

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

Dottorato di Ricerca in Neuroscienze

XXI° Ciclo

**OSSERVAZIONE DI ATTI DI PRENSIONE
MANUALE E CONTROLLO DEL PARLATO**

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. Vittorio Gallese

Tutor:

Chiar.mo Prof. Maurizio Gentilucci

Dottorando: Riccardo Dalla Volta

INDICE

Introduzione:

I gesti pag. 3

Gesti e origine del linguaggio pag. 5

Relazione tra mano e bocca nell'uomo pag. 14

Studio Sperimentale:

Scopo dello studio pag. 17

Materiali e metodi pag. 19

Risultati pag. 28

Discussione pag. 43

Conclusione pag. 47

Bibliografia

Ringraziamenti

INTRODUZIONE

Il linguaggio rappresenta una delle espressioni più alte dell'uomo. La comunicazione fra individui è pressoché ubiquitaria nel mondo animale ma nessuno dubita che il linguaggio umano sia qualcosa di speciale, una dotazione particolarmente ricca e versatile che ci consente di manifestare e comunicare con efficacia e facilità la moltitudine dei nostri pensieri. La ricchezza del linguaggio umano va di pari passo con la ricchezza delle nostre abilità cognitive.

Lo studio del linguaggio comprende un vastissimo numero di aspetti indagati. Quelli affrontati nello studio oggetto di questa tesi di dottorato riguardano essenzialmente le relazioni tra i gesti e il linguaggio parlato. L'approccio sperimentale impiegato è duplice: comportamentale e neurofisiologico, nel tentativo di correlare i comportamenti osservati a specifici processi cerebrali.

I gesti

I gesti sono attività universalmente diffuse della comunicazione umana. In ogni cultura essi, al pari della comunicazione vocale, sono parte integrante del linguaggio. Anzi, i gesti e il parlato sono prodotti insieme in maniera strettamente integrata (Willems & Hagoort, 2007). Ma che cosa essi rappresentano nello specifico?

I gesti costituiscono un vasto repertorio di azioni compiute da effettori diversi, tra cui soprattutto gli arti superiori e la faccia, le quali hanno una valenza comunicativa. In generale possiamo distinguere due principali categorie di gesti: una caratterizzata da azioni più o meno codificate che possono sostituire il linguaggio parlato e un'altra, più informale, che accompagna la produzione verbale. I gesti in grado di sostituire il linguaggio parlato sono definiti anche "emblemi" (Ekman & Friesen, 1969). Si contraddistinguono in quanto sono ampiamente standardizzati per quello che riguarda la loro morfologia, non necessitano di supporti verbali al fine di essere compresi dall'interlocutore e sono eseguiti e percepiti in modo cosciente. Gli emblemi, o gesti simbolici, tuttavia, non costituiscono un sistema linguistico vero e proprio come invece accade, ad esempio, per il linguaggio dei segni utilizzato dai non udenti, dove i gesti sono organizzati in sequenze più o meno complesse in ottemperanza a precise regole che costituiscono una vera e propria grammatica (Stokoe, 1960).

I gesti che accompagnano la produzione verbale (*co-speech gestures*) sono stati spesso considerati come una spia dello stato d'animo e delle emozioni di chi li compie (Friedman, 1979). Sono stati identificati 4 tipi principali di questi gesti (McNeill, 1992):

- a) “pittorici” (*iconic gestures*), se riproducono caratteristiche fisiche relative ai contenuti della comunicazione verbale che accompagnano: ad esempio quando un bambino, per descrivere come un liquido viene travasato da un contenitore (bottiglia) ad un bicchiere, inarca le dita della mano come se questa tenesse realmente il contenitore.
- b) “metaforici”, che sono simili ai precedenti ma con un contenuto pittorico astratto piuttosto che concreto. Ad esempio quando qualcuno che voglia offrire al suo interlocutore un bene astratto come la sua disponibilità o il suo tempo, apre e protende le mani verso l'altra persona come a porgergli qualcosa di concreto.
- c) “ritmici” o “di battuta”, tipici delle mani che si muovono al ritmo del linguaggio come se battessero un ritmo musicale. Questi gesti sottolineano la struttura ritmica del parlato.
- d) “deittici” o “indicativi”, quando appunto indicano oggetti o posizioni nello spazio circostante, ma possono assumere anche una valenza più astratta puntando uno spazio per indicare un tempo.

E' importante osservare che i gesti che accompagnano la produzione verbale hanno la possibilità di veicolare informazioni in modo anche autonomo dal parlato, dopo che il significato del gesto è stato specificato con parole pronunciate contestualmente. Ma il loro potenziale comunicativo si dilata ulteriormente nel momento in cui riescono a veicolare informazioni non chiaramente espresse o addirittura non contenute affatto nelle espressioni verbali che li accompagnano. Consideriamo quando qualcuno deve descrivere un percorso automobilistico su una cartina stradale: troverebbe difficile, se non arduo, farlo senza ricorrere ai gesti (nel caso specifico deittici). Questi infatti consentono di rappresentare in modo rapido e facilmente accessibile quei concetti che, per la loro natura, possono sfruttare meglio il carattere mimico e analogico dei gesti. Si pensi quando si cerca di spiegare la forma, le dimensioni o, più in generale, le relazioni spaziali di oggetti concreti: questi parametri non sarebbero facilmente comunicabili se si potesse contare solo sul carattere discreto e categoriale delle parole (Goldin-Meadow & McNeill, 1999). Altre volte le informazioni espresse con i gesti sono diverse da quelle espresse con le parole pronunciate contemporaneamente. La discordanza che si viene a creare riflette la presenza, in un dato soggetto, di un conflitto tra aspetti contrastanti del pensiero che sta esprimendo. Questo comportamento è stato notato ad esempio nei bambini di 6-9 anni a cui veniva richiesto di risolvere alcuni problemi di matematica. Ma quello che è più interessante è che le idee comunicate coi gesti erano spesso più vicine alla soluzione del problema matematico rispetto alla spiegazione verbale che i bambini fornivano (Perry e al., 1988). Una possibile spiegazione di questo fenomeno risiede nel fatto che il gesto, non essendo soggetto a rigorose regole di formulazione ed avendo una dimensione spaziale, si presta meglio ad esprimere quei concetti non ancora elaborati, come le intuizioni, o quelle relazioni che si fondano su proprietà spaziali/geometriche. Un'altra spiegazione, non

necessariamente alternativa, sta nel fatto che, se il linguaggio parlato è impegnato a esprimere una certa idea (nell'esempio di prima una soluzione al problema matematico) una seconda possibile soluzione elaborata contestualmente non troverebbe che un solo canale comunicativo aperto, ovvero quello della comunicazione gestuale. In questo caso quindi i gesti possono fornire all'osservatore delle informazioni che altrimenti non trasparirebbero, aprendo una seconda finestra sui processi mentali in atto nell'interlocutore.

Il gesto tuttavia non ha solo una valenza comunicativa. Consideriamo ad esempio il fatto che le persone non vedenti dalla nascita accompagnano normalmente i loro discorsi con la gestualità, perfino quando sono consapevoli che anche il loro interlocutore è un non vedente (Iverson & Goldin-Meadow, 1998). E' stato osservato che il gesto aiuta chi lo compie a recuperare parole dai depositi della memoria (Rauscher e al., 1996). Può ridurre lo sforzo cognitivo, come nel caso dei bambini piccoli che vengono facilitati dall'eseguire gesti di puntamento quando devono contare (Alibali & DiRusso, 1999). In generale, quindi, il repertorio gestuale sembra aumentare le risorse disponibili a chi parla, trasferendo in parte il lavoro dalla memoria verbale a quella spaziale.

I gesti dunque affiancano e se necessario sostituiscono il principale pilastro su cui poggia l'abilità di comunicare dell'uomo, ovvero il linguaggio parlato. A questo punto viene spontaneo chiedersi in che relazione stiano fra di loro.

Gesti e origine del linguaggio

Ci sono due principali posizioni riguardo alla relazione tra gesti e linguaggio parlato. La prima li considera due sistemi di comunicazione distinti (Hadar e al., 1998; Krauss & Hadar, 1999; Levelt e al., 1985). Secondo questa concezione i gesti sono considerati semplicemente un sistema ausiliario che interviene quando l'espressione verbale è temporaneamente difficoltosa o per facilitare il recupero (mnemonico) delle parole. Nel modello proposto da Butterworth e Hadar (1989) una difficoltà nel recuperare una parola avvia una nuova ricerca della parola in questione o di una parola alternativa. Questa nuova ricerca fa ripartire un insieme rilevante di elaborazioni concettuali che, a sua volta, evoca immagini mentali visuo-spaziali correlate. Tale rievocazione di immagini è una caratteristica della riattivazione di processi di selezione lessicale mirati ad ottenere *cue* semantici addizionali, oltre a quelli che si erano resi disponibili durante la prima attivazione. Secondo gli autori quindi i gesti potrebbero rappresentare una sorta di epifenomeno nei processi di facilitazione lessicale e servire solo a mantenere o rinforzare la rievocazione di immagini visuo-spaziali. La seconda posizione, invece, considera i gesti e il parlato come parte di un unico sistema di comunicazione (McNeill, 1992; Kendon, 2004), dal momento che sono ancorati agli stessi

processi mentali. In linea con quest'ultima posizione si trovano quelle teorie sull'origine del linguaggio secondo cui il linguaggio umano è nato inizialmente come una forma di comunicazione basata sul riconoscimento e sulla produzione di gesti manuali piuttosto che sulle vocalizzazioni, tipiche di molte altre specie animali (Arbib, 2005; Armstrong, 1999; Armstrong e al., 1995; Corballis, 1992, 2002; Donald, 1991; Gentilucci & Corballis, 2006; Givòn, 1995; Hewes, 1973; Rizzolatti & Arbib, 1998; Ruben, 2005).

Le teorie che sostengono un'origine gestuale del linguaggio si basano su molteplici osservazioni che spaziano dal linguaggio dei segni all'anatomia e alla fisiologia dei centri del sistema nervoso che controllano i movimenti degli arti e di quelli fono-articolatori, nonché da ipotesi sul ruolo di alcuni geni, implicati fra l'altro nella dominanza manuale, a considerazioni evoluzionistiche legate a trasformazioni che hanno interessato la specie *Homo*. Di seguito verranno tratte brevemente quelle più salienti.

Il linguaggio non necessita della componente vocale. I linguaggi dei segni in uso presso le diverse comunità di non udenti si basano esclusivamente sui gesti (che coinvolgono il capo, il tronco e gli arti superiori) ma tuttavia mostrano quasi tutte le principali caratteristiche del linguaggio parlato, in primis sono dotati di una vera e propria grammatica (Emmorey, 2002; Neidle e al., 2000; Stokoe, 1960). Ora, i segni sono sostanzialmente diversi dai gesti che di solito accompagnano il parlato: i primi infatti sono di natura prettamente simbolica e non hanno frequentemente una chiara relazione fisica con gli oggetti, le azioni o le proprietà che rappresentano (arbitrarietà), mentre i gesti sono per lo più iconici o deittici. Malgrado ciò i segni conservano una componente analogica che suggerisce un legame con una forma di comunicazione più iconica. Donald (1991) ha proposto che nel corso dell'evoluzione pantomime di azioni potrebbero essere state impiegate per rappresentare oggetti ed azioni ma poi, col tempo, queste pantomime avrebbero progressivamente perso le loro caratteristiche analogiche per diventare più astratte. Quando un gesto viene a perdere le sue caratteristiche analogiche per assumere un significato più arbitrario e trasformarsi quindi in un simbolo, si parla di "convenzionalizzazione" (*conventionalisation*, Burling, 1999).

Dati neurofisiologici indicano che i primati non umani hanno un controllo corticale delle vocalizzazioni assai poco sviluppato. Questa capacità, tuttavia, è ritenuta essenziale per lo sviluppo di un linguaggio vocale. Due sono i principali sistemi neurali deputati al controllo della produzione vocale: un primo sistema localizzato a livello della corteccia cingolata, del diencefalo e di strutture localizzate nel tronco dell'encefalo è coinvolto nella genesi delle vocalizzazioni nei primati non umani mentre il secondo sistema è costituito dalle classiche aree corticali laterali del linguaggio parlato nell'uomo ovvero l'area di Broca e l'area di Wernicke (Jürgens, 2002). Vocalizzazioni e

linguaggio parlato quindi sono comportamenti con un substrato neurale sostanzialmente differente. Il controllo volontario dei movimenti manuali invece utilizza regioni corticali omologhe nei primati non umani e nell'uomo ed è dotato di un livello di complessità paragonabile nei due gruppi. Questo implica che i nostri antenati erano molto meglio preadattati per sviluppare un sistema di comunicazione intenzionale basato sui gesti manuali piuttosto che sulle vocalizzazioni (Gentilucci & Corballis, 2006).

Nella porzione rostrale di corteccia premotoria ventrale di scimmia, ovvero nell'area F5 secondo la parcellazione di Matelli e collaboratori (Matelli e al., 1985), è stata descritta una classe di neuroni visuomotori, definiti neuroni "specchio" (*mirror neurons*), che rispondono sia quando l'animale compie determinate azioni sia quando osserva un conspecifico o uno sperimentatore che compie la stessa azione (Gallese e al., 1996; Rizzolatti e al., 1996). Le azioni osservate cui questi neuroni si dimostrano sensibili sono principalmente azioni eseguite con l'arto superiore, come ad esempio afferrare oggetti o cibo, manipolarli, tenerli in mano, strapparli e altre ancora. Alcuni rispondono anche all'osservazione di oggetti che vengono afferrati con la bocca. La maggior parte di queste cellule sono selettive per un particolare tipo di azioni. Le proprietà motorie dei neuroni specchio mostrano una congruenza con quelle visive. Quando la congruenza è stretta l'azione osservata che risulta efficace nell'attivare il neurone è la stessa che, quando eseguita, si accoppia alla scarica del neurone. Altre volte la congruenza è più larga, nel senso che le azioni osservate efficaci nel attivare il neurone possono essere molteplici mentre quella eseguita rimane generalmente una sola. Una piccola ma significativa percentuale di neuroni specchio è anche in grado di rispondere al suono prodotto da determinate azioni, come ad esempio rompere una nocciolina o strappare della carta (Kohler e al., 2002). Queste unità si attivano dunque indifferentemente per l'osservazione, l'ascolto del rumore tipico o l'esecuzione di azioni e sono state definite cellule "audio-specchio". Infine, Ferrari e colleghi (2003) hanno descritto, sempre in F5, dei neuroni specchio che rispondono durante il *lip-smacking* (protrusione ripetuta delle labbra) che è uno dei gesti facciali comunicativi più comuni fra i primati non umani, e altri che rispondono durante gesti di tipo ingestivo. Il complesso di azioni, dunque, che osservate/udite oppure eseguite si dimostra efficace nell'attivare una parte dei neuroni della corteccia premotoria ventrale di scimmia comprende movimenti eseguiti con la mano o con la bocca. È stato proposto che i neuroni specchio rappresentino azioni (Gallese e al., 1996; Jeannerod, 1994; Rizzolatti e al., 1996). Questa rappresentazione può essere messa al servizio dell'imitazione e della comprensione delle azioni stesse. Comprendere un'azione viene qui inteso come capacità di riconoscere che qualcuno sta compiendo un'azione, distinguere l'azione osservata da altre e utilizzare questa informazione in modo appropriato. Nei neuroni specchio lo stesso movimento finalizzato viene codificato in modo

analogo sia quando viene osservato che quando viene eseguito. In questo modo queste cellule rappresentano quel legame tra colui che invia (attore) e colui che riceve un messaggio (osservatore) che Alvin Liberman, nella sua “teoria motoria della percezione del linguaggio parlato” (MTSP), ha postulato essere un prerequisito necessario ad ogni tipo di comunicazione (Liberman & Mattingly, 1985). Scrive infatti:

“In all communication, sender and receiver must be bound by a common understanding about what counts; what counts for the sender must count for the receiver, else communication does not occur. Moreover the processes of production and perception must somehow be linked; their representation must, at some point, be the same” (Liberman, 1993).

Una delle principali affermazioni della MTSP dice che ciò che viene realmente percepito, quando ascoltiamo uno che parla, sono le sue posture fono-articulatorie, rappresentate nel cervello come comandi motori definiti che producono movimenti degli articolatori della voce. Le cellule audio-specchio potrebbero costituire un substrato neurale in grado di mappare, ovvero di codificare direttamente, la percezione delle vocalizzazioni sulla loro produzione.

Anche nell’uomo si è accumulato recentemente un vasto corpo di evidenze sperimentali che dimostrano la presenza di aree corticali, potenzialmente omologhe a quelle della scimmia nelle quali sono stati descritti i neuroni specchio, che si attivano durante l’osservazione di azioni eseguite con il corpo e, in diversi casi, anche durante la loro esecuzione (sistema specchio). Le tecniche di indagine impiegate comprendono, fra le altre, l’elettroencefalografia (Muthukumaraswamy e al., 2004), la magnetoencefalografia (Hari e al., 1998), la stimolazione magnetica transcranica (Baldissera e al., 2001; Fadiga e al., 1995; Maeda e al., 2002; Patuzzo e al., 2003; Strafella & Paus, 2000) e la risonanza magnetica funzionale (fMRI) (per una revisione vedere Rizzolatti & Craighero, 2004).

L’area F5 della scimmia, dove si trovano i neuroni specchio, viene considerata da alcuni come la regione omologa dell’area di Broca nell’uomo (Rizzolatti & Arbib, 1998). Già nella prima metà del secolo scorso Von Bonin e Bailey (1947), sulla base di studi di citoarchitettura, avevano proposto un’omologia tra l’area 44 di Brodmann nell’uomo (BA 44) e l’area premotoria FCBm. Quest’ultima occupa la parte più rostrale della corteccia premotoria ventrale di scimmia e la sua posizione corrisponde essenzialmente a quella dell’area F5 nella parcellazione proposta da Matelli e collaboratori (1985). Altri autori, anche più di recente, hanno esaminato le somiglianze tra l’area di Broca e il settore rostrale della corteccia premotoria ventrale di scimmia. Molti di loro sono concordi nel ritenere che queste due aree siano omologhe, sia perché entrambe fanno parte dell’area 6 inferiore (Campbell, 1905; Passingham, 1993) sia perché, dal punto di vista citoarchitettonico, ci

sono notevoli somiglianze tra la BA 44 (parte caudale dell'area di Broca) e l'area F5 (Galaburda & Pandya, 1982; Petrides & Pandya, 1994). In figura 1, nella pagina successiva, sono mostrate due vedute della convessità corticale nella scimmia e nell'uomo. La corteccia di scimmia è parcellata secondo Matelli e collaboratori (1985) mentre quella di uomo è parcellata secondo Brodmann (1909). Un codice basato sul colore mette in risalto le ipotizzate omologie nelle due specie, relativamente alla corteccia premotoria.

Accanto agli studi di neuroanatomia anche le neuroimmagini forniscono evidenze a favore di un'analogia funzionale tra la BA 44 e F5, che si basano soprattutto sulla dimostrazione della presenza di una rappresentazione motoria dei movimenti dell'arto superiore anche nell'area di Broca. Binkofski e collaboratori (1999), ad esempio, hanno trovato un'attivazione della BA 44 durante la manipolazione di oggetti complessi senza che venissero nominati mentalmente. La Broca si attiva anche quando si osserva l'afferramento di oggetti, ma non se si osservano gli oggetti soltanto (Rizzolatti e al., 1996). In un altro studio (Buccino e al., 2001) sono stati evidenziati due foci di attivazione: il primo, corrispondente alla BA 44, per osservazione di azioni manuali transitive, cioè rivolte verso un oggetto, e l'altro, situato nel giro precentrale, che si attiva invece per osservazione di azioni intransitive, ovvero senza l'oggetto-bersaglio. Inoltre c'era anche un'attivazione per osservazione di movimenti della bocca come mordere un pezzo di cibo, che parzialmente si sovrapponeva alla rappresentazione della mano. Complessivamente risulta evidente che il ruolo dell'area di Broca non è circoscritto soltanto alla produzione verbale ma quest'area contiene, al pari di F5, anche una rappresentazione motoria dei movimenti dell'arto superiore.

È dunque interessante notare che la stessa area che nella scimmia contiene un sistema in grado di stabilire una corrispondenza tra le azioni osservate e quelle eseguite sia stata indicata anche come il probabile omologo dell'area di Broca. Ci si chiede dunque se il sistema specchio non abbia avuto un ruolo nello sviluppo del linguaggio parlato e, più in generale, di forme di comunicazione intenzionale. Rizzolatti e Arbib (1998) propongono che lo sviluppo del circuito per il linguaggio parlato sulla convessità corticale nell'uomo sia la conseguenza del fatto che nel precursore dell'area di Broca esisteva, prima della comparsa del linguaggio, un meccanismo per il riconoscimento delle azioni altrui. Questo meccanismo costituisce il prerequisito neuronale per lo sviluppo di una comunicazione interindividuale e infine del parlato.

Ma che tipo di azioni sono state utilizzate con intento comunicativo nei primati? I gesti manuali o quelli oro-facciali? MacNeilage (1998) vede una somiglianza tra il parlato e i gesti facciali sonori dei primati, come ad esempio il *lip-smacking*. La sua proposta è che il ciclo di apertura e chiusura della bocca associato alla masticazione e ad altre azioni legate alla nutrizione, come ad esempio il succhiare e il leccare cibo, costituisca la cornice sillabica specifica del

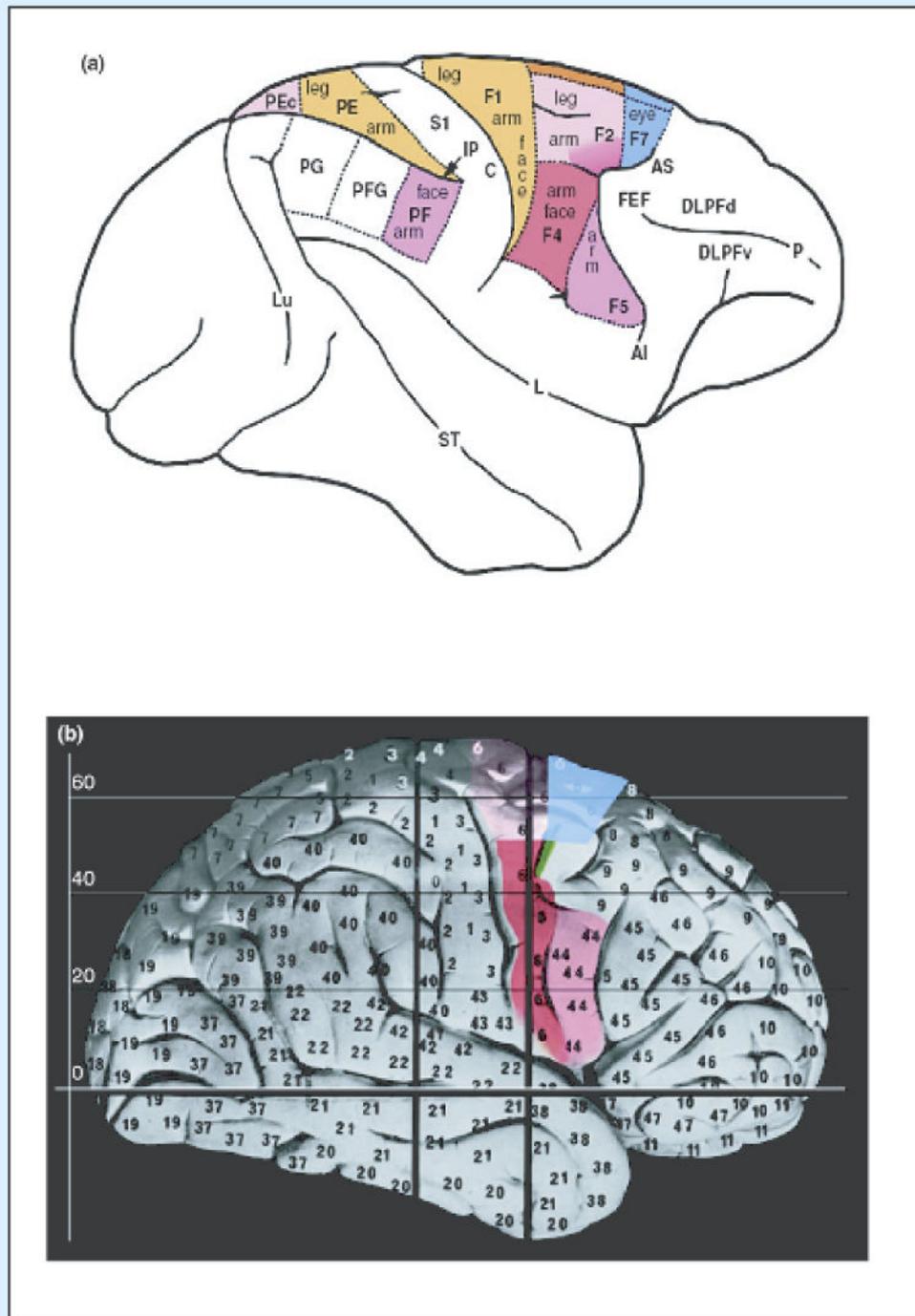


Figura 1

Veduta laterale della corteccia cerebrale di scimmia (riquadro superiore) e di uomo (riquadro inferiore). Secondo Rizzolatti e Arbib (1998) l'area 44 di Brodmann nell'uomo corrisponde filogeneticamente all'area premotoria F5 della scimmia mentre l'area 6 laterale di Brodmann corrisponde all'area premotoria F4 della scimmia. Tratta da Rizzolatti e coll. (2002).

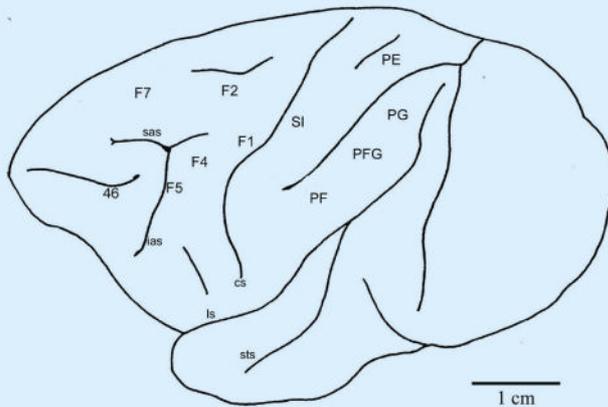
linguaggio umano dalla cui modulazione dipenderebbero i differenti contenuti (vocali e consonanti). A sostegno di questa tesi starebbe il fatto che la maggior parte delle modificazioni corticali necessarie alla comparsa del linguaggio avrebbe avuto luogo in quella parte della corteccia frontale dei primati non umani omologa della Broca e deputata al controllo della masticazione (ma non solo). Questa proposta si accorda con la scoperta di neuroni specchio correlati al controllo e alla osservazione di movimenti della bocca. Tuttavia l'architettura anatomo-funzionale dell'area F5 è caratterizzata dalla presenza di rappresentazioni motorie legate a diversi effettori (arto superiore, faccia, bocca, laringe) e fa sospettare che la comunicazione interindividuale non si sia evoluta solo da una modalità motoria, quella oro-facciale, ma dalla integrazione progressiva di modalità diverse (gesti facciali, brachio-manuali e da ultimo vocali). Senza l'intervento di un sistema brachio-manuale a sostegno di quello oro-facciale le potenzialità comunicative sarebbero rimaste drasticamente ridotte. È la mano, più della bocca, che consente di includere in una relazione a due, una terza persona o un oggetto, in quanto consente di indicarne la posizione e di descriverne alcune caratteristiche. Ed è dall'uso della mano, più che da quello della bocca, che probabilmente è dipeso lo sviluppo della capacità di articolare i gesti in maniera tale da dare vita a un primo sistema comunicativo aperto, cioè in grado di esprimere significati nuovi sfruttando le possibili combinazioni dei singoli movimenti. Questo non succede nella comunicazione oro-facciale dei primati (Rizzolatti & Sinigaglia, 2006). Rizzolatti e Arbib (1998) sostengono che i primi gesti dei primati ad essere utilizzati in una comunicazione *tête-à-tête* sono stati quelli oro-facciali. I movimenti oro-facciali infatti sono impiegati dalle scimmie e dall'uomo mentre né le scimmie né l'uomo usano come principale veicolo di comunicazione i gesti manuali. Solo in un secondo momento si sarebbe evoluto un sistema di comunicazione brachio-manuale a fianco di quello oro-facciale. Questo sviluppo avrebbe incrementato notevolmente l'importanza delle vocalizzazioni e il loro controllo. Infatti l'associazione con i gesti avrebbe permesso loro di assumere il carattere più aperto e referenziale che i gesti manuali già possedevano (Johannesson, 1950; Paget, 1930).

Se si accetta l'ipotesi che il primo tipo di comunicazione aperta, dove cioè gli elementi possono essere combinati per ottenere un repertorio di significati molto più vasto di quello ristretto e fisso tipico di una comunicazione chiusa senza proprietà combinatoriali, sia rappresentato dai gesti brachio-manuali, allora il passo successivo è quello di individuare le possibili tappe che hanno portato alla progressiva affermazione di un sistema vocale. È possibile che oggetti o eventi descritti in maniera analogica attraverso i gesti manuali, come ad esempio rappresentare un oggetto grande mediante un gesto ampio o un oggetto piccolo mediante una piccola apertura delle dita, siano stati ad un certo punto accompagnati da vocalizzazioni tali per cui, per indicare gli stessi elementi, sono stati usati costantemente gli stessi suoni, come ad esempio un oggetto grande che viene accoppiato a

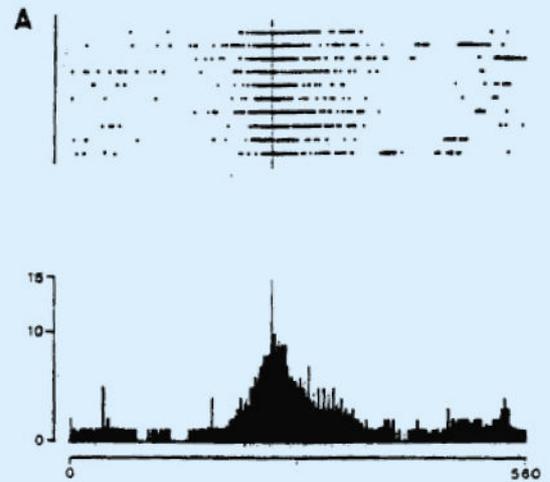
un'apertura della bocca ampia (vocale "a") e uno piccolo accoppiato a un'apertura stretta (vocale "i"). A questo punto si sarebbe sviluppato un primitivo vocabolario di suoni dotati di significato (Holland & Wertheimer, 1964; Rizzolatti & Arbib, 1998; Weiss, 1964). Questo scenario prevede un accoppiamento tra gesti manuali e suoni che non è puramente e primitivamente arbitrario, come invece appare essere il legame tra la maggior parte delle parole e le entità concrete o astratte cui fanno riferimento. Le caratteristiche fisiche e cinematiche di un dato gesto braccio-manuale vengono infatti ad assomigliare a quelle delle posture ("gesti") fono-articolatorie necessarie a produrre il suono che viene accoppiato a quel gesto. Vi sarebbe quindi un parallelismo tra gesti manuali e suoni emessi contestualmente che è simile a quello proposto da Paget (1930) per le parole e i significati che queste esprimono. Secondo la teoria di Paget definita "Schematopoeia", infatti, le parole inizialmente sarebbero derivate da aspetti fisici legati al loro significato: ad esempio in molti idiomi le vocali sono aperte in parole che indicano oggetti grandi mentre sono chiuse in parole che indicano qualcosa di piccolo (per esempio "grande" verso "piccolo"; notare anche che la vocale "a" è pronunciata diversamente nelle parole inglesi *large* e *small*). Riassumendo è possibile che il carattere analogico con cui i gesti manuali descrivono gli oggetti e le azioni si applichi in qualche misura anche ai suoni/posture fono-articolatorie corrispondenti.

Recentemente Gentilucci e colleghi hanno avanzato un'ipotesi sull'accoppiamento tra gesti manuali e parlato che fa riferimento sia alle proprietà funzionali dei neuroni della corteccia premotoria ventrale di scimmia, le quali indicano profonde connessioni tra la mano e la bocca, che ad una serie di osservazioni nell'uomo che confermano e ampliano quelle nella scimmia (per una revisione si veda Gentilucci & Corballis, 2006, Gentilucci & Dalla Volta, 2008, Gentilucci e al., 2008). Oltre ai neuroni specchio, nell'area F5 del macaco che occupa il banco posteriore del solco arcuato, sono stati registrati neuroni che si attivano sia quando l'animale compie gesti di afferramento con la mano che con la bocca (Rizzolatti e al., 1988). Un tipico neurone di questo tipo scarica quando si afferra un pezzo di cibo con la bocca e quando lo stesso pezzo di cibo è afferrato con la mano sia controlaterale che ipsilaterale all'emisfero registrato. Spesso la scarica di queste unità è selettiva per uno specifico tipo di afferramento: questo significa che la cellula si attiva quando l'animale utilizza, ad esempio, una presa di precisione ma non una presa di forza o vice versa. Frequentemente la scarica è evocata semplicemente dal vedere un pezzo di cibo o un altro oggetto afferrabile purchè le sue dimensioni siano compatibili con il tipo di afferramento codificato dal neurone. In figura 2, nella pagina successiva, si può vedere un esempio dell'attività di queste cellule. È stato proposto che questi neuroni siano coinvolti nella codifica dello scopo dell'afferramento, cioè di prendere possesso di un oggetto (Rizzolatti e al., 1988). Da un punto di vista funzionale essi potrebbero contribuire alla pianificazione e alla coordinazione di sequenze di

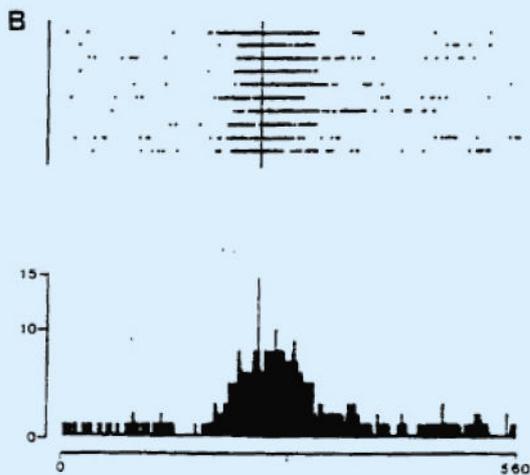
Lateral view of the monkey brain



Grasping a piece of food with the mouth



Grasping a piece of food with the right hand



Grasping a piece of food with the left hand

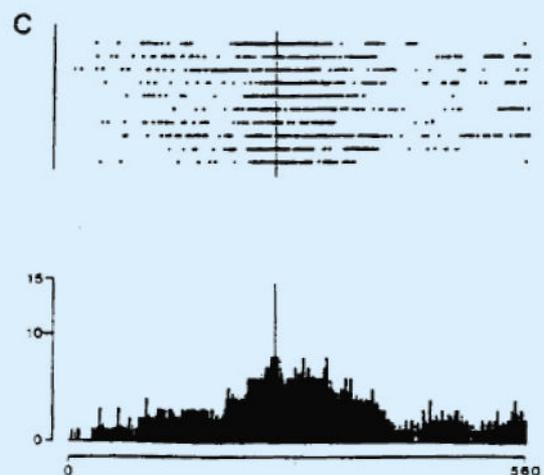


Figura 2

Riquadro superiore sinistro: veduta della convessità corticale del cervello di scimmia e dell'area F5 secondo la parcellazione di Matelli e colleghi (riferirsi al testo per ulteriori dettagli).

Riquadro superiore destro (A): in alto sono mostrati frammenti di registrazione dell'attività di un neurone che si attiva quando la scimmia afferra cibo con la bocca. In basso istogramma della suddetta attività.

Riquadro inferiore sinistro (B): medesimo neurone di A ma l'attività si riferisce a quando la scimmia afferra cibo con la mano destra.

Riquadro inferiore destro (C): medesimo neurone di A ma l'attività si riferisce a quando la scimmia afferra cibo con la mano sinistra.

azioni che coinvolgono la mano e la bocca come, ad esempio, prendere del cibo con la mano e introdurlo in bocca. Come verrà illustrato nella sezione successiva la presenza di un meccanismo di doppi comandi motori per la mano e per la bocca è stata dimostrata anche nell'uomo e questo potrebbe essere stato sfruttato nel corso dell'evoluzione per il passaggio da un sistema di comunicazione di tipo prevalentemente manuale a uno di tipo prevalentemente vocale. Questo scenario implica dunque che il linguaggio parlato poggi direttamente sui gesti manuali, dal momento che il sistema di doppi comandi lega in maniera specifica i movimenti della bocca a quelli della mano.

Relazione tra mano e bocca nell'uomo

Gentilucci e collaboratori (2001) in uno studio di cinematica hanno osservato che, quando veniva chiesto di aprire la bocca di una quantità fissa mentre contemporaneamente si dovevano afferrare con la mano dei parallelepipedi di dimensioni diverse, i soggetti aprivano di più la bocca se afferravano solidi grandi rispetto a quelli piccoli. Un esperimento di controllo ha escluso che questo effetto sia dovuto alla semplice osservazione, senza afferramento, di oggetti di diversa taglia. Allo stesso modo, quando veniva chiesto di aprire le dita della mano (indice e pollice) di una quantità costante mentre si dovevano afferrare con la bocca cubetti di cibo di dimensioni diverse, la distanza tra le dita era direttamente proporzionale al grado di apertura della bocca, che a sua volta dipendeva dalle dimensioni del cibo. La cinematica, dunque, di un'azione transitiva eseguita con la mano o con la bocca influenzava la concomitante esecuzione di un'azione intransitiva con l'altro effettore. Sempre nel medesimo studio gli autori hanno potuto dimostrare che questo effetto è presente anche quando si considerano movimenti della bocca legati al linguaggio. In un successivo esperimento, infatti, è stato osservato che la cinematica delle labbra e il picco dello spettro di potenza della voce durante la pronuncia di sillabe variavano in modo conforme al variare della cinematica del movimento della mano in funzione delle diverse dimensioni degli oggetti che contestualmente venivano afferrati. Gli stessi effetti sono stati trovati anche durante la semplice osservazione di una prensione eseguita con la mano (Gentilucci, 2003a; Gentilucci e al., 2004b). Inoltre, un esperimento di controllo ha mostrato che l'osservazione degli stessi oggetti, questa volta presentati senza la mano che afferra, non è sufficiente a influenzare la pronuncia di sillabe.

La voce umana è dotata di frequenze caratteristiche, chiamate formanti. Specificamente le formanti rappresentano quelle frequenze nello spettro del segnale vocale dove si registra un picco di energia acustica. Nel passaggio attraverso le varie cavità dell'apparato fono-articolatorio, che fungono da risonatori, le diverse formanti del segnale si stabilizzano su valori caratteristici. Esse

vengono quindi influenzate dalla particolare conformazione dell'apparato fono-articolatorio. In particolare l'apertura della bocca interna influenza soprattutto la formante 1 (F1) mentre la posizione in senso antero-posteriore della lingua influenza soprattutto la formante 2 (F2) (Delattre, 1951; Leoni & Maturi, 2002). La F1 e la F2 definiscono ciascuna vocale da un punto di vista acustico (Leoni & Maturi, 2002), permettendone il suo riconoscimento da parte di chi ascolta. Quando veniva osservato l'afferramento di oggetti grandi rispetto a quello di oggetti piccoli la cinematica dell'apertura delle labbra e la F1 della voce durante la concomitante pronuncia di una sillaba contenente una labiale (BA) aumentavano con l'aumentare dei parametri cinematici legati al movimento della mano osservato.

Questi effetti non sono limitati all'esecuzione/osservazione di gesti di afferramento ma si estendono anche ad altri movimenti. Anche l'esecuzione del gesto di portare alla bocca del cibo di dimensioni diverse influenzava la simultanea pronuncia della sillaba BA. In particolare la F2 aumentava durante il portare alla bocca del cibo grande rispetto a quello piccolo (Gentilucci e al., 2004a). E' interessante notare che questo risultato è stato osservato selettivamente per il linguaggio. Infatti, quando veniva chiesto di emettere una vocalizzazione non appartenente al repertorio dei soggetti che partecipavano all'esperimento, non vi era alcun effetto del gesto di portare alla bocca.

Successivamente è stato dimostrato che non solo l'esecuzione ma anche l'osservazione del portare alla bocca (che si apre) oggetti diversi era efficace e perfino l'osservazione di una pantomima del portare alla bocca dove invece la bocca restava chiusa. Quest'ultimo controllo è molto importante perché esclude sia che gli effetti precedenti possano essere ascritti direttamente all'osservazione della bocca che si apre di più o di meno in funzione delle dimensioni dell'oggetto tenuto in mano, e sia che gli effetti siano dovuti all'osservazione delle dimensioni dell'oggetto tenuto in mano. Ma suggerisce pure, al contempo, che il doppio comando motorio per la mano e per la bocca possa funzionare anche per azioni manuali con un certo grado di astrazione, come sono le pantomime, che potrebbero giocare un ruolo chiave nella comunicazione braccio-manuale, come spiegato in precedenza.

Riassumendo, dunque, la serie di studi comportamentali di Gentilucci e collaboratori suggerisce che sia esecuzione che osservazione di afferramenti di oggetti con la mano attivino comandi di afferramento con la bocca mediante il sistema di doppi comandi mano-bocca, di modo che l'apertura concomitante della bocca è influenzata dalla conformazione (*shaping*) della mano che afferra. Questo poi produce specifiche variazioni nella F1 dello spettro della voce, che è correlata al grado di apertura della parte anteriore della bocca interna. Analogamente sia esecuzione che osservazione di gesti di portare oggetti alla bocca induce probabilmente un movimento della bocca interna che serve per preparare azioni successive, come la masticazione e la deglutizione. A sua

volta questo produce specifiche variazioni nella F2 della voce, che è correlata alla posizione della lingua (Leoni & Maturi, 2002). Gentilucci e Corballis (2006) hanno proposto che il significato di azioni manuali (ad es. impossessarsi di un oggetto afferrandolo, portare un oggetto commestibile alla bocca) potrebbe essere associato all'attività di particolari organi articolatori della bocca, cooptati dal linguaggio. Attraverso i doppi comandi mano-bocca il repertorio di gesti manuali potrebbe essere stato condiviso e poi successivamente trasferito alla bocca.

Un possibile limite di questa ipotesi è dato dal fatto che la succitata serie di studi di Gentilucci e colleghi si basa su osservazioni comportamentali, non corroborate da dati neurofisiologici che dimostrino, a livello di corteccia cerebrale, la presenza di un doppio comando per la mano e per la bocca nell'uomo. A tal fine sarebbe necessario, ad esempio, mostrare una modulazione dell'attività neuronale delle aree corticali motorie deputate al controllo degli organi articolatori, in funzione dell'osservazione di specifici gesti braccio-manuali. Un altro aspetto che merita di essere approfondito riguarda la possibilità che altri effettori biologici, oltre alla mano, esercitino un'influenza sul controllo motorio della bocca. Infatti azioni transitive della mano e della bocca, ma non del piede, si trovano rappresentate in regioni parzialmente sovrapposte dell'area 44 di Brodmann (Buccino e al., 2001). Il substrato neuronale comune che codifica queste rappresentazioni potrebbe essere coinvolto nell'interazione tra la mano e la bocca. Al contrario, poiché il sistema di risonanza motoria coinvolto nell'osservazione di azioni transitive del piede è probabilmente situato al di fuori dell'area 44 (Buccino e al., 2001), è inverosimile un suo coinvolgimento diretto nel controllo motorio della bocca e, più in generale, del linguaggio verbale.

STUDIO SPERIMENTALE

Scopo dello studio

Questo studio consta di una parte comportamentale (esperimento 1) e di una parte dove è stata impiegata la stimolazione magnetica transcranica (TMS, esperimenti 2-6). Nell'esperimento comportamentale, dove venivano registrati la cinematica delle labbra e lo spettro della voce, sono stati presi in considerazione due confronti. Il primo riguardava gli effetti sulla pronuncia della sillaba DA dovuti all'osservazione dell'afferramento manuale di oggetti rispetto all'osservazione di un piede che interagisce con altri oggetti. Gli oggetti presentati avevano dimensioni diverse. Il secondo invece riguardava gli effetti sulla pronuncia della sillaba DA relativi all'osservazione di oggetti commestibili e non commestibili. Gli oggetti potevano essere presentati da soli oppure mentre venivano afferrati da una mano. I suddetti confronti miravano a chiarire alcuni aspetti che i precedenti studi di Gentilucci e collaboratori avevano toccato solo indirettamente. In particolare, col primo di questi si è voluto escludere che l'osservazione di azioni transitive compiute col piede possa influenzare la pronuncia di sillabe.

La semplice osservazione di oggetti afferrabili è sufficiente, di per sé, a evocare un *affordance*, ovvero dei programmi motori di afferramento con la mano (Tucker & Ellis, 1998; Barbieri e al., 2007) che potrebbero influenzare i movimenti della bocca, soprattutto durante la pronuncia di sillabe. Un precedente lavoro (Gentilucci, 2003a) non ha rivelato alcun effetto della presentazione di solidi da soli sui parametri della voce durante la pronuncia di sillabe ma, tuttavia, oggetti più familiari, e soprattutto commestibili, potrebbero attivare più facilmente delle *affordance* (Gentilucci, 2003b). Inoltre, la presentazione di oggetti commestibili potrebbe influenzare direttamente i movimenti della bocca durante la produzione verbale attraverso l'evocazione di atti di masticazione e ingestione. Il secondo confronto è stato dunque disegnato per verificare se la presentazione di oggetti commestibili da soli influenza la pronuncia di sillabe e per confrontare l'osservazione dell'afferramento di oggetti commestibili verso quella di oggetti non commestibili. Studi precedenti hanno trovato che l'osservazione dell'afferramento di oggetti non commestibili (Gentilucci, 2003a) influenza la produzione verbale analogamente a quella di oggetti commestibili (Gentilucci e al., 2004b), tuttavia non è mai stato fatto un confronto diretto tra le due presentazioni, al fine di evidenziare un possibile effetto maggiore per gli oggetti commestibili.

L'esperimento 2 è stato disegnato per verificare se l'osservazione di differenti tipi di afferramento con la mano modula in maniera specifica l'eccitabilità della corteccia motoria sede

della rappresentazione della mano. A tal fine sono stati dati singoli impulsi di TMS in corrispondenza dell'area motoria primaria della mano di soggetti che osservavano due tipi di afferramento: una presa di forza con tutta la mano o una presa di precisione con indice e pollice. Come parametro correlato all'eccitabilità corticale sono stati registrati i potenziali evocati motori (PEM) dal muscolo opponente del pollice (OP), dal momento che questo è attivo sia durante una presa di forza che durante una presa di precisione. L'ipotesi di una modulazione specifica di questo muscolo durante l'osservazione di afferramenti diversi è stata fatta considerando che i neuroni specchio sono spesso selettivi per un particolare tipo di prensione e, inoltre, è risaputo che durante una presa di precisione di oggetti piccoli il picco di velocità di apertura delle dita e la loro massima apertura sono più piccoli mentre la durata della fase di chiusura è più lunga rispetto all'afferramento di oggetti grandi (Chieffi & Gentilucci, 1993; Gentilucci e al., 1991; Gentilucci e al., 1994). Di conseguenza i comandi di attivazione dei muscoli delle dita responsabili delle differenze cinematiche fra i due tipi di movimento dovrebbero essere più deboli quando si osserva una presa di precisione rispetto a una presa di forza. La TMS è in grado di rivelare eventuali attivazioni sottosoglia dell'area motoria della mano e si presta dunque a dimostrare questa ipotesi.

Come verrà illustrato successivamente, i risultati dell'esperimento comportamentale mostrano come l'osservazione di diversi tipi di afferramento moduli lo spettro della voce di sillabe pronunciate simultaneamente, in accordo con dati precedenti (Gentilucci, 2003a; Gentilucci e al., 2004b). In particolare l'osservazione della presa di forza di un oggetto grande induce un aumento della F1 rispetto all'osservazione della presa di precisione di un oggetto piccolo. Sulla base di questi risultati è stato ipotizzato che comandi motori, generati dall'osservazione di diversi tipi di afferramento attraverso un meccanismo di risonanza motoria, siano mandati sia alla corteccia motoria della mano che a quella della bocca grazie alla presenza di un sistema di doppi comandi mano-bocca. Poiché durante l'osservazione veniva pronunciata la sillaba DA, ovvero una dentale, i comandi generati dall'osservazione della prensione e diretti alla bocca dovrebbero modulare i movimenti della lingua, l'organo fonatorio principale nella pronuncia delle dentali. Questa ipotesi è stata verificata negli esperimenti 3-5 applicando la TMS in corrispondenza della corteccia motoria sede della rappresentazione della lingua (area motoria primaria) durante l'osservazione di diversi tipi di afferramento, oppure la pantomima degli stessi tipi di afferramento o, da ultimo, gli oggetti da soli.

Infine l'esperimento 6 si proponeva di dimostrare che l'osservazione di un piede che interagisce con oggetti di diverse dimensioni non influenza l'eccitabilità dell'area motoria primaria della lingua, così come si era già reso evidente in termini comportamentali nell'esperimento 1.

Materiali e Metodi

Esperimento comportamentale (esperimento 1)

Partecipanti

Hanno preso parte a questo esperimento 15 volontari (11 femmine e 4 maschi) di madrelingua italiana e di età compresa tra i 22 e i 27 anni. Tutti sono stati classificati come destrimani sulla base del questionario Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971) e non erano al corrente delle finalità dello studio, che ha ricevuto l'approvazione del Comitato Etico della Facoltà di Medicina dell'Università di Parma.

Apparato, stimoli e procedure

I partecipanti sedevano in una stanza semibuia di fronte a un tavolo dove era posto un monitor da 19 pollici, ad una distanza di un metro dall'osservatore. Attraverso il monitor sono state presentate ai partecipanti tre serie di filmati, ciascuno dei quali durava 2720 ms e aveva una frequenza di campionamento di 25 fotogrammi al secondo (fps). La prima serie di filmati mostrava frutti diversi, sia nell'atto di essere afferrati da una mano destra che da soli. I frutti erano una mela, una pesca, una fragola e una ciliegia. In figura 5 (pag. 32, a sinistra) si vedono singoli fotogrammi estratti dai filmati relativi alla mela e alla fragola. La seconda serie presentava invece solidi diversi, sia afferrati che da soli, rappresentati da un cubo grande verde, un cilindro grande giallo, un cubo piccolo rosso e un cilindro piccolo viola (in figura 3 a pag. 29, a sinistra, si vedono fotogrammi relativi al cubo verde e al cubo rosso). Le dimensioni dei frutti grandi erano all'incirca le medesime dei solidi grandi e, allo stesso modo, le dimensioni dei frutti piccoli erano simili a quelle dei solidi piccoli. Gli oggetti (frutti e solidi) grandi venivano afferrati con una presa di forza con tutte le dita mentre gli oggetti piccoli venivano afferrati con una presa di precisione dell'indice e del pollice. All'inizio dei filmati dove veniva mostrato l'afferramento, la mano si trovava nella configurazione a pinza, con indice e pollice uniti all'estremità, sulla destra della scena. Il suo movimento era costituito da una fase di apertura delle dita fino ad un massimo, seguita da una fase di chiusura delle dita sull'oggetto. La velocità della mano era maggiore durante una presa di forza rispetto alla presa di precisione: i tempi medi di raggiungimento/afferramento erano infatti di 340 e 1200 ms, rispettivamente. Nella terza serie di filmati venivano mostrate una palla da calcetto e una pallina da tennis, sia nell'atto di essere raggiunte e bloccate da un piede destro, sia da sole (figura 3, a destra). La palla da calcetto veniva bloccata con l'arcata plantare mentre la pallina da tennis veniva bloccata con le dita dei piedi. La velocità del movimento verso la palla da calcetto era maggiore di quella del movimento verso la pallina da tennis (tempo di movimento: 440 e 900 ms, rispettivamente). In tutti

i filmati dove venivano mostrati gli oggetti da soli un piccolo cerchio bianco compariva al centro dell'oggetto nel momento corrispondente a quando la mano o il piede toccavano l'oggetto nei filmati che presentavano l'interazione effettore-oggetto.

Il compito dei partecipanti era quello di osservare attentamente i filmati e di pronunciare la sillaba DA nel momento in cui l'effettore toccava l'oggetto oppure quando compariva il cerchio bianco nei filmati senza effettore. Sono stati presentati quattro blocchi di prove: nel primo blocco i filmati mostravano i movimenti di raggiungimento/afferramento dei frutti e dei solidi, nel secondo mostravano i movimenti di raggiungimento e blocco della palla da calcetto e da tennis, nel terzo presentavano i frutti e i solidi da soli e nel quarto la palla da calcetto e da tennis da sole. Gli oggetti grandi (frutto, solido e palla da calcetto) e quelli piccoli (frutto, solido e pallina da tennis) venivano presentati 10 volte in ordine semicasuale, sia da soli che con il corrispondente effettore, quindi il primo e il terzo blocco consistevano di 40 prove mentre il secondo e il quarto consistevano di 20 prove. Ciascun partecipante veniva testato in due giornate consecutive e in ciascuna sessione venivano somministrati due blocchi in ordine semicasuale in quanto si è evitato di presentare insieme nella stessa sessione blocchi con movimento dell'effettore e blocchi senza movimento (oggetti da soli). Questa procedura si è resa necessaria per evitare che i soggetti, quando osservavano gli oggetti da soli, fossero indotti ad attivare rappresentazioni motorie interne delle interazioni effettore-oggetto per il fatto che queste interazioni erano state osservate nel blocco precedente. Al termine di ciascuna sessione i soggetti dovevano completare un questionario riportante alcune domande sul contenuto dei filmati e in particolare dovevano specificare la categoria (ad esempio, frutti o solidi diversi), le dimensioni (grandi o piccole), il colore degli stimoli e anche il tipo di afferramento (ad esempio, presa di forza o presa di precisione) e la velocità del movimento osservato (elevata o bassa). Tutti sono stati in grado di completare il suddetto questionario correttamente.

Registrazione dei dati e analisi

Il movimento delle labbra di 9 partecipanti è stato registrato mediante un'apparecchiatura di acquisizione computerizzata del movimento (3D-optoelectronic SMART system, BTS Bioengineering, Milano). Questo sistema consta di 6 videocamere che rilevano i raggi infrarossi riflessi da marcatori sferici di 5 mm di diametro, ad una frequenza di campionamento di 120 Hz. La risoluzione spaziale del sistema è di 0,3 mm. Il computer che controllava la presentazione dei filmati avviava anche l'acquisizione del movimento. I dati registrati sono stati filtrati utilizzando un filtro a media mobile, ovvero un filtro passa basso che per ciascun valore restituisce la media calcolata su 5 misurazioni successive campionate, con una finestra di durata pari a 33,3 ms. Per analizzare l'apertura delle labbra durante la pronuncia delle sillabe sono stati applicati due

marcatori, uno per ciascun labbro, in posizione mediana. I parametri analizzati erano: il tempo all'inizio dell'apertura delle labbra (a partire dal momento del contatto effettore-oggetto o della comparsa del cerchio bianco sugli oggetti), il picco di velocità di apertura delle labbra, la massima apertura delle labbra e il tempo alla massima apertura delle labbra. Come inizio dell'apertura si è considerato il primo campionamento in cui la distanza tra i due marcatori aumentava di un valore superiore a 0,3 mm (risoluzione spaziale del sistema).

Tutti i 15 partecipanti indossavano un microfono, montato su un archetto metallico, per la registrazione della voce durante la pronuncia delle sillabe (modello WH20, Shure). Questo era collegato ad un personal computer attraverso una scheda audio (16 PCI Sound Blaster, CREATIVE Technology Ltd, Singapore). La frequenza di risposta del microfono era compresa in un range di 50-15.000 Hz. Per l'acquisizione della voce è stata impiegata l'applicazione professionale Avisoft SASLab (Avisoft Bioacoustics, Germania), mentre per calcolare i parametri della voce dei partecipanti si è utilizzata l'applicazione PRAAT (www.praat.org). In particolare è stato analizzato il decorso temporale della formante 1 (F1) e della formante 2 (F2) delle sillabe. Le prime due formanti dello spettro della voce sono sufficienti a caratterizzare inequivocabilmente le vocali da un punto di vista acustico (Leoni & Maturi, 2002). Nell'analisi sono state incluse sia la transizione formantica che la pronuncia della vocale pura. I parametri medi calcolati erano F1, F2, ed inoltre intonazione (*pitch*) e intensità vocale.

Sui parametri della cinematica delle labbra e i parametri della voce sono state condotte due serie di analisi della varianza (ANOVA): nella prima sono stati confrontati i valori ottenuti durante l'osservazione dei filmati di interazione effettore-oggetto e dei filmati con gli oggetti da soli. I fattori entro i soggetti erano: Effettore coinvolto nell'interazione (mano verso piede), Interazione (oggetti afferrati/bloccati verso oggetti da soli) e Dimensione degli oggetti (grande verso piccolo). Nella seconda serie sono stati confrontati l'afferramento di frutti e l'afferramento di solidi con i medesimi oggetti presentati da soli. I fattori entro i soggetti erano: Interazione (oggetti afferrati verso oggetti da soli), Categoria (frutti verso solidi) e Dimensione (grande verso piccolo). Per i confronti *post-hoc* è stato utilizzato il test di Newman-Keuls e il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Esperimenti di Stimolazione Magnetica Transcranica

Esperimento 2

Partecipanti

Sono stati arruolati 16 (7 femmine e 9 maschi) soggetti volontari (di madrelingua italiana) di età compresa tra i 21 e i 25 anni, destrimani sulla base del questionario Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971). Nessuno di loro era al corrente delle finalità dell'esperimento. In questi soggetti, e in tutti i partecipanti agli esperimenti di TMS, abbiamo escluso con un'intervista la presenza di patologie significative ed eventuali controindicazioni all'utilizzo di questa tecnica, secondo le raccomandazioni di Wassermann (1998). Tutti i partecipanti hanno dato il loro consenso scritto all'esperimento, che è stato approvato dal comitato etico della Facoltà di Medicina dell'Università di Parma.

Stimolazione Magnetica Transcranica

La corteccia cerebrale motoria di sinistra è stata stimolata magneticamente mediante singoli impulsi monofasici generati da una bobina (*coil*) focale (ESAOTE, Biomedica). In questo esperimento è stata stimolata l'area motoria primaria della mano, che è stata localizzata individuando il punto, sullo scalpo dei partecipanti, dove era possibile evocare un potenziale evocato motorio (PEM) nel muscolo Opponente del Pollice (OP) controlaterale (destra) alla stimolazione utilizzando la più bassa intensità di stimolazione possibile, secondo la definizione di soglia motoria a riposo per quel muscolo (vedere oltre). Il *coil* è stato posizionato tangenzialmente allo scalpo, con il manico diretto posteriormente e lateralmente a formare un angolo di circa 45° con l'asse longitudinale dei soggetti e perpendicolare alla linea passante per il solco centrale. Il muscolo OP è stato scelto perché coinvolto nella chiusura delle dita sia durante una presa di precisione che durante una presa di forza. La soglia motoria a riposo (rMT) di OP è stata definita come la minima intensità di stimolazione capace di evocare, nel muscolo rilassato, almeno 5 PEM con un'ampiezza di almeno 50 microV su 10 impulsi somministrati. Il suo valore era in media 47,2 +/- 6,3% dell'intensità massima dello stimolatore. La posizione sullo scalpo corrispondente alla rappresentazione del muscolo OP destro sulla corteccia motoria di sinistra, era in media 6,0 +/- 0,2 cm lateralmente e 0 +/- 0,2 cm anteriormente rispetto al vertice del cranio.

Durante tutte le sessioni sperimentali di questo e dei successivi esperimenti l'intensità di stimolazione è stata fissata al 120% della soglia a riposo.

Apparato, stimoli e procedure

In una stanza semibuia i partecipanti sedevano su una sedia coi braccioli di fronte al monitor di un computer da 17 pollici a tubo catodico, posizionato ad una distanza di 110 cm dall'osservatore. Sul monitor venivano presentati brevi filmati (durata: 2680 ms; frequenza di campionamento: 25 fps), analoghi a quelli mostrati nell'esperimento 1, in cui dei frutti (mela, pesca, fragola e ciliegia) venivano afferrati da una mano destra oppure venivano presentati da soli (figura 7, pag. 35). Di nuovo, la mela e la pesca venivano afferrate con una presa di forza mentre la fragola

e la ciliegia con una presa di precisione. La posizione della mano destra dei partecipanti era compatibile con il movimento osservato. Sui frutti presentati compariva la scritta “DA” durante la fase di chiusura delle dita o al tempo corrispondente durante la presentazione dei frutti da soli. Non compariva invece nessun cerchio bianco. Nel momento in cui le dita toccavano gli oggetti, cioè 200 ms dopo la comparsa del DA, un singolo impulso di TMS veniva somministrato in corrispondenza della rappresentazione corticale motoria sinistra del muscolo OP, precedentemente individuata. La stessa sequenza temporale di eventi è stata seguita quando i frutti venivano presentati da soli.

In questo come negli altri esperimenti di stimolazione magnetica si è deciso di non includere una condizione di base (*baseline*), a causa della grande variabilità dei PEM che si osserva quando i partecipanti non sono coinvolti in attività cognitive o motorie (vedere Kiers e al., 1993).

Ciascun frutto, sia da solo che con la mano che lo afferra, è stato presentato in modo casuale 8 volte. Complessivamente, quindi, questo esperimento consisteva di 32 prove. Le istruzioni date ai partecipanti erano di osservare attentamente i filmati in modo da poter poi rispondere, al termine dell’esperimento, a una serie di domande relative al tipo di frutto presentato, alle dimensioni (grandi o piccole), ai colori dei frutti, alle caratteristiche del movimento (tipo di afferramento e velocità di esecuzione) quando presente, e alla presenza di scritte. Tutti sono stati in grado di rispondere correttamente al questionario.

Dopo la sessione di stimolazione, ai partecipanti veniva chiesto di afferrare due dei frutti presentati nei filmati, ovvero, una mela con una presa di forza con la mano destra e una fragola con una presa di precisione. Ciascun frutto veniva afferrato 5 volte mentre si registrava contemporaneamente sia l’attività elettromiografica di OP che il movimento, quest’ultimo con una videocamera.

Registrazione dei dati e analisi

È stata acquisita una registrazione elettromiografica continua dal muscolo OP con un convertitore analogico-digitale CED Micro 1401 (Cambridge Electronic Design, Cambridge, UK). Il segnale elettromiografico è stato amplificato (x1000), digitalizzato (frequenza di campionamento: 8 kHz) e filtrato (banda passante: 5-4000 Hz). I muscoli sono stati registrati con un paio di elettrodi di superficie del tipo argento/cloruro di argento, del diametro di 3 mm, con un montaggio del tipo *belly-tendon*. Per ciascuna prova la traccia elettromiografica è stata rettificata e sono state stabilite 2 epoche: la prima epoca definita “*baseline*” durava 100 ms e comprendeva il segnale registrato immediatamente prima della somministrazione dell’impulso magnetico mentre la seconda epoca, definita “MEP”, aveva una durata variabile da 20 a 42 ms (range calcolato su tutti gli esperimenti di TMS) e comprendeva il segnale registrato immediatamente dopo l’impulso magnetico. Dal momento che l’ampiezza del PEM è influenzata anche dal livello dell’attività elettromiografica

basale, è stata fatta un'analisi della covarianza per correggere l'ampiezza del PEM in funzione della corrispondente attività elettromiografica basale in ciascuna prova (Watkins e al., 2003). Facendo questa operazione è stato assunto che l'attività elettromiografica basale nell'epoca MEP sia la medesima che nell'epoca baseline. I valori dei PEM così pesati sono stati quindi trasformati in punti Z sottraendo la media di popolazione dai singoli valori e dividendo questa differenza per la deviazione standard della popolazione. La trasformazione in punti Z (normalizzazione) si è resa necessaria a causa della variabilità elevata dei PEM tra i partecipanti. Riducendo questa variabilità è possibile evidenziare differenze significative nei dati che rischierebbero di andare perdute considerando solo i valori non normalizzati. I valori non normalizzati e i punti Z dei PEM sono stati impiegati nei confronti statistici (ANOVA) dove fattori entro i soggetti erano la Dimensione dei frutti (grandi verso piccoli) e la Interazione (frutto afferrato verso frutto da solo). Nelle ANOVA condotte sui punti Z i gradi di libertà dell'errore sono stati ridotti di 1 (Montgomery, 1984) perché la normalizzazione ha rimosso una sorgente di errore. Per i confronti *post-hoc* è stato utilizzato il test di Newman-Keuls e il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Esperimento 3

Partecipanti

Sono stati arruolati nell'esperimento 10 soggetti volontari (di madrelingua italiana) di età compresa tra i 22 e i 30 anni (5 femmine e 5 maschi), destrimani sulla base del questionario Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971). Nessuno di loro era al corrente delle finalità dell'esperimento.

Stimolazione Magnetica Transcranica

In questo, come nei successivi esperimenti, abbiamo stimolato l'area motoria primaria sinistra della lingua. È stata localizzata individuando prima l'area motoria della mano (vedere esperimento 2) e quindi muovendo il *coil* sia ventralmente che leggermente anteriormente, finché PEM di almeno 50 microV non sono stati registrati dalla lingua in almeno 5 prove su 10. La rMT, calcolata sui partecipanti a tutti gli esperimenti in cui è stata stimolata l'area della lingua (esperimenti 3-6), era in media 49,3 +/- 6,4% dell'intensità massima dello stimolatore. La posizione della rappresentazione corticale motoria della lingua era in media 11,4 +/- 0,6 cm lateralmente e 0,2 +/- 0,4 cm anteriormente rispetto al vertice.

Apparato, stimoli e procedure

L'apparato era il medesimo dell'esperimento 2. Sul monitor venivano presentati brevi filmati (durata: 2680 ms; frequenza di campionamento: 25 fps), analoghi a quelli mostrati nell'esperimento 1. Oltre ai frutti presentati nell'esperimento 2, venivano presentati anche i solidi

geometrici (cubo grande verde, cilindro grande giallo, cubo rosso piccolo, cilindro viola piccolo), sia afferrati che da soli (figura 9, pag. 37). Al fine di indurre una minima attivazione della corteccia motoria della lingua, a prescindere dalla condizione sperimentale, sugli oggetti presentati compariva la scritta DA durante la fase di chiusura delle dita o al tempo corrispondente durante la presentazione degli oggetti da soli. Non compariva invece nessun cerchio bianco. Occorre notare che un aumento dell'eccitabilità dell'area motoria sinistra della lingua è stato osservato 100 ms dopo la presentazione di consonanti (Fadiga e al., 2002) e la lettura automatica di parole avviene entro 300 ms dalla presentazione della parola (Rayner, 1984). Quindi la sillaba DA poteva essere pronunciata in maniera *covert* intorno a 200 ms dopo la sua comparsa. Nel momento in cui le dita toccavano gli oggetti, cioè 200 ms dopo la comparsa del DA, un singolo impulso di TMS veniva somministrato in corrispondenza della rappresentazione corticale motoria sinistra della lingua, precedentemente individuata. La stessa sequenza temporale di eventi è stata seguita quando gli oggetti venivano presentati da soli.

Ciascun oggetto (frutto o solido), sia da solo che con la mano che lo afferra, è stato presentato in modo casuale 8 volte quindi, complessivamente, questo esperimento consisteva di 64 prove. Si è evitato di presentare tutte le condizioni degli esperimenti 3-6 al medesimo campione di soggetti, al fine di evitare possibili variazioni nell'eccitabilità corticale secondarie ad una diminuzione dell'attenzione prestata agli stimoli a causa della lunga durata che avrebbe richiesto tale presentazione.

Le istruzioni date ai partecipanti erano di osservare attentamente i filmati in modo da poter poi rispondere, al termine dell'esperimento, a una serie di domande relative alla categoria (frutti o solidi diversi), alle dimensioni (grandi o piccole), al colore degli stimoli, al tipo di afferramento (presa di forza o presa di precisione) e alla velocità del movimento osservato (elevata o bassa) e alla presenza di scritte. Tutti sono stati in grado di completare il suddetto questionario correttamente.

Registrazione dei dati e analisi

È stata acquisita una registrazione elettromiografica continua dalla lingua. I muscoli della lingua sono stati registrati con un paio di elettrodi di superficie del tipo argento/cloruro di argento, del diametro di 3 mm, fissati ad una molletta metallica amagnetica, con l'elettrodo registrante sulla superficie dorsale e quello di riferimento sulla superficie ventrale della lingua in posizione mediana, a circa 2 cm dalla punta.

I valori non normalizzati e i punti Z dei PEM sono stati impiegati nei confronti statistici (ANOVA) dove fattori entro i soggetti erano la Categoria degli oggetti (solidi verso frutti), la Dimensione degli oggetti (grandi verso piccoli) e la Interazione (oggetto afferrato verso oggetto da

solo). Per i confronti *post-hoc* è stato utilizzato il test di Newman-Keuls e il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Esperimento 4

Partecipanti

Sono stati arruolati 12 soggetti volontari (di madrelingua italiana) di età compresa tra i 25 e i 27 anni (5 femmine e 7 maschi), destrimani sulla base del questionario Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971). Nessuno di loro era al corrente delle finalità dell'esperimento.

Apparato, stimoli e procedure

L'apparato era il medesimo degli esperimenti 2-3. Sul monitor venivano presentati brevi filmati (durata: 2680 ms; frequenza di campionamento: 25 fps), che mostravano pantomime della presa di forza e della presa di precisione, realizzate con la mano destra (figura 10, pag. 40). Il tempo di movimento era di 440 ms per la presa di forza e 940 ms per la presa di precisione. La direzione del movimento e la sequenza temporale degli eventi era la medesima degli esperimenti 2-3. In questo esperimento sono stati introdotti dei *catch trial* in cui veniva presentata solo la scritta DA. La corteccia motoria della lingua veniva stimolata 200 ms dopo la comparsa della scritta DA, come negli esperimenti 2-3. Ciascuna pantomima è stata presentata 8 volte per cui questo esperimento consisteva complessivamente di 24 prove (16 pantomime di movimento e 8 *catch trial*).

Le istruzioni date ai partecipanti erano di osservare attentamente i filmati in modo da poter poi rispondere, al termine dell'esperimento, a una serie di domande relative al tipo di afferramento mimato (presa di forza o presa di precisione), alla velocità dell'effettore (elevata o bassa) e alla presenza di scritte. Tutti sono stati in grado di rispondere correttamente al questionario.

Registrazione dei dati e analisi

È stata acquisita una registrazione elettromiografica continua dalla lingua come nell'esperimento 3. I valori non normalizzati e i punti Z dei PEM sono stati impiegati nei confronti statistici (ANOVA) dove fattore entro i soggetti era il Tipo di Afferramento (presa di forza verso presa di precisione). Il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Esperimento 5

Partecipanti

Sono stati arruolati 14 soggetti volontari (di madrelingua italiana) di età compresa tra i 24 e i 35 anni (4 femmine e 10 maschi), destrimani sulla base del questionario Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971). Nessuno di loro era al corrente delle finalità dell'esperimento.

Apparato, stimoli e procedure

L'apparato era il medesimo degli esperimenti 2-4. Sul monitor venivano presentati brevi filmati (durata: 2680 ms; frequenza di campionamento: 25 fps), che mostravano gli stessi frutti e solidi presentati negli esperimenti 2-3, ma senza che venisse presentato alcun movimento di afferramento (figura 11, pag. 41). Anche qui, come negli esperimenti 3-4, la corteccia motoria della lingua veniva stimolata 200 ms dopo la comparsa della scritta DA.

Ciascun oggetto (frutto o solido) è stato presentato in modo casuale 8 volte quindi, complessivamente, l'esperimento consisteva di 32 prove. Le istruzioni date ai partecipanti erano di osservare attentamente i filmati in modo da poter poi rispondere, al termine dell'esperimento, a una serie di domande relative alla categoria (frutti o solidi), alle dimensioni (grandi o piccole), ai colori degli oggetti presentati e alla presenza di scritte. Tutti sono stati in grado di rispondere correttamente al questionario.

Registrazione dei dati e analisi

È stata acquisita una registrazione elettromiografica continua dalla lingua come negli esperimenti 3-4. I valori non normalizzati e i punti Z dei PEM sono stati impiegati nei confronti statistici (ANOVA) dove fattori entro i soggetti erano la Categoria degli oggetti (solidi verso frutti) e la Dimensione degli oggetti (grandi verso piccoli). Per i confronti *post-hoc* è stato utilizzato il test di Newman-Keuls e il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Esperimento 6

Partecipanti

Sono stati arruolati nell'esperimento 9 soggetti volontari (di madrelingua italiana) di età compresa tra i 26 e i 33 anni (4 femmine e 5 maschi) e destrimani, sulla base del questionario Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971). Nessuno di loro era al corrente delle finalità dello studio.

Apparato, stimoli e procedure

L'apparato era il medesimo degli esperimenti 2-5. Sul monitor venivano presentati brevi filmati (durata: 2680 ms; frequenza di campionamento: 25 fps), che mostravano un piede destro che raggiungeva e bloccava una palla da calcetto o una pallina da tennis, oppure gli stessi oggetti da soli (figura 12, pag. 42). La scritta DA compariva sugli oggetti con la medesima tempistica dei filmati 2-5, cioè 200 ms prima del contatto tra effetto ed oggetto oppure al tempo corrispondente durante la presentazione degli oggetti da soli. Come negli esperimenti 3-5, la corteccia motoria della lingua veniva stimolata 200 ms dopo la comparsa della scritta DA.

Ciascun oggetto (palla da calcetto o da tennis), sia da solo che con il piede con cui interagisce, è stato presentato in modo casuale 8 volte quindi complessivamente l'esperimento consisteva di 32 prove. Le istruzioni date ai partecipanti erano di osservare attentamente i filmati in

modo da poter poi rispondere, al termine dell'esperimento, a una serie di domande relative al tipo di palla presentato, alle dimensioni (grandi o piccole), alla presenza di scritte e al tipo di movimento e alla sua velocità di esecuzione. Tutti sono stati in grado di rispondere correttamente al questionario.

Registrazione dei dati e analisi

È stata acquisita una registrazione elettromiografica continua dalla lingua come negli esperimenti 3-5. I valori non normalizzati e i punti Z dei PEM sono stati impiegati nei confronti statistici (ANOVA) dove fattori entro i soggetti erano la Dimensione degli oggetti (grande verso piccola) e l'Interazione (oggetto bloccato dal piede verso oggetto da solo). Per i confronti *post-hoc* è stato utilizzato il test di Newman-Keuls e il livello di significatività è stato fissato a $P < 0,05$.

Risultati

Esperimento 1 (comportamentale)

Confronto tra le interazioni della mano e del piede con gli oggetti

Analisi della voce

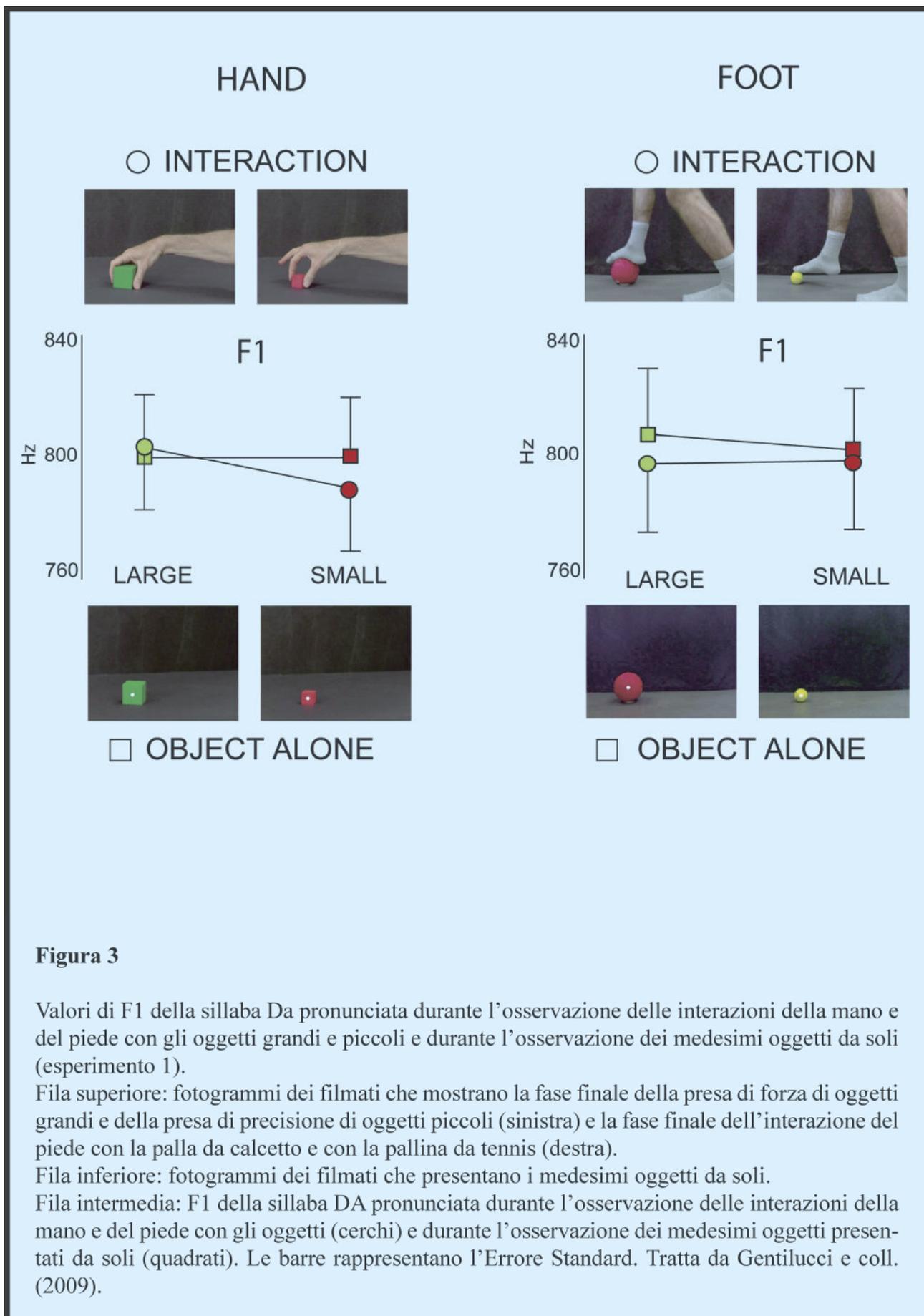
Per quanto riguarda la F1 è stata osservata un'interazione significativa tra Effettore, Interazione e Dimensione degli oggetti ($F(1,14)=22,2$, $P < 0,0005$). I confronti *post-hoc* mostrano che F1 è modulata dall'osservazione del tipo di afferramento essendo maggiore in presenza di una presa di forza rispetto a una presa di precisione. Al contrario, il tipo di interazione col piede e la dimensione degli oggetti non modulava F1. Sia l'osservazione della presa di forza che degli oggetti da soli e delle interazioni del piede induceva gli stessi effetti su F1 (figura 3, pag. 29).

L'intonazione della voce era influenzata dall'interazione tra Effettore e Interazione ($F(1,14)=4,8$, $P < 0,05$). I confronti *post-hoc* hanno mostrato che le interazioni del piede inducevano una significativa diminuzione del parametro (176,8 verso 171,3 Hz), ma non quelle della mano ($P=0,08$, 175,3 verso 173,0 Hz). L'intonazione poi non era influenzata dal tipo di interazione del piede.

L'intensità della voce è risultata influenzata in modo significativo dall'interazione tra Interazione e Dimensione degli oggetti ($F(1,14)=5,4$, $P < 0,05$). L'intensità diminuiva col diminuire delle dimensioni degli oggetti (63,5 verso 62,8 db), e questo effetto era maggiore nelle condizioni di interazione. Invece l'intensità non era modulata dall'effettore e dal tipo di interazione.

Analisi della cinematica delle labbra

Il tempo all'inizio dell'apertura delle labbra è stato influenzato dall'interazione tra Effettore, Interazione e Dimensione dell'oggetto ($F(1,8)=20,2$, $P < 0,0005$). Dai confronti *post-hoc* è emerso che quando veniva osservata la mano o il piede che interagiva con gli oggetti i partecipanti

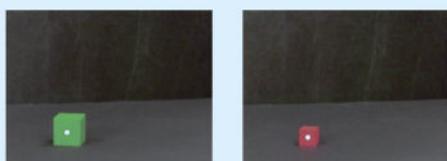
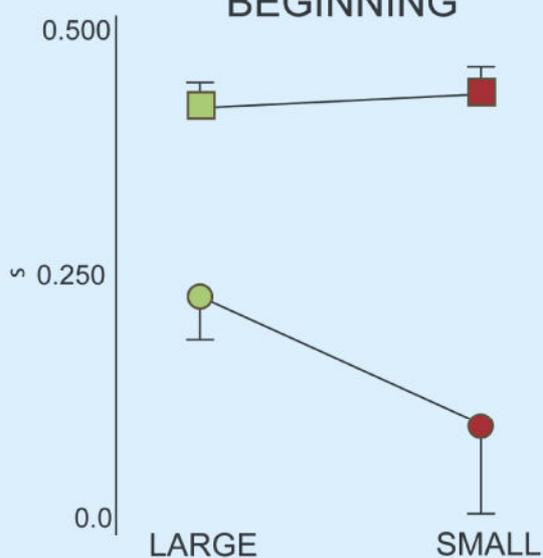


HAND

○ INTERACTION



TIME TO LIP OPENING
BEGINNING



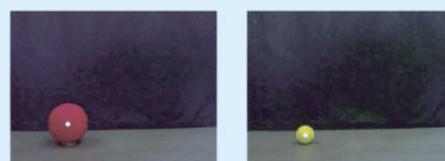
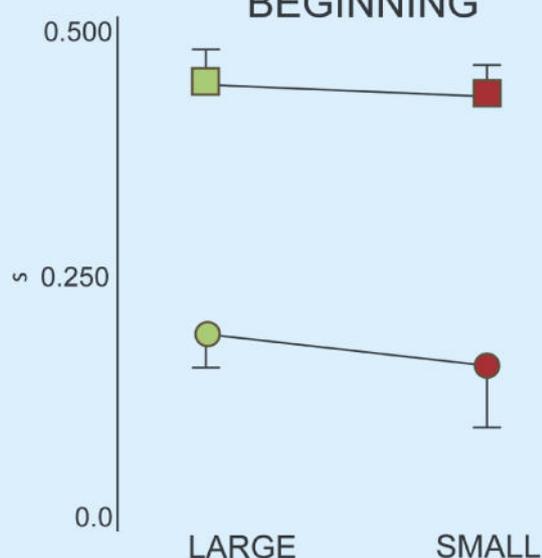
□ OBJECT ALONE

FOOT

○ INTERACTION



TIME TO LIP OPENING
BEGINNING



□ OBJECT ALONE

Figura 4

Valori del tempo all'inizio dell'apertura delle labbra durante la pronuncia della sillaba DA e l'osservazione delle interazioni della mano e del piede con gli oggetti grandi e piccoli oppure l'osservazione dei medesimi oggetti presentati da soli (esperimento 1).

Fila centrale: tempo all'inizio dell'apertura delle labbra durante la pronuncia della sillaba DA e l'osservazione delle interazione della mano (sinistra) e del piede (destra) con gli oggetti (cerchi) oppure l'osservazione degli stessi oggetti presentati da soli (quadrati). Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

rispondevano in anticipo rispetto a quando venivano presentati gli oggetti da soli (figura 4, pag. 30). Questo indica che il contatto effettore-oggetto poteva essere previsto in anticipo osservando l'effettore in movimento. Il tipo di afferramento, ma non il tipo di interazione del piede, modulava questo parametro anche se le differenze in termini di cinematica tra i due diversi movimenti del piede presentati erano simili a quelle esistenti fra i due diversi movimenti della mano. Il tempo all'inizio dell'apertura delle labbra era minore quando si osservava una presa di precisione rispetto a una presa di forza. Inoltre, il tempo all'inizio dell'apertura delle labbra durante l'osservazione delle interazioni del piede era significativamente minore di quello durante l'osservazione della presa di forza e significativamente maggiore di quello durante l'osservazione della presa di precisione (figura 4, pag. 30).

Il picco di velocità di apertura delle labbra era influenzato dalla Dimensione dell'oggetto ($F(1,8)=7,2$, $P<0,05$) e diminuiva col diminuire di questa (108,6 verso 98,8 mm/s). Inoltre il picco di velocità di apertura delle labbra era influenzato dall'interazione tra Effettore e Interazione ($F(1,8)=5,0$, $P=0,05$). Diminuiva significativamente quando il piede (113,1 verso 90,5 mm/s) ma non la mano (109,3 verso 102,0 mm/s) interagiva con gli oggetti.

Il tempo alla massima apertura delle labbra aumentava ($F(1,8)=6,1$, $P<0,05$, 0,196 verso 0,243 s) e la massima apertura delle labbra diminuiva ($F(1,8)=6,6$, $P<0,05$, 46,8 verso 44,0 mm) nelle condizioni di interazione effettore-oggetto.

Confronto tra le interazioni della mano con i frutti e con i solidi

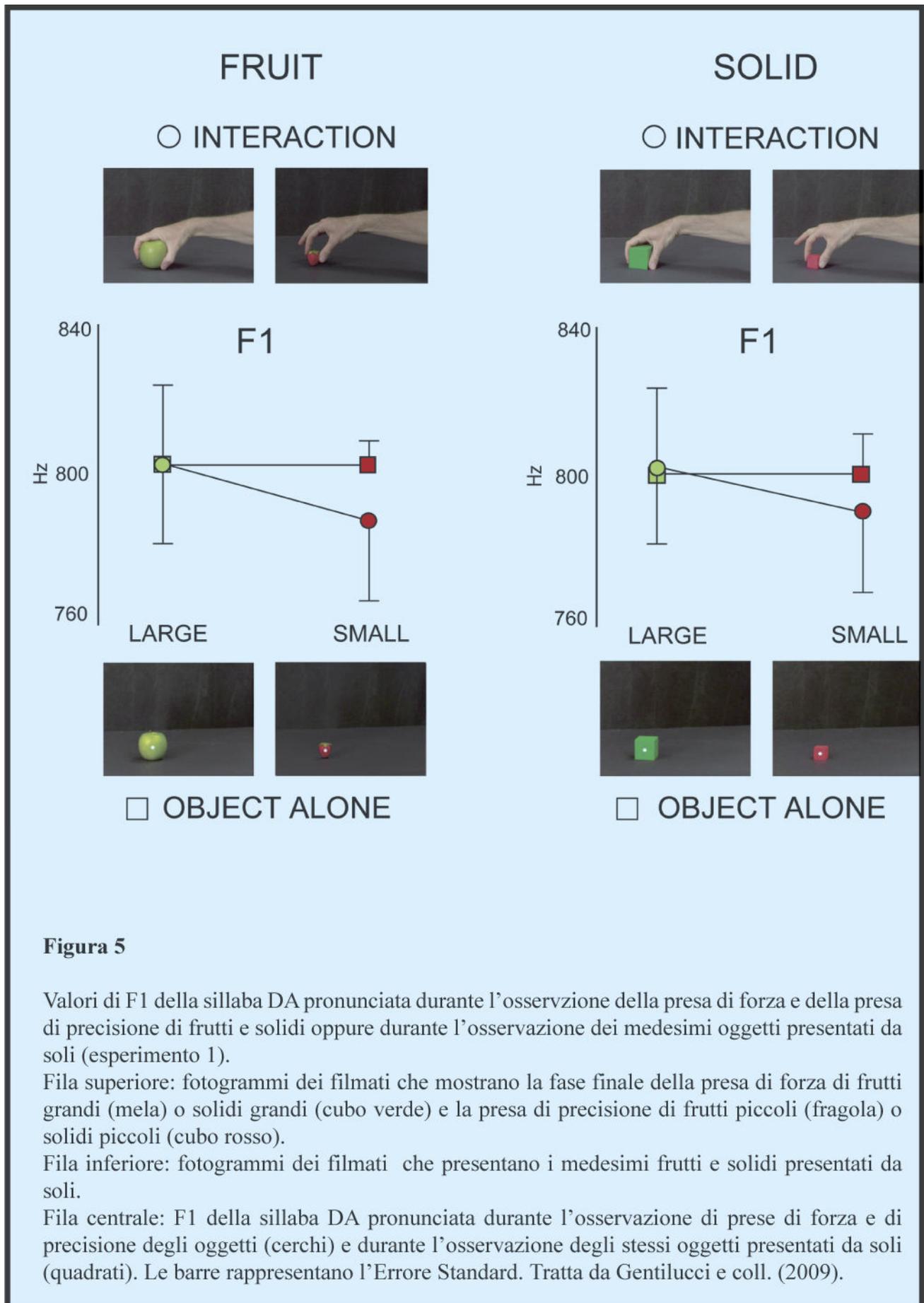
Analisi della voce

F1 era influenzata dall'interazione tra Interazione e Dimensione degli oggetti ($F(1,14)=25,1$, $P<0,0005$) e diminuiva significativamente durante l'osservazione di una presa di precisione rispetto a quella di forza (figura 5, pag. 32). Non è stata osservata invece nessuna differenza tra frutti e solidi (confronti *post-hoc*, figura 5).

L'intonazione del suono della vocale ($F(1,14)=6,7$, $P<0,05$, 174,7 verso 173,4 Hz) e la sua intensità ($F(1,14)=12,1$, $P<0,005$, 63,7 verso 62,9 dB) diminuivano col diminuire delle dimensioni degli oggetti.

Analisi della cinematica delle labbra

Il tempo all'inizio dell'apertura delle labbra era influenzato dall'interazione tra Interazione e Dimensione degli oggetti ($F(1,8)=23,1$, $P<0,0005$). I confronti *post-hoc* hanno mostrato che diminuiva quando la mano interagiva con gli oggetti e la risposta era più rapida quando veniva osservata una presa di precisione (figura 6, pag. 33). Era influenzato anche dall'interazione tra Interazione e Categoria degli oggetti ($F(1,8)=21,9$, $P<0,0005$) con una risposta più rapida quando i partecipanti osservavano le interazioni con i frutti (figura 6).



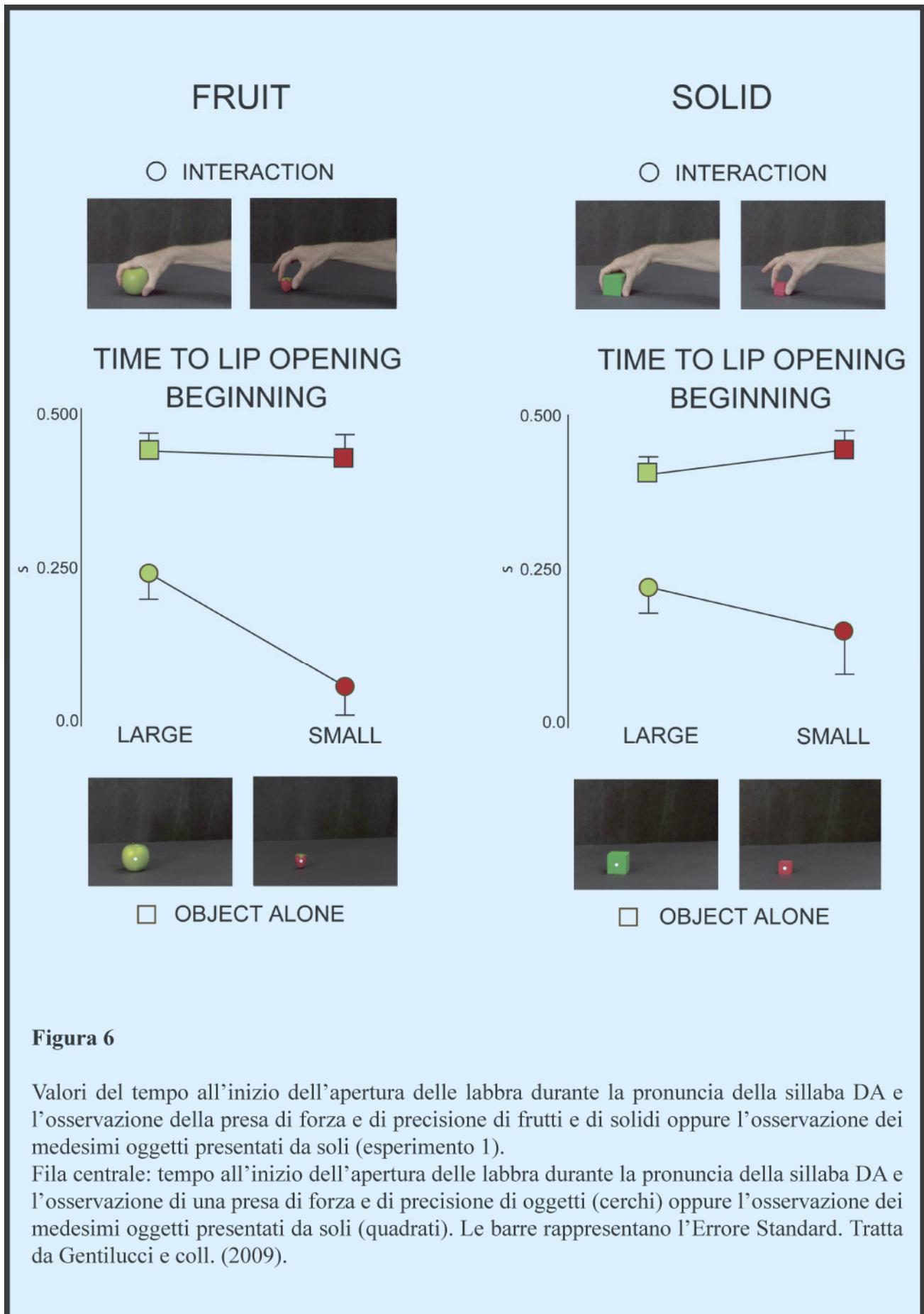


Figura 6

Valori del tempo all'inizio dell'apertura delle labbra durante la pronuncia della sillaba DA e l'osservazione della presa di forza e di precisione di frutti e di solidi oppure l'osservazione dei medesimi oggetti presentati da soli (esperimento 1).

Fila centrale: tempo all'inizio dell'apertura delle labbra durante la pronuncia della sillaba DA e l'osservazione di una presa di forza e di precisione di oggetti (cerchi) oppure l'osservazione dei medesimi oggetti presentati da soli (quadrati). Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

Il picco di velocità di apertura delle labbra diminuiva col diminuire della dimensione degli oggetti ($F(1,8)=8,4$, $P<0,05$, 110,7 verso 100,5 mm/s) e quando venivano presentati i solidi ($F(1,8)=8,6$, $P<0,05$, 107,9 verso 103,4 mm/s).

Per quanto riguarda la massima apertura delle labbra si è osservata un'interazione significativa tra Interazione effetto-oggetto e Dimensione ($F(1,8)=18,7$, $P<0,005$). Le analisi *post-hoc* hanno mostrato che la massima apertura diminuiva col diminuire delle dimensioni degli oggetti quando la mano interagiva con essi (oggetto afferrato: 44,5 verso 43,7 mm per la presa di forza e quella di precisione, rispettivamente; oggetto da solo: 46,9 verso 46,6 mm per l'oggetto grande e quello piccolo, rispettivamente).

Esperimenti di stimolazione magnetica transcranica

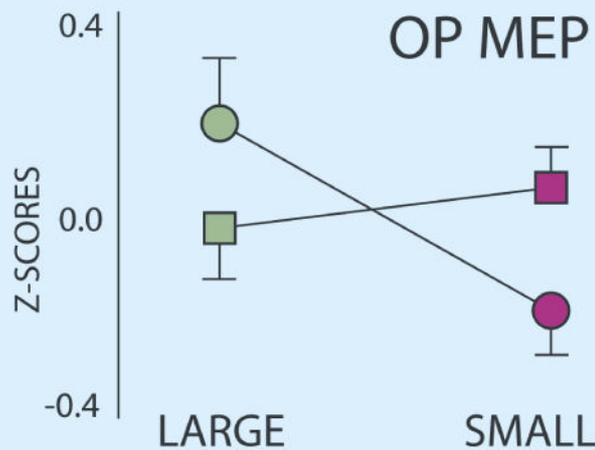
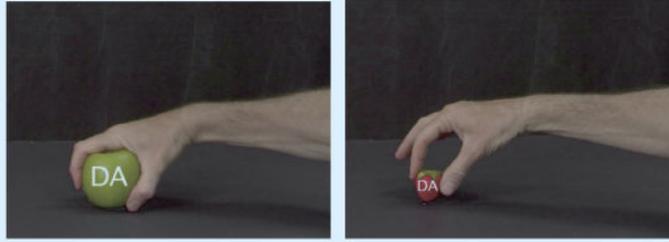
Esperimento 2

L'esperimento 2 intendeva verificare se l'osservazione di un afferramento influenzava i PEM del muscolo OP, ottenuti per stimolazione magnetica dell'area motoria della mano a sinistra, in maniera congruente con il tipo di afferramento osservato e la sua cinematica. I partecipanti osservavano la presa di forza di frutti grandi e la presa di precisione di frutti piccoli, oppure i medesimi frutti presentati da soli. Nella figura 7, nella pagina successiva, si vede che i PEM di OP erano più ampi quando si osservava una presa di forza piuttosto che una presa di precisione. Questo non si è verificato quando i partecipanti osservavano i frutti grandi e piccoli presentati da soli (interazione significativa tra Interazione effetto-oggetto e Dimensione dei frutti; punti Z: $F(1,14)=8,96$, $P<0,01$, figura 7, dati non normalizzati: $F(1,15)=5,0$, $P=0,05$, presa di forza: 143,7 mV, presa di precisione: 129,0 mV, frutti grandi da soli: 133,5 mV, frutti piccoli da soli: 140,0 mV, confronti *post-hoc* $P<0,05$). Nella sessione di afferramento attivo dei frutti da parte dei partecipanti, l'ispezione delle tracce elettromiografiche del muscolo OP ha mostrato che l'attività muscolare di tutti i soggetti era maggiore per la mela (presa di forza) rispetto alla fragola (presa di precisione), sia durante la fase di chiusura delle dita che durante la fase successiva in cui l'oggetto è tenuto fra le dita (figura 8, pag. 36). Questo risultato conferma che i comandi di chiusura per il muscolo OP sono più forti quando si afferra una mela rispetto a una fragola.

Esperimento 3

Il terzo esperimento era volto a determinare se effetti simili a quelli osservati nei muscoli della mano nell'esperimento 2 si osservano anche a livello della lingua quando si stimola l'area motoria della bocca. Gli oggetti afferrati o presentati da soli erano frutti e solidi (esempi in figura 9, pag. 37). I risultati indicano che i PEM della lingua erano influenzati dalle dimensioni degli oggetti (punti Z: $F(1,8)=10,82$, $P<0,01$; dati non normalizzati: $F(1,9)=9,36$, $P<0,01$), essendo maggiori

○ GRASP OF FRUIT



□ FRUIT

Figura 7

Valori del Potenziale Evocato Motorio (PEM) del muscolo Opponente del Pollice (OP) in seguito a Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS) dell'area motoria della mano durante l'osservazione della presa di forza di frutti grandi e la presa di precisione di frutti piccoli oppure durante l'osservazione dei medesimi frutti presentati da soli (esperimento 2).

Fila superiore: fotogrammi dei filmati che mostrano la fase finale della presa di forza di un frutto grande (mela) e della presa di precisione di un frutto piccolo (fragola).

Fila inferiore: fotogrammi dei filmati che presentano i medesimi frutti da soli.

Fila centrale: PEM di OP dopo singolo impulso di TMS sulla corteccia motoria della mano durante l'osservazione di una presa di forza e di una presa di precisione di frutti (cerchi) oppure l'osservazione dei medesimi frutti da soli (quadrati). Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

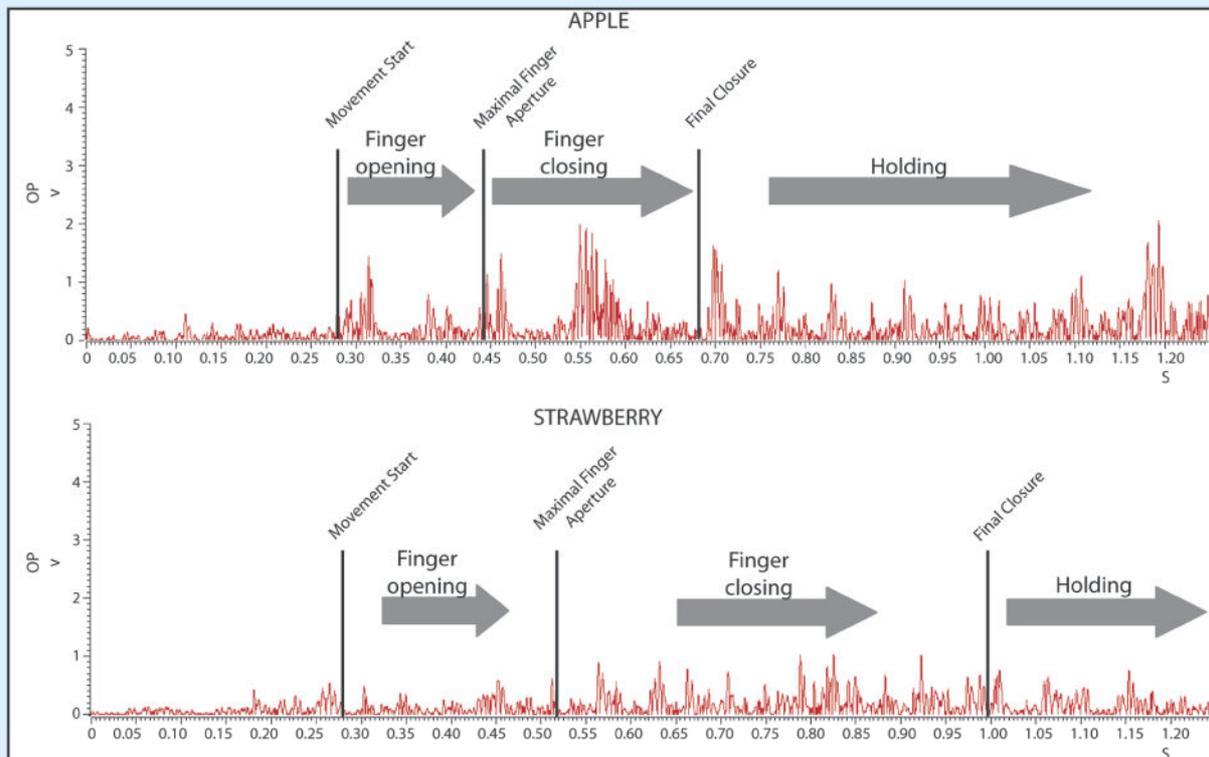


Figura 8

Esempi dell'attività elettromiografica (tracce rettificate) del muscolo Opponente del Pollice (OP) destro quando i partecipanti all'esperienza 2 afferravano una mela (oggetto grande) con una presa di forza (traccia superiore) e una fragola (oggetto piccolo) con una presa di precisione (traccia inferiore). Le frecce grigie indicano le varie fasi del movimento. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

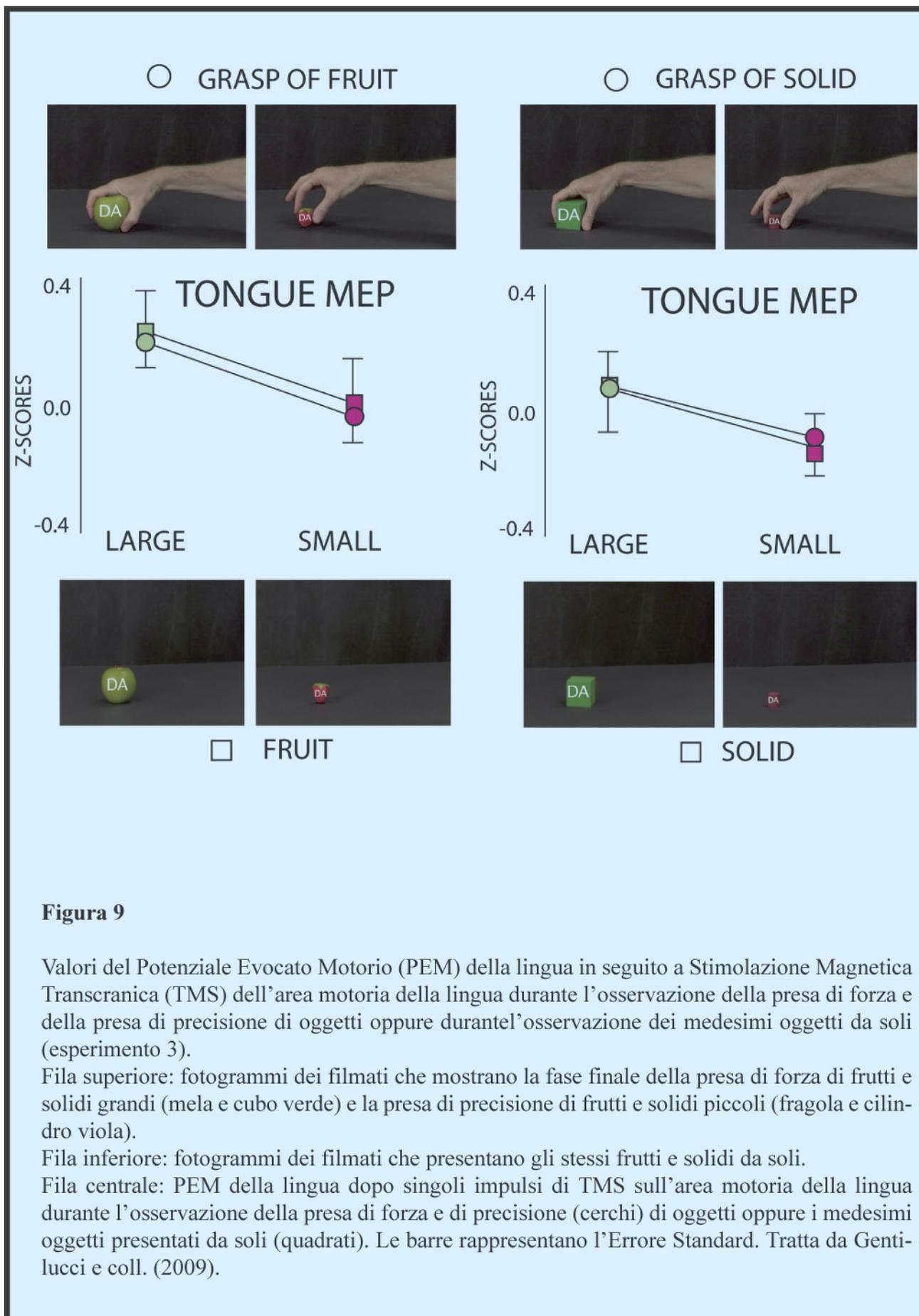


Figura 9

Valori del Potenziale Evocato Motorio (PEM) della lingua in seguito a Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS) dell'area motoria della lingua durante l'osservazione della presa di forza e della presa di precisione di oggetti oppure durante l'osservazione dei medesimi oggetti da soli (esperimento 3).

Fila superiore: fotogrammi dei filmati che mostrano la fase finale della presa di forza di frutti e solidi grandi (mela e cubo verde) e la presa di precisione di frutti e solidi piccoli (fragola e cilindro viola).

Fila inferiore: fotogrammi dei filmati che presentano gli stessi frutti e solidi da soli.

Fila centrale: PEM della lingua dopo singoli impulsi di TMS sull'area motoria della lingua durante l'osservazione della presa di forza e di precisione (cerchi) di oggetti oppure i medesimi oggetti presentati da soli (quadrati). Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

quando si presentava un oggetto grande piuttosto che uno piccolo, sia afferrato che presentato da solo (Figura 9, pag. 37; dati non normalizzati, oggetti grandi: 37,8 mV, oggetti piccoli: 35,7 mV). Inoltre la presentazione di frutti induceva un aumento dei PEM della lingua rispetto agli effetti della presentazione di solidi (punti Z: $F(1,8)=9,23$, $P<0,01$, Figura 9; dati non normalizzati: $F(1,9)=4,10$, $P=0,07$, frutti: 37,3 mV, solidi: 35,7 mV).

Esperimenti 4 e 5

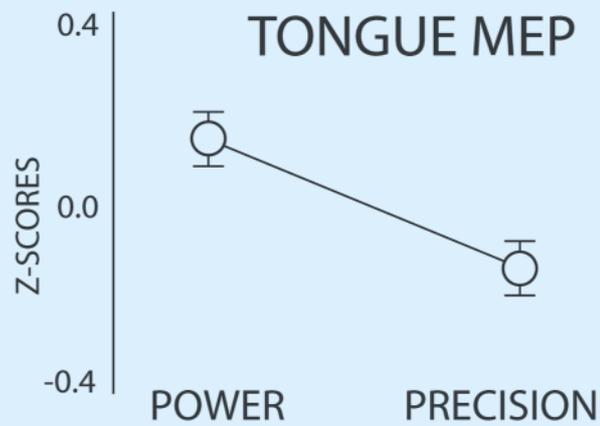
Nell'esperimento 3 anche la semplice presentazione di oggetti da soli modula l'ampiezza del PEM, con una facilitazione per l'oggetto di dimensioni maggiori. L'eccitabilità dell'area motoria della lingua aumenta, dunque, in funzione della dimensione dell'oggetto presentato ma sembra non risentire della osservazione di un gesto di afferramento. Questo risultato appare in contraddizione con il dato di una facilitazione del PEM solo nella condizione di osservazione di un afferramento di frutti grandi piuttosto che piccoli, che abbiamo visto nell'esperimento 2. Questa divergenza si può spiegare in due modi: o c'è un effetto diretto degli oggetti sulla bocca, tale per cui l'osservazione di frutti o solidi attiva sottosoglia un atto di manipolazione con la bocca, oppure i partecipanti potrebbero, nel momento in cui osservano un oggetto da solo, attivare automaticamente un afferramento sotto-soglia di quell'oggetto, poiché i filmati di afferramento e quelli con gli oggetti da soli sono alternati fra loro casualmente. La facilitazione dei frutti (oggetti commestibili) rispetto ai solidi depone per la prima spiegazione mentre la seconda ipotesi prevede che i partecipanti attivino un *affordance* per gli oggetti sulla base delle precedenti interazioni mano-oggetto osservate. Questi *affordance* evocherebbero comandi di afferramento (Barbieri e al., 2007; Gentilucci, 2002; 2003b; Tucker & Ellis, 1998) che sono inviati anche alla bocca, secondo l'ipotesi dell'esistenza di un sistema di doppi comandi per la mano e per la bocca. Al fine di chiarire quale delle due ipotesi sia corretta sono stati condotti due esperimenti di controllo, ovvero gli esperimenti 4 e 5. Nell'esperimento 4 sono state presentate pantomime dell'afferramento con una presa di forza e con una presa di precisione, mentre nell'esperimento 5 sono stati presentati gli stessi oggetti dell'esperimento 3 senza però presentarne anche l'afferramento. In entrambi gli esperimenti è stata stimolata la corteccia motoria della lingua. In caso gli oggetti presentati attivino sottosoglia un atto di manipolazione con la bocca il risultato atteso era di una modulazione del PEM nell'esperimento 5 ma non nell'esperimento 4 dove non viene presentato alcun oggetto. Se invece nell'esperimento 3 la facilitazione per gli oggetti grandi presentati da soli è secondaria all'attivazione di un *affordance* allora nell'esperimento 5, dove i soggetti non vedono mai un gesto di afferramento è lecito aspettarsi un'assenza di modulazione.

I risultati dell'esperimento 4 mostrano che l'osservazione di pantomime di una presa di forza facilita i PEM della lingua rispetto alla pantomima della presa di precisione (punti Z:

$F(1,10)=11,24$, $P<0,01$, Figura 10, pag. 40; dati non normalizzati: $F(1,11)=10,84$, $P<0,01$, presa di forza: 27,9 mV, presa di precisione: 25,6 mV). Invece la dimensione degli oggetti presentati da soli nell'esperimento 5 non ha alcun effetto sui PEM della lingua (punti Z: $F(1,12)=0,09$, $P=0,8$, Figura 11, pag. 41; dati non normalizzati: $F(1,13)=0,22$, $P=0,6$, oggetti grandi: 36,0 mV, oggetti piccoli: 35,1 mV), e anche l'interazione tra Dimensione dell'oggetto e Categoria non era significativa (punti Z: $F(1,12)=1,26$, $P=0,3$, Figura 11; dati non normalizzati: $F(1,13)=0,58$, $P=0,5$, frutti grandi: 35,5 mV, frutti piccoli: 35,6 mV, solidi grandi: 36,4 mV, solidi piccoli: 34,6 mV).

Esperimento 6

Al quesito se questo sistema di doppi comandi sia specifico per la mano e la bocca o, invece, anche altre coppie di effettori biologici siano coordinate in maniera analoga dal punto di vista motorio, risponde l'esperimento di osservazione del blocco di una palla col piede. La figura 12, a pagina 42, mostra come non vi siano effetti significativi sui PEM della lingua in seguito all'osservazione di un piede che interagisce in modi diversi con palle di due diverse dimensioni. La Dimensione degli oggetti (punti Z: $F(1,7)=1,47$, $P=0,3$, dati non normalizzati: $F(1,8)=2,20$, $P=0,2$, oggetto grande: 37,2 mV, oggetto piccolo: 42,4 mV), l'Interazione effettore-oggetto (punti Z: $F(1,7)=1,62$, $P=0,2$, dati non normalizzati: $F(1,8)=2,7$, $P=0,1$, interazione con l'oggetto: 42,6 mV, oggetto da solo: 36,9 mV) e la loro interazione (punti Z: $F(1,7)=0,01$, $P=1,0$, Figura 12, dati non normalizzati: $F(1,8)=0,48$, $P=0,5$, interazione con l'oggetto grande: 39,5 mV, interazione con l'oggetto piccolo: 45,7 mV, oggetto grande da solo: 34,9 mV, oggetto piccolo da solo: 39,0 mV) non erano significative.



○ TYPE OF GRASP

Figura 10

Valori del Potenziale Evocato Motorio (PEM) della lingua in seguito a Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS) dell'area motoria della lingua durante l'osservazione di pantomime di una presa di forza e di una presa di precisione (esperimento 4).

Fila inferiore: fotogrammi dei filmati che mostrano la fase finale di una pantomima di una presa di forza e di una presa di precisione.

Fila superiore: PEM della lingua dopo singolo impulso di TMS sull'area motoria della lingua mentre si osservano pantomime dei due tipi di afferramento. Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

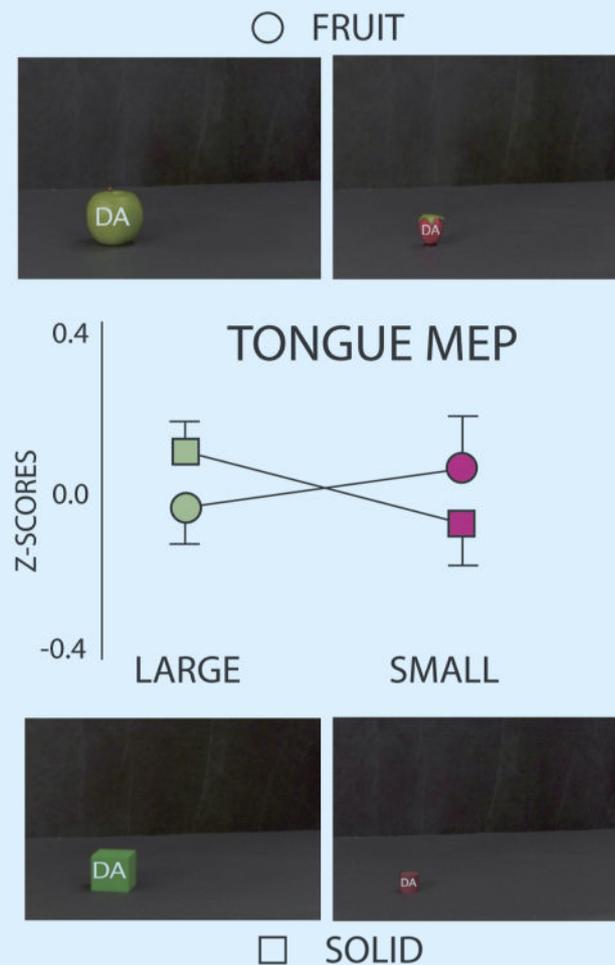


Figura 11

Valori del Potenziale Evocato Motorio (PEM) della lingua in seguito a Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS) dell'area motoria della lingua durante l'osservazione di frutti e solidi (esperimento 5).

Fila superiore e inferiore: fotogrammi dei filmati che presentano frutti grandi e piccoli (mela e fragola) e solidi grandi e piccoli (cubo verde e cilindro viola).

Fila centrale: PEM della lingua dopo singolo impulso di TMS sull'area motoria della lingua durante l'osservazione di frutti (cerchi) e solidi (quadrati). Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

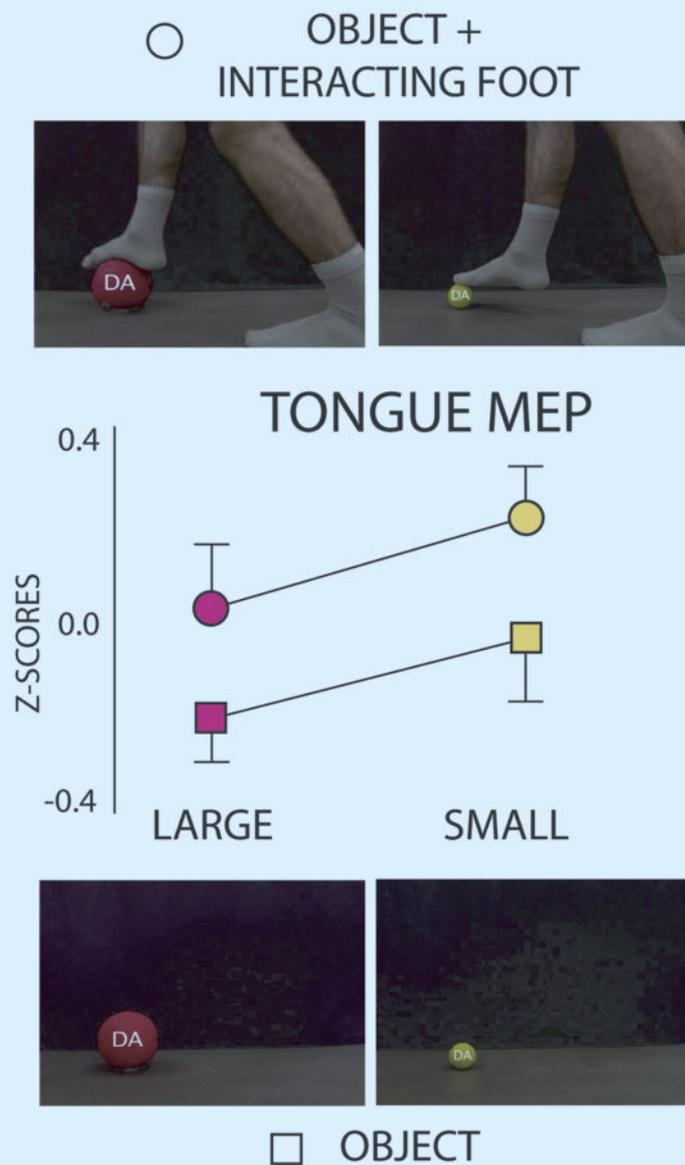


Figura 12

Valori del Potenziale Evocato Motorio (PEM) della lingua in seguito a Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS) dell'area motoria della lingua durante l'osservazione di un piede che interagisce con oggetti e l'osservazione dei medesimi oggetti presentati da soli (esperimento 6).

Fila superiore: fotogrammi dei filmati che mostrano la fase finale del movimento di un piede che si avvicina e blocca un oggetto grande (palla da calcetto) oppure un oggetto piccolo (pallina da tennis).

Fila inferiore: fotogrammi dei filmati che mostrano gli stessi oggetti presentati da soli.

Fila centrale: PEM della lingua dopo singolo impulso di TMS sull'area motoria della lingua durante l'osservazione di un piede che interagisce con gli oggetti (cerchi) o durante l'osservazione dei medesimi oggetti presentati da soli (quadrati). Le barre rappresentano l'Errore Standard. Tratta da Gentilucci e coll. (2009).

Discussione

Esperimento comportamentale

L'osservazione dei due tipi di afferramento manuale ha influenzato la formante 1 mentre l'osservazione dei due tipi di interazione piede-oggetto e dei vari oggetti di diverse dimensioni presentati da soli non ha prodotto alcuna modulazione significativa di questo parametro. In particolare la F1 diminuiva quando si osservava una presa di precisione rispetto a una presa di forza. L'osservazione di una presa di forza, invece, esercitava su F1 effetti analoghi all'osservazione delle due interazioni piede-oggetto e degli oggetti da soli (figura 3, pag. 29). L'ipotesi avanzata sulla base degli studi precedenti di Gentilucci e collaboratori (Gentilucci, 2003a; Gentilucci e al., 2004a) prevede che il particolare tipo di afferramento osservato attivi nell'osservatore un congruente programma motorio di afferramento con la mano che verrebbe trasferito anche alla bocca. In questo modo, il suddetto trasferimento causerebbe modificazioni nella postura interna della bocca e dunque di F1 quando vengono pronunciate simultaneamente delle sillabe. Nello specifico, dal momento che una presa di forza è caratterizzata da un'apertura delle dita maggiore e da un movimento di apertura e chiusura di queste più rapido dovrebbe indurre un'apertura della bocca più grande e un aumento di F1 maggiore. Al contrario, una presa di precisione, dove invece l'apertura delle dita è più piccola e il movimento di queste è più lento, dovrebbe indurre un'apertura della bocca più piccola e quindi una F1 minore. È noto infatti che F1 dipende dal grado di apertura della bocca interna (Leoni & Maturi, 2002). Come riportato nella sezione che introduce questo studio, è stato anche ipotizzato che l'osservazione di tipi diversi di interazione piede-oggetto e di oggetti da soli, cioè né afferrati da una mano né bloccati da un piede, non produca effetti simili a quelli dell'osservazione di gesti di afferramento con la mano. Tutte le ipotesi sperimentali succitate sono state dunque confermate dai risultati ottenuti. Tuttavia la F1 della sillaba pronunciata durante l'osservazione della mano era, in media, minore di quella trovata dopo osservazione delle interazioni piede-oggetto e degli oggetti da soli. Questo comportamento si può spiegare considerando che la pronuncia della sillaba DA da parte dei partecipanti avveniva in maniera coordinata, sotto il profilo temporale, con la simultanea imitazione *covert* dell'afferramento manuale osservato. Ora, il rilascio dell'occlusione durante la pronuncia di sillabe è di solito più rapido del movimento di apertura/chiusura delle dita nell'afferramento. Di conseguenza il movimento della lingua rallenterebbe durante l'imitazione *covert* dell'afferramento (e specialmente di una presa di precisione). Questo produrrebbe aperture della bocca interna più piccole e quindi una F1 minore.

Il fatto che gli oggetti afferrati fossero commestibili o meno non ha influenzato né F1 né gli altri parametri della voce. Tuttavia poiché l'apertura delle labbra era più veloce quando venivano presentati i frutti è probabile che gli oggetti commestibili esercitino un effetto facilitatorio sull'attivazione della bocca. La presentazione di frutti dunque metterebbe in moto una serie di comandi motori funzionali all'ingestione di cibo i quali, a loro volta, faciliterebbero i movimenti della bocca, anche se non quelli specificamente correlati al linguaggio parlato.

L'intonazione e l'intensità della voce sono state influenzate dalle dimensioni degli oggetti, a prescindere che venisse presentato un effettore o meno. Questi parametri aumentavano durante l'osservazione degli oggetti grandi rispetto ai piccoli. In uno studio precedente (Gentilucci e al., 2004b), è stato trovato un aumento di intonazione e intensità durante la presentazione di una presa di forza rispetto a una presa di precisione. Siccome in quel lavoro non è stato fatto alcun controllo sugli oggetti da soli, è probabile che gli effetti fossero dovuti semplicemente alle dimensioni degli oggetti presentati.

Alcuni parametri della cinematica delle labbra erano maggiori quando venivano osservati gli oggetti grandi rispetto a quelli piccoli presentati da soli. Il fatto, invece, che il tipo di afferramento abbia influenzato solo in maniera incostante la cinematica delle labbra fa pensare che quelle modificazioni nella postura della bocca che sono responsabili degli effetti su F1 in funzione del tipo di afferramento osservato riguardassero essenzialmente la bocca interna. Un'ipotesi plausibile è che sia stato modulato il movimento della lingua, dal momento che proprio la lingua è principalmente coinvolta nella pronuncia del DA. Questo ha trovato conferma negli esperimenti di stimolazione magnetica (vedere sotto). In un precedente lavoro (Gentilucci e al., 2004b), tuttavia, è stato osservato che il tipo di afferramento influenzava la cinematica delle labbra. Questo risultato si può spiegare considerando che in quello studio veniva pronunciata la sillaba BA e il comando motorio alla bocca poteva essere pianificato al fine di modulare il rilascio dell'occlusione delle labbra. Al contrario questo non dovrebbe verificarsi quando si pronuncia la sillaba DA perché in questo caso i movimenti delle labbra sono poco correlati alla pronuncia di questa consonante.

I risultati relativi al tempo all'inizio dell'apertura delle labbra sembrano indicare che i partecipanti allo studio hanno utilizzato l'informazione visiva dell'effettore biologico in movimento per prevedere il momento del contatto con l'oggetto, cioè il momento in cui pronunciare il DA. L'attivazione di programmi di imitazione *covert* del movimento osservato può servire a questo fine. Il fatto che questa previsione non sia stata modulata dal tipo di interazione col piede e avvenga con un certo ritardo quando si afferrano i solidi, che sono meno familiari dei frutti (nonostante le velocità del braccio siano analoghe), suggerisce che la previsione del contatto non si basi solamente

sulla semplice analisi visiva della velocità dello stimolo. L'imitazione *covert* è facilitata quando si tratta di programmi di afferramento di frequente utilizzo e questo può spiegare perché la capacità di prevedere il contatto fosse più accurata in questi casi. Il diverso tipo di interazione col piede invece potrebbe non avere influenzato in maniera specifica la previsione del contatto in quanto l'imitazione *covert* di questi movimenti non ha una coordinazione temporale stretta con quelli della bocca.

Studio con la Stimolazione Magnetica

L'esperimento 2 ha confermato che l'osservazione di specifici gesti di afferramento manuale e della loro cinematica influenza l'eccitabilità della corteccia motoria della mano (Aziz-Zadeh e al., 2002; Fadiga e al., 1995; Gangitano e al., 2001). Infatti l'eccitabilità è stata modulata dal tipo di afferramento osservato e dalla cinematica della mano. I PEM del muscolo opponente del pollice erano più ampi quando si osservava una presa di forza piuttosto che una presa di precisione. Questo risultato costituisce anche un'ulteriore conferma che il sistema specchio della mano si attiva durante l'osservazione di un gesto di afferramento. I neuroni specchio, d'altronde, sono di solito selettivi per il tipo di afferramento: alcuni ad esempio sono specifici per l'esecuzione e l'osservazione di una presa di precisione mentre altri lo sono per una presa di forza (Gallese e al., 1996). Studi di cinematica hanno dimostrato che durante la presa di precisione di oggetti piccoli il picco di velocità di apertura e la massima apertura delle dita sono minori mentre la durata della fase di chiusura delle dita è maggiore, rispetto alla presa di forza di oggetti grandi (Chieffi & Gentilucci, 1993; Gentilucci e al., 1991; Gentilucci e al., 1994). Questo significa che il sistema motorio sviluppa un grado di forza muscolare differente nei muscoli impegnati nei due tipi di prensione e questo è direttamente correlato alle loro peculiarità cinematiche. In questo esperimento il sistema specchio, attivato in modo differenziale in funzione dell'osservazione di una presa di forza o di una presa di precisione, inviava alla corteccia motoria della mano dei comandi di apertura e chiusura delle dita la cui forza di attivazione differiva con il tipo di afferramento osservato e la sua cinematica. Il fatto che l'attivazione di OP fosse maggiore durante l'esecuzione di una presa di forza piuttosto che di una presa di precisione rappresenta una conferma che l'attività di questo muscolo è correlata alle differenze cinematiche esistenti fra i due tipi di presa e giustifica le differenze osservate nei PEM dopo stimolazione magnetica dell'area motoria della mano. Infine, l'osservazione degli oggetti da soli ha prodotto effetti che si pongono a metà strada tra quelli secondari all'osservazione della presa di forza da una parte e di quella di precisione dall'altra. Questo risultato può essere spiegato in termini di attivazioni aspecifiche della mano secondarie all'osservazione degli oggetti da soli e non correlate a specifici programmi motori di afferramento. A sostegno di questa interpretazione Barbieri e colleghi (Barbieri e al., 2007) hanno trovato che solo in presenza di un effettore biologico potenzialmente in grado di interagire con un oggetto si evocano i programmi di interazione manuale

appropriati alle dimensioni degli oggetti da afferrare.

I risultati degli esperimenti 3-5 confermano nel complesso i dati dell'esperimento comportamentale e, più specificamente, l'ipotesi che un'imitazione *covert* dell'afferramento con la mano, osservato nei filmati presentati, abbia influenzato il controllo dei movimenti della lingua durante la simultanea pronuncia (*covert*) della sillaba DA. Tuttavia nell'esperimento 3 è risultato significativo il fattore Dimensione degli oggetti ma non quello Interazione effetto-oggetto, quindi l'elemento cruciale nell'influenzare i PEM della lingua sembrerebbe l'osservazione di caratteristiche intrinseche degli oggetti presentati. Questo suggerisce che l'osservazione di oggetti afferrabili potrebbe partecipare direttamente all'attivazione di comandi di manipolazione con la bocca. Il fatto che oggetti commestibili, come sono i frutti, abbiano indotto un effetto maggiore di quelli non commestibili (solidi) starebbe a favore dell'interpretazione succitata. Inoltre anche alcuni parametri della voce e della cinematica delle labbra sono stati influenzati direttamente dalla dimensione degli oggetti. Tuttavia, nell'esperimento 4 l'osservazione di pantomime dei due tipi di prensione ha indotto effetti analoghi all'osservazione delle azioni transitive corrispondenti, dove invece l'oggetto era realmente presente. Viceversa nell'esperimento 5, dove venivano presentati soltanto i filmati con gli oggetti senza che fossero alternati con i filmati che mostravano un afferramento, come invece accadeva nell'esperimento 3, non sono stati trovati effetti sui PEM della lingua dovuti agli oggetti da soli. Alla luce di questi risultati è possibile, quindi, che nell'esperimento 3 la presentazione di filmati che mostrano gesti di afferramento faciliti l'attivazione di programmi motori di afferramento con la mano anche quando vengono presentati i filmati che mostrano gli oggetti da soli in quanto, appunto, mostrati a breve distanza di tempo gli uni dagli altri (Tucker & Ellis, 1998; Barbieri e al., 2007). Questi comandi di afferramento con la mano verrebbero inviati anche alla bocca e sono stati probabilmente amplificati da altri comandi motori diretti alla bocca e, più precisamente, quelli dovuti alla pronuncia *covert* della scritta DA e quelli dovuti ad un effetto diretto degli oggetti presentati sulla bocca (che invece non può essere visibile nell'esperimento 2, nel quale si è stimolata l'area motoria della mano). La convergenza di più comandi di movimento sul medesimo effetto consentirebbe di raggiungere la soglia per modulare la contrazione della lingua al momento della stimolazione magnetica.

L'osservazione, invece, di interazioni piede-oggetti di diverse dimensioni non ha modulato i PEM della lingua dopo stimolazione magnetica della area motoria primaria di questo organo. Questa osservazione è in accordo con dati di neuroimmagine che hanno mostrato che la presentazione di azioni transitive (dirette verso un oggetto), effettuate con la mano e con la bocca, attiva settori dell'area di Broca e delle aree premotorie, mentre la presentazione di azioni transitive effettuate col piede attiva solo un settore dorsale dell'area premotoria (Buccino e al., 2001). A causa

della prossimità e della parziale sovrapposizione nell'area di Broca del sistema specchio della mano e di quello della bocca con i settori legati alla produzione verbale (Demonet e al., 1992; Zatorre e al., 1992; Paulesu e al., 1993) è più logico supporre un effetto del sistema specchio della mano sui movimenti della bocca e sul parlato piuttosto che di quello del piede.

È possibile, comunque, ipotizzare che il piede abbia una connessione con la bocca che si realizzerebbe, però, mediante una rappresentazione comune con la mano. Dal momento infatti che le azioni di piede possono influenzare i gesti brachio-manuali (Baldissera e al., 2002) questi ultimi gesti potrebbero poi influenzare direttamente i movimenti della bocca tramite il sistema di doppi comandi mano-bocca. Ne consegue che l'attivazione della rappresentazione di un'azione effettuata col piede, evocata dall'osservazione, potrebbe influenzare la cinematica della mano, ma in misura minore quella della bocca e la voce. Invero un debole effetto del piede dovuto a queste relazioni indirette è mostrato dai dati comportamentali che mostrano come l'intonazione della voce sia stata influenzata dall'osservazione del piede che interagisce con gli oggetti anche se non c'è stato un effetto del tipo di interazione del piede osservata. Inoltre la velocità di apertura delle labbra rallentava durante l'osservazione del piede che interagisce.

Conclusioni

I risultati di questo studio corroborano i dati ottenuti in precedenti studi comportamentali (Gentilucci, 2003a; Gentilucci e al., 2001, 2004a, 2004b) nei quali si è dimostrato che l'esecuzione e l'osservazione di gesti di afferramento e, in generale, di azioni transitive brachio-manuali rivolte verso oggetti di dimensioni differenti, influenzano parametri dello spettro della voce di sillabe pronunciate contemporaneamente alla esecuzione o all'osservazione di tali azioni. In altre parole questi dati sono a favore dell'esistenza nell'uomo, così come già descritto nella scimmia (Rizzolatti e al., 1988; Gallese e al., 1996), di un sistema specchio della mano e di un sistema di doppi comandi motori per la mano e per la bocca. Questi sistemi operano in modo sinergico quando azioni transitive coinvolgono la mano e la bocca. Ogni qualvolta viene generata una rappresentazione motoria *covert* di un'azione transitiva fatta con la mano il sistema di doppi comandi trasferisce alcuni aspetti cinematici di questa rappresentazione alla bocca.

Questo lavoro lascia tuttavia aperte alcune importanti questioni. Ad esempio non è chiaro se il sistema specchio e il sistema di doppi comandi motori siano specifici per il linguaggio o piuttosto non siano due sistemi *general purpose* ovvero che svolgono funzioni di carattere generale comuni a più domini funzionali. A favore della prima ipotesi stanno studi di neuroimmagine che dimostrano

come il sistema specchio della mano sia localizzato nell'area di Broca (Buccino e al., 2001; Grafton e al., 1996; Iacoboni e al., 1999). Inoltre sono stati osservati anche livelli di integrazione più alti rispetto a quelli dimostrati tra l'esecuzione/osservazione di azioni transitive e la pronuncia di sillabe. Quando infatti vengono emessi contemporaneamente gesti simbolici braccio-manuali e parole congruenti l'esecuzione del gesto viene rallentata mentre alcuni parametri della voce sono rinforzati. Inoltre alcuni parametri della voce durante un compito di risposta vocale all'osservazione di gesti e all'ascolto di parole corrispondenti, emesse contemporaneamente ai gesti, sono risultati aumentati in confronto alle condizioni di semplice ascolto delle parole o di osservazione dei gesti soltanto (Bernardis & Gentilucci, 2006). Questi effetti sono temporaneamente aboliti in seguito alla somministrazione di impulsi ripetitivi di stimolazione magnetica transcranica sull'area di Broca (Gentilucci e al., 2006) alla frequenza di 1 Hz, che esercita effetti di carattere inibitorio sul funzionamento delle aree cerebrali motorie (Maeda e al., 2000; Shapiro e al., 2001). Complessivamente, questi dati sembrano indicare un'intima e forse specifica relazione anatomica e funzionale tra linguaggio e sistema specchio. A favore della seconda ipotesi, invece, si pongono dati comportamentali che dimostrano la presenza di un sistema di doppi comandi motori per la mano e per la bocca che opera sia per azioni intransitive della bocca (non legate al parlato) che per movimenti coinvolti nella pronuncia di sillabe (Gentilucci e al., 2001). Partendo dal fatto che il sistema dei neuroni specchio e quello dei doppi comandi mano-bocca sono stati scoperti nella corteccia premotoria di scimmia in relazione a gesti di afferramento con la mano o con la bocca, è stato proposto, come già detto nell'introduzione a questo elaborato, che essi si siano evoluti inizialmente nel contesto di attività di tipo ingestivo o legate all'esplorazione di oggetti e successivamente siano diventati il fondamento di una comunicazione che combina aspetti manuali e vocali (Gentilucci e al., 2006; Gentilucci & Corballis, 2006). Una possibilità è che nell'uomo moderno il sistema di doppi comandi svolga due funzioni differenti: una più antica, legata alla coordinazione delle attività oro-manuali legate al cibarsi e alla esplorazione di oggetti, e una più recente, legata all'integrazione dei gesti e del linguaggio parlato nelle attività comunicative. Questi due aspetti non sembrano rigidamente separati ma piuttosto rappresentano un continuum che permette di ancorare l'integrazione tra gesti e parlato alla coordinazione mano-bocca tipica delle attività ingestive ed esplorative. Alcuni autori (Bernardis e al., 2008) hanno proposto che la permanenza, nell'uomo, di un sistema di integrazione tra azioni transitive e gesti da una parte e il controllo motorio della bocca e il parlato dall'altra, sia utilizzata anche nello sviluppo del linguaggio nei bambini. Più specificamente i comandi di interazione manuale potrebbero essere usati dai bambini ad uno stadio preverbale come forme primitive di identificazione degli oggetti. Una volta trasformate in vocalizzazioni mediante il sistema dei doppi comandi potrebbero poi

essere utilizzate per comunicare verbalmente con altri individui.

BIBLIOGRAFIA

Alibali, M.W., DiRusso, A.A., 1999. The function of gesture in learning to count: more than keeping track. *Cognitive Development*. 14, 37-56.

Arbib, M.A., 2005. From monkey-like action recognition to human language: an evolutionary framework for neurolinguistics. *Behavioral and Brain Sciences*. 28, 105–168.

Armstrong, D.F., 1999. *Original Signs: Gesture, Sign, and The Source of Language*. Gallaudet University Press, Washington, DC.

Armstrong, D.F., Stokoe, W.C., Wilcox, S.E., 1995. *Gesture and The Nature of Language*. Cambridge University Press, Cambridge, MA.

Aziz-Zadeh, L., Maeda, F., Zaidel, E., Mazziotta, J., Iacoboni, M., 2002. Lateralization in motor facilitation during action observation: a TMS study. *Experimental Brain Research*. 144, 127-131.

Baldissera, F., Cavallari, P., Craighero, L., Fadiga, L., 2001. Modulation of spinal excitability during observation of hand actions in humans. *European Journal of Neuroscience*. 13, 190–194.

Baldissera, F., Borroni, P., Cavallari, P., Cerri, G., 2002. Excitability changes in human corticospinal projections to forearm muscles during voluntary movement of ipsilateral foot. *Journal of Physiology*. 539, 903-911.

Barbieri, F., Buonocore, A., Bernardis, P., Dalla Volta, R., Gentilucci, M., 2007. On the relations between affordance and representation of the agent's effector. *Experimental Brain Research*. 180, 421-433.

Bernardis, P., Bello, A., Pettenati, P., Stefanini, S., Gentilucci, M., 2008. Manual actions affect vocalizations of infants. *Experimental Brain Research*. 184, 599–603.

Bernardis, P., Gentilucci, M., 2006. Speech and gesture share the same communication system. *Neuropsychologia*. 144, 178-190.

Binkofski, F., Buccino, G., Posse, S., Seitz, R.J., Rizzolatti, G., Freund, H.J., 1999. A fronto-parietal circuit for object manipulation in man. Evidence from an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*. 11, 3276–3286.

Binkofski, F., Amunts, K., Stephan, K.M., Posse, S., Schormann, T., Freund, H.-J., Zilles, K., Seitz, R.J., 2000. Broca's region subserves imagery of motion: a combined cytoarchitectonic and fMRI study. *Human Brain Mapping*. 11, 273–285.

Brodman, K., 1909. Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues, Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig.

Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G., Freund, H.J., 2001. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*. 13, 400–404.

Burling, R. 1999. Motivation, conventionalization, and arbitrariness in the origin of language. In B. J. King (Ed.), *The origins of language: What human primates can tell us*. Santa Fe, NM: School of American Research Press.

Butterworth, B., Hadar, U., 1989. Gesture, speech and computational stages. *Psychological Review*. 96, 168–174.

Campbell, A.W., 1905. *Histological Studies on the Localisation of Cerebral Function*, Cambridge University Press.

Chieffi, S., Gentilucci, M., 1993. Coordination between the transport and the grasp components during prehension movements. *Experimental Brain Research*. 94, 471-477.

Corballis, M.C., 1992. On the evolution of language and generativity. *Cognition*. 44, 197–226.

Corballis, M.C., 2002. *From Hand to Mouth: The Origins of Language*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Delattre, P., 1951. The physiological interpretation of sound spectrogram. *PMLA*, LXVI, 5, 864–875.

Demonet, J.F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.L., Wise, R., Rascol, A., Frackowiak, R., 1992. The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*. 115, 1753-1768.

Donald, M., 1991. *Origins of the Modern Mind*. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Ekman, P., Friesen, W.V., 1969. The repertoire of non-verbal behavior: categories, origins, usage and coding. *Semiotica*. 1, 49-98.

Emmorey, K., 2002. *Language, Cognition, and Brain: Insights from Sign Language Research*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., Rizzolatti, G., 1995. Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*. 73, 2608–2611.

Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., Rizzolatti, G., 2002. Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *European Journal of Neuroscience*. 15, 399–402.

Ferrari, P.F., Gallese, V., Rizzolatti, G., Fogassi, L., 2003. Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *European Journal of Neuroscience*. 17, 1703–1714.

Friedman, H.S., 1979. The concept of skill in nonverbal communication: implications for understanding social interactions, in *Skill in Nonverbal Communication* (Rosenthal, R., ed.), pp. 2-27, Oelgeschlager, Gunn & Hain.

Galaburda, A.M., Pandya, D.N., 1982. Role of architectonics and connections in the study of primate brain evolution. In: Armstrong, E., Falk, D. (Eds.), *Primate Brain Evolution: Methods and Concepts*. Plenum Press, New York, pp. 203–216.

Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., Rizzolatti, G., 1996. Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119, 593–609.

Gangitano, M., Mottaghy, F.M., Pascual-Leone, A., 2001. Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport*. 12, 1489-1492.

Gentilucci, M., 2003a. Grasp observation influences speech production. *European Journal of Neuroscience*. 17, 179–184.

Gentilucci, M., 2003b. Object familiarity affects finger shaping during grasping of fruit stalks. *Experimental Brain Research*, 149, 395-400.

Gentilucci, M., Corballis, M.C., 2006. From manual gesture to speech: a gradual transition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 30, 949–960.

Gentilucci, M., Dalla Volta, R., 2008. Spoken language and arm gestures are controlled by the same motor control system. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Jun;61(6):944-57.

Gentilucci, M., Benuzzi, F., Gangitano, M., Grimaldi, S., 2001. Grasp with hand and mouth: a kinematic study on healthy subjects. *Journal of Neurophysiology*. 86, 1685–1699.

- Gentilucci, M., Bernardis, P., Crisi, G., Dalla Volta, R., 2006. Repetitive transcranial magnetic stimulation of Broca's area affects verbal responses to gesture observation. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 18, 1059-1074.
- Gentilucci, M., Campione, G.C., Dalla Volta, R., Bernardis P., 2009. The observation of manual grasp actions affects the control of speech: a combined behavioural and Transcranial Magnetic Stimulation study. *Neuropsychologia*. 47, 3190–3202.
- Gentilucci, M., Castiello, U., Corradini, M.L., Scarpa, M., Umiltà, C., Rizzolatti, G., 1991. Influence of different types of grasping on the transport component of prehension movements *Neuropsychologia*. 29, 361-378.
- Gentilucci, M., Dalla Volta, R., Gianelli, C., 2008. When the hands speak. *Journal of Physiology Paris*. 102(1-3), 21-30.
- Gentilucci, M., Santunione, P., Roy, A.C., Stefanini, S., 2004a. Execution and observation of bringing a fruit to the mouth affect syllable pronunciation. *European Journal of Neuroscience*. 19, 190–202.
- Gentilucci, M., Stefanini, S., Roy, A.C., Santunione, P., 2004b. Action observation and speech production: study on children and adults. *Neuropsychologia*. 42, 1554–1567.
- Gentilucci, M., Toni, I., Chieffi, S., Pavesi, G., 1994. The role of proprioception in the control of prehension movements: a kinematic study in a peripherally deafferented patient and in normal subjects. *Experimental Brain Research*. 99, 483-500.
- Givón, T., 1995. *Functionalism and Grammar*. Benjamins, Philadelphia, PA.
- Goldin-Meadow, S., McNeill, D., 1999. The role of gesture and mimetic representation in making language the province of speech, in *The Descent of Mind* (Corballis, M.C. and Lea, S., eds), pp. 155–172, Oxford University Press.
- Grafton, S.T., Arbib, M.A., Fadiga, L., Rizzolatti, G., 1996. Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. *Experimental Brain Research*. 112, 103–111.
- Hadar, U.D., Wenkert-Olenik, R.K., Soroker, N., 1998. Gesture and the processing of speech: Neuropsychological evidence. *Brain and Language*. 62 (1), 107–126.
- Hari, R., Forss, N., Avikainen, S., Kirveskari, S., Salenius, S., Rizzolatti, G., 1998. Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 95, 15061–15065.
- Hewes, G.W., 1973. Primate communication and the gestural origins of language. *Current Anthropology*. 14, 5–24.

- Holland, M., Wertheimer, M., 1964. Some physiognomic aspects of naming, or Maluma and Takete revisited. *Perceptual and Motor Skills*. 19, 111–117.
- Iacoboni, M., Woods, R.P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J.C., Rizzolatti, G., 1999. Cortical mechanisms of human imitation. *Science*. 286, 2526-2528.
- Iverson, J.M., Goldin-Meadow, S., 1998. Why people gesture as they speak. *Nature*. 396, 228.
- Jeannerod, M., 1994. The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*. 17, 187–245.
- Johannesson, A., 1950. The Gestural Origin of Language: Evidence from Six 'Unrelated' Languages. *Nature*. 166, 60–61.
- Jürgens, U., 2002. Neural pathways underlying vocal control. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 26, 235–238.
- Kendon, A., 2004. *Gesture: Visible Action as Utterance*. Cambridge University Press, New York.
- Kiers, L., Cros, D., Chiappa, K.H., Fang, J., 1993. Variability of motor potentials evoked by transcranial magnetic stimulation. *Electroencephalography Clinical Neurology*. 89, 415-423.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G., 2002. Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*. 297, 846–48.
- Krauss, R.M., Hadar, U., 1999. The role of speech-related arm/hand gestures in word retrieval. In: Campbell, R., Messing, L. (Eds.), *Gesture Speech and Sign*. Oxford University Press, Oxford, pp. 93–116.
- Leoni, F.A., Maturi, P., 2002. *Manuale di fonetica*. Carocci, Roma.
- Levelt, W.J., Richardson, G., La Heij, W., 1985. Pointing and voicing in deictic expressions. *Journal of Memory and Language*. 24, 133–164.
- Lieberman, A.M., 1993. Haskins Laboratories Status Report on Speech Research. 113, 1–32
- Lieberman, A.M., Mattingly, I.G., 1985. The motor theory of speech perception revised. *Cognition*. 21, 1–36.
- MacNeilage, P.F., 1998. The frame/content theory of evolution of speech. *Behavioral and Brain Sciences*. 21, 499–546.
- Maeda, F., Keenan, J. P., Tormos, J. M., Topka, H., Pascual-Leone, A., 2000. Modulation of corticospinal excitability by repetitive transcranial magnetic stimulation. *Clinical Neurophysiology*. 111, 800–805.

- Maeda, F., Kleiner-Fisman, G., Pascual-Leone, A., 2002. Motor facilitation while observing hand actions: specificity of the effect and role of observer's orientation. *Journal of Neurophysiology*. 87, 1329–1335.
- Matelli, M., Luppino, G., Rizzolatti, G., 1985. Patterns of cytochrome oxidase activity in the frontal agranular cortex of the macaque monkey. *Behavioural Brain Research*. 18(2), 125-36.
- McNeill, D., 1992. Hand and mind: What gestures reveal about thought. Chicago: University of Chicago Press.
- Montgomery, D.C., 1984. Design and analysis of experiments, New York: John Wiley & Sons.
- Muthukumaraswamy, S.D., Johnson, B.W., McNair, N.A., 2004. Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Brain Research. Cognitive Brain Research*. 19 (2), 195–201.
- Neidle, C., Kegl, J., MacLaughlin, D., Bahan, B., Lee, R.G., 2000. The Syntax of American Sign Language. MIT Press, Cambridge, MA.
- Oldfield, R.C., 1971. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*. 9, 97-113.
- Paget, R., 1930. Human Speech: Some Observations, Experiments and Conclusions as to the Nature, Origin, Purpose and Possible Improvement of Human Speech. P. Kegan, T. Trench, Trubner & Co, New York, NY.
- Passingham, R., 1993. The Frontal Lobes and Voluntary Action. Oxford University Press.
- Paulesu, E., Frith, C.D., Frackowiak, R., 1993. The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*. 362, 342–345.
- Patuzzo, S., Fiaschi, A., Manganotti, P., 2003. Modulation of motor cortex excitability in the left hemisphere during action observation: a single and paired-pulse transcranial magnetic stimulation study of self- and non-self action observation. *Neuropsychologia*. 41, 1272–1278.
- Perry, M., Church, R.B., Godin-Meadow, S., 1988. Transitional knowledge in the acquisition of concepts. *Cognitive Development*. 3, 359-400.
- Petrides, M., Pandya, D.N., 1994. Comparative architectonic analysis of the human and macaque frontal cortex. In: Grafman, J., Boller, F. (Eds.), Handbook of Neuropsychology. Elsevier, Amsterdam.
- Rayner, K., 1984. Visual selection in reading, picture perception, and visual search. In Bouma H Bouwhuis DG, editors. Attention and Performance X: Control of Language Processes. London: Lawrence Erlbaum. pp.67-89.

- Rauscher, F.H., Krauss, R.M., Chen, Y., 1996. Gesture, speech and lexical access: the role of lexical movements in speech production. *Psychological Science*. 70, 226-231.
- Rizzolatti, G., Arbib, M.A., 1998. Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*. 21, 188–194.
- Rizzolatti, G., Craighero, L., 2004. The mirror-neuron system. *Annual Review in Neuroscience*. 27, 169–192.
- Rizzolatti, G., Sinigaglia, C., 2006. So quel che fai. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Rizzolatti, G., Camarda, R., Fogassi, L., Gentilucci, M., Luppino, G., Matelli, M., 1988. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. II. Area F5 and the control of distal movements. *Experimental Brain Research*. 71, 491–507.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., Fogassi, L., 1996. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*. 3, 131–141.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Matelli, M., Bettinardi, V., Paulesu, E., Perani, D., Fazio, F., 1996. Localization of grasp representations in humans by PET: 1. Observation versus execution. *Experimental Brain Research*. 111, 246–252.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., Gallese V., 2002. Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Current Opinion in Neurobiology*. 12(2), 149-54.
- Ruben, R.J., 2005. Sign language: its history and contribution to the understanding of the biological nature of language. *Acta Oto-Laryngologica*. 125, 464–467.
- Shapiro, K. A., Pascual-Leone, A., Mottaghy, F. M., Gangitano, M., Caramazza, A., 2001. Grammatical distinctions in the left frontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 13, 713–720.
- Stokoe, W.C., 1960. Sign Language Structure: An Outline of the Communicative Systems of the American Deaf. Linstock Press, Silver Spring, MD.
- Strafella, A.P., Paus, T., 2000. Modulation of cortical excitability during action observation: a transcranial magnetic stimulation study. *Neuroreport*. 11, 2289–2292.
- Tucker M, Ellis R. 1998. On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology*. 24, 830–846.
- Von Bonin, G., Bailey, P., 1947. The Neocortex of Macaca Mulatta. University of Illinois Press, Urbana.
- Wassermann, E.M., 1998. Risk and safety of repetitive transcranial magnetic stimulation: Report and suggested guidelines from the International Workshop on the Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation. June 5–7, 1996. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials*. 108, 1–16.

Watkins, K.E., Strafella, A.P., Paus, T., 2003. Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*. 41, 989-994.

Weiss, J.H., 1964. Phonetic symbolism re-examined. *Psychological Bulletin*. 61, 454–458.

Willems, R.M., Hagoort, P., 2007. Neural evidence for the interplay between language, gesture, and action: a review. *Brain and Language*. 101(3), 278-89.

Zatorre, R.J., Evans, A.C., Meyer, E., Gjedde, A., 1992. Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*. 256, 846–849.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare in primo luogo il Prof. Maurizio Gentilucci, che in questi anni di dottorato è stato una figura di riferimento fondamentale, accompagnandomi e consigliandomi nel mio percorso di maturazione scientifica e dimostrando, parimenti, grande comprensione e fattiva solidarietà nei momenti difficili che ci sono stati.

Devo poi ringraziare tutto il personale docente e non docente in servizio alla sezione di fisiologia del Dipartimento di Neuroscienze, che ha reso possibile questa esperienza culturale ma anche umana.

Infine voglio ringraziare tutti i miei colleghi di corso e di lavoro per la loro amicizia e per l'arricchimento che ha comportato il lavorare insieme.