la quale è organizzata in maniera gerarchica in direzione caudale-rostrale. Di conseguenza gli input sensoriali provenienti dalle varie parti del corpo che contribuiscono a determinare la sensazione fisiologica connessa al proprio equilibrio omeostatico, saranno primariamente proiettati all'insula posteriore e progressivamente elaborati e

integrati nella porzione centrale e anteriore della stessa (Craig & D, 2009). La parte anteriore dell'insula, strettamente interconnessa con la corteccia cingolata anteriore, sarebbe inoltre implicata nel riconoscimento di sé (Devue et al., 2007), e secondo Craig (2009) costituirebbe una struttura cruciale al fine di integrare i sentimenti relativi al corpo, in particolare quelli legati alle sue condizioni fisiologiche.

Più in generale, l'insula è implicata in disturbi neurologici che possono riguardare il senso di *body ownership*¹⁰ e *agency*¹¹, e nell'anosognosia da emiplegia (Berlucchi & Aglioti, 2010). Quest'ultima, sia nella sua versione motoria che sensoriale, consiste nell'incapacità da parte di chi ne è affetto di realizzare di avere un lato del proprio corpo paralizzato. La rilevanza di questa struttura ai fini della consapevolezza corporea è testimoniata dal fatto che in pazienti paralitici con anosognosia per emiplegia sinistra si osserva una lesione in corrispondenza dell'insula posteriore destra, lesione che non si rileva in pazienti emiplegici ma non anosognosici (Berlucchi & Aglioti, 2010). Inoltre, tale condizione può essere accompagnata dalla sensazione di *disownership*¹² dell'arto paralizzato. Studi di neuroimmagine, condotti comparando le lesioni di pazienti anosognosici con o senza esperienza di *disownership*, hanno permesso di attribuire alle lesioni localizzate nella porzione posteriore dell'insula destra un ruolo determinante nell'associazione tra anosognosia da emiplegia e i disturbi relativi al senso di *ownership* degli arti paralizzati.

Per quanto concerne la consapevolezza corporea possiamo affermare che l'insula sia una struttura fondamentale. In particolare, la corteccia insulare posteriore sarebbe responsabile delle rappresentazioni corticali del dolore e degli stati corporei interni, mentre il successivo processamento delle afferenze viscerali avrebbe luogo

¹⁰ Concetto che verrà affrontato all'interno del paragrafo successivo.

¹¹ Definita come l'esperienza di controllare gli eventi esterni attraverso le proprie azioni (Chambon et al., 2014).

¹² Sinteticamente, la negazione dell'appartenenza di un arto al proprio corpo.

nella porzione anteriore della stessa, che pare essere di cruciale importanza per gli aspetti emotivi connessi al corpo, la consapevolezza interocettiva e l'autoconsapevolezza (Heydrich & Blanke, 2013).

Infine, tornando al punto da cui siamo partiti nel presente paragrafo, quindi ai tre *luoghi* del cervello nei quali Berlucchi e Aglioti sostengono risieda il corpo, giungiamo alla corteccia parietale. Il coinvolgimento di quest'area è stato dimostrato attraverso studi relativi ai cosiddetti fenomeni *autoscopici*, illusioni visive durante le quali le persone hanno l'impressione di vedere un *secondo sé corporeo* nello spazio extra-personale (Berlucchi & Aglioti, 1997). La porzione emisferica sinistra della corteccia parietale sarebbe inoltre coinvolta in disturbi neurologici che riguardano la consapevolezza corporea, come l'autotopagnosia. A fronte dell'incapacità di indicare parti del proprio corpo sotto comando verbale, i pazienti affetti da questa condizione riescono con successo a svolgere azioni guidate che *non* riguardano il corpo, inoltre, si osservano difficoltà significative nel descrivere le relazioni spaziali tra le diverse parti.

Da un punto di vista neuroanatomico, l'autotopagnosia è tipicamente causata da lesioni ubicate nel lobo parietale posteriore sinistro, in aggiunta studi fMRI su soggetti normali hanno permesso di individuare come aree cruciali nel riconoscimento delle parti del corpo, e delle relazioni tra esse, il giro angolare e il solco intraparietale. In generale, il lobo parietale sembrerebbe essere particolarmente coinvolto nella codifica delle posizioni dinamiche delle parti del corpo. Vi sono infatti evidenze circa l'esistenza di specifici neuroni, collocati nella regione parietale superiore delle scimmie rhesus, in grado di integrare input provenienti dalla corteccia somatosensoriale primaria al fine di costruire complesse rappresentazioni delle posture

corporee (Sakata et al., 1973), fornendo la base per un *modello mentale* del corpo (Buxbaum & Branch Coslett, 2001).

1.1.6. Body ownership

Come arriviamo a sentire di possedere il nostro corpo? Per secoli la filosofia e la psicologia hanno tentato di rispondere a domande simili a questa (Ehrsson, 2020), tuttavia, come affermato da Botvinick (2004), nelle scienze della cognizione i fenomeni più sfidanti sono spesso quelli che diamo per scontati nella vita di tutti i giorni (*Probing the Neural Basis of Body Ownership | Science*, s.d.). Da un punto di vista neuropsicologico il costrutto che risponde alla domanda iniziale è quello di *body ownership*, definito da Gallagher (2000) come: “*il senso di essere colui che sta subendo un’esperienza. Per esempio, il senso che il mio corpo si muova indipendentemente dal fatto che il movimento sia volontario o involontario*”. Più in generale, il fenomeno di *body ownership* si riferisce alla sensazione, continua e onnipresente, che il corpo in cui si *abita* sia il proprio e all’esperire questo come parte integrante del sé, in un modo diverso da quanto accade con gli altri oggetti (Tsakiris et al., 2010). Assumendo una prospettiva evoluzionistica, sentire di essere in possesso del proprio corpo, oltre a garantire continuità all’esperienza corporea, ha una funzione adattiva connessa al bisogno di localizzare e identificare correttamente sé stessi nell’ambiente sensoriale (Ehrsson, 2020), processi, che a loro volta contribuiscono in maniera fondamentale all’autoconsapevolezza dell’individuo (Ehrsson et al., 2004). La *body ownership* può anche essere definita come uno *speciale stato percettivo* del corpo, il quale rende possibile esperire le sensazioni corporali come unicamente proprie. Essa confluisce nel sentimento, sempre presente nella vita mentale dell’individuo, che “*il mio corpo mi appartenga*” (Tsakiris, 2010).

Sono molteplici le ipotesi formulate come spiegazione di questo fenomeno, nell'ambito della comunità neuroscientifica vi è crescente consenso nel ritenere che l'esperienza di *percepire* il corpo come proprio sia strettamente dipendente da un processo di integrazione multisensoriale (Ehrsson, 2020). Coerentemente con tale prospettiva, l'*auto-attribuzione* delle diverse parti del corpo sarebbe l'esito di un processo analogo a quello che porta alla costruzione di una rappresentazione dinamica e costantemente aggiornata del corpo, basata anch'essa sull'integrazione degli input provenienti dai vari distretti sensoriali (Ehrsson, 2020).

Tale prospettiva è stata sistematizzata da Ehrsson il quale, nel manuale *Multisensory Perception* (2020), ha illustrato il modello *multisensoriale dell'ownership*. Coerentemente con quanto emerso da studi condotti utilizzando il paradigma della *Rubber hand illusion*¹³, questo modello abbraccia uno scenario nel quale l'*ownership* di un arto, nello caso specifico della mano, corrisponderebbe all'esito di un processo di " *fusione percettiva*" (Ehrsson, 2020) degli input visivi, tattili e propriocettivi in un oggetto multisensoriale rappresentato dal corpo o dalle sue parti. Botvinick (2004), nell'ambito di un'indagine relativa alle basi neurali della *body ownership*, mise in rilievo il ruolo di specifici pattern *inter-sensoriali* nel processo che consente di distinguere il proprio corpo dagli altri, sostenendo come la correlazione o la sovrapposizione di questi dia vita all'esperienza di padronanza del proprio corpo. Ad esempio, citando l'autore: "*esiste una corrispondenza affidabile tra la posizione del nostro corpo e le sensazioni che proviamo. L'input visivo circa la postura del corpo è direttamente correlato con le informazioni relative alla propriocezione, il nostro intrinseco senso della posizione*".

¹³ Paradigma a cui si farà anche riferimento con l'acronimo RHI, trattato in maniera approfondita nel paragrafo seguente.

Da un punto di vista neuroanatomico, a mediare questa fusione percettiva sarebbero le popolazioni neurali ubicate nella corteccia premotoria ventrale, nella corteccia intraparietale e in *siti multisensoriali chiave* che integrano informazioni visive, tattili e propriocettive entro coordinati sistemi di riferimento centrati su una specifica parte del corpo (Ehrsson, 2020). Ne consegue che i meccanismi causali chiave alla base dell'esperienza di *ownership* siano implementati all'interno dei sistemi percettivi multisensoriali presenti nel cervello. Ulteriori evidenze a supporto di una connessione tra l'identificazione con il proprio corpo e l'*intersensorialità* provengono da una sindrome neurologica causata da una lesione del lobo parietale destro, la somatoparafrenia la quale porta gli individui a negare di possedere uno o più arti nella porzione sinistra del loro corpo.

In questo ambito, il punto di forza di una prospettiva *multisensoriale* sta nel fatto che essa offre una spiegazione *parsimoniosa* (Ehrsson, 2020) di un fenomeno complesso come la *body ownership*. Inoltre, consente di non dover ricorrere, da un punto di vista causale, a funzioni cognitive di livello superiore talvolta difficili da definire e da porre in relazione con i corrispettivi meccanismi neurali (Ehrsson, 2020). Tuttavia, la possibilità di distinguere percettivamente il proprio corpo dall'ambiente circostante consente di creare il *fondamento* necessario affinché le funzioni cognitive superiori connesse all'autoconsapevolezza corporea possano emergere.

1.1.7. Rubber Hand Illusion

La *Rubber Hand Illusion* è un paradigma sperimentale condiviso e ampiamente utilizzato per investigare i cambiamenti nelle rappresentazioni corporee (Riemer et al., 2019) che coinvolge il sentimento di *body ownership* (Ehrsson, 2020). Come suggerisce il nome, la RHI si basa su un'illusione che induce il soggetto a percepire e processare una mano artificiale come appartenente al proprio corpo, attraverso il coinvolgimento di componenti somatosensoriali, affettive e motorie. Da un punto di vista fenomenologico, essa evoca un sentimento illusorio di appartenenza a seguito di una stimolazione che consiste nel toccare in maniera sincrona la mano del partecipante, nascosta alla vista, e una mano artificiale, posta invece di fronte al soggetto in una posizione visibile e *anatomicamente plausibile*¹⁴. L'illusione consiste nella *soluzione* trovata dalla mente del soggetto al conflitto sensoriale derivato da informazioni visive e propriocettive discrepanti. Nel corso degli anni il paradigma originale, descritto in maniera seminariale da Botvinick e Cohen in "*Rubber hands 'feel' touch that eyes see*" (1998), è stato implementato e ridefinito sotto molteplici aspetti (Riemer et al., 2019). Di seguito, nel paragrafo, verranno trattati i punti salienti della procedura a partire dal *set-up* sperimentale per poi giungere alle modalità di induzione¹⁵ dell'illusione e infine alle tecniche di quantificazione degli effetti.

Nelle ricerche che adoperano la RHI il *set-up* sperimentale varia considerevolmente in base al quesito specifico che ci si pone. Una prima importante differenza riguarda la posizione della mano artificiale, ovvero lungo quale asse spaziale essa viene posizionata rispetto alla mano reale del partecipante e, di conseguenza, lungo quale asse è atteso un effetto dovuto all'illusione. Come riportato

¹⁴ Nella formulazione originaria del paradigma.

¹⁵ Di questo aspetto verrà approfondita solamente la modalità di induzione tattile, poiché rilevante ai fini della trattazione.

da Riemer et al. (2019), nella maggior parte delle ricerche la mano artificiale è posizionata lungo l'asse orizzontale accanto alla mano del soggetto. Tuttavia, un significativo numero di studi ricorre a una *discrepanza* spaziale lungo l'asse verticale, in questo caso la mano artificiale è posta sopra la mano del partecipante (Riemer et al., 2019). L'aspetto relativo all'asse di posizionamento della mano protesica è di fondamentale importanza, infatti la distanza percepita dal soggetto tra essa e la mano reale ha un'influenza significativa sull'esito dell'illusione (Kalckert & Ehrsson, 2014). Considerando come misura dell'effetto il *drift* propriocettivo¹⁶, Riemer et al. (2019) riportano una differenza importante tra i due *set-up* sperimentali, infatti la misura più alta dell'effetto prodotto dall'illusione lungo l'asse orizzontale mai rilevata sarebbe superiore del doppio a quella mai registrata lungo l'asse verticale. È opportuno inoltre tenere conto delle differenze connesse all'età nella percezione della lunghezza degli arti, che possono influenzare la procedura in un *set-up* sperimentale che utilizza una discrepanza spaziale verticale, ma non orizzontale. In aggiunta, la procedura di RHI risente di un limite spaziale per il quale la forza dell'illusione diminuisce all'aumentare della distanza tra la mano reale e quella artificiale. Ai fini della presente trattazione è possibile affermare che la procedura ottimale sia quella che ricorre a un posizionamento lungo l'asse orizzontale, dove le due mani sono poste a una distanza di circa 15 cm tra loro.

Le tipologie di *mano artificiale* che possono essere adoperate nella procedura di RHI sono molteplici, il nome stesso fa riferimento alla versione iniziale dell'esperimento descritta nello studio pionieristico di Botvinick e Cohen (1998), dove *rubber* si riferisce al materiale della mano utilizzata come stimolo. Poiché la procedura non prevede che i partecipanti tocchino la mano, il materiale di cui essa è fatta è

¹⁶ Verrà descritto nel dettaglio successivamente nel corso del paragrafo.

pressoché irrilevante ai fini dell'illusione, purché essa venga riconosciuta in maniera inequivocabile come un oggetto esterno e non appartenente al corpo (Riemer et al., 2019). L'evoluzione della procedura ha permesso di creare stimoli alternativi all'originaria protesi di gomma, quali: il riflesso della mano reale del partecipante, una o più videoregistrazioni della mano ipsilaterale o, ancora, stimoli creati attraverso la realtà virtuale, questi ultimi consistono in riproduzioni presentate su un monitor, attraverso proiezioni 3D o all'interno di ambienti di realtà virtuale immersiva (Riemer et al., 2019). Per quanto concerne le prime due, entrambe hanno dei vantaggi importanti rispetto alla mano protesica, come la possibilità di implementare movimenti attivi (Riemer et al., 2019). Trattandosi in entrambi i casi della mano del partecipante *riprodotta* in diverse modalità, questi input visivi oltrepassano il problema della somiglianza tra la mano di gomma e quella del partecipante. Tuttavia, poiché il paradigma di RHI investiga, citando Riemer et al. (2019), "*l'incorporazione percettiva di un oggetto estraneo all'interno della rappresentazione del proprio corpo*", va quindi tenuto conto dell'influenza dei processi *top-down* di *body ownership* che vengono generati dall'esposizione a stimoli quali video o immagini riflesse a uno specchio. Tali processi possono infatti esitare in una valutazione alterata di *ownership*, in quanto si presume che la maggior parte delle persone abbia una certa familiarità con video e specchi e di conseguenza maggiore consapevolezza dello star guardando, di fatto, la propria mano, anche se dislocata nello spazio. Le versioni della RHI che utilizzano lo specchio o i video sono efficaci al fine di studiare le influenze dell'integrazione multisensoriale *bottom-up* alla base dell'illusione, ma vanno prese in seria considerazione le influenze *top-down* che possono aumentare le misure degli effetti rispetto al paradigma che prevede l'uso di una *inequivocabilmente estranea* mano protesica (Riemer et al., 2019).

Sono diversi gli studi che si sono occupati di stabilire l'eventuale influenza della lateralità della mano reale/artificiale e della manualità del soggetto sugli effetti dell'illusione, tuttavia, non è stato possibile giungere a risultati univoci. Coerentemente con l'ipotesi di un'asimmetria dell'attenzione spaziale (Zeller & Hullin, 2018) e, considerato che la forza della RHI sembra correlare con la riduzione dell'attenzione verso i segnali sensoriali provenienti dalla propria mano, si potrebbe postulare, come fatto da Riemer et al. (2019), che l'induzione dell'illusione sia facilitata nella mano non dominante. Considerato inoltre che la *consapevolezza corporea* è stata associata prevalentemente all'emisfero corticale destro (Riemer et al., 2019), nei destrimani la mano sinistra non dominante dovrebbe essere più direttamente connessa ai processi implicati nella *body ownership*. Tuttavia, non è stata trovata un'evidente interazione tra la manualità e l'esito della RHI (Haans et al., 2008), in generale i risultati suggeriscono che potrebbe esserci un piccolo vantaggio nell'indurre l'illusione nella mano non dominante in soggetti destrimani, mentre non vi sono dati conclusivi per i soggetti sinistrorsi (Riemer et al., 2019).

Per quanto concerne le modalità di induzione dell'illusione è possibile distinguere tra la stimolazione tattile e i movimenti attivi e passivi. Nell'affrontare questo aspetto della procedura va premesso che le modalità di induzione *innescano* l'attivazione di due distinti aspetti fondamentali del corpo, se la stimolazione tattile attiva l'aspetto sensoriale, i movimenti, siano essi attivi o passivi, si riferiscono al corpo come fonte di azione (Riemer et al., 2019). La stimolazione tattile consiste, nella maggior parte dei casi, nell'accarezzare con un piccolo pennello la mano nascosta del partecipante e la *rubber hand*. Un fattore di vitale importanza in questo ambito è la sincronia o asincronia dei tocchi sulle mani (Riemer et al., 2019), su questa differenza si basano infatti le condizioni sperimentali sulle quali si strutturano la maggior parte

degli studi che utilizzano la RHI. Come si può intuire, la condizione sperimentale sincrona prevede che la stimolazione tattile avvenga in maniera coordinata su entrambe le mani e secondo intervalli temporali stabiliti, mentre quella asincrona non prevede tale accorgimento. È stato inoltre dimostrato che la velocità e la piacevolezza dei tocchi hanno un effetto di modulazione sull'illusione (Riemer et al., 2019). In merito alla durata della fase di induzione, questa varia considerevolmente tra i diversi studi, spaziando da pochi secondi a dieci minuti (Riemer et al., 2019).

Al fine di quantificare gli effetti della RHI è possibile ricorrere a diverse tecniche, tra le principali vi sono: i questionari *self-report* relativi all'esperienza fenomenologica durante la fase di induzione, il *drift propriocettivo* dalla propria mano verso quella artificiale e le risposte fisiologiche¹⁷ (Riemer et al., 2019). I questionari *self-report* consentono di ottenere un giudizio retrospettivo riguardante l'esperienza vissuta dai partecipanti durante la fase di induzione dell'illusione. Si compongono di item mirati relativi al senso di *embodiment* o di *agency*¹⁸ percepito dal soggetto rispetto alla mano artificiale e di item di controllo riguardanti altre esperienze (Riemer et al., 2019). Usualmente, tali questionari, consistono in una serie di affermazioni rispetto alle quali viene richiesto al soggetto di indicare, su una scala Likert, il grado di accordo o disaccordo con esse.

¹⁷ Non verranno descritte in questo contesto poiché non rilevanti ai fini della trattazione.

¹⁸ Il costrutto che si vuole indagare varia in base alla tecnica di stimolazione scelta.

La seconda misura che consente di quantificare gli effetti della RHI è quella relativa al *drift propriocettivo*, un illusorio spostamento della localizzazione percepita della propria mano verso quella artificiale. Esso può essere valutato sia attraverso *task* percettivi che motori¹⁹, questi ultimi consistono generalmente in puntamenti balistici o movimenti volti ad afferrare qualcosa. I movimenti possono essere effettuati con la mano controlaterale a quella coinvolta nell'illusione verso la posizione percepita di quest'ultima (Figura 2, riquadro E), oppure possono essere effettuati con la mano ipsilaterale all'illusione ed essere rivolti a un oggetto target (Figura 2, riquadro F). Nel primo caso il *drift propriocettivo* è riflesso direttamente dalla posizione indicata dal soggetto, mentre, nel secondo, la posizione percepita dal soggetto, presumibilmente alterata, viene inferita sulla base di eventuali errori sistematici nel raggiungimento dell'oggetto target (Riemer et al., 2019). Considerate le diverse tecniche per valutare la deriva propriocettiva, alcuni studi che adoperano come *task* motorio i puntamenti effettuati con la mano controlaterale verso quella ipsilaterale all'illusione, hanno rivelato l'esistenza di una correlazione tra la misura del *drift* e i punteggi attribuiti

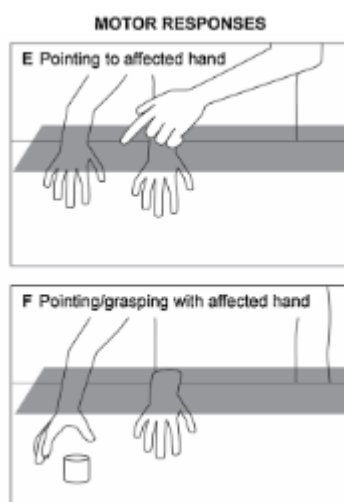


Figura 2. (E) Il partecipante indica con la mano non coinvolta nell'illusione la posizione percepita dell'indice della mano coinvolta nell'illusione. (F) Il partecipante usa la mano coinvolta nell'illusione per afferrare un oggetto esterno e visibile (Riemer et al., 2019).

¹⁹ Nell'ambito della presente trattazione verrà approfondita solamente la modalità motoria.

all'esperienza di *ownership* rispetto mano artificiale, correlazione che non è emersa in studi che utilizzano altre tecniche di valutazione.

Limanowski (2022) propone una breve una revisione della letteratura di neuroimmagine relativa ai correlati neuro-anatomici della RHI. Da questa, emerge come ai fini dell'illusoria *adozione* della mano artificiale le strutture aventi un ruolo funzionale siano la corteccia premotoria, quella parietale posteriore e la corteccia occipitotemporale visiva laterale.

1.2. LA RAPPRESENTAZIONE DELLO SPAZIO

1.2.1. Come la mente rappresenta lo spazio

Nel mondo ogni cosa che possa definirsi concreta possiede una sua localizzazione spaziale, compreso il corpo umano. Per tale ragione essere dotati di una competenza relativa allo spazio è una condizione fondamentale per la sopravvivenza. Di norma, le persone sono costantemente consapevoli della loro ubicazione, quest'informazione costituisce un prerequisito fondamentale affinché si possano compiere azioni finalizzate mantenendo un orientamento soggettivo adeguato (Newcombe & Huttenlocher, 2000).

Data la complessità del fenomeno, risulta difficile pensare alla codifica spaziale come a un processo monolitico, vi è infatti ampio consenso nel ritenere che esso possa essere scisso in differenti sistemi (Newcombe & Huttenlocher, 2000) i quali darebbero origine a molteplici forme di rappresentazioni spaziali. Tuttavia, da un punto di vista soggettivo, *l'esperienza dello spazio* è unitaria e coinvolge un processo di integrazione delle informazioni sensoriali e motorie che porta alla costruzione di rappresentazioni interne del corpo nello spazio e dello spazio che ci circonda, dando origine a delle *relazioni spaziali* tra noi e gli oggetti con i quali ci troviamo a interagire (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo). Uno dei quesiti principali che le neuroscienze cognitive si pongono riguarda il come la mente costruisce una *mappa* del mondo esterno e come questa mappa interagisca con le rappresentazioni corporee al fine di consentire il movimento nello spazio e l'azione in e su di esso (Berti & Frassinetti, 2000).

Per Vallar e Maravita (2009) le rappresentazioni spaziali hanno origine all'interno dei distretti sensoriali presenti nel nostro corpo. Inizialmente, il processamento degli input sensoriali induce la formazione di rappresentazioni

specifiche degli stimoli nelle cortece sensoriali primarie. Successivamente, l'integrazione delle informazioni somatosensoriali, visive e uditive con i segnali di natura vestibolare, visiva e propriocettiva relativi alla posizione del corpo e delle sue parti nello spazio esita in due sistemi di riferimento spaziali per il movimento e la cognizione: quello *egocentrico* e quello *allocentrico*. Da un punto di vista ecologico è possibile osservare un'ampia interazione funzionale tra i due sistemi di riferimento, rendendo possibile un'esperienza soggettiva dello spazio unitaria e autentica. Come riportato da Vallar e Maravita (2009), le evidenze provenienti dallo studio di pazienti cerebrolesi supportano l'eventualità di un "*frazionamento della mappa interna dello spazio in un numero di discrete, anche se interconnesse, componenti*". Tale frazionamento esita, come già affermato, in una rappresentazione interna dello spazio non unitaria. Il *frame* egocentrico consente la codifica della posizione degli oggetti in riferimento al corpo o a parti di esso, dando così origine a rappresentazioni dello spazio centrate sul soggetto, le quali sono adoperate principalmente nella generazione e attuazione delle azioni finalizzate. Diversamente, nel sistema di riferimento allocentrico gli oggetti sono codificati principalmente in riferimento alla loro spazialità e alle loro proprietà configurazionali (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo). Queste rappresentazioni trovano la loro principale applicazione nell'identificazione degli oggetti e nella navigazione nello spazio. La principale distinzione che possiamo osservare nella rappresentazione spaziale è quella tra *spazio personale* e *spazio extra-personale*. Il primo è generalmente *posto* entro i limiti del corpo, mentre il secondo, esterno ai confini corporei, è ulteriormente suddiviso sulla base delle azioni che il soggetto è in grado di performare in esso. La rappresentazione dello spazio *extra-personale* è infatti composta da: il *grasping space*, lo spazio di presa, che include

ulteriori sottocomponenti in base ai distretti motori utilizzati per svolgere l'azione; lo spazio del *vicino*, il quale include un settore spaziale che arriva fino ai 6-8 metri oltre il corpo; infine, lo spazio del *lontano*, che Vallar e Maravita (2009) hanno definito come “*uno spazio visivo percepito (...) con una scala di distanza non lineare*”. Più in generale, la dimensione *extra-personale* della rappresentazione spaziale prevede una distinzione tra uno spazio *peri-personale*, raggiungibile con il movimento della mano o del braccio, che può, come dimostrato dall'esperimento condotto da Berti & Frassinetti (2000), essere esteso ulteriormente attraverso l'uso di strumenti *integrabili* nello schema corporeo, ad esempio un bastone, che rendano raggiungibile distanze maggiori; e uno spazio più distante le cui sottocomponenti variano in base al modello adoperato per descriverlo.

Come accade per la rappresentazione corporea, anche per quella spaziale, le principali evidenze scientifiche provengono dalla rilevazione e dallo studio di dissociazioni in pazienti con patologie neuropsicologiche. La principale fonte di informazioni che supportano l'esistenza di discrete e indipendenti rappresentazioni dello spazio è il *neglect*, anche noto come negligenza spaziale unilaterale. Si tratta di un disordine di natura *multicomponentiale* a causa del quale il paziente fallisce sistematicamente nell'esplorazione dell'emicampo spaziale, e attenzionale, controlaterale la sede della lesione. Il *neglect* è usualmente causato da un danno localizzato nell'emisfero cerebrale destro e coinvolge, di conseguenza, il settore sinistro dello spazio personale ed *extra-personale*. Generalmente, come riportato da Vallar e Maravita (2009), i pazienti affetti da *neglect* manifestano deficit sia per lo spazio personale che per quello *extra-personale*, tuttavia sono state riscontrate numerose dissociazioni nelle due manifestazioni del disturbo. Già agli albori di quest'ampissimo capitolo della letteratura scientifica furono osservati insoliti *pattern*

sintomatologici in pazienti neglettici, alcuni manifestavano un neglect visivo per lo spazio *extra-personale*, ma non per la metà sinistra del proprio corpo, altri mostravano la dissociazione inversa (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo). Questi, e altri, *pattern* deficitari selettivi suggerirono l'esistenza di discreti sistemi neurali responsabili di altrettanto discrete rappresentazioni per i due macrosettori spaziali.

Rispetto allo spazio *extra-personale*, la distinzione tra le rappresentazioni dello spazio vicino e lontano sembrerebbe essere supportata da evidenze provenienti ancora dallo studio di pazienti neglettici con lesioni emisferiche destre. Tali evidenze suggerirebbero che vi siano distinti sistemi neurali, ubicati nell'emisfero destro, responsabili della rappresentazione dello spazio vicino o *peri-personale* e di quella per lo spazio lontano. Le rappresentazioni di questo settore spaziale possono essere distinte in base a fattori connessi al movimento, agli effettori adoperati per agire in esso e ad aspetti sensoriali e percettivi, i quali contribuiscono, in maniera coordinata, alla costruzione e all'aggiornamento di esse (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo).

Sono diverse le strutture neurali che codificano lo spazio attraverso differenti prospettive e lavorano parallelamente al fine di fornire al soggetto una coerente rappresentazione dello spazio. Essa costituisce l'esito dell'integrazione di stimoli visivi e uditivi presenti nello spazio *extra-personale*, degli stimoli somatosensoriali provenienti dal corpo e delle informazioni relative alla postura ottenute attraverso la propriocezione. Data la complessità del processo che conduce alla formazione delle rappresentazioni mentali dello spazio, è plausibile ipotizzare che il corrispettivo neuro-anatomico includa un *network* di strutture interconnesse che gestiscono i differenti aspetti, incluse le componenti discrete relative allo spazio personale ed *extra-*

personale e la loro integrazione multisensoriale (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo). A partire da studi condotti su pazienti cerebrolesi ai quali sono stati sottoposti compiti di cancellazione di stimoli target, disegno e bisezione di linee svolti nello spazio peripersonale, è stato possibile includere nel *network* della cognizione spaziale le seguenti strutture: la corteccia parietale posteriore, in particolare la sua porzione emisferica destra, la corteccia premotoria frontale e la materia bianca che connette le regioni frontali con la corteccia parietale posteriore. Rispetto a quest'ultima, il giro sovramarginale e angolare del lobo parietale inferiore sembrano essere rilevanti ai fini della cognizione spaziale, così come la giunzione temporo-parietale e il giro temporale superiore, sebbene, come riportano Vallar e Maravita (2009), il ruolo di queste ultime sia più controverso.

Alcuni studi di neuroimmagine condotti sugli umani hanno esplorato il ruolo delle differenti strutture cerebrali nella rappresentazione dello spazio generata a partire da diversi sistemi di riferimento²⁰ e hanno permesso di supportare l'ipotesi di *frame* distinti associati a distinti *network* neurali. Adoperando il paradigma della risonanza magnetica funzionale su soggetti sani, Galati et al. (2000) hanno tentato di individuare le regioni cerebrali sottostanti le coordinate spaziali egocentriche e allocentriche che consentono di giudicare la posizione di stimoli visivi rispetto al proprio corpo o ad altri oggetti, contribuendo a una rappresentazione adeguata dello spazio. I ricercatori hanno chiesto ai soggetti di giudicare la posizione (destra *vs* sinistra) di un segmento verticale che interseca una linea orizzontale. In una condizione i partecipanti dovevano valutare la posizione del segmento verticale rispetto al piano mediano sagittale del proprio corpo, sistema di riferimento egocentrico. Nell'altra condizione sperimentale veniva

²⁰ Egocentrico *vs* allocentrico.

chiesto loro di stimare la posizione del segmento verticale rispetto all'oggettivo punto mediano della linea orizzontale, sistema di riferimento allocentrico. I pattern di attivazione cerebrale emersi dalla somministrazione dei compiti mostrano l'esistenza di *network* corticali solo in parte sovrapponibili (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo). Nella condizione egocentrica è stato rilevato un *network* di attivazione che include la corteccia parietale posteriore (nelle porzioni superiori e inferiori dei lobi parietali), dalla superficie mediana fino alla giunzione temporo-parietale, e la corteccia premotoria frontale. Sempre nella prima condizione, sono state osservate attivazioni bilaterali, tuttavia vi è una netta predominanza dell'attività cerebrale nella porzione emisferica destra. Anche nella condizione allocentrica è stato attivato un *network* fronto-parietale, questa volta centrato sulle regioni parietali superiori e intra-parietali e sul solco frontale superiore dell'emisfero destro (Vallar e Maravita, *Personal and extrapersonal spatial perception*, capitolo 15, 2009, in Berntson & Cacioppo).

Le evidenze provenienti dallo studio dei casi individuali di pazienti con neglect suggeriscono come vi sia un ampio coinvolgimento dell'emisfero destro nella suddetta patologia, in particolare della corteccia parietale posteriore e frontale oltre all'implicazione di alcune strutture sottocorticali. A partire da tali evidenze, viene postulata l'esistenza di un ampio circuito, attivato nella porzione emisferica destra, responsabile della rappresentazione dello spazio *extra-personale* che comprende le regioni frontali, tra le quali la corteccia premotoria ventrale e il giro frontale mediano, e le regioni temporali superiori. Diversamente, le aree parietali posteriori, tra le quali il giro sovra-marginale, il giro post-centrale e la materia bianca sottostante, sembrerebbero supportare le rappresentazioni dello spazio personale.

In conclusione di questo paragrafo e alla luce delle evidenze riportate, è possibile affermare che la rappresentazione dello spazio costituisca un fenomeno cognitivo la cui esperienza fenomenologica soggettiva ha un carattere unitario, ma la sua controparte neuro-anatomica e cognitiva è estremamente complessa e articolata. Quest'ultima non è ascrivibile entro singole strutture cerebrali, bensì è riconducibile a un complesso *network* che coinvolge strutture corticali, sottocorticali e sensoriali.

1.2.2. L'adattamento prismatico

Tra i soggetti sani, una procedura ampiamente utilizzata per investigare la plasticità visuo-motoria a breve e lungo termine è l'adattamento prismatico, o PA. Il quale trova un'ulteriore applicabilità *clinica* nell'ambito del *neglect*, del quale è in grado di ridurre alcuni dei sintomi in pazienti con lesioni emisferiche destre. Tale procedura prevede l'utilizzo di prismi ottici a cuneo al fine di *spostare* otticamente il campo visivo in diverse direzioni, verso destra o verso sinistra (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Durante l'esposizione ai prismi, i soggetti rimappano i loro sistemi di riferimento spaziali senso-motori²¹, al fine di eseguire in modo corretto e preciso, a fronte dello spostamento del campo visivo, compiti di natura visuo-motoria (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Lo spostamento del campo visivo indotto dai prismi comporta alcune difficoltà nell'adempimento dei suddetti compiti visuo-motori, in particolare nella prima fase della procedura di adattamento. Ad esempio, nell'eseguire dei puntamenti verso uno stimolo *target* posto nello spazio peri-personale, i soggetti commettono errori lateralizzati in base all'orientamento dei prismi indossati. Coloro i quali indossano lenti orientate verso destra, commettono un errore a destra del *target* visivo. Lo stesso *pattern*, chiaramente in direzione opposta, si rileva nel caso di prismi

²¹ Egocentrico vs allocentrico.

orientati a sinistra. Gli errori iniziali si riducono gradualmente all'aumentare del numero di puntamenti effettuati, in virtù della crescente forza dell'adattamento (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021).

Un paradigma di adattamento prismatico frequentemente adoperato consiste nell'eseguire tra i 50 e i 150 puntamenti, effettuati con il dito indice della mano destra dominante, verso un *target* visivo, il quale può essere collocato in un numero stabilito di posizioni, generalmente tra le 2 e le 4, e posto di fronte al partecipante con un *range* di angolazione variabile purché possa essere raggiunto senza sforzo (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Se nell'eseguire il puntamento il soggetto ha la possibilità di vedere l'arto implicato nel movimento sono sufficienti pochi tentativi affinché l'errore si riduca consistentemente, tale condizione è definita *esposizione concomitante*. Diversamente, se a essere visibile è solamente la punta del dito con il quale si esegue il puntamento, *esposizione terminale*, la riduzione dell'errore richiederà più tentativi (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). A seguito della procedura di adattamento i prismi vengono rimossi e il soggetto, nel puntare verso un qualsiasi bersaglio, sarà portato a commettere un errore nella direzione opposta allo spostamento indotto dai prismi. Questi errori rappresentano gli *aftereffects* (AEs) della procedura e, da un punto di vista fenomenologico, costituiscono un indicatore chiave del grado di effettivo adattamento all'esposizione ai prismi (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021).

Come riportato dettagliatamente da Terruzzi et al. (2021), la procedura classica di PA include tre differenti *step*, ciascuno dei quali indicizza una specifica sfaccettatura del costrutto della coordinazione visuo-motoria:

- La valutazione di base pre-esposizione

- L'esposizione alle lenti prismatiche, durante la quale il soggetto si *adatta* attivamente allo spostamento indotto dai prismi attraverso l'esecuzione di movimenti ripetuti
- La valutazione post-esposizione del grado e della durata dell'adattamento attraverso l'analisi degli AEs, i quali vengono interpretati come il risultato di una sovracompensazione dello spostamento del campo visivo indotto dai prismi.

Coerentemente con il modello proposto da Redding & Wallace (2006), sono due i meccanismi che consentono di raggiungere un solido adattamento: la *ricalibrazione*, che si realizza nei primi tentativi di puntamento e, come affermato da Terruzzi et al. (2021), manifesta caratteri di natura strategico-cognitiva; e il *riallineamento*, il quale consiste in un'implicita e automatica riorganizzazione della mappa spaziale la quale viene così strutturata, e ristrutturata, sulla base della ripetizione dei puntamenti (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). In questo quadro teorico, la riduzione dell'errore nell'esecuzione dei puntamenti sarebbe da attribuirsi alla ricalibrazione. Diversamente, gli AEs osservati in direzione opposta allo spostamento indotto dai prismi dipenderebbero, secondo quanto riportano Terruzzi et al. (2021), da entrambi i meccanismi citati.

Al fine di valutare gli AEs possono essere adoperati diversi *task*, tra questi vi è il *Test propriocettivo*. In questo compito i partecipanti, a occhi bendati, eseguono alcuni puntamenti dritto davanti a loro, con il dito indice della mano. È fondamentale che i movimenti vengano eseguiti quanto più rapidamente e accuratamente possibile, partendo con il dito indice dal centro dello sterno fino ad arrivare a toccare un punto sulla superficie di un piano orizzontale posto di fronte al soggetto (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). La rappresentazione spaziale sottostante l'esecuzione di questo

task è di matrice propriocettiva e risponde a un sistema di riferimento egocentrico, ogni deviazione dal piano sagittale mediano riflette di conseguenza un'alterazione spaziale della rappresentazione interna della linea mediana del proprio corpo (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Un altro test che consente di valutare gli AEs è quello *Visuo-Propriocettivo*, nel quale ai partecipanti viene richiesto di indicare su un piano orizzontale, senza poter vedere il proprio braccio, la posizione di un punto che corrisponde alla proiezione di uno stimolo visivo bersaglio²². Non potendo vedere l'arto superiore che esegue il movimento, i soggetti sono indotti a ricorrere a una rappresentazione interna ed egocentrica dello spazio e agli indizi visivi presenti nell'ambiente. È possibile implementare ancora un terzo *task* allo scopo di valutare gli AEs, il *Test Visivo*. In esso, i partecipanti individuano, attraverso una risposta verbale, la posizione di un bersaglio visivo in movimento, allineato al piano sagittale mediano del loro tronco. Nel caso del *Test Visivo* la risposta non sarà controlaterale allo spostamento indotto dall'adattamento, bensì seguirà una direzione coerente con esso (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021).

Terruzzi et al. (2021) in “*Exploring the time-course and the reference frames of adaptation to optical prisms and its aftereffects*”, hanno investigato le caratteristiche, l'andamento temporale degli AEs derivati dalla procedura di PA e la loro relazione con i diversi sistemi di riferimento spaziali. In questo lavoro, gli autori riportano alcuni dati rilevanti al fine di effettuare una procedura ottimale di PA. In particolare, dagli esperimenti condotti da Terruzzi et al. (2021), emerge come i soggetti sani si adattino alla deviazione della scena visiva indotta dai prismi con una maggiore riduzione dell'errore nei primi 30 tentativi di puntamento, risultato coerente con una recente metanalisi prodotta da McIntosh, Brown e Young (2019) (Terruzzi, Crivelli,

²² Centrato sul piano sagittale mediano del corpo del partecipante.

Campana, et al., 2021). Viene tuttavia sottolineato come questo non implichi una minore efficacia dei successivi puntamenti ai fini dello sviluppo di AEs persistenti nel tempo, al contrario un'esposizione ai prismi oltre questa soglia porta a un maggiore consolidamento dell'adattamento, grazie anche al contributo dei meccanismi di ricalibrazione e di riallineamento (Redding & Wallace, 2006a) sopra descritti.

Gli AEs derivati dall'adattamento prismatico, valutati in maniera longitudinale in soggetti cerebrolesi con *neglect*, sembrerebbero persistere oltre le sessioni di PA, per poi diminuire, a seguito della rimozione dei prismi, quando i soggetti sono impegnati in compiti visuo-motori, come l'eseguire puntamenti (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Studi condotti su soggetti sani hanno permesso invece di osservare una durata degli AEs che può raggiungere le 72 ore (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Al fine di ottenere uno stabile adattamento allo spostamento del campo visivo dopo la rimozione dei prismi ottici, è necessario che venga ripetuto un numero considerevole di puntamenti. In ogni caso, la forza degli AEs, valutati attraverso compiti basati su un sistema di riferimento egocentrico, tende a decrescere nei 15 minuti successivi al PA (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021), sebbene, come riportano Terruzzi et al. (2021), gli errori di puntamento persistano fino a 30 minuti dopo la rimozione dei prismi.

Poiché lo spostamento del campo visivo derivato dall'adattamento prismatico rende meno *affidabili* le informazioni provenienti da un sistema di riferimento spaziale allocentrico, il soggetto è indotto a fare affidamento su una coordinazione visuo-motoria di natura egocentrica. Questo principio è alla base del mantenimento prolungato degli AEs, se infatti al soggetto, a seguito della procedura di PA, viene data la possibilità di attingere a informazioni multisensoriali, di natura prevalentemente propriocettiva e visiva, si osserva una più rapida correzione dell'errore. I risultati

ottenuti attraverso gli studi di Terruzzi et al. (2021) indicano che, immediatamente dopo l'adattamento allo spostamento della scena visiva, i partecipanti si basano fortemente sui segnali propriocettivi al fine di performare compiti visuo-motori o motori. Allo scopo di *adattarsi* a uno scenario sensoriale alterato, il soggetto è forzatamente indotto a *catturare* gli indizi visivi presenti nell'ambiente al fine di guidare il proprio comportamento motorio, come accade quando esegue un puntamento dritto davanti a sé. Il lavoro di Terruzzi et al. (2021) testimonia come nella procedura di PA siano coinvolte informazioni di natura sia propriocettiva che visiva, ma con un differente andamento temporale. Nei primi minuti successivi all'adattamento gli AEs rispondono alla propriocezione, quando divengono disponibili informazioni di natura visiva, queste acquisiscono una crescente importanza per il soggetto al fine di *restaurare* una coordinazione visuo-motoria appropriata (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Ne consegue, citando Terruzzi et al. (2021) che “*quando la performance è guidata unicamente da informazioni propriocettive, il restauro della performance di partenza è più lenta rispetto a quando sono disponibili anche informazioni di natura visiva*”.

In generale, dalla letteratura emerge come gli AEs connessi all'adattamento prismatico vadano a influire sulla *performance* dei soggetti in compiti che richiedono una risposta manuale, piuttosto che in quelli implicanti un giudizio percettivo. Inoltre, gli effetti della procedura di PA, come testimoniano i benefici da essa prodotta sui sintomi del *neglect*, sorgono per mezzo del circuito neurale implicato nella *visione per l'azione*, la via visiva dorsale, la quale è fortemente coinvolta nell'attenzione e nei comportamenti motori che implicano un sistema di riferimento egocentrico. L'entità degli AEs osservati in un *frame* di natura allocentrica non è equiparabile a quella osservata in compiti che implicano una matrice egocentrica, come testimoniano i dati

in letteratura. Ne consegue che il coinvolgimento della via visiva *per la percezione*, implicata nel riconoscimento degli oggetti e nella percezione di essi, sia relativamente minore (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Tuttavia, come riportato da Terruzzi et al. (2021), vi sono comunque evidenze che supportano come questi circuiti neurali, così come i due sistemi di riferimento spaziale, interagiscano in maniera combinata coerentemente con il compito nel quale l'individuo è coinvolto (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021). Limanowski (2022) riporta alcuni dati provenienti da studi di neuroimmagine volti a localizzare le attivazioni associate alla prima fase dell'adattamento visuo-motorio implicato nella procedura di PA. Oltre alla via visiva dorsale, a manifestare un notevole aumento dell'attività cerebrale vi sono le aree della corteccia premotoria, prefrontale, parietale posteriore e occipitale.

1.2.3. Un modello che unisce, il *precision control* per una rappresentazione del corpo flessibile

Muovendosi in uno scenario Bayesiano, Jakub Limanoski (2022) propone l'idea per la quale la sia possibile aumentare la *flessibilità* delle rappresentazioni visuo-proprioceptive del corpo per mezzo di una modulazione contestuale dei processi sensoriali *top-down*. In particolare, egli sostiene che l'attenuazione della precisione attribuita all'informazione proprioceptiva possa facilitare l'integrazione di segnali sensoriali conflittuali. È stato dimostrato che il processamento corticale delle informazioni visive e proprioceptive relative alla posizione del corpo può essere alterato attraverso una modulazione *top-down*, questo supporta l'assunzione che il flusso sensoriale utilizzato per costruire le rappresentazioni corporee possa essere controllato sulla base di tale modulazione. All'interno del paragrafo *Un modello più dinamico e nuovi orizzonti*, il processo decisionale percettivo che porta alla

generazione della rappresentazione del corpo è stato descritto come *una gerarchia di probabilistiche rappresentazioni o credenze* volte a dedurre come le sensazioni corporee vengono generate (Limanowski, 2022). Le credenze a priori relative al *modello* del proprio corpo possono essere implementate e ottimizzate incorporando nuove *evidenze* sensoriali. Ne consegue che l'integrazione multisensoriale alla base della formazione di rappresentazioni corporee, aventi una natura *flessibile e adattiva*, si basi sull'affidabilità e sulla precisione attribuita ai segnali sensoriali, al fine di risolvere eventuali conflitti tra gli input provenienti dalle diverse modalità. L'ipotesi di Limanowski (2022) prevede che, dato il carattere multisensoriale della rappresentazione corporea, modificando la credibilità e la precisione attribuita dal soggetto ai segnali sensoriali captati, sia possibile *alterare* sistematicamente il processo inferenziale che porta alla formazione di esse.

Il *framework* teorico che consente di formulare tale ipotesi è quello del *predictive coding* il quale pone in interconnessione la precisione delle informazioni multisensoriali, l'attenzione e i processi neurali. Nella sua concettualizzazione più recente, tale modello ipotizza che la modulazione *top-down* del *peso* attribuito ai segnali sensoriali, e conseguentemente la loro rilevanza al fine di costruire una rappresentazione corporea adattiva, possa essere raggiunta andando a modificare le credenze a priori possedute dal soggetto circa la precisione delle informazioni sensoriali. Per Limanowski (2022) *alterare la precisione* può essere inteso come applicare un effetto moltiplicativo dei processi *bottom-up*. Sostanzialmente manipolando la stima della precisione attribuita ai segnali sensoriali è possibile aumentare o diminuire l'impatto di questi sulle inferenze e sulle credenze che costituiscono il fondamento della rappresentazione corporea. Nello scenario del *predictive coding* il paradigma che rende possibile tale alterazione è quello del

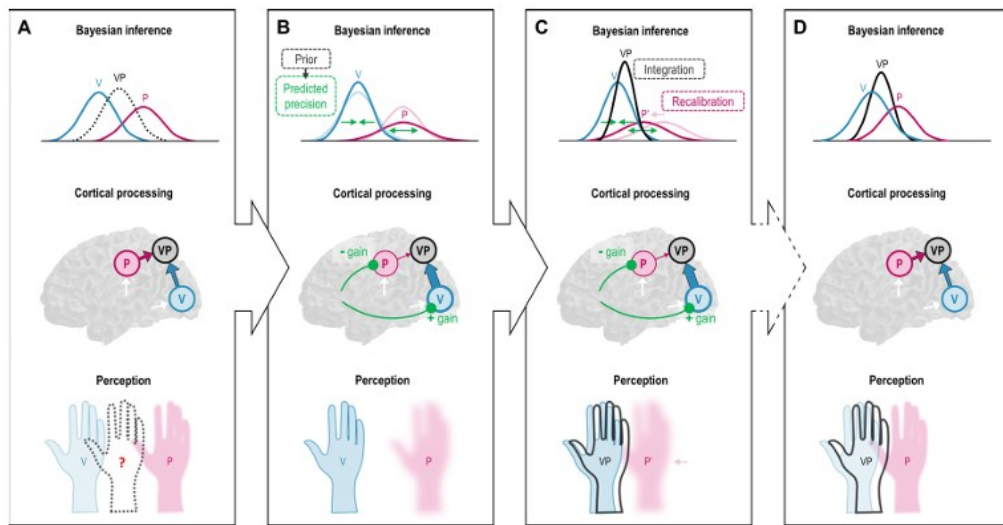
precision control, inteso come l'aggiustamento contestuale della precisione sensoriale stimata a partire dalle credenze a priori. La precisione attribuita ai segnali sensoriali può essere non solo aumentata, ma anche diminuita. Questo esiterebbe in un'attenuazione dell'informazione sensoriale trasportata dalle differenti modalità e conseguentemente in una riduzione dell'impatto dei processi inferenziali di livello superiore.

Come affermato dallo stesso Limanowski (2022), nel contesto della rappresentazione corporea, il concetto di attenuazione sensoriale appare paradossale poiché implica una deliberata soppressione dell'informazione che costituisce un elemento cardine della rappresentazione stessa. Tuttavia, è stato ampiamente dimostrato come, entro certi limiti, la mente umana sia in grado di tollerare conflitti sensoriali, in particolare di natura visuo-propriocezionale, e lo fa per una *causa comune*, il corpo. Il fatto che input visivi e propriocezionali discrepanti tra loro vengano tollerati e integrati, come avviene nel caso della RHI, risponde al bisogno di avere un'*esperienza unitaria* del proprio corpo. Numerosi scienziati, come riportato da Limanowski (2022), hanno ipotizzato che la distorsione o la soppressione della propriocezione in questo processo possa facilitare l'accettazione di un conflitto sensoriale. In questo scenario, l'abbassamento della precisione propriocezionale potrebbe temporaneamente portare su un piano prioritario la visione rispetto alla propriocezione (Limanowski, 2022). Tale abbassamento sarebbe reso possibile attraverso, come già detto, una modulazione *top-down* basata su fattori cognitivo-attenzionali. L'attenzione è infatti l'altro elemento chiave dell'ipotesi proposta da Limanowski (2022), è stato dimostrato come il controllo attenzionale necessario in un compito che induce un conflitto *visuo-propriocezionale* possa influire sul processo di integrazione sensoriale sottostante la rappresentazione del corpo. L'immagine proposta di seguito illustra,

coerentemente con l'ipotesi di Limanowski (2022), come il *precision control* potrebbe aiutare la rappresentazione corporea ad adattarsi a input visivi e propriocettivi conflittuali favorendo l'insorgenza di fenomeni come la RHI.

1.3. L'IPOTESI

L'idea che il *precision control* sia un meccanismo che promuove la flessibilità della



rappresentazione corporea apre a una serie di interrogativi e di nuovi scenari di ricerca.

Figura 3. Questo esempio schematico mostra: una sequenza ipotetica di inferenza Bayesiana circa la posizione della mano dati segnali sensoriali visivi (V) e propriocettivi (P) (la riga superiore mostra una possibile funzione Gaussiana di densità di probabilità); i cambiamenti a livello di processamento corticale dell'informazione, come ipotizzato dal predictive coding (nella riga centrale si assume che il flusso dell'informazione parta dalle aree della corteccia visiva primaria/secondaria e propriocettiva e arrivi alle aree multisensoriali parietali posteriori); e i possibili cambiamenti associati nella percezione del proprio corpo (riga inferiore). **A:** In quest'esempio è presente un conflitto visuo-propriocezionale. Data l'assunzione di una causa comune (basata sulle forti credenze a priori circa la congruenza visuo-propriocezionale), sorge un problema per il modello del corpo nella mente, poiché i segnali sensoriali trasportano informazioni diverse circa la posizione della mano. In principio, la mente può continuare a combinare le due stime in una stima multisensoriale, ma la fiducia in questa potrebbe non essere molto alta. Data una discrepanza sufficientemente ampia, una causa comune per V e P potrebbe non essere inferita e la visione potrebbe essere discredita in favore della propriocezione. **B** Per risolvere questo tipo di incertezza relativa alla posizione della propria mano, può essere adoperato il precision control per formulare un'inferenza bias. La precisione dei cues sensoriali, corrispondente all'ampiezza delle rispettive distribuzioni di probabilità gaussiane, può essere predetta attraverso una gerarchicamente più alta credenza a priori, che a sua volta può essere aggiustata: qui, la precisione predetta di V è aumentata e quella di P è attenuata. Questo può essere descritto come l'applicazione di un vantaggio moltiplicativo al flusso delle informazioni bottom-up. Cambiare la precisione predetta relativa ai due segnali sensoriali V e P corrisponde a modulare il vantaggio delle aree cerebrali V e P e la sensibilità di queste popolazioni neurali ai loro rispettivi input. Ci si potrebbe aspettare che questo sia connesso ai cambiamenti nell'attività neurale da una parte, e nella connettività nella mente dall'altra: gli input sensoriali ricevuti dalla regione V vengono percepiti come più precisi, perciò, il vantaggio nella regione V è aumentato e l'informazione instradata verso regioni gerarchicamente più alte è enfatizzata, al contrario l'informazione trasportata attraverso P è attenuata perché ridotta dal vantaggio di P. (...) il processo sottostante questa modulazione potrebbe corrispondere a un'attenuazione percettiva e psicofisiologica della mano sentita rispetto a quella vista. **C:** Aggiustare la precisione può influenzare l'integrazione di entrambi i cues in una stima multisensoriale (VP), la quale ora può essere chiaramente indirizzata verso un più preciso cue V. **D:** Potenzialmente, il precision control può solo essere temporaneamente necessario, per ridurre l'incertezza circa la propria rappresentazione corporea data una nuova e non predetta mappatura multisensoriale. Una volta che la credenza a priori circa la posizione della mano è stata aggiornata, la precisione e il processamento corticale possono tornare al loro stato precedente (Limanowski, 2022).

Il presente lavoro va ad approfondire la possibilità che l'incertezza corporea derivata da conflitti visuo-propriocezionali, come quello che emerge nella RHI, possa essere ridotta attenuando la precisione visiva (Limanowski, 2022). I dati riportati da Limanowski (2022) suggeriscono infatti come abbassare la precisione della *visione* possa aumentare la probabilità nel soggetto di dedurre, di fronte a informazioni sensoriali discrepanti, una causa comune²³, facilitando di conseguenza l'integrazione visuo-propriocezionale nonostante un eventuale conflitto tra le informazioni sensoriali. Lo studio svolto si propone quindi di andare a investigare il processo di attenuazione *top-down* della precisione propriocezionale attraverso la combinazione dell'adattamento prismatico e della *Rubber hand illusion*. In questo modo sarà possibile, attraverso lo studio dell'azione del *precision control* unito all'attenuazione sensoriale durante procedure che inducono conflitti corporei tra diversi domini sensoriali, andare a verificare la veridicità del modello proposto dall'autore.

L'ipotesi alla base del presente esperimento è la seguente: se fosse vero il modello di Limanowski (2022), per il quale è possibile andare ad aumentare la flessibilità della rappresentazione corporea abbassando la *precisione* attribuita dal soggetto ai segnali sensoriali necessari alla generazione e al mantenimento di essa, attenuando la visione in favore della propriocezione, osserveremo una facilitazione della risoluzione di conflitti sensoriali, volta a garantire un'esperienza del corpo *unitaria*. Coerentemente con quanto riportato, al fine di promuovere l'adattamento contestuale del modello mentale del corpo a fronte di nuovi feedback sensoriali, combinando le due procedure e inducendo un adattamento visuo-motorio prima, attraverso il PA, ed eseguendo immediatamente dopo la procedura di RHI, si dovrebbe osservare un effetto dell'illusione più forte poiché il soggetto, a fronte della necessità

²³ Il corpo.

di esperire il corpo in maniera unitaria, sarà indotto a integrare con più facilità i segnali sensoriali discrepanti. In particolare, adoperando come principali variabili dipendenti gli AEs del PA, quantificati attraverso un *Test propriocettivo*²⁴, e il *proprioceptive drift*²⁵ indotto dalla RHI e valutato attraverso un *task* motorio, ci attenderemo, a seguito di uno stabile adattamento prismatico, e quindi a un'alterazione della precisione dell'informazione sensoriale indotta attraverso un processo di natura *top-down*, un'illusione di *ownership* più forte del normale.

Il presente studio adopera un disegno di ricerca *2 per 2* che prevede due condizioni per la procedura di RHI, nelle quali la stimolazione può essere sincrona o asincrona, e due condizioni per l'adattamento prismatico, durante le quali il soggetto sottoposto all'esperimento indossa lenti orientate verso destra o neutre. Al fine di verificare l'ipotesi proposta, sono stati reclutati 18 soggetti sani i quali sono stati sottoposti a 4 sessioni sperimentali, ciascuna delle quali prevedeva una diversa combinazione delle condizioni previste dal disegno di ricerca, illustrate in maniera schematica nella tabella sottostante.

PA con lenti neutre	RHI sincrona
PA con lenti neutre	RHI asincrona
PA a destra	RHI sincrona
PA a destra	RHI asincrona

²⁴ Descritto a pagina 43.

²⁵ Descritto a pagina 34.

In sintesi: se fosse vero quanto ipotizzato da Limanowski (2022), dovremmo osservare nella condizione sperimentale *PA a destra e RHI sincrona* un effetto dell'illusione, quantificato attraverso la misura del *proprioceptive drift* diretto, significativamente più forte di quello osservato nella condizione di controllo *PA con lenti neutre e RHI sincrona*. Questo dato consentirebbe di inferire l'esistenza di una correlazione causale tra l'adattamento visuo-motorio, che induce un abbassamento della precisione attribuita all'informazione sensoriale da parte del soggetto, e l'effetto della RHI, dovuto a una facilitata integrazione multisensoriale entro una rappresentazione corporea maggiormente flessibile, che *ammette* input sensoriali discrepanti.

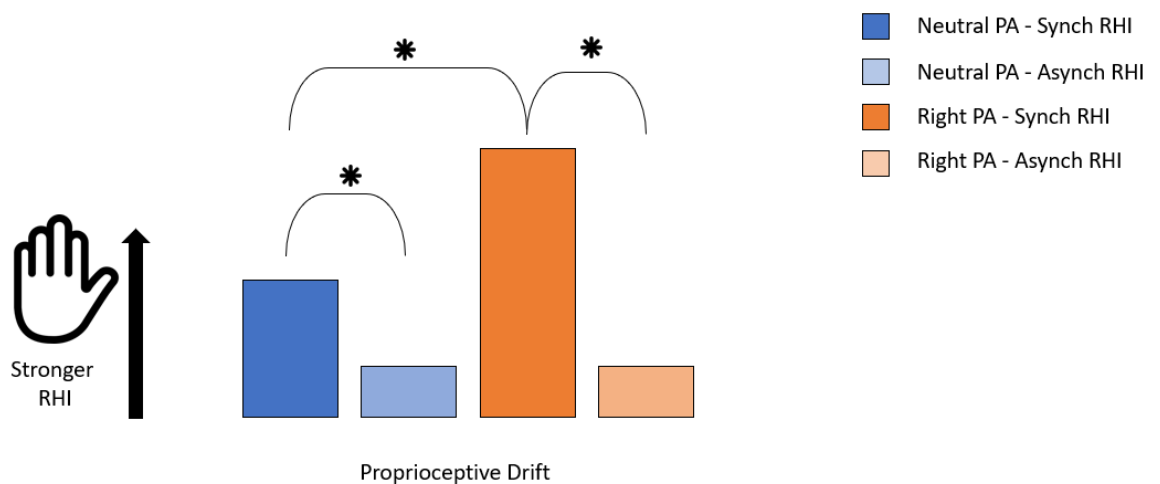


Figura 4. La figura illustra schematicamente gli effetti attesi nelle diverse condizioni sperimentali coerentemente con il modello di Limanowski (2022). Nella condizione PA con lenti neutre e RHI sincrona è atteso un proprioceptive drift significativo. Nella condizione PA con lenti neutre e RHI asincrono non è atteso nessun effetto particolare associato all'illusione, così come nella condizione PA con lenti a destra e RHI asincrona. Diversamente, nella condizione PA con lenti a destra e RHI sincrona è atteso un effetto significativamente superiore rispetto alle altre condizioni sperimentali.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Partecipanti

Per il presente studio sono stati reclutati 18 soggetti sani (3 maschi, 15 femmine) di età compresa tra i 20 e i 36 anni [età media (DS) = $23.88 \pm 4,15$ anni]. Rispetto alla scolarità, stando a quanto riportato dai partecipanti, il numero medio di anni di scolarizzazione completati è di 13.66 ± 1.97 . In linea con i criteri di inclusione previsti dallo studio, tutti i soggetti possedevano una vista normale, o corretta con occhiali da vista, e non riportavano una storia precedente di patologie psichiatriche o neurologiche. Inoltre, al fine di indagare la manualità dei partecipanti è stato somministrato l'*Edinburgh Handedness Inventory* (Oldfield, 1971), dal quale è emerso come tutti i soggetti fossero destrimani, fatta eccezione per uno, il quale riporta di essere ambidestro. Prima di procedere all'esperimento, è stato ottenuto il consenso informato a prendere parte allo studio da parte di tutti i soggetti, ai quali non è stata riservata alcuna forma di compenso economico.

2.2. La *Rubber Hand Illusion*

La procedura di RHI effettuata nel presente studio prevedeva l'utilizzo di una mano protesica in gomma²⁶ posta nella porzione sinistra dello spazio peripersonale del soggetto accanto alla sua mano reale *ipsilaterale*, in una posizione anatomicamente plausibile al fine dell'illusione e visibile al partecipante. Coerentemente con quanto affermato nel paragrafo relativo alla *Rubber Hand Illusion*, la mano artificiale è stata posta a una distanza di circa 15 cm dalla mano reale del partecipante. Il quale, seduto comodamente a una scrivania, aveva davanti a sé una scatola in legno²⁷, che gli

²⁶ Sono state utilizzate due mani artificiali con caratteri differenti in base al genere del partecipante, così da eliminare eventuali interferenze nell'induzione dell'illusione.

²⁷ Alla quale, di seguito nella trattazione, verrà fatto riferimento con l'espressione *scatola 0*.

impediva di vedere la sua mano sinistra reale, ma, attraverso uno sportello richiudibile posto sul piano superiore di essa, gli consentiva di vedere in modo chiaro la mano artificiale dal polso in su, Figura 5. Durante tutta la sessione sperimentale la mano sinistra e la *rubber hand* erano collocate all'interno della scatola, mentre la mano destra, non coinvolta nell'illusione, era appoggiata sulla parte superiore della scatola in una posizione confortevole per il soggetto. Anche questa era nascosta alla vista poiché i partecipanti indossavano una mantella che copriva il tronco e la mano destra, lasciando visibile lo spazio delimitato dall'apertura posta sulla porzione superiore della scatola.

Per quanto concerne la modalità di induzione, è stata effettuata una stimolazione sensoriale, dalla durata di 90 secondi, attraverso l'uso di due pennelli identici. In base alla condizione sperimentale, sincrona o asincrona, mentre il soggetto fissava attentamente la mano artificiale, venivano accarezzate contemporaneamente le due mani. Il tocco del pennello era coordinato e speculare nella condizione sincrona,

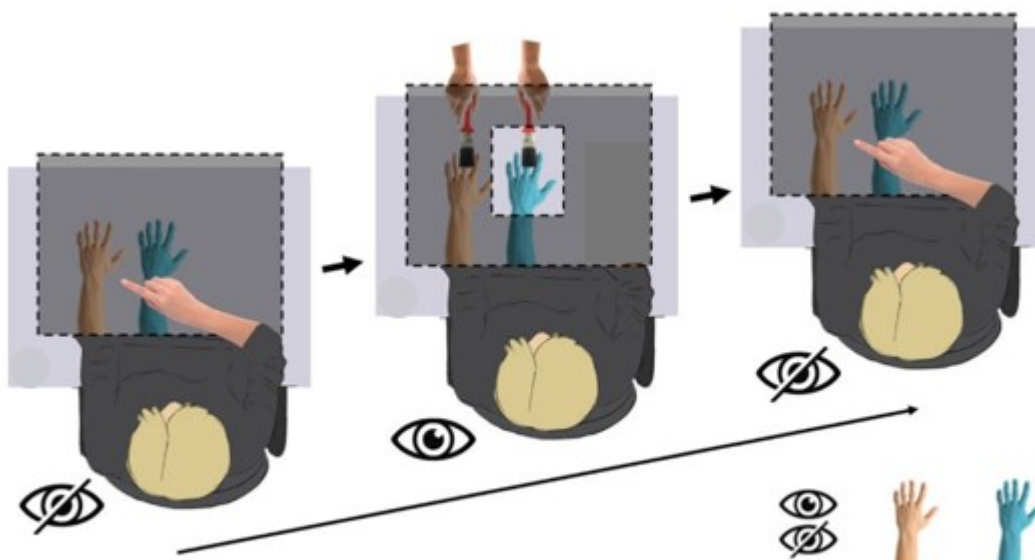


Figura 5. L'immagine, riadattata da Cataldo et al. (2024), raffigura i tre momenti della procedura di RHI svolta nell'esperimento. Il rettangolo grigio scuro, delineato dal tratteggio, rappresenta la scatola di legno collocata davanti al partecipante, all'interno della quale si trova la sua reale mano sinistra posta di fianco a quella artificiale. Nella prima figura, a partire da sinistra, il soggetto esegue a occhi chiusi e con la mano destra i tre puntamenti balistici di baseline verso la posizione percepita del dito medio della propria mano sinistra. Nella figura centrale, lo sportello posto sulla superficie superiore della scatola è aperto, il soggetto può vedere chiaramente la mano artificiale mentre viene effettuata la stimolazione sensoriale. Nella terza figura a destra, lo sportello viene richiuso e il soggetto, a occhi chiusi, esegue nuovamente i tre puntamenti.

mentre non vi era un pattern di stimolazione definito nella condizione asincrona, dove il movimento dei pennelli era casuale. Tuttavia, in entrambe le condizioni, il pennello andava ad accarezzare la giunzione tra le dita, dove si presume che la precisione propriocettiva sia minore.

Al fine di quantificare gli effetti dell'illusione è stata utilizzata la misura relativa al *drift propriocettivo*, l'illusorio spostamento della localizzazione percepita della propria mano verso quella artificiale. A tale scopo, prima di procedere alla stimolazione sensoriale, è stato richiesto a ciascun soggetto di effettuare, a occhi chiusi, tre puntamenti balistici con il dito indice della mano destra verso la posizione percepita del dito medio della propria mano sinistra²⁸. Per ciascun puntamento, con una *webcam* posta al di sopra del *set-up* sperimentale è stata scattata una fotografia, dalla quale è stato possibile *estrarre* le coordinate della posizione percepita, e indicata dal soggetto sul piano superiore della scatola. Questo ha consentito di ottenere delle coordinate *baseline* rispetto alle quali confrontare quelle dei puntamenti successivi alla RHI, ricavate attraverso lo stesso procedimento. Al termine della stimolazione, è stato infatti chiesto al soggetto di rieffettuare, sempre a occhi chiusi, i tre puntamenti balistici. La differenza tra le coordinate *baseline* e quelle post-stimolazione è stata convertita in cm, in questo modo è stato possibile ottenere una misura diretta del *drift propriocettivo*, si veda la Figura 6. Considerate le premesse formulate nell'ipotesi, ci attendevamo che il soggetto, nei puntamenti di *baseline*, avrebbe indicato un punto sulla superficie della scatola la cui proiezione era più vicina alla *posizione reale* del dito medio della propria mano sinistra, quindi in termini relativi, un punto più *spostato* verso sinistra. Mentre, a seguito della procedura di RHI, abbiamo previsto che il dito indice sarebbe caduto in un punto della scatola la cui proiezione si avvicinava

²⁸ Talvolta, nei successivi paragrafi, vi si farà riferimento con l'espressione *Task n.3*, suddiviso in *pt.1*, i tre puntamenti *pre-RHI*, e *pt.2*, i tre puntamenti *post-RHI*.

maggiormente a dove si trova il dito medio della *rubber hand*, sempre in termini relativi, in un punto più *spostato* verso destra, poiché a causa dell'attenuazione propriocettiva l'effetto dell'illusione sarebbe dovuto essere più forte.

In sintesi, ci attendevamo che il *drift propriocettivo* convertito in cm, ottenuto confrontando i puntamenti *pre* e *post* RHI, fosse significativamente più ampio nella condizione *PA a destra e RHI sincrona*, rispetto alle altre condizioni sperimentali, in virtù della modulazione della precisione propriocettiva conseguente all'adattamento prismatico.



Figura 6. Le due fotografie rappresentano rispettivamente, a partire da sinistra, un puntamento *pre-RHI* e un puntamento *post-RHI*. Dato l'orientamento dalla foto, è stato considerato come indice del *drift propriocettivo* il valore delle *Y*.

2.3. L'adattamento prismatico nell'esperimento

Nell'ambito del presente esperimento, a ciascun soggetto è stato richiesto di indossare un occhiale con lenti prismatiche orientate a destra, le quali inducevano uno spostamento percettivo orizzontale del campo visivo di 30 gradi. Mentre erano comodamente seduti a una scrivania, i soggetti avevano davanti a sé una scatola²⁹ in legno alta 21 cm e larga 74 cm, appoggiata sopra quella utilizzata nella procedura di RHI. La superficie inferiore e superiore della scatola era costituita da due *pentagoni*, aventi una profondità minima di 19 cm ai lati e una massima di 32 cm in

²⁹ Alla quale, di seguito nella trattazione, verrà fatto riferimento con l'espressione *scatola 1*.

corrispondenza della punta. La base piatta dei pentagoni era rivolta verso il partecipante, mentre la punta guardava lo sperimentatore. Il bordo *appuntito* della superficie superiore della scatola era graduato: la punta del pentagono corrispondeva al grado 0 (°) dell'angolo visivo del partecipante, mentre spostandosi verso l'estremo destro del lato superiore i valori crescevano in positivo, e muovendosi verso l'estremo di sinistra i valori aumentavano in negativo. Ogni spostamento laterale di un cm, in entrambe le direzioni, corrispondeva a un grado dell'angolo visivo.

Al fine di indurre l'adattamento prismatico, in ciascuna sessione sperimentale ogni soggetto ha effettuato, indossando i prismi, un totale di 64 puntamenti³⁰ verso un *target* visivo, in questo caso una penna, posto in tre differenti posizioni, +15°, 0°, -15°, e a pochi centimetri dal bordo superiore della scatola. La sequenza delle posizioni della penna è stata randomizzata e l'errore è stato misurato in gradi angolari. I puntamenti, coerentemente con il paradigma illustrato da Terruzzi, Crivelli, Campana, et al. (2021), sono stati eseguiti con la mano destra dominante partendo con il dito indice posizionato al centro dello sterno, nonché in corrispondenza del piano mediano-sagittale del tronco. I soggetti sono stati istruiti a performare movimenti veloci di *andata e ritorno*, dopo aver toccato il *target visivo* era infatti richiesto loro di tornare rapidamente al punto di partenza, con il dito indice sullo sterno, pronti a eseguire il puntamento successivo. Nel compiere il movimento verso il *target*, l'arto del partecipante passava *attraverso* la scatola e il puntamento era svolto al di sotto del piano orizzontale superiore di essa. Di conseguenza, i partecipanti non potevano vedere la traiettoria dell'arto implicato, se non nella parte finale del gesto, quando la punta del dito indice emergeva oltre l'apertura della scatola, come si vede nella figura 7. Al fine di quantificare gli AEs, prima e dopo i 64 puntamenti è stato chiesto a ciascun soggetto

³⁰ Talvolta, nei successivi paragrafi, vi si farà riferimento con il termine *Task n.2*.

di effettuare un *Test propriocettivo*³¹. Questo consisteva nell'eseguire, prima e dopo l'adattamento, sei puntamenti con la mano destra dominante, puntando dritto davanti a sé. I partecipanti, durante il *test*, avevano gli occhi chiusi e nel performare il movimento partivano con il dito indice posizionato sullo sterno. Per ogni puntamento è stata scattata una foto, e, analogamente a quanto fatto per il *drift propriocettivo*, sono state estratte le coordinate³² del punto indicato dal soggetto, il quale *cadeva* con il dito sulla superficie della scatola 0. Le coordinate ottenute dalle foto dei puntamenti *pre-PA* hanno permesso di ottenere dei valori *baseline* con i quali confrontare quelle dei puntamenti *post-PA*. Una volta calcolata la differenza tra le coordinate dei puntamenti *pre* e *post PA*, è stata effettuata una conversione in cm che ha consentito di ottenere un valore diretto degli AEs.



Figura 7. L'immagine rappresenta un setting sperimentale analogo a quello previsto dall'esperimento (Terruzzi, Crivelli, Pisoni, et al. 2021).

2.4. Il questionario di *embodiment*

³¹ Talvolta, nei successivi paragrafi, vi si farà riferimento con il termine *Task n.1*, suddiviso in *pt.1*, i sei puntamenti *pre-PA* e in *pt.2*, i sei puntamenti *post-PA*.

³² Anche in questo caso sono stati presi in considerazione i valori di Y.

Al termine di ognuna delle quattro sessioni sperimentali è stato richiesto ai partecipanti di compilare un questionario *self-report* relativo all'esperienza di illusoria *ownership* vissuta durante la *Rubber Hand Illusion*, mostrato in Figura 8. Gli item erano costituiti da sette affermazioni rispetto alle quali ciascun soggetto doveva indicare il suo grado di accordo o disaccordo su una scala Likert a sette punti, dove lo 0 corrispondeva all'essere *fortemente in disaccordo* con quanto affermato, e il 6 all'essere *fortemente d'accordo*. Gli item “...era come se avessi più di una mano sinistra o braccio sinistro”

Gentile partecipante, indichi il suo grado di accordo o disaccordo con le seguenti affermazioni cerchiando il numero corrispondente.

0. Fortemente in disaccordo
1. In disaccordo
2. Parzialmente in disaccordo
3. Né d'accordo né in disaccordo
4. Parzialmente d'accordo
5. D'accordo
6. Fortemente d'accordo

Durante questo esperimento, mentre avevo gli occhi aperti...

... era come se la rubber hand fosse la mia mano.	0 1 2 3 4 5 6
... era come se stessi guardando direttamente la mia mano sinistra.	0 1 2 3 4 5 6
... era come se avessi più di una mano sinistra o braccio sinistro.	0 1 2 3 4 5 6
... la rubber hand cominciava ad assomigliare alla mia (vera) mano sinistra.	0 1 2 3 4 5 6
... era come se la mia (vera) mano sinistra stesse diventando “gommosa”.	0 1 2 3 4 5 6
... era come se il tocco che sentivo fosse causato dal pennello che toccava la rubber hand.	0 1 2 3 4 5 6
... era come se stessi sentendo il tocco del pennello nella posizione in cui vedevo che veniva toccata la rubber hand.	0 1 2 3 4 5 6

Figura 8. Il questionario relativo all'esperienza di RHI.

e “...era come se la mia (vera) mano sinistra stesse diventando “gommosa””,

volutamente ambigui, sono stati usati come indicatori di un eventuale *cheating* da parte dei partecipanti. I punteggi indicati dai soggetti sono stati poi inseriti in un *file excel*.

2.5. La procedura

Gli esperimenti hanno avuto luogo nella sede dell'Università di Pavia, presso il dipartimento di Scienze del Sistema Nervoso e del Comportamento ubicato nei locali di Piazza Botta 11. Le sessioni sperimentali sono state svolte dalla seconda metà di ottobre fino alla fine del mese di novembre 2023. La maggior parte dei partecipanti è stata reclutata attraverso un'e-mail inviata nella *newsletter* dell'Università, mentre, gli altri hanno preso parte allo studio su base volontaria. Al fine di garantire *l'ingenuità* dei partecipanti circa lo scopo dello studio, nell'email non è stato fatto alcun riferimento alle procedure previste nell'esperimento, il quale è stato descritto solamente come relativo all'attenzione spaziale. I criteri di inclusione contemplavano l'essere destrimani, l'avere una vista normale o corretta con un occhiale e il non avere una storia precedente di condizioni psichiatriche o neurologiche. Non vi erano particolari criteri di esclusione allo studio.

Al loro arrivo, i partecipanti sono stati accolti in una stanza predisposta per l'esperimento, al cui interno hanno trovato due scrivanie. Una dove compilare il questionario relativo ai dati anagrafici, firmare il consenso informato alla partecipazione allo studio e al trattamento dei dati personali e completare l'*Edinburgh Handedness Inventory* (Oldfield, 1971); e una seconda, dove ha avuto luogo la procedura sperimentale vera e propria, al di sopra della quale era posizionata solamente la scatola 0. Ancorato al piano della scrivania, vi era un braccio in legno al cui estremo è stata posizionata una *webcam* comandata a distanza che inquadrava il *set-up* dall'alto e con la quale sono state scattate le foto di tutti i puntamenti. All'interno

della scatola 0, in corrispondenza dello sportello richiudibile, è stata posizionata la *rubber hand*, la quale, in base alle proporzioni del partecipante, è stata collocata in modo tale che fosse per lui visibile dal polso in su. Una volta compilati i documenti sopra elencati, a ciascun partecipante sono state fornite istruzioni dettagliate circa lo svolgimento delle sessioni sperimentali e dei tre *task* da eseguire, schematicamente descritti nella tabella a pagina 68. Il soggetto è stato poi invitato a sedersi alla scrivania dove ha avuto luogo l'esperimento. La seduta su cui si trovava è stata regolata in altezza così che entrambe le procedure potessero essere svolte nella maggiore comodità possibile.

L'esperimento, dalla durata complessiva di circa 90 minuti, consisteva in quattro sessioni sperimentali di un quarto d'ora intervallate da una pausa di 10 minuti. Le diverse sessioni, descritte in breve nella sezione 1.3., prevedevano una diversa combinazione delle procedure di PA, neutro o a destra, e RHI, sincrona o asincrona, in base alla condizione sperimentale svolta. L'ordine nel quale sono state eseguite le sessioni è stato *randomizzato*, così da escludere eventuali variabili intervenenti legate alla sequenza di esecuzione. Una volta posizionatosi dalla sua parte della scrivania, il partecipante ha indossato la mantella, inserito la mano sinistra all'interno della scatola 0³³ e posto la destra in una posizione a lui comoda. Lo sperimentatore si è seduto dalla parte opposta e l'esperimento ha avuto inizio.

Ciascuna sessione prevedeva come *task* iniziale i sei puntamenti *pre-PA* (*Task n.1 pt.1* nella tabella). Nell'eseguirli il partecipante aveva gli occhi chiusi, utilizzava la mano destra e partiva, come precedentemente illustrato, con il dito indice posizionato sul suo sterno. Al termine di ogni puntamento, il soggetto cadeva con il dito indice su un punto, coerente con la sua propriocezione, della superficie superiore

³³ Unica scatola presente sulla scrivania in questa fase dell'esperimento.

della scatola 0. Al fine di consentire allo sperimentatore di scattare la foto, il soggetto è stato istruito a non tornare in posizione di partenza prima di aver ricevuto l'indicazione a farlo. Una volta terminati i primi sei puntamenti, la scatola 1 è stata posizionata sopra la scatola 0, così da essere perfettamente allineate³⁴ e in modo che la punta dei pentagoni coincidesse con lo sterno del partecipante. Sempre mantenendo gli occhi chiusi, il soggetto ha indossato un occhiale con i prismi o con lenti neutre, in base alla condizione sperimentale, ed è stata effettuata la procedura di PA. Il soggetto, ora a occhi aperti, ha così svolto il secondo *task* (*Task n.2* nella tabella) della sessione, costituito dai 64 puntamenti verso un *target* visivo: la penna. Quest'ultima è stata posta dallo sperimentatore, seguendo un ordine *randomizzato*, nelle tre posizioni stabilite a priori, in corrispondenza dei gradi angolari +15°, 0°, -15°, indicati sulla sezione superiore della scatola 1. Durante tutta la procedura di PA, lo sperimentatore aveva a disposizione una tabella, nella quale ha inserito, per ciascun puntamento del *Task n.2*, l'eventuale grado di errore compiuto dal soggetto nel tentativo di toccare il *target* visivo.

Terminati i puntamenti, la scatola 1 e l'occhiale sono stati rimossi, e il soggetto, nuovamente a occhi chiusi e con il dito indice della mano destra sul suo sterno, ha effettuato i secondi sei puntamenti dritto davanti a sé (*Task n1. Pt.2* nella tabella), per ciascuno dei quali, ancora, è stata scattata una foto. A questo punto della

³⁴ Dal punto di vista del partecipante, la base piatta della scatola 1, dalla forma pentagonale, era allineata con il bordo della scatola 0.

Task n.1 PUNTAMENTI PRE-POST PA	Pt. 1	Pt.2
<ul style="list-style-type: none"> • Eseguiti con la mano DX • Istruzione dello sperimentatore: <i>“tenendo gli occhi chiusi, e partendo con il dito indice della tua mano destra sullo sterno, punta dritto davanti a te cadendo con il dito sulla scatola. Mi raccomando rimani fermo fino a quando non ti dirò di tornare, così che io possa scattare la foto”</i> • Punto di partenza: centro dello sterno • Punto di arrivo: un punto sulla superficie della scatola 0 • Movimenti di andata e ritorno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eseguiti prima del PA • N. puntamenti: 6 • Occhi chiusi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eseguito dopo il PA • N. puntamenti: 6 • Occhi chiusi.
Task n.2 PUNTAMENTI PA		
<ul style="list-style-type: none"> • Eseguiti con la mano DX • Istruzione dello sperimentatore: <i>“per questi puntamenti avrai gli occhi aperti e partirai con il dito indice della mano destra sul tuo sterno. Il tuo obiettivo è toccare questa penna con la punta del dito. Se non riesci a toccarla, non importa! Non muoverti per correggere la mira, ma stendi bene il braccio per vedere dove sei arrivato. È importante che tu veda la punta del dito oltre la scatola”</i> • Punto di partenza: centro dello sterno • Punto di arrivo: target visivo, la penna • Rapidi movimenti di andata e ritorno • N. puntamenti: 64 • Occhi aperti. 		
Task n.3 PUNTAMENTI PRE-POST RHI	Pt. 1	Pt.2
<ul style="list-style-type: none"> • Eseguiti con la mano DX • Istruzione dello sperimentatore: <i>“per questo tipo di puntamento partirai con la mano destra posizionata sopra la scatola 0 e avrai di nuovo gli occhi chiusi. Diversamente dai precedenti puntamenti, in questi dovrai puntare con il dito indice della tua mano destra verso il dito medio della tua mano sinistra. Mi raccomando quando toccherai la scatola rimani fermo, così che io possa scattare la foto”</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Eseguiti prima della RHI • N. puntamenti: 3 • Occhi aperti. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eseguiti dopo la RHI • N. puntamenti: 3 • Occhi aperti.

<ul style="list-style-type: none"> • Punto di partenza: mano dx sopra la scatola 0 • Punto di arrivo: un punto sulla superficie della scatola 0 • Puntamenti balistici. 		
---	--	--

sessione, mantenendo gli occhi chiusi, il partecipante è stato invitato a posizionare la sua mano destra sopra la scatola 0 in una posizione a lui comoda per effettuare la prima parte del terzo, e ultimo, *task*. Lo sperimentatore ha chiesto quindi al soggetto, sempre a occhi chiusi, di performare tre puntamenti balistici con il dito indice della sua mano destra, verso la posizione percepita del dito medio della sua mano sinistra (*Task n.3. pt.1* nella tabella). Anche in questo caso il dito indice del partecipante, nel concludere il puntamento, cadeva sulla scatola 0. Una volta effettuati i primi tre puntamenti balistici e le rispettive tre foto, mentre il soggetto si trovava a occhi chiusi, lo sperimentatore ha nascosto la mano destra del partecipante, coprendola con la mantella, e ha aperto lo sportello della scatola 0. In questa fase dell'esperimento, il soggetto veniva invitato ad aprire gli occhi e a fissare attentamente la mano protesica posta all'interno della scatola 0 e in corrispondenza dell'apertura. Lo sperimentatore cominciava ora la stimolazione sensoriale, accarezzando contemporaneamente la mano sinistra del partecipante, sempre nascosta alla vista, e quella artificiale, seguendo un diverso pattern di stimolazione in base alla condizione sperimentale. Trascorsi 90 secondi, al soggetto veniva chiesto di chiudere ancora gli occhi, lo sportello in legno veniva richiuso e la sua mano destra scoperta. A questo punto, il partecipante ha effettuato la seconda parte del terzo *task*, ovvero gli ultimi tre puntamenti (*Task n.3 pt.2* nella tabella). Terminati questi, sempre oggetto di fotografia, il partecipante aveva così ultimato tutti i *task* sperimentali.

Infine, è stato somministrato il questionario *self-report* relativo all'esperienza di RHI, si veda Figura 8. La sessione sperimentale era così conclusa e il soggetto

veniva invitato, durante la pausa, ad alzarsi e muovere gli arti superiori e inferiori, prima di procedere alla sessione successiva. Mentre la sequenza dei *task* è rimasta invariata durante tutte le sessioni, l'ordine di queste era casuale. Di seguito, nella tabella è possibile trovare una versione schematica di ciascuna sessione.

Al termine di tutti gli esperimenti, i dati relativi ai puntamenti del *Task n.2* e del questionario *self-report* sono stati inseriti all'interno di un *file excel*. In seguito, attraverso il programma *ImageJ*, sono state estratte le coordinate relative ai puntamenti dei *Task n.1* e *n.3*. Dopo aver inserito anche queste nello stesso foglio *excel*, è stata effettuata la conversione in cm e sono state ricavate le misure dirette degli AEs e del *drift propriocettivo*.

<i>Task n.1, pt.1:</i>	<i>Task n.2:</i>	<i>Task n.1, pt.2:</i>	<i>Task n.3, pt.1:</i>	RHI:	<i>Task n.3, pt.2:</i>	QUESTIONARIO
6 puntamenti <i>pre-PA</i>	64 puntamenti PA	6 puntamenti <i>post-PA</i>	3 puntamenti <i>pre-RHI</i>	90 secondi	3 puntamenti post-RHI	<i>SELF-REPORT</i>

15 minuti

inizio sessione

fine sessione

2.6. Piano di analisi statistica

Per quanto concerne l'analisi statistica dei dati ottenuti, come prima cosa abbiamo valutato l'efficacia del paradigma di PA nell'indurre l'adattamento. A tale scopo siamo andati a misurare sia gli effetti diretti, ovvero gli errori di puntamento commessi dal soggetto durante l'esecuzione del *Task n.2*, sia gli AEs conseguenti all'adattamento, quantificati in cm³⁵. Per quanto concerne gli effetti diretti, è stato utilizzato un modello

³⁵ Attraverso il *Task n.1*, la procedura è illustrata nella sezione 2.3.

lineare misto con PA (Destro, Neutro), il numero di puntamenti e la loro interazione come *fixed effects* e intercettazioni casuali per i soggetti. La deviazione in gradi angolari dal *target* visivo è stata modellata come variabile dipendente. Per gli AEs, è stato nuovamente utilizzato un modello lineare misto, con solamente PA (Destro, Neutro) come *fixed effects* e intercettazioni casuali per i soggetti. In questo caso, i valori del *delta*³⁶ tra i puntamenti dritto davanti a sé *pre-PA* e *post-PA* sono stati considerati come variabile dipendente.

In seguito, è stata valutata l'efficacia del paradigma di RHI al fine di elicitare l'illusione di *ownership*. A tale scopo, come variabili dei due modelli sono stati utilizzati i valori in cm relativi al *drift propriocettivo* e le risposte fornite dai soggetti al questionario di *embodiment*³⁷. Per quanto riguarda il *drift*, si è ricorso a un modello lineare misto con RHI (Sincrona, Asincrona), PA (Destro, Neutro) e la loro interazione come *fixed effects* e intercetti casuali per i soggetti. Per il questionario, abbiamo utilizzato lo stesso modello con l'aggiunta del numero di domanda e la sua interazione con RHI e PA come *fixed effects*.

Allo scopo di verificare che le assunzioni del modello lineare non venissero violate, abbiamo controllato che i residui dei modelli fossero normalmente distribuiti esaminando visivamente i *plot* Q-Q. L'analisi dei dati è stata effettuata utilizzando Jamovi. Quando necessario, i confronti a coppie sono stati corretti da Holm-Bonferroni.

³⁶ In cm.

³⁷ Figura 8.

3. RISULTATI

3.1. PA

Per quanto concerne la procedura di PA, i risultati mostrano un chiaro adattamento dei partecipanti ai prismi ottici destri, esemplificato da un iniziale *pattern* di errore nella direzione dei prismi. Tale *pattern*, coerentemente con la letteratura (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021), è stato osservato maggiormente nei primi dieci puntamenti, per poi ridursi gradualmente, fino ad azzerarsi, all'aumentare del numero di puntamenti effettuati. Un aspetto particolarmente rilevante è che il *pattern* d'errore era presente solamente per i prismi destri, ma non per i prismi neutri. I partecipanti, infatti, non commettevano errori quando nell'effettuare i puntamenti del *Task n.2* indossavano le lenti di controllo, come si vede in Figura 9.

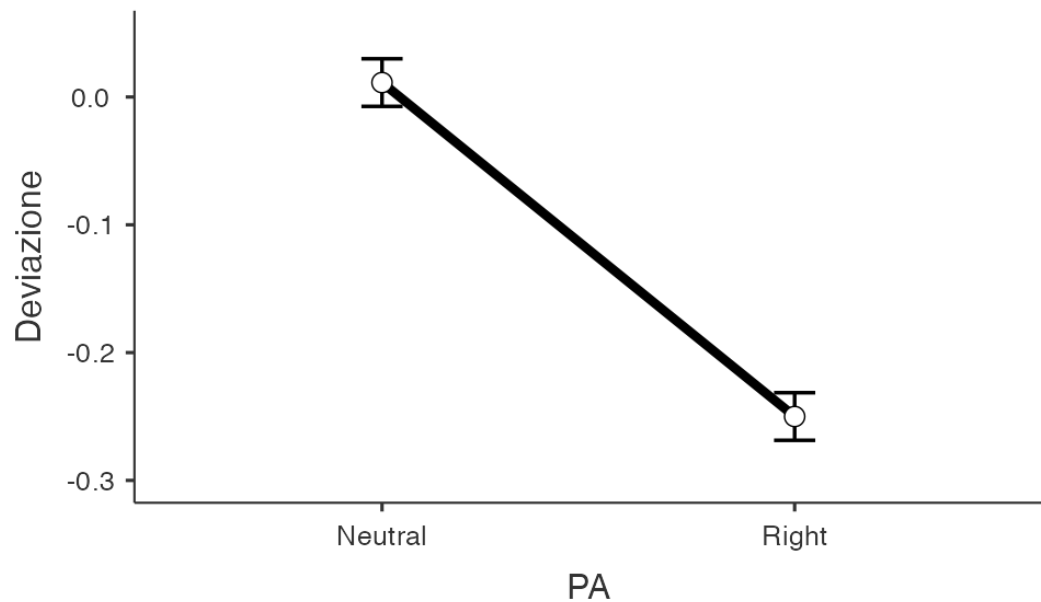


Figura 9.

Anche l'effetto principale del numero di puntamenti si è rivelato significativo ($F_{(63,4463)} = 29.1; p < 0.001$), mostrando come i partecipanti sbagliassero di più all'inizio dei puntamenti per poi tendere, e arrivare, allo zero, come si può osservare nel grafico in Figura 10.

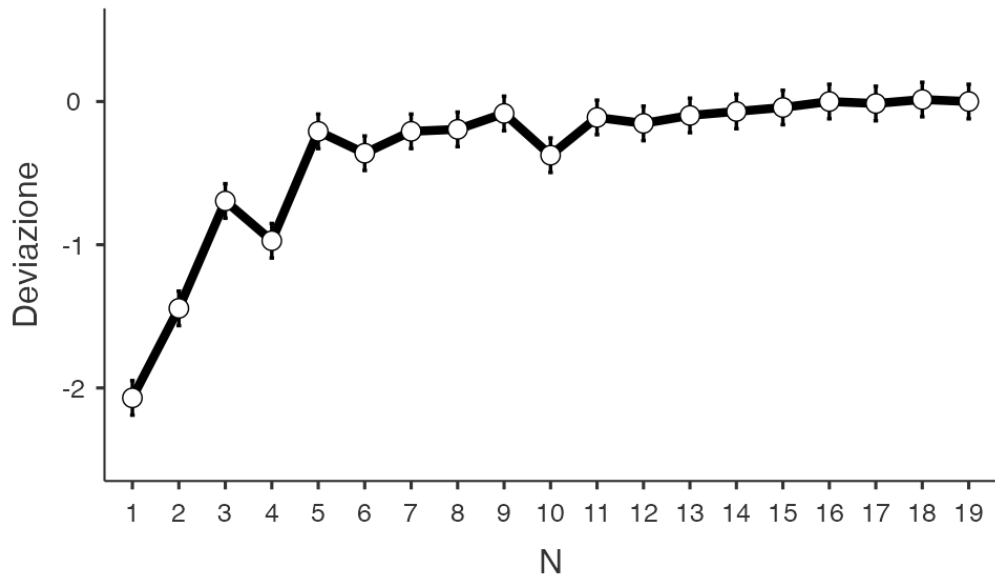


Figura 10. Il plot raffigura, per comodità di visualizzazione, solamente i primi 20 trial. Tuttavia, già entro questi l'errore raggiunge lo zero.

Inoltre, anche l'effetto di interazione era significativo ($F_{(63,4463)} = 38.1; p < 0.001$), ciò mostra come questo pattern di errore fosse presente solo nella condizione in cui il soggetto indossava i prismi destri e non quelli neutri, Figura 11. Per vedere per quali puntamenti specifici fosse presente un errore di deviazione significativamente diverso per le due condizioni, si rimanda ai *simple effects* dell'interazione, si veda la Tabella 1. Tuttavia, come si può chiaramente osservare nel grafico, l'errore tende a scomparire dopo i primi 10 puntamenti.

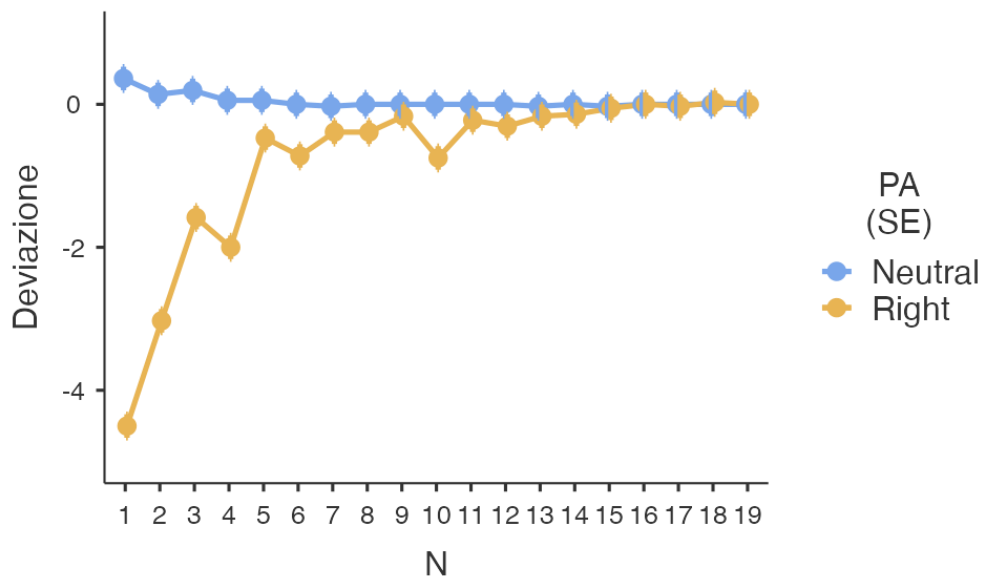


Figura 11.

Simple effects of PA: Omnibus Tests

Moderator levels					
N	F	Num df	Den df	p	
1	1467.0450	1.00	4463	< .001	
2	622.5540	1.00	4463	< .001	
3	196.2130	1.00	4463	< .001	
4	262.3200	1.00	4463	< .001	
5	17.2930	1.00	4463	< .001	
6	32.3830	1.00	4463	< .001	
7	8.0960	1.00	4463	0.004	
8	9.3890	1.00	4463	0.002	
9	1.7250	1.00	4463	0.189	
10	34.9220	1.00	4463	< .001	
11	3.0660	1.00	4463	0.080	
12	5.7960	1.00	4463	0.016	
13	1.1980	1.00	4463	0.274	
14	1.1980	1.00	4463	0.274	
15	0.0480	1.00	4463	0.827	
16	0.0000	1.00	4463	1.000	
17	0.0480	1.00	4463	0.827	
18	0.0480	1.00	4463	0.827	

Simple effects of PA: Omnibus Tests

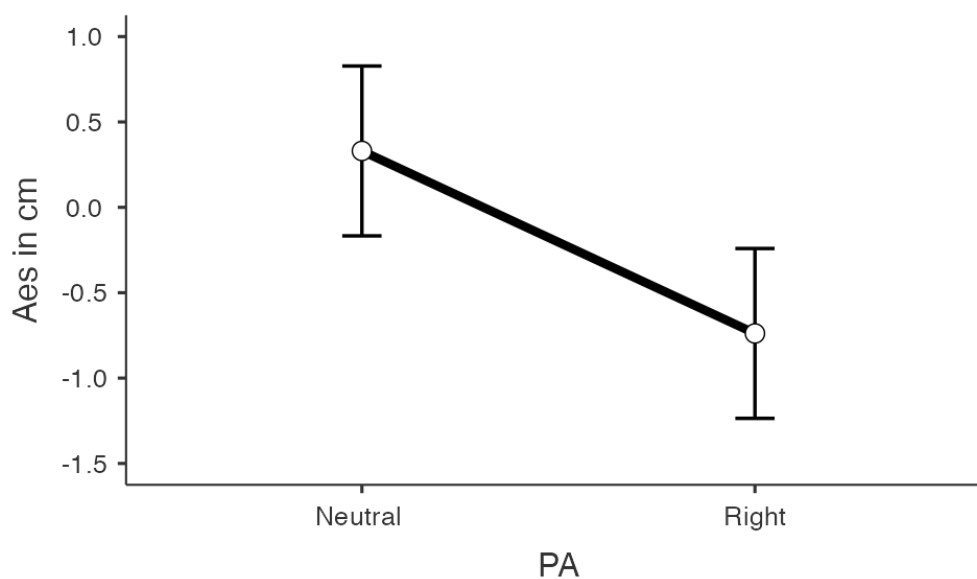
Moderator levels				
N	F	Num df	Den df	p
19	0.0000	1.00	4463	1.000
20	0.0000	1.00	4463	1.000
21	0.7660	1.00	4463	0.381
22	0.0000	1.00	4463	1.000
23	0.0480	1.00	4463	0.827
24	0.0000	1.00	4463	1.000
25	0.0000	1.00	4463	1.000
26	0.1920	1.00	4463	0.662
27	0.0000	1.00	4463	1.000
28	0.0000	1.00	4463	1.000
29	0.0480	1.00	4463	0.827
30	0.4310	1.00	4463	0.511
31	0.0000	1.00	4463	1.000
32	0.0000	1.00	4463	1.000
33	0.0000	1.00	4463	1.000
34	0.0000	1.00	4463	1.000
35	0.0000	1.00	4463	1.000
36	0.1920	1.00	4463	0.662
37	3.8800	1.00	4463	0.049
38	1.1980	1.00	4463	0.274
39	0.0480	1.00	4463	0.827
40	0.0000	1.00	4463	1.000
41	0.1920	1.00	4463	0.662
42	0.0480	1.00	4463	0.827
43	1.7250	1.00	4463	0.189
44	0.1920	1.00	4463	0.662
45	0.0480	1.00	4463	0.827
46	0.0480	1.00	4463	0.827
47	0.0000	1.00	4463	1.000
48	0.0480	1.00	4463	0.827
49	0.0000	1.00	4463	1.000
50	0.0000	1.00	4463	1.000
51	0.0000	1.00	4463	1.000
52	0.0000	1.00	4463	1.000
53	0.0000	1.00	4463	1.000
54	0.1920	1.00	4463	0.662

Simple effects of PA: Omnibus Tests

Moderator levels					
N	F	Num df	Den df	p	
55	0.0480	1.00	4463	0.827	
56	0.0000	1.00	4463	1.000	
57	0.0000	1.00	4463	1.000	
58	0.0480	1.00	4463	0.827	
59	0.0480	1.00	4463	0.827	
60	0.0480	1.00	4463	0.827	
61	0.0000	1.00	4463	1.000	
62	0.0000	1.00	4463	1.000	
63	0.0000	1.00	4463	1.000	
64	0.0000	1.00	4463	1.000	

Tabella 1.

Diversamente, per quanto riguarda gli *aftereffects*, i risultati mostrano come essi siano stati presenti come *shift* verso sinistra solo nella condizione di prismi destri, ma non in quella dove il soggetto indossava le lenti neutre ($F_{(1,974)} = 9.74; p = 0.002$), come si può osservare in Figura 12.



3.2. RHI

Figura 12.

In merito ai risultati della *Rubber Hand illusion* abbiamo considerato sia le risposte al questionario di *embodiment*, sia la misura del *drift propriocettivo*. Rispetto al questionario è stato trovato un effetto principale significativo legato al *question number* ($F_{(6,459)} = 15.596; p < .001$). Questo indica che i partecipanti hanno prodotto, coerentemente con la letteratura, punteggi diversi a domande diverse.

Abbiamo inoltre trovato l'effetto principale significativo di RHI, il quale suggerisce che i partecipanti hanno fornito risposte diverse al questionario in base alla condizione sperimentale ($F_{(1,459)} = 374.787; p < .001$). In particolare, i punteggi prodotti dai soggetti erano maggiori nella condizione sincrona rispetto a quella asincrona. Non è stato rilevato alcun effetto principale di PA, il quale non ha raggiunto un livello significativo ($F_{(1,459)} = 0.141; p = 0.708$).

È emersa un'interazione significativa tra *question number* e RHI, ($F_{(6,459)} = 22.474; p < .001$). Ciò significa che la differenza nelle risposte prodotte dai soggetti tra la condizione sincrona e asincrona era statisticamente rilevante solo per alcune domande, per vedere quali si faccia riferimento alla voce *Simple effects of RHI*, nella Tabella 2. In particolare, si sono rilevate significative le domande 1, 2, 4, 6, 7 [$(F_{(1,459)} = 98.373; p < .001)$, ($F_{(1,459)} = 77.905; p < .001$), ($F_{(1,459)} = 38.286; p < .001$), ($F_{(1,459)} = 125.266; p < .001$), ($F_{(1,459)} = 166.955; p < .001$)]. Al contrario, i punteggi prodotti dai soggetti alle domande 3 ($F_{(1,459)} = 0.298; p = 0.585$) e 5 ($F_{(1,459)} = 2.683; p = 0.102$) non hanno raggiunto una significatività statistica. Un aspetto interessante in merito agli altri effetti di interazione, è che nessuno di questi è emerso come significativo [(QN * PA: $F_{(6,459)} = 0.234; p = 0.965$), (RHI * PA: $F_{(1,459)} = 2.840; p = 0.093$), (QN * RHI * PA: $F_{(6,459)} = 0.215; p = 0.972$)], mostrando che non c'è stato alcun effetto di PA sulle risposte alle domande del questionario.

Fixed Effect Omnibus tests

	F	Num df	Den df	p
QN	15.596	6	459	< .001
RHI	374.787	1	459	< .001
PA	0.141	1	459	0.708
QN * RHI	22.474	6	459	< .001
QN * PA	0.234	6	459	0.965
RHI * PA	2.840	1	459	0.093
QN * RHI * PA	0.215	6	459	0.972

Note. Satterthwaite method for degrees of freedom

Simple effects of RHI : Omnibus Tests

Moderator levels				
QN	F	Num df	Den df	p
1	98.373	1.00	459	< .001
2	77.905	1.00	459	< .001
3	0.298	1.00	459	0.585
4	38.286	1.00	459	< .001
5	2.683	1.00	459	0.102
6	125.266	1.00	459	< .001
7	166.955	1.00	459	< .001

Tabella 2.

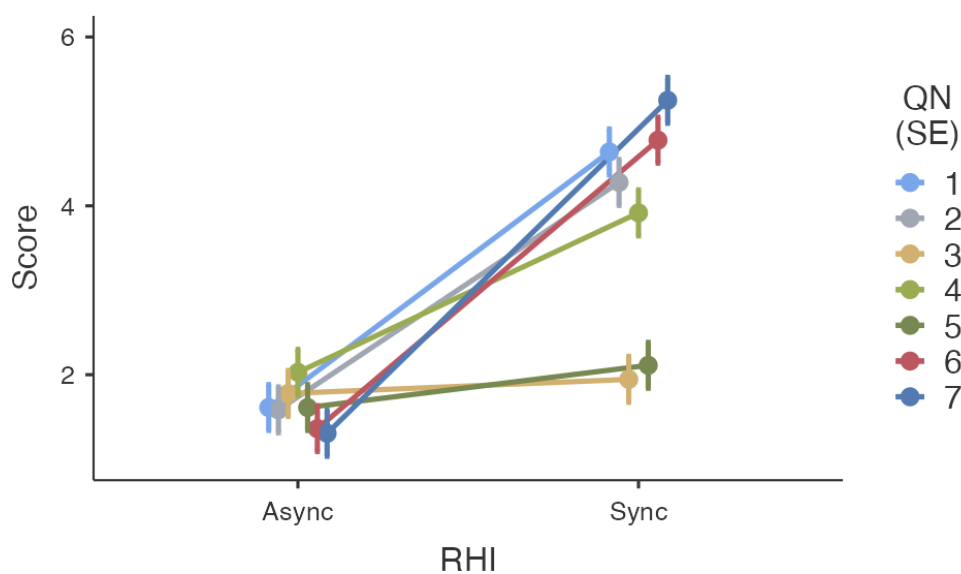


Figura 13.

Per quanto riguarda il *drift propriocettivo*, non abbiamo trovato l'effetto principale significativo di *Rubber Hand Illusion* ($F_{(1,17)} = 3.71; p=0.071$), così come di PA ($F_{(1,17)} = 1.99; p=0.176$). Tuttavia, è stato trovato un effetto di interazione tra le due variabili (RHI * PA: $F_{(1,161)} = 4.02; p=0,047$). Considerando sia il *plot*, Figura 14, che i *Simple effects*, Tabella 3, è stato trovato una differenza nel *drift propriocettivo* solamente nella direzione *Right* ($F_{(1,44)} = 7.612; p=0,008$).

Fixed Effect Omnibus tests				
	F	Num df	Den df	p
RHI	3.71	1	17.0	0.071
PA	1.99	1	17.0	0.176
RHI * PA	4.02	1	161.0	0.047

Note. Satterthwaite method for degrees of freedom

Simple effects of RHI : Omnibus Tests

Moderator levels				
PA	F	Num df	Den df	p
Neutral	0.0520	1.00	44.9	0.821
Right	7.6120	1.00	44.9	0.008

Tabella 3.

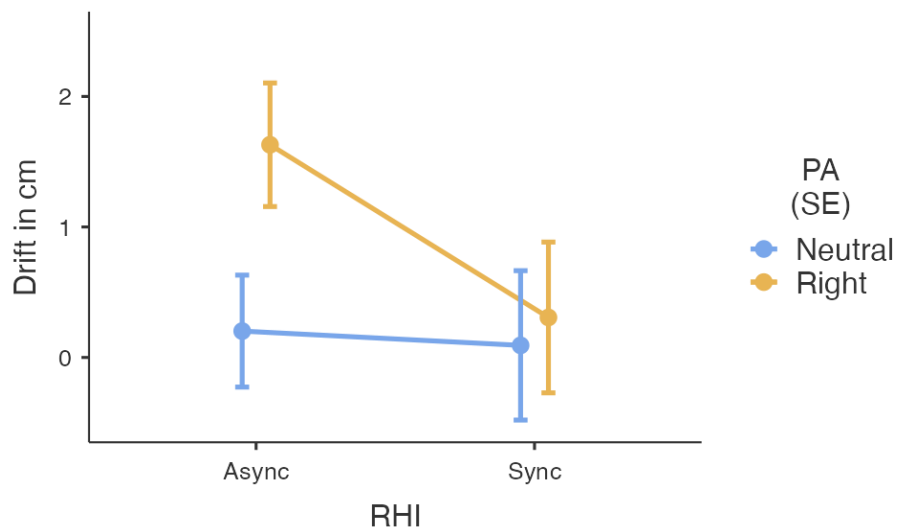


Figura 14.

4. DISCUSSIONE

Partendo dal modello proposto da Limanowski (2022), il quale postula che sia possibile aumentare la flessibilità delle rappresentazioni visuo-proprioceptive del corpo operando una modulazione contestuale di natura *top-down* dei processi sensoriali, il presente studio è andato a esplorare, da un punto di vista sperimentale, l'ipotesi per la quale l'attenuazione della precisione attribuita all'informazione proprioceptiva da parte del soggetto possa favorire l'integrazione di segnali sensoriali discrepanti, promuovendo l'emergere di fenomeni cognitivi derivati da conflitti visuo-proprioceptivi, come l'illusione di *ownership* conseguente alla *Rubber Hand illusion*. In particolare, il focus dello studio era quello di andare rilevare un'eventuale interazione tra l'attenuazione della precisione visiva, indotta attraverso l'adattamento prismatico e quantificata con gli AEs, e il *drift proprioceptivo*, indice diretto dell'illusorio spostamento della posizione percepita della propria mano verso quella artificiale. Uno scenario, questo, rispetto al quale non vi sono precedenti studi in letteratura. A tale scopo, un gruppo di 18 soggetti sani ha preso parte al presente studio, svolgendo un esperimento composto da quattro sessioni sperimentali, ciascuna delle quali prevedeva il completamento di tre *task*. Durante l'esperimento i partecipanti sono stati prima sottoposti alla procedura di PA, la quale ha promosso uno spostamento orizzontale del campo visivo verso destra, e, immediatamente dopo, è stata loro indotta la *Rubber Hand Illusion*. Alla luce della letteratura analizzata e coerentemente con l'ipotesi formulata, descritta nel dettaglio nella sezione 1.3, ci attendavamo che nella condizione sperimentale *PA a destra e RHI sincrona* la misura del *drift proprioceptivo*, così come l'esperienza di illusoria *ownership* della mano artificiale, fossero significativamente maggiori rispetto alle altre condizioni sperimentali.

In generale, i risultati ottenuti vanno nella direzione dell'ipotesi: è stato trovato un *drift propriocettivo* associato alla RHI maggiore nella condizione sperimentale in cui i soggetti erano stati precedentemente sottoposti alla procedura di PA con l'occhiale che montava prismi ottici orientati a destra, rispetto alla condizione nella quale ai soggetti veniva indotta la RHI a seguito di un adattamento svolto con lenti di controllo. Tuttavia, dall'analisi dei risultati sono emersi alcuni aspetti controversi, i quali verranno di seguito discussi e approfonditi.

Per quanto concerne la procedura di PA, come descritto nella sezione 2.6, sono state considerate come indice dell'effettivo adattamento, sia gli effetti diretti, quantificati in termini di errore di puntamento rispetto al *target* visivo, sia gli AEs³⁸, i quali rappresentano un indicatore fenomenologico dello spostamento dell'egocentro del soggetto. In merito agli effetti diretti, coerentemente con i precedenti risultati presenti in letteratura (Calzolari et al., 2017; McIntosh et al., 2019), durante la procedura di adattamento con lenti prismatiche orientate a destra, i partecipanti hanno mostrato una crescente riduzione dell'errore entro i primi 30 tentativi di puntamento, per poi non commetterne più oltre questa soglia. Da letteratura (Redding et al., 2005), la riduzione dell'errore terminale varia in base alla condizione di esposizione visiva al movimento di puntamento. Come illustrato nella sezione 1.2.2., questo studio prevedeva un'esposizione terminale per cui i soggetti potevano vedere solamente la punta del dito con il quale effettuavano il puntamento. Ciò ha generato un significativo pattern di errore, quantificato come deviazione in termini di gradi angolari rispetto al *target* visivo, nei primi dieci puntamenti. All'aumentare del numero di puntamenti effettuati, il grado di errore diminuiva significativamente, fino a raggiungere lo zero. Questi dati suggeriscono come tutti i soggetti, nella condizione sperimentale che

³⁸ In cm.

prevedeva l'uso dei prismi ottici, abbiano raggiunto un solido adattamento conseguente al processo di *ricalibrazione* descritto da Redding & Wallace (2006), il quale consente la graduale *correzione* dell'errore. Nelle condizioni sperimentali dove i soggetti effettuavano la procedura di PA indossando le lenti di controllo, il *pattern* di errore sopra descritto non è stato rilevato. A supportare quanto affermato è stato riscontrato un effetto d'interazione significativo, il quale mostra come la sequenza d'errore fosse presente solamente nella condizione in cui il soggetto indossava i prismi destri e non le lenti neutre.

In merito agli *aftereffects*, dai risultati è possibile osservare come l'adattamento prismatico abbia nuovamente avuto luogo solo per la condizione con i prismi destri, come ci attendevamo da letteratura (Hay et al., 1971; Redding & Wallace, 2006b; Schintu et al., 2014). Inoltre, sempre in accordo con la precedente letteratura (Kitazawa et al., 1997), la quale suggerisce che l'entità degli *aftereffects* sarebbe maggiormente generalizzabile quando i *task* effettuati durante e post esposizione sono simili³⁹, i soggetti hanno prodotto un significativo *shift* verso sinistra nell'eseguire il puntamento dritto davanti a sé a seguito della procedura. I due compiti visuo-motori previsti dall'esperimento mostravano infatti diverse analogie, a partire dalla posizione di partenza del puntamento, in entrambi i casi costituita dal centro dello sterno del partecipante. La presenza di uno *shift* verso sinistra del punto percepito e indicato dal soggetto come *dritto davanti a sé* nei puntamenti *post-PA*, conferma, come da letteratura (Terruzzi, Crivelli, Campana, et al., 2021), che i soggetti abbiano prodotto una sovracompensazione dello spostamento del campo visivo a seguito dell'azione combinata dei processi di ricalibrazione e riallineamento, si veda la sezione 1.2.2.

³⁹ Ad esempio, rispetto alla postura e alla velocità d'esecuzione

In generale, è possibile affermare che tutti i soggetti abbiano raggiunto un solido adattamento a seguito dell'esposizione ai prismi ottici, come confermato dai risultati riportati nella sezione 3.1, sia per quanto riguarda gli effetti diretti che gli AEs.

Rispetto alla *Rubber Hand Illusion*, come precedentemente illustrato nella sezione 3.2, abbiamo considerato come indice dell'avvenuta illusione le risposte al questionario di *embodiment*, dove i partecipanti hanno indicato il loro grado di accordo o disaccordo con una serie di affermazioni relative all'esperienza soggettiva di *ownership*, e il *drift propriocettivo*, l'illusorio spostamento della localizzazione percepita della propria mano verso quella artificiale (Riemer et al., 2019).

Gli *item* del questionario erano mirati a esplorare la percezione di *ownership* della *Rubber Hand* e, in accordo con la letteratura, erano formulati su una scala Likert a sette livelli con valori positivi, dove lo zero poteva essere interpretato come un'esperienza *neutra* rispetto all'incorporazione della mano e il punteggio massimo come indice dell'avvenuta illusione (Riemer et al., 2013). L'effetto principale significativo, trovato rispetto al *question number*, è indicativo di una buona sensibilità delle domande rispetto al costrutto d'interesse. Inoltre, i punteggi prodotti dai soggetti erano significativamente maggiori nella condizione che prevedeva la stimolazione sensoriale sincrona, il che suggerisce come nella maggior parte dei partecipanti la procedura abbia avuto un esito positivo e indotto l'illusione di *ownership* desiderata. Stando ai risultati, riportati nella Tabella 2 della sezione 3.2, la procedura di PA sembrerebbe non aver influito sulle risposte fornite dai soggetti. Diversamente, è emersa un'interazione significativa tra *question number* e RHI, il che suggerisce come la differenza nelle risposte prodotte dai soggetti tra la condizione sincrona e asincrona fosse statisticamente rilevante solo per alcune domande. Osservando più approfonditamente i punteggi prodotti dai soggetti agli *item* del questionario, è

possibile convenire come solamente i punteggi attribuiti alle affermazioni *sentinella* di un eventuale *cheating* non abbiano raggiunto una significatività statistica. Gli *item* che hanno generato punteggi significativi erano proprio quelli mirati all'esperienza di illusoria *ownership* della RHI. In generale, è possibile affermare che la maggior parte dei soggetti abbia riportato di aver esperito, da un punto di vista fenomenologico soggettivo, una consistente illusione di *Rubber Hand*.

Rispetto alla misura del *drift propriocettivo*, coerentemente con l'ipotesi di partenza e in virtù del razionale teorico illustrato nelle sezioni 1.2.3. e 1.3., ci attendevamo che questa fosse significativamente maggiore nella condizione *PA a destra e RHI sincrona* rispetto alle altre, in particolare a quella *PA neutro e RHI sincrona*. L'effetto atteso, sarebbe infatti motivato dalla maggiore *facilità* con la quale il nostro sistema cognitivo è portato a incorrere nell'illusione di RHI, poiché, a seguito dell'adattamento prismatico verso destra, la precisione attribuita dal soggetto all'informazione visiva, che confluisce nella rappresentazione mentale del corpo, risulta ridotta. In uno scenario *Bayesiano*, a fronte della necessità di esperire il corpo come unitario, la mente andrebbe a integrare informazioni sensoriali meno precise e conflittuali, supportando l'ipotesi di una possibile modulazione contestuale di natura *top-down* della rappresentazione del proprio corpo, la quale assumerebbe così un carattere di maggiore flessibilità.

In accordo con le precedenti evidenze presenti in letteratura, i partecipanti hanno mostrato il *bias propriocettivo* circa la posizione percepita della propria mano, nascosta alla vista, solamente a seguito della stimolazione visuo-tattile sincrona (Schütz-Bosbach et al., 2009). Tuttavia, dai risultati ottenuti non è emerso un effetto principale significativo di *Rubber Hand Illusion* e di PA. Contrariamente a quanto ci attendevamo, il *drift propriocettivo* non ha raggiunto un livello significativo nella

condizione *PA neutro e RHI sincrona*. Tuttavia, è stato osservato un effetto di interazione tra le variabili RHI e PA, il che, coerentemente con quanto atteso dallo studio, suggerisce come l'adattamento abbia generato un'attenuazione della precisione propriocettiva, e come questa abbia favorito l'insorgenza dell'illusione di *Rubber Hand*. Questo dato è in linea con quanto trovato recentemente da Chancel et al. (2022), ovvero che l'aggiunta di *rumore* visivo in un setting sperimentale può favorire l'emergere della RHI. Sempre in accordo con Chancel et al. (2022), quanto osservato rispetto alla condizione *PA a destra e RHI sincrona* del presente studio ci consente di affermare come la probabilità che la *Rubber Hand Illusion* si realizzi aumenti all'abbassarsi della precisione dell'informazione visiva fruibile per il soggetto, a fronte dell'importanza primariamente attribuita alla visione nella generazione e nel mantenimento della rappresentazione corporea (Gallagher, 1986).

In generale, questi dati suggeriscono come l'attenuazione della precisione visiva, e la conseguente diminuzione della dominanza della visione sulla propriocezione, possa potenziare la probabilità di inferire una causa comune promuovendo l'integrazione visuo-propiocettiva di informazioni tra loro conflittuali, entro un certo grado di tollerabilità cognitiva. Seppure, come trovato da Badde et al. (2020), l'aumento del *rumore* sensoriale porterebbe a maggiori effetti di integrazione di stimoli visuo-tattili anche a fronte di una grande discrepanza spaziale. Tuttavia, l'assenza di un effetto dovuto alla RHI nella condizione dove la procedura di adattamento veniva effettuata con le lenti di controllo, è in contrasto con quanto atteso dall'ipotesi di partenza. Questo dato non è inoltre conciliabile con i punteggi forniti dai soggetti al questionario di *embodiment*, dal quale emerge come, da un punto di vista soggettivo, essi abbiano *vissuto* l'illusione pur non producendo un significativo *drift propriocettivo*. In merito a questo aspetto, si potrebbe ipotizzare l'esistenza di un

effetto di *slatentizzazione* dell'illusione da parte dell'adattamento prismatico, la quale, in assenza dell'attenuazione visuo-proprioceettiva indotta dalla procedura, non sarebbe in grado di raggiungere un'intensità sufficiente a generare il l'effetto cercato.

Lo studio svolto presenta una serie di limitazioni metodologiche che potrebbero aver influito sulle misure ottenute e sul buon esito della RHI. Il campione, di 18 soggetti, aveva una misura ridotta, ciò incide in maniera negativa sulla generalizzabilità dei risultati e sulla possibilità di far emergere il fenomeno ricercato, dato il limitato numero di *trials* sperimentali effettuati. Inoltre, vi era una netta prevalenza di soggetti di genere femminile, il che riduce ulteriormente la rappresentatività del campione rispetto alla popolazione generale.

Per quanto concerne il set-up sperimentale, sono diverse le variabili intervenenti che potrebbero aver *sporcato* i risultati. Coerentemente con quanto affermato da Costantini & Haggard (2007) il successo della RHI non dipenderebbe solamente dalla sincronia del pattern di stimolazione, ma anche dalla corrispondenza tra la *rubber hand* e la pre-esistente rappresentazione corporea. Questo ci suggerisce come le stesse caratteristiche della mano protesica utilizzata potrebbero aver influito sull'efficacia della procedura e sull'esperienza di *ownership* della mano artificiale, la quale, per essere incorporata deve mostrare delle corrispondenze con l'immagine corporea della mano del soggetto. Sempre in accordo con quanto riportato da Costantini & Haggard (2007), la RHI è sensibile al *pattern temporale* di stimolazione. Nel caso dello studio presentato, questo potrebbe aver compromesso la *pulizia* della misura del *drift proprioceettivo*, nello svolgimento della procedura potrebbe infatti essere trascorso un tempo eccessivo tra la stimolazione sensoriale e l'esecuzione dei puntamenti balistici. Ancora, fattori *top-down* come la postura del corpo (Austen et al., 2004), l'aspetto visivo e l'identità della mano potrebbero aver influito sul buon esito

della procedura (Tsakiris et al., s.d.; Tsakiris & Haggard, 2005). Infine, è plausibile ipotizzare che i soggetti abbiano una differente sensibilità all'esperienza di illusione e di conseguenza una diversa resistenza alla procedura. Al fine di escludere questa eventualità, si sarebbe potuto ricorrere alla *mirror box* per elicitare l'illusione.

In conclusione, l'ipotesi formulata può dirsi parzialmente confermata. Tutti i partecipanti hanno raggiunto un solido adattamento prismatico nelle condizioni sperimentali d'interesse ed è stato trovato l'effetto desiderato nella condizione *PA a destra e RHI sincrona*. Tuttavia, l'illusione di *ownership* nella condizione di controllo *PA neutro e RHI sincrona* non ha avuto luogo. Questo elemento, in contrasto con quanto ipotizzato, potrebbe essere attribuibile a una serie di limitazioni dello studio, quali il ridotto numero di soggetti coinvolti ed eventuali *bias* metodologici legati al *setting* sperimentale, fattori che potrebbero aver *sporcato* le misure ottenute.

Nell'ambito del presente studio il modello proposto da Limanowski (2022) può considerarsi attendibile, questo apre a una serie di futuri scenari di ricerca di grande interesse per l'ambito neuropsicologico. Innanzitutto, si potrebbe esplorare da un punto di vista neuroanatomico l'ipotesi che il *precision control*, implementato attraverso una modulazione *top-down*, possa promuovere una maggiore flessibilità della rappresentazione mentale del corpo, contribuendo così a una più completa comprensione dei meccanismi sottostanti tali fenomeni cognitivi.

Le implicazioni di questo studio potrebbero assumere inoltre un risvolto applicativo nell'ambito del trattamento di pazienti con condizioni neuropsicologiche associate alla rappresentazione del corpo. Quanto emerso, suggerisce infatti come l'adattamento prismatico produca un effetto sulla percezione del soggetto rispetto alla posizione della propria mano. Questo, nel caso del *neglect personale*, apre alla possibilità di adoperare la procedura di PA al fine di elicitare un miglioramento dei

sintomi in pazienti affetti da questa condizione. Ancora, date le osservazioni formulate, potrebbe essere interessante approfondire i potenziali effetti della procedura di adattamento prismatico su soggetti affetti da somatoparafrenia (Vallar & Ronchi, 2009), condizione per la quale i pazienti manifestano credenze deliranti circa la metà sinistra del proprio corpo, caratterizzata da una patologica alterazione del senso di *ownership* dei propri arti.

BIBLIOGRAFIA

Ataria, Y., Tanaka, S., & Gallagher, S. (2021). *Body Schema and Body Image: New Directions*. Oxford University Press.

Austen, E. L., Soto-Faraco, S., Enns, J. T., & Kingstone, A. (2004). Mislocalizations of touch to a fake hand. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 4(2), 170–181. <https://doi.org/10.3758/CABN.4.2.170>

Badde, S., Navarro, K. T., & Landy, M. S. (2020). Modality-specific attention attenuates visual-tactile integration and recalibration effects by reducing prior expectations of a common source for vision and touch. *Cognition*, 197, 104170. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.104170>

Berlucchi, G., & Aglioti, S. (1997). The body in the brain: Neural bases of corporeal awareness. *Trends in Neurosciences*, 20(12), 560–564. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(97\)01136-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(97)01136-3)

Berlucchi, G., & Aglioti, S. M. (2010). The body in the brain revisited. *Experimental Brain Research*, 200(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1970-7>

Berntson, G. G., & Cacioppo, J. T. (2009). *Handbook of Neuroscience for the Behavioral Sciences, Volume 1*. John Wiley & Sons.

Berti, A., & Frassinetti, F. (2000). When Far Becomes Near: Remapping of Space by Tool Use: Journal of Cognitive Neuroscience. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 415–420. <https://doi.org/10.1162/089892900562237>

Bonnier, P. (2009). Asomatognosia P. Bonnier. L'aschématie. *Revue Neurol* 1905;13:605-9. *Epilepsy & Behavior: E&B*, 16(3), 401–403. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.09.020>

(Bud) Craig, & D, A. (2009). How do you feel — now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(1), 59–70.

<https://doi.org/10.1038/nrn2555>

Buxbaum, L. J., & Branch Coslett, H. (2001). Specialised structural descriptions for human body parts: Evidence from autotopagnosia. *Cognitive Neuropsychology*, *18*(4), 289–306. <https://doi.org/10.1080/02643290126172>

Calzolari, E., Albin, F., Bolognini, N., & Vallar, G. (2017). Multisensory and Modality-Specific Influences on Adaptation to Optical Prisms. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00568>

Carman, T. (1999). The Body in Husserl and Merleau-Ponty. *Philosophical Topics*, *27*(2), 205–226.

Carruthers, G. (2008). Types of body representation and the sense of embodiment. *Consciousness and Cognition*, *17*(4), 1302–1316.

<https://doi.org/10.1016/j.concog.2008.02.001>

Chambon, V., Sidarus, N., & Haggard, P. (2014). From action intentions to action effects: How does the sense of agency come about? *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00320>

Chancel, M., Ehrsson, H. H., & Ma, W. J. (2022). Uncertainty-based inference of a common cause for body ownership. *eLife*, *11*, e77221.

<https://doi.org/10.7554/eLife.77221>

Chatterjee, A., & Coslett, H. B. (2014). *The Roots of Cognitive Neuroscience: Behavioral Neurology and Neuropsychology*. OUP USA.

Coelho, L. A., & Gonzalez, C. L. R. (2024). Perception, action, and the body model. *Neuropsychologia*, *196*, 108853.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2024.108853>

Costantini, M., & Haggard, P. (2007). The rubber hand illusion: Sensitivity and reference frame for body ownership. *Consciousness and Cognition*, *16*(2), 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.01.001>

de Vignemont, F. (2010). Body schema and body image—Pros and cons. *Neuropsychologia*, *48*(3), 669–680. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.022>

Devue, C., Collette, F., Balteau, E., Degueldre, C., Luxen, A., Maquet, P., & Brédart, S. (2007). Here I am: The cortical correlates of visual self-recognition. *Brain Research*, *1143*, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.01.055>

Downing, P. E., Jiang, Y., Shuman, M., & Kanwisher, N. (2001). A Cortical Area Selective for Visual Processing of the Human Body. *Science*, *293*(5539), 2470–2473. <https://doi.org/10.1126/science.1063414>

Downing, P. E., & Peelen, M. V. (2011). The role of occipitotemporal body-selective regions in person perception. *Cognitive Neuroscience*, *2*(3–4), 186–203. <https://doi.org/10.1080/17588928.2011.582945>

Ehrsson, H. H. (2020). Chapter 8—Multisensory processes in body ownership. In K. Sathian & V. S. Ramachandran (A c. Di), *Multisensory Perception* (pp. 179–200). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00008-5>

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. <https://doi.org/10.1126/science.1097011>

Friston, K. (2012). The history of the future of the Bayesian brain. *NeuroImage*, *62*(2), 1230–1233. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.004>

Galati, G., Lobel, E., Vallar, G., Berthoz, A., Pizzamiglio, L., & Le Bihan, D. (2000). The neural basis of egocentric and allocentric coding of space in humans: A functional magnetic resonance study. *Experimental Brain Research*, *133*(2), 156–164. <https://doi.org/10.1007/s002210000375>

Gallagher, S. (1986). Body Image and Body Schema: A Conceptual Clarification. *The Journal of Mind and Behavior*, *7*(4), 541–554.

Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(1), 14–21. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01417-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01417-5)

Gallagher, S. (2006). *How the Body Shapes the Mind*. Clarendon Press.

Gallagher, S., & Cole, J. (1995). Body Image and Body Schema in a Deafferented Subject. *The Journal of Mind and Behavior*, *16*(4), 369–389.

Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*(1), 20–25. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(92\)90344-8](https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8)

Haans, A., IJsselsteijn, W. A., & de Kort, Y. A. W. (2008). The effect of similarities in skin texture and hand shape on perceived ownership of a fake limb. *Body Image*, *5*(4), 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.bodyim.2008.04.003>

Hay, J. C., Langdon, B., & Pick, H. L. (1971). Spatial parameters of eye-hand adaptation to optical distortion. *Journal of Experimental Psychology*, *91*(1), 11–17. Scopus. <https://doi.org/10.1037/h0031787>

Heydrich, L., & Blanke, O. (2013). Distinct illusory own-body perceptions caused by damage to posterior insula and extrastriate cortex. *Brain*, *136*(3), 790–803. <https://doi.org/10.1093/brain/aws364>

- Hu, L., He, H., Roberts, N., Chen, J., Yan, G., Pu, L., Song, X., & Luo, C. (2023). Insular dysfunction of interoception in major depressive disorder: From the perspective of neuroimaging. *Frontiers in Psychiatry, 14*. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2023.1273439>
- Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y. (1996). Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. *Neuroreport, 7*(14), 2325–2330. <https://doi.org/10.1097/00001756-199610020-00010>
- Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). The spatial distance rule in the moving and classical rubber hand illusions. *Consciousness and Cognition, 30*, 118–132. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.08.022>
- King, I. C. C. (2018). Body image in paediatric burns: A review. *Burns & Trauma, 6*. <https://doi.org/10.1186/s41038-018-0114-3>
- Kitazawa, S., Kimura, T., & Uka, T. (1997). Prism adaptation of reaching movements: Specificity for the velocity of reaching. *Journal of Neuroscience, 17*(4), 1481–1492. Scopus. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.17-04-01481.1997>
- Limanowski, J. (2022). Precision control for a flexible body representation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 134*, 104401. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.10.023>
- McIntosh, R. D., Brown, B. M. A., & Young, L. (2019). Meta-analysis of the visuospatial aftereffects of prism adaptation, with two novel experiments. *Cortex, 111*, 256–273. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.013>
- Melzack, R. (2005). Evolution of the Neuromatrix Theory of Pain. The Prithvi Raj Lecture: Presented at the Third World Congress of World Institute of Pain, Barcelona 2004. *Pain Practice, 5*(2), 85–94. <https://doi.org/10.1111/j.1533-2500.2005.05203.x>

Moro, V., Urgesi, C., Pernigo, S., Lanteri, P., Pazzaglia, M., & Aglioti, S. M. (2008). The Neural Basis of Body Form and Body Action Agnosia. *Neuron*, *60*(2), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.09.022>

Neural Correlates of Human Body Perception | Journal of Cognitive Neuroscience | MIT Press. (s.d.). Recuperato 30 aprile 2024, da <https://direct.mit.edu/jocn/article/22/3/482/4820/Neural-Correlates-of-Human-Body-Perception>

Newcombe, N., & Huttenlocher, J. (2000). *Making Space: The Development of Spatial Representation and Reasoning*. MIT Press.

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)

Paillard, J. (s.d.). *Body schema and body image—A double dissociation in deafferented patients*.

Peelen, M. V., & Downing, P. E. (2005). Selectivity for the Human Body in the Fusiform Gyrus. *Journal of Neurophysiology*, *93*(1), 603–608. <https://doi.org/10.1152/jn.00513.2004>

Peelen, M. V., & Downing, P. E. (2007). The neural basis of visual body perception. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*(8), 636–648. <https://doi.org/10.1038/nrn2195>

Pitron, V., & de Vignemont, F. (2017). Beyond differences between the body schema and the body image: Insights from body hallucinations. *Consciousness and Cognition*, *53*, 115–121. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.06.006>

Poeck, K., & Orgass, B. (1971). The Concept of the Body Schema: A Critical Review and Some Experimental Results. *Cortex*, 7(3), 254–277.

[https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(71\)80005-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(71)80005-9)

Probing the Neural Basis of Body Ownership | Science. (s.d.). Recuperato 3 maggio 2024, da <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.1101836>

Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: A tutorial in theory and method. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 29(3), 431–444. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2004.12.004>

Redding, G. M., & Wallace, B. (2006a). Generalization of prism adaptation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(4), 1006–1022. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.4.1006>

Redding, G. M., & Wallace, B. (2006b). Prism adaptation and unilateral neglect: Review and analysis. *Neuropsychologia*, 44(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.04.009>

Riemer, M., Kleinböhl, D., Hölzl, R., & Trojan, J. (2013). Action and perception in the rubber hand illusion. *Experimental Brain Research*, 229(3), 383–393. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3374-3>

Riemer, M., Trojan, J., Beauchamp, M., & Fuchs, X. (2019). The rubber hand universe: On the impact of methodological differences in the rubber hand illusion. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 104, 268–280. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.07.008>

Rubber hands 'feel' touch that eyes see | Nature. (s.d.). Recuperato 6 maggio 2024, da <https://www.nature.com/articles/35784>

Sakata, H., Takaoka, Y., Kawarasaki, A., & Shibutani, H. (1973). Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the

rhesus monkey. *Brain Research*, 64, 85–102. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(73\)90172-8](https://doi.org/10.1016/0006-8993(73)90172-8)

Sattin, D., Parma, C., Lunetta, C., Zulueta, A., Lanzone, J., Giani, L., Vassallo, M., Picozzi, M., & Parati, E. A. (2023). An Overview of the Body Schema and Body Image: Theoretical Models, Methodological Settings and Pitfalls for Rehabilitation of Persons with Neurological Disorders. *Brain Sciences*, 13(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/brainsci13101410>

Schintu, S., Pisella, L., Jacobs, S., Salemme, R., Reilly, K. T., & Farnè, A. (2014). Prism adaptation in the healthy brain: The shift in line bisection judgments is long lasting and fluctuates. *Neuropsychologia*, 53, 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.11.013>

Schütz-Bosbach, S., Tausche, P., & Weiss, C. (2009). Roughness perception during the rubber hand illusion. *Brain and Cognition*, 70(1), 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.01.006>

Schwoebel, J., Branch Coslett, H., & Buxbaum, L. J. (2001). Compensatory coding of body part location in autotopagnosia: Evidence for extrinsic egocentric coding. *Cognitive Neuropsychology*, 18(4), 363–381. <https://doi.org/10.1080/02643290126218>

Semenza, C., & Delazer, M. (2002). Pick's cases on body representation (1908, 1915, 1922): A retrospective assessment. In *Classic Cases in Neuropsychology, Volume II*. Psychology Press.

Simmons, W. K., Avery, J. A., Barcalow, J. C., Bodurka, J., Drevets, W. C., & Bellgowan, P. (2013). Keeping the body in mind: Insula functional organization and functional connectivity integrate interoceptive, exteroceptive, and emotional

awareness. *Human Brain Mapping*, 34(11), 2944–2958.

<https://doi.org/10.1002/hbm.22113>

Sirigu, A., Grafman, J., Bressler, K., & Sunderland, T. (1991). Multiple representations contribute to body knowledge processing: evidence from a case of Autotopagnosia. *Brain*, 114(1), 629–642. <https://doi.org/10.1093/brain/114.1.629>

Terruzzi, S., Crivelli, D., Campana, E., Pisoni, A., Romero Lauro, L. J., Bolognini, N., & Vallar, G. (2021). Exploring the time-course and the reference frames of adaptation to optical prisms and its aftereffects. *Cortex*, 141, 16–35. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.04.002>

Terruzzi, S., Crivelli, D., Pisoni, A., Mattavelli, G., Romero Lauro, L. J., Bolognini, N., & Vallar, G. (2021). The role of the right posterior parietal cortex in prism adaptation and its aftereffects. *Neuropsychologia*, 150, 107672. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107672>

Tewes, C., Durt, C., & Fuchs, T. (2017). *Introduction: The Interplay of Embodiment, Enaction, and Culture*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/10799.003.0002>

Tsakiris, M. (2010). My body in the brain: A neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia*, 48(3), 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.034>

Tsakiris, M., & Haggard, P. (2005). The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(1), 80–91. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.1.80>

Tsakiris, M., Hesse, M. D., Boy, C., & Fink, G. R. (s.d.). *Neural Signatures of Body Ownership: A Sensory Network for Bodily Self-Consciousness*.

Tsakiris, M., Longo, M. R., & Haggard, P. (2010). Having a body versus moving your body: Neural signatures of agency and body-ownership.

Neuropsychologia, 48(9), 2740–2749.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.021>

Vallar, G., & Ronchi, R. (2009). Somatoparaphrenia: A body delusion. A review of the neuropsychological literature. *Experimental Brain Research*, 192(3),

533–551. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1562-y>

Vignemont, F. de. (2018). *Mind the Body: An Exploration of Bodily Self-Awareness*. Oxford University Press.

Wright, G. H. (1956). The names of the parts of the body a linguistic approach to the study of the body-image. *Brain*, 79(1), 188–210.

<https://doi.org/10.1093/brain/79.1.188>

Zeller, D., & Hullin, M. (2018). Spatial attention and the malleability of bodily self in the elderly. *Consciousness and Cognition*, 59, 32–39.

<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.01.006>