

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

Dottorato di Ricerca in Neuroscienze

Ciclo XXIII

**GESTO E PARLATO: CARATTERISTICHE
FUNZIONALI DEI SISTEMI RESPONSABILI
DELLE LORO INTERAZIONI**

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. Vittorio Gallese

Tutor:

Chiar.mo Prof. Maurizio Gentilucci

Dottorando: Dott.ssa Giovanna Cristina Campione

Anno Accademico 2010/2011

INDICE

INTRODUZIONE

1. Il linguaggio e la sua evoluzione.....	1
1.1. Cenni introduttivi.....	1
1.2. Il sistema specchio.....	4
1.2.1. <i>I neuroni specchio della scimmia.....</i>	<i>4</i>
1.2.2. <i>Il sistema specchio nell'essere umano.....</i>	<i>6</i>
1.3. Il sistema specchio e l'evoluzione del linguaggio.....	7
1.3.1. <i>Il sistema specchio come base per lo sviluppo della</i> <i>comunicazione interindividuale.....</i>	<i>7</i>
1.3.2. <i>Il sistema specchio e lo sviluppo della comunicazione verbale.....</i>	<i>11</i>
1.4. Teoria gestuale dell'evoluzione del linguaggio: alcune precisazioni.....	14
1.4.1. <i>Relazione tra mano e bocca: basi neurofisiologiche ed evidenze empiriche.....</i>	<i>16</i>
2. I gesti ed il loro rapporto con l'espressione verbale.....	20
2.1. Cenni introduttivi.....	20
2.2. Classificazione dei gesti.....	22
2.2.1. <i>Classificazione funzionale del gesto.....</i>	<i>23</i>
2.3. Rapporto tra gesto e linguaggio verbale: evidenze empiriche.....	24
2.3.1. <i>L'area di Broca e il legame tra gesto e parola.....</i>	<i>28</i>
3. Scopo della tesi.....	30

STUDIO I

PRESUPPOSTI TEORICI E SCOPO DELLO STUDIO.....	35
ESPERIMENTO 1.....	38
4. Materiali e metodi.....	38
4.1. Partecipanti.....	38
4.2. Apparato, stimoli e procedura.....	38
4.3. Registrazione e analisi dei dati.....	40

5. Risultati.....	42
ESPERIMENTO 2.....	44
6. Materiali e metodi.....	44
6.1. Partecipanti.....	44
6.2. Apparato, stimoli e procedura.....	44
6.3. Registrazione e analisi dei dati.....	45
7. Risultati.....	45
ESPERIMENTO 3.....	46
8. Materiali e metodi.....	46
8.1. Partecipanti.....	46
8.2. Apparato, stimoli e procedura.....	46
8.3. Registrazione e analisi dei dati.....	47
9. Risultati.....	48
ESPERIMENTO 4.....	52
10. Materiali e metodi.....	52
10.1. Partecipanti.....	52
10.2. Apparato, stimoli e procedura.....	52
10.3. Registrazione e analisi dei dati.....	52
11. Risultati.....	53
ESPERIMENTO 5.....	54
12. Materiali e metodi.....	54
12.1. Partecipanti.....	54
12.2. Apparato, stimoli e procedura.....	54
12.3. Registrazione e analisi dei dati.....	55
13. Risultati.....	55
13.1. Parametri vocali.....	55
13.2. Parametri cinematici.....	56
14. Discussione generale.....	57
14.1. Caratteristiche funzionali del sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca	57

14.2. Influenza della pronuncia di unità fonemiche sul movimento di prensione manuale.....	60
--	----

STUDIO II

PRESUPPOSTI TEORICI E SCOPO DELLO STUDIO.....	64
--	-----------

ESPERIMENTO 1.....	66
---------------------------	-----------

15. Materiali e metodi.....	66
------------------------------------	-----------

15.1. Partecipanti.....	66
-------------------------	----

15.2. Apparato, stimoli e procedura.....	66
--	----

15.3. Registrazione e analisi dei dati.....	69
---	----

16. Risultati.....	72
---------------------------	-----------

16.1. Parametri vocali.....	72
-----------------------------	----

16.2. Parametri cinematici.....	73
---------------------------------	----

ESPERIMENTO 2.....	75
---------------------------	-----------

17. Materiali e metodi.....	75
------------------------------------	-----------

17.1. Partecipanti.....	75
-------------------------	----

17.2. Apparato, stimoli e procedura.....	75
--	----

17.3. Registrazione e analisi dei dati.....	75
---	----

18. Risultati.....	76
---------------------------	-----------

18.1. Parametri vocali.....	76
-----------------------------	----

18.2. Parametri cinematici.....	76
---------------------------------	----

ESPERIMENTO 3.....	78
---------------------------	-----------

19. Materiali e metodi.....	78
------------------------------------	-----------

19.1. Partecipanti.....	78
-------------------------	----

19.2. Apparato, stimoli e procedura.....	78
--	----

19.3. Registrazione e analisi dei dati.....	78
---	----

20. Risultati.....	79
---------------------------	-----------

20.1. Parametri vocali.....	79
-----------------------------	----

20.2. Parametri cinematici.....	79
---------------------------------	----

21. Discussione generale.....	80
--------------------------------------	-----------

21.1. Risultati dell'analisi vocale ed effetto del gesto rappresentazionale sul parlato.....	80
21.2. Risultati dell'analisi cinematica e discussione della relazione tra gesto e parola.....	84
21.3. Gesto e linguaggio verbale: alcune precisazioni sulle loro interazioni.....	86
21.4. Relazione tra gesto e parlato: i circuiti cerebrali implicati.....	87
CONCLUSIONI.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	91
APPENDICE A.....	103
APPENDICE B.....	108

INTRODUZIONE

1. IL LINGUAGGIO E LA SUA EVOLUZIONE

1.1. Cenni introduttivi

Il linguaggio, inteso come capacità di esprimersi verbalmente, è composto da simboli che generalmente hanno scarsa o nessuna relazione fisica con oggetti, azioni e proprietà cui essi si riferiscono. Pertanto, una delle questioni più spinose circa il linguaggio riguarda proprio la sua evoluzione, dal momento che risulta difficoltoso comprendere come simboli astratti possano essere stati associati ad aspetti del mondo reale. Prima di affrontare questo problema, è però importante sottolineare che il linguaggio verbale non solo è prodotto di processi evolutivi probabilmente molto complessi, ma esso è anche una facoltà esclusivamente umana. Anche i primati non umani sono in grado di comunicare, anche se non verbalmente, ma la loro comunicazione si differenzia da quella umana per un'altra importante caratteristica: i segnali comunicativi animali sono dotati di significato, ma non possono essere combinati per veicolare di nuovi. In altre parole, i sistemi comunicativi dei primati non umani sono chiusi, mentre il linguaggio umano è aperto, generativo e tramite esso è in linea di principio possibile veicolare un numero infinito di significati. Tuttavia, perché vi sia generatività è necessario che i segnali linguistici intrattengano con le realtà cui si riferiscono una relazione arbitraria (de Saussure, 1959). Ma come si è stabilita tale relazione? Paget (1930) propose che le parole nascessero inizialmente da un parallelismo tra suono e significato. Ad esempio, in alcune lingue, le vocali aperte si trovano in parole che codificano qualcosa di grande, mentre le vocali chiuse sono contenute in parole che si riferiscono a qualcosa di piccolo (si considerino, ad esempio, proprio le parole *gr/a/nde* e *p/i/ccolo*). Tuttavia, molte delle cose a cui ci riferiamo non possono essere rappresentate iconicamente tramite il suono della parola ad esse

corrispondente, come accade ad esempio per “zanzara”, ma, al contrario, il suono loro corrispondente non dice nulla circa il loro significato.

Un’ipotesi più attuale sull’origine del linguaggio propone che la capacità umana di esprimersi verbalmente si sia evoluta dal gesto manuale, piuttosto che dalla vocalizzazione, dal momento che le azioni manuali sembrano possedere più numerosi legami iconici con oggetti, azioni e proprietà del mondo reale. Tale ipotesi nacque già nel Diciottesimo secolo nelle riflessioni filosofiche di de Condillac (1711/1756) e Vico (1694/1744), ma è stata ripresa recentemente, con le dovute variazioni, da numerosi studiosi (vedere per esempio: Arbib, 2005; Armstrong, 1999; Corballis, 1992, 2002; Donald, 1991; Givon, 1995; Hewes, 1973; Rizzolatti e Arbib, 1998; Ruben, 2005).

Alcuni autori, infine, hanno proposto che il linguaggio si sia evoluto improvvisamente (Lieberman, 1998), partendo presumibilmente dall’assunto che “linguaggio” corrisponda strettamente alla capacità di parlare. Tale visione, attribuita a Bickerton (1995) è stata denominata teoria “big bang” dell’evoluzione del linguaggio. Tuttavia, il linguaggio è estremamente complesso e ciò rende improbabile l’ipotesi di un tale salto. Assumere che esso si sia evoluto dal gesto manuale ci permetterebbe di considerare una progressione più realistica, dal punto di vista evolutivo, con la graduale aggiunta di vocalizzazioni al repertorio gestuale, che probabilmente acquisirono una maggiore dominanza con l’evoluzione dell’Homo Sapiens (Corballis, 2002).

Allo stadio attuale dell’evoluzione, la capacità di comunicare può sussistere anche senza espressione verbale. E’ noto, infatti, che i linguaggi dei segni possiedono una struttura grammaticale sofisticata tanto quanto quella del linguaggio verbale, pur non essendovi per molte persone sordomute la possibilità di averne esperienza (Armstrong et al., 1995; Emmorey, 2002; Neidle et al., 2000). Inoltre, come accade per il linguaggio verbale, i segni sono convenzionali, simbolici e prodotti in combinazioni gerarchiche (Goldin-Meadow, 2003;

McNeill, 1992). Ancora, bambini esposti solo al linguaggio dei segni vanno incontro a uno sviluppo linguistico le cui fasi sono analoghe a quelle osservate per i bambini esposti al linguaggio verbale (Petitto e Marentette, 1991). Ciò suggerisce che il linguaggio delle mani sia “naturale” quanto quello orale.

Una questione critica per le teorie che sostengono che l’evoluzione del linguaggio sia avvenuta dal gesto manuale riguarda il come abbia avuto luogo il passaggio da un sistema visuo-manuale a un sistema acustico-vocale. Tuttavia, l’argomento della continuità tra comunicazione manuale e comunicazione vocale è supportato da varie evidenze che il linguaggio verbale abbia una base fondamentale gestuale. Questa idea è racchiusa nella *teoria motoria della percezione del linguaggio* (verbale) (Lieberman et al., 1967; Lieberman e Mattingly, 1985; Lieberman, 1996) e più recentemente nella *fonologia articolatoria* (Browman e Goldstein, 1989; 1995), le quali propongono che il linguaggio verbale non coincida tanto con un sistema di produzione di suoni, ma con un sistema che produce gesti articolatori per mezzo dell’azione indipendente di sei organi articolatori, ossia le labbra, il velo, la laringe ed infine il dorso, il corpo e la radice della lingua (vedere anche Goldstein et al., 2006). Tale approccio è largamente basato sul fatto che i fonemi, ossia le unità di base del parlato, nelle registrazioni meccaniche del suono non sono discretamente divisibili (Lieberman et al., 1967). Il motivo di ciò potrebbe risiedere nel fatto che i segnali acustici corrispondenti a singoli fonemi possono variare ampiamente in funzione del contesto in cui sono prodotti. Ad esempio, la transizione formantica per un dato fonema può cambiare se variano i fonemi circostanti. Tuttavia, l’essere umano è in grado di percepire dai dieci ai quindici fonemi al secondo (Gentilucci e Corballis, 2006) e ciò potrebbe sembrare in contrasto con il fatto che le trasformazioni contestuali appena descritte siano realmente necessarie. D’altra parte, però, il fatto che unità sonore più semplici, come i rumori, non siano percepibili a tali ritmi (Warren et al., 1969) suggerisce che alla percezione del linguaggio verbale possano sottostare principi differenti rispetto a quelli della

percezione di suoni non linguistici. Intendere il parlato in senso gestuale ci permetterebbe di comprendere i fenomeni legati alla sua percezione; infatti, se i gesti articolatori alla base del linguaggio verbale si sovrappongono temporalmente, proprio ciò renderebbe possibile la produzione e la percezione del linguaggio a ritmi sostenuti (Studdert-Kennedy, 2005).

1.2. Il sistema specchio

1.2.1. I neuroni specchio della scimmia

I neuroni specchio (Gallese et al, 1996; Rizzolatti et al., 1996) sono stati per la prima volta descritti nell'area F5 della corteccia premotoria ventrale del macaco (Matelli et al., 1985). Essi formano una classe di neuroni che scarica sia durante l'esecuzione che durante l'osservazione di atti motori finalizzati, mentre non si attivano quando la scimmia esegue semplici movimenti non legati a finalità specifiche, come lo spostamento di parti corporee nello spazio. I neuroni specchio della scimmia sono connessi sia ad azioni braccio-manuali (Gallese et al., 1996; Rizzolatti et al., 1996) che ad azioni eseguite con la bocca (Ferrari et al., 2003). Sempre nel macaco, neuroni con le stesse caratteristiche di quelli descritti in F5 sono stati rinvenuti nel lobulo parietale inferiore. Le aree appena citate sono tra loro interconnesse e comprese in un sistema di circuiti parieto-frontali, implicato nell'organizzazione di azioni (Rizzolatti et al., 1998).

L'informazione visiva sugli atti motori biologici giunge a F5 attraverso le connessioni con il solco temporale superiore (STS), in cui sono codificati visivamente movimenti di agenti biologici (Puce e Perrett, 2003). Tuttavia i neuroni del STS non sembrano attivarsi in associazione all'esecuzione di atti motori e, per questa ragione, pur essendo a esso strettamente connessa, tale area non è considerata parte del circuito specchio.

In generale, si assume che una delle funzioni cruciali del circuito specchio parieto-frontale sia la comprensione di atti motori eseguiti da altri individui, grazie al fatto che esso

permette il “confronto” automatico delle azioni osservate con il repertorio motorio di chi assiste all’azione (Rizzolatti et al., 2001). Vi sono varie evidenze a favore di tali ipotesi. Tra queste i risultati dell’esperimento che mostra che i neuroni specchio di F5 possono scaricare anche se alla scimmia è impedito di osservare l’intera azione, qualora essa abbia a disposizione abbastanza informazioni per comprenderne il fine (Umiltà et al., 2001). Altri risultati non poco rilevanti mostrano, inoltre, che i neuroni specchio di F5 scaricano anche per azioni di cui riconoscono il suono (Kohler et al., 2002). Tutti questi dati mostrano un’attività dei neuroni specchio premotori basata sulla rappresentazione interna di un atto motorio compiuto da un altro individuo, che prescinde dalla diretta osservazione di esso.

Uno studio più recente sull’organizzazione dei neuroni specchio del lobulo parietale inferiore (Fogassi et al., 2005) ha mostrato che essi non codificano individualmente solo per singoli atti motori (per esempio “afferrare”), ma, al contrario, che i neuroni specchio sono organizzati in popolazioni che codificano catene di atti motori. In altre parole, ciascuna popolazione controlla in modo specifico atti motori serialmente connessi. Neuroni motori che codificano per l’esecuzione di atti specifici (come “afferrare”) mostrano una diversa attivazione se l’atto fa parte di azioni (catene di atti) guidate da finalità diverse (come “afferrare per mangiare” e “afferrare per spostare”). Inoltre, molti neuroni motori del lobulo parietale inferiore, scaricano anche durante l’osservazione di atti eseguiti da altri individui e, anche in questo caso, la loro risposta si differenzia quando lo stesso atto motorio è parte di diverse azioni. E’ importante sottolineare che i neuroni che scaricano durante l’osservazione di un atto motorio, lo fanno ancor prima che l’atto successivo specifichi il fine dell’azione. Essi, pertanto, non solo sembrano codificare per lo specifico atto osservato, ma permettono probabilmente all’osservatore di comprendere l’intenzione dell’agente, proprio grazie al fatto che i singoli atti motori sono collegati in catene.

1.2.2. Il sistema specchio nell'essere umano

Varie evidenze a supporto di un sistema specchio nell'essere umano derivano da studi di neuroimaging funzionale (Kilner et al., 2009; Gazzola e Keysers, 2009; per altri studi vedere Rizzolatti e Craighero, 2004). Essi hanno mostrato l'esistenza nell'essere umano di due circuiti che sembrano avere proprietà specchio. Il primo comprende aree del lobo parietale, aree della corteccia premotoria e la parte caudale del giro frontale inferiore (sistema specchio parieto-frontale), mentre il secondo circuito comprende l'insula e la corteccia frontale mesiale anteriore (sistema specchio limbico). Il sistema specchio parieto-frontale sembra essere coinvolto nel riconoscimento di comportamenti intenzionali, mentre quello limbico sembra essere deputato al controllo del comportamento affettivo (Cattaneo e Rizzolatti, 2009).

Per quanto riguarda l'anatomia e il funzionamento del sistema specchio parieto-frontale, sono stati condotti fino ad oggi numerosi studi, molti dei quali si sono concentrati sul controllo di atti motori distali transitivi (diretti ad oggetti). I risultati di tali studi hanno mostrato che essi sono codificati nella parte ventrale della corteccia premotoria, congruentemente all'organizzazione somatotopica di quest'ultima (vedere ad esempio Buccino et al., 2001). Nello specifico, la rappresentazione di atti motori eseguiti con l'arto inferiore è localizzata più dorsalmente, quella degli atti motori di bocca più ventralmente e infine, la rappresentazione degli atti manuali è localizzata in posizione intermedia tra i due, ed è parzialmente sovrapposta alla rappresentazione degli atti motori di bocca (Buccino et al., 2001). Anche l'osservazione di atti intransitivi (non diretti ad oggetti), a differenza di quanto accade nella scimmia, attivava nello studio di Buccino e colleghi (2001) le stesse aree frontali coinvolte nella rappresentazione di atti transitivi (vedere anche Sakreida et al., 2005).

La ricerca precedentemente citata ha esplorato anche la rappresentazione degli atti motori osservati nella porzione parietale del sistema specchio deputato alla comprensione di azioni. Atti motori transitivi sembrano essere rappresentati nel solco intraparietale e nella

convessità del lobulo parietale inferiore a esso adiacente (Buccino et al., 2001). Studi più recenti hanno inoltre mostrato che azioni intransitive manuali hanno la loro specifica rappresentazione anche in sede parietale (Lui et al., 2008).

1.3. Il sistema specchio e l'evoluzione del linguaggio

1.3.1. Il sistema specchio come base per lo sviluppo della comunicazione interindividuale

Se il linguaggio, incluso quello verbale, è essenzialmente produrre, percepire e interpretare gesti, è plausibile supporre che esso coinvolga il sistema specchio. Infatti, come già anticipato, sin dai primi studi condotti sui neuroni specchio, il gruppo di Rizzolatti (Rizzolatti et al., 1996; Gallese et al., 1996) propose che l'attività di questa classe di neuroni permettesse la comprensione delle azioni compiute da altri individui e che i neuroni specchio possano aver fornito la base attraverso cui viene stabilito un legame tra attore e osservatore. In accordo a tale visione, Rizzolatti e Arbib (1998) hanno proposto che, in un contesto comunicativo, i neuroni specchio abbiano fornito un legame tra mittente e ricevente, il quale, secondo la teoria motoria della percezione del linguaggio, è un requisito necessario per ogni tipo di comunicazione (Lieberman 1993; Lieberman e Mattingly 1985, 1989).

E' chiaro che i movimenti di prensione per cui si attivano i neuroni specchio della scimmia non sono linguaggio, ma i processi a loro connessi possono avere fornito una base dalla quale si sono evolute strutture interpretative molto più complesse. L'area F5 della corteccia premotoria della scimmia, in cui sono stati scoperti i neuroni specchio, è, infatti, considerata omologa a quella di Broca nell'essere umano (Coudè et al., 2011; Rizzolatti e Arbib, 1998; Von Bonin e Bailey 1947; Campbell, 1905; Passingham, 1993; Galaburda e Pandya, 1982; Petrides e Pandya, 1994; vedere Fig. 1), ossia alla prima area cerebrale a essere identificata come implicata nei processi linguistici (Broca, 1861). Più precisamente, l'area di

Broca può essere suddivisa nelle aree 44 e 45 di Brodman e sarebbe l'area BA44 a essere realmente omologa a F5. Infatti, dati di neuroimaging mostrano un coinvolgimento dell'area BA45 per la produzione linguistica, sia per quanto concerne il linguaggio dei segni che per l'espressione verbale (Horwitz et al., 2003). Invece, l'area BA44, analogamente a F5, non risulta attivata unicamente per compiti connessi alla produzione linguistica, ma anche da funzioni motorie non connesse al linguaggio. Essa, ad esempio, è coinvolta nel controllo di movimenti brachio-manuali: Binkofski e collaboratori (1999) riportano un'attivazione di BA44 quando i soggetti manipolano oggetti ed è loro impedito di denominarli silenziosamente. Al contrario, se è loro richiesto di denominare esplicitamente gli oggetti durante la manipolazione, le attivazioni si concentrano nella parte triangolare dell'area di Broca (BA45). Ancora, lo studio di Buccino e colleghi (2001) precedentemente citato mostra un'attivazione della parte opercolare del giro frontale inferiore e del giro precentrale per l'osservazione di azioni manuali e orali, transitive e intransitive. Ciò non toglie, comunque, che l'area BA44 risulta attivata anche quando i partecipanti osservano la produzione silente di gesti articolatori connessi al parlato (Buccino et al., 2004).

A prescindere dal suo coinvolgimento nel controllo dell'espressione verbale, il sistema specchio umano sembra possedere delle proprietà che possono essere considerate prerequisiti basilari delle abilità comunicative generalmente intese. Ad esempio, diversamente da quanto accade nella scimmia, il sistema specchio umano sembra attivarsi per la processazione di movimenti che non necessariamente si dirigono a un oggetto (Buccino et al., 2001), anche se vi sono evidenze che l'attivazione sia maggiore per le azioni transitive piuttosto che per azioni intransitive (Muthukumaraswamy et al., 2004). L'attivazione di tale sistema per azioni intransitive potrebbe riflettere un suo adattamento al controllo di segnali più astratti. Inoltre, le aree cerebrali coinvolte nel controllo del linguaggio verbale, e non solo l'area di Broca,

sembrano sovrapporsi al sistema specchio e ciò fornirebbe un sostegno all'idea che il linguaggio verbale possa essersi sviluppato proprio a partire da tale sistema (Corballis, 2009).

Rispetto alle altre specie, l'incorporazione della vocalizzazione nel sistema specchio potrebbe essere unica per gli umani, sebbene nella scimmia i neuroni specchio rispondano anche a suoni di azioni come schiacciare una nocciolina (Kohler et al., 2002). Tuttavia, i suoni in questione erano legati ad azioni manuali e le vocalizzazioni della scimmia non attivavano tale sistema. Una possibile spiegazione di tale fenomeno potrebbe risiedere nel fatto che, qualora presente (Coudè et al., 2011), il controllo intenzionale della vocalizzazione nei primati non umani sarebbe scarso. Infatti, per queste specie la vocalizzazione appare essere primariamente sotto il controllo della corteccia cingolata e di alcune strutture diencefaliche e del tronco dell'encefalo (Jurgens 1995, 2009; MacLean, 1993). Diversamente, il controllo del parlato nell'essere umano parrebbe mediato da strutture corticali coinvolte nel controllo volontario del movimento (Ploog, 2002). Anche negli scimpanzé, ossia nelle specie più vicine agli umani, il controllo volontario della vocalizzazione è estremamente limitato. (Goodall, 1986).

Si è detto che la capacità umana di parlare e le vocalizzazioni degli animali sono fenomeni differenti, in virtù del fatto che essi sono mediati da strutture cerebrali diverse. Il linguaggio verbale è infatti controllato, in particolare, dal circuito i cui nodi principali tradizionalmente consistono nelle aree di Broca e di Wernicke. Rizzolatti e Arbib (1998) suggeriscono che lo sviluppo di tale circuito sia una conseguenza del fatto che, prima che il linguaggio verbale emergesse, il precursore dell'area di Broca, cioè F5, fosse dotato di un meccanismo di riconoscimento di azioni altrui. Come già detto, quest'ultimo può essere considerato il prerequisito neurale, in un primo tempo, per lo sviluppo della comunicazione interindividuale e in seguito per lo sviluppo della capacità di esprimersi verbalmente. Pertanto, questi autori concepiscono il linguaggio come un fenomeno più generale e non strettamente

corrispondente alla capacità di parlare. Essi inoltre riconoscono che rimane un notevole salto tra il riconoscimento di azioni e l'invio di messaggi a partire da intenti comunicativi, ma presentano un'ipotesi che si propone di dare maggiore continuità allo sviluppo di tale facoltà. In altre parole, Rizzolatti e Arbib (1998) sottolineano che quando un individuo esegue un'azione o osserva qualcun altro compiere un'azione, le aree premotorie si attivano. Normalmente, una serie di meccanismi impedisce all'osservatore di emettere il comportamento motorio che simula automaticamente quello osservato. Tuttavia, a volte i sistemi premotori permettono l'esecuzione e pertanto l'esibizione di un prefisso del movimento percepito. Esso sarà riconosciuto dall'attore, il quale potrà a sua volta riconoscere l'intenzione dell'osservatore. In tal modo i comportamenti di entrambi s'influenzeranno reciprocamente. Lo sviluppo della capacità di controllo delle funzioni del sistema specchio è un aspetto cruciale per l'emissione volontaria di segnali. Quando ciò ha avuto luogo, si è probabilmente stabilita una prima forma di dialogo tra attore e osservatore. Proprio tale dialogo sarebbe alla base del linguaggio e spiegherebbe il carattere intersoggettivo del sistema di comunicazione basato sui gesti manuali (Gentilucci e Corballis, 2006). Non è chiaro, tuttavia, se la capacità di scorgere l'emissione di un segnale da parte di un individuo e quella di associare a esso un cambiamento comportamentale si siano sviluppate parallelamente, ma non vi è dubbio che, una volta stabilita, questa nuova associazione abbia avuto enormi benefici adattivi per chi ne facesse uso.

ad esempio il succhiare e il leccare cibo, costituisca la cornice sillabica specifica del linguaggio verbale umano, dalla cui modulazione dipenderebbe la pronuncia di vocali e consonanti.

E' dunque plausibile pensare che il linguaggio verbale sia derivato direttamente dall'evoluzione dei gesti oro-facciali, in seguito alla quale è poi apparsa la vocalizzazione? Ciò sembra improbabile poiché lo scambio comunicativo per mezzo dei soli gesti oro-facciali sarebbe difficilmente estendibile a più di due attori. Se però alla comunicazione oro-facciale si associano gesti manuali, allora le possibilità comunicative aumentano sensibilmente. Chi stabilisce la comunicazione, ad esempio, potrebbe indicare al ricevente del messaggio una terza persona, un oggetto o una loro caratteristica. Inoltre, una seconda ragione che rende improbabile l'ipotesi di una diretta derivazione del linguaggio verbale dal gesto oro-facciale, risiede nel fatto che le forme basiche di comunicazione oro-facciale non possiedono le proprietà combinatorie caratterizzanti invece il parlato umano. Tutte queste considerazioni suggeriscono che, probabilmente, a un certo punto dell'evoluzione un sistema di comunicazione manuale si sia evoluto in modo complementare a quello oro-facciale e tale sviluppo deve avere enormemente modificato l'importanza della vocalizzazione e il suo controllo, poiché l'associazione di suoni e gesti manuali potrebbe aver permesso alla comunicazione di assumere una maggiore apertura e un carattere referenziale, già posseduto dai gesti manuali (Paget, 1963). Al contrario, essendo la comunicazione oro-facciale chiusa, l'associazione di suoni a tali gesti non avrebbe aggiunto molto di più al messaggio comunicativo. Quindi, da questo momento in poi, la descrizione gestuale di un oggetto potrebbe essere stata accompagnata dalla vocalizzazione e, se è accaduto che suoni identici siano stati costantemente usati per indicare gli stessi oggetti del mondo reale (come ad esempio: oggetto grande – grande apertura della bocca, vocale “a” (/a/), mentre oggetto piccolo – minore apertura della bocca, vocale “i” (/i/)), si sarebbe verificata la costruzione di una prima forma di vocabolario di significati (Holland e Wertheimer 1964; Weiss 1964).

E' plausibile pensare che un'importante conseguenza funzionale dell'uso della vocalizzazione sia consistita nella necessità di introdurre un controllo più fine. Nel sistema di comunicazione oro-facciale l'aggiunta di suoni aveva, verosimilmente, solo una valenza emozionale che semplicemente rinforzava i significati veicolati dall'espressione facciale. Quindi, in questo caso la vocalizzazione poteva rimanere sotto il controllo di strutture sottocorticali, non essendo necessario un controllo fine di essa. Presumibilmente, la situazione cambiò radicalmente quando i suoni acquisirono valore descrittivo. Da qui in poi, il vecchio controllo ad opera dei centri implicati nelle vocalizzazioni emozionali non poteva più essere sufficiente. Proprio tali contingenze hanno probabilmente portato allo sviluppo dell'area di Broca, a partire dal precursore F5, che già possedeva proprietà specchio, il controllo oro-laringeale (anche se non primariamente di azioni connesse alla vocalizzazione), quello brachio-manuale e un legame con la corteccia motoria primaria. Quindi, se volessimo approfondire i processi tramite i quali è avvenuta l'incorporazione della vocalizzazione nel sistema specchio, potremmo sottolineare che, nell'area F5 della scimmia, un piccolo numero di neuroni (neuroni specchio comunicativi) sembra rispondere sia all'esecuzione che all'osservazione di gesti della bocca tipicamente comunicativi (e ingestivi; ad esempio lip smacking e protrusione di labbra e lingua; Ferrari et al., 2003). Tuttavia, nello studio in questione, le azioni per cui i neuroni scaricavano erano primariamente visive e poco connesse alla vocalizzazione. Nonostante ciò, in uno studio più recente di Coudè e collaboratori (2011), gli autori riportano la presenza, nella porzione laterale di F5, di alcuni neuroni la cui attività sembra essere legata ad un rudimentale controllo volontario (condizionato) della vocalizzazione. Ciò implica che tale regione, oltre ad essere coinvolta nel controllo dei movimenti oro-facciali tipici di gesti comunicativi (Ferrari et al, 2003), potrebbe combinare tale tipo di controllo con quello dell'emissione di suoni. La scoperta di neuroni legati al controllo della vocalizzazione rende dunque plausibile l'idea che i processi da essi controllati possano aver favorito lo sviluppo di un sistema comunicativo

vocale, volontario, in seguito notevolmente più sviluppato nell'essere umano. Quindi, la pressione evolutiva per lo sviluppo di capacità di vocalizzazione più complesse e la possibilità che ciò potesse avvenire anche a livello anatomico possono effettivamente aver portato all'evoluzione della capacità di esprimersi verbalmente, e ciò sarebbe avvenuto a partire dal gesto manuale, che avrebbe perso d'importanza con una sempre maggiore autonomia della vocalizzazione, fino al momento in cui la relazione tra gesto e comunicazione orale si è invertita ed il gesto è divenuto accessorio all'emissione di suoni. Da qui la nascita del linguaggio verbale.

1.4. Teoria gestuale dell'evoluzione del linguaggio: alcune precisazioni

Come sottolinea Corballis (2010), nel corso dell'evoluzione la produzione di suoni ha sostituito i gesti manuali che ad oggi comunque persistono, soprattutto nel linguaggio dei segni utilizzato dalle comunità sordomute. E' inoltre chiaro che anche individui non sordomuti producono continuamente gesti durante il parlato (McNeill, 1992; Goldin-Meadow e McNeill, 1999; Willems e Hagoort, 2007) e sembra che i gesti manuali giochino un ruolo importante nel normale sviluppo del linguaggio verbale (Bates e Dick, 2002). Ad esempio, la lallazione canonica in bambini da 6 a 8 mesi è accompagnata da movimenti ritmici della mano (Masataka, 2001). Sempre nei bambini, la comprensione di parole da 8 a 10 mesi e la produzione di parole da 11 a 13 mesi è accompagnata da gesti di puntamento nel primo caso e da gesti indicanti un avvenuto riconoscimento nel secondo (Bates e Snyder, 1987; Volterra et al., 1979). Infine, la comparsa del gesto manuale precede l'espressione verbale nel bambino e predice il successivo sviluppo di olofrasi (Iverson e Goldin-Meadow, 2005) e del vocabolario (Sauer et al., 2010).

Nonostante la continua e costante presenza del gesto manuale, l'ipotesi che il linguaggio verbale si sia evoluto da quello gestuale rimane ad oggi speculativa e per alcuni

poco plausibile perché troppo complessa (Burling 2005; MacNeilage 2008). Tuttavia, Corballis (2010, 2009; Gentilucci e Corballis 2006) propone che il passaggio dall'una all'altra modalità comunicativa sia stato probabilmente relativamente semplice e naturale. Egli infatti sottolinea che: a) i neuroni specchio possono essere attivati da stimoli acustici (Kohler et al., 2002); b) che anche nella scimmia il sistema specchio si basa su azioni e non su specifiche modalità di input; c) che il linguaggio verbale, più che come sistema acustico, può essere visto come un sistema gestuale (Studdert-Kennedy, 1998).

E' utile considerare tali osservazioni alla luce del fatto che il sistema specchio sembra operare in accordo al medesimo principio postulato della teoria motoria della percezione del linguaggio (Rizzolatti e Arbib 1998) e cioè che il parlato sia percepito sulla base di com'è prodotto, piuttosto che a partire dall'analisi di elementi acustici (Lieberman et al., 1967; Browman e Goldstein, 1995). Come sottolinea Corballis (2010), è chiaro che in questo contesto il gesto non sia unicamente confinato a movimenti visibili. La teoria motoria della percezione del linguaggio non implica che l'ascolto del parlato induca un gesto articolatorio, proprio come la scarica dei neuroni specchio non causa nell'animale l'esecuzione del gesto osservato. Anzi, in un più recente aggiornamento della teoria motoria della percezione del linguaggio, Lieberman e Mattingly (1985) hanno sottolineato che oggetto della percezione non sono i gesti correnti, ma quelli che s'intende produrre. Ciò potrebbe infatti spiegare perché pazienti con afasia di Broca tipicamente conservano, almeno in parte, la capacità di percepire (o comprendere) il linguaggio verbale, nonostante le loro abilità di produzione verbale siano pesantemente intaccate. Quindi, percezione, espressione verbale e gesti manuali sembrano condividere una base fondata sul sistema specchio. Ma come possono essersi stabiliti tali nessi? Una delle possibili spiegazioni chiama in causa il contributo di un sistema che stabilisce interazioni motorie tra la mano e la bocca (Gentilucci e Corballis, 2006).

1.4.1. Relazione tra mano e bocca: basi neurofisiologiche ed evidenze empiriche

Il sistema specchio della scimmia è connesso sia al controllo di azioni brachio-manuali (Gallese et al., 1996; Rizzolatti et al., 1996) che al controllo di azioni eseguite con la bocca (Ferrari et al., 2003). Oltre ai neuroni specchio, l'area F5 della corteccia premotoria della scimmia include un'altra classe di neuroni, che scarica sia quando l'animale afferra con la mano che quando esegue la stessa azione con la bocca (Rizzolatti et al., 1988). Tali neuroni sembrano essere implicati nella preparazione motoria della bocca a ricevere l'oggetto precedentemente afferrato dalla mano (Gentilucci et al., 2001) e ciò sembra avvenire in relazione alla codifica del fine dell'azione (prendere possesso dell'oggetto, sia con la mano che con la bocca, Rizzolatti et al., 1988). Da un punto di vista evolutivo, i neuroni in questione potrebbero essere stati il tramite per il passaggio dalla comunicazione gestuale manuale a quella orale (Gentilucci e Corballis, 2006).

Gentilucci e colleghi (2001) inferiscono la presenza di una simile classe di neuroni anche nell'essere umano. In questo studio cinematico, che misurava quindi posizioni, angoli, velocità e accelerazioni di parti corporee, era richiesto ai partecipanti di raggiungere e afferrare con la mano oggetti di grandi e piccole dimensioni, aprendo contemporaneamente la bocca di una quantità arbitraria e costante tra le prove. I risultati mostrarono che se l'apertura delle dita era più ampia per la prensione di oggetti grandi, allora l'apertura della bocca era maggiore in questo caso, rispetto a quando la mano afferrava oggetti piccoli (Fig. 2). In un altro esperimento dello stesso studio, i soggetti afferravano con la bocca oggetti di grandi e piccole dimensioni e aprivano di una quantità costante le dita della mano. Anche in questo caso, l'apertura delle dita era maggiore per la prensione con la bocca di oggetti di grandi dimensioni, rispetto a quanto accadeva se la bocca afferrava oggetti di piccole dimensioni (Fig. 2).

Gli studi analizzati suggeriscono, dunque, che uno stesso circuito possa essere coinvolto sia nel controllo di movimenti di prensione con la mano che di prensioni con la bocca e ciò

potrebbe fornire una base per comprendere le origini delle relazioni esistenti tra gesto e linguaggio verbale e, in termini evolutivi, dei processi attraverso i quali la comunicazione verbale si è evoluta a partire da un sistema basato sul gesto manuale (Gentilucci e Dalla Volta, 2008). Tale ipotesi è ancora una volta supportata dallo studio di Gentilucci e colleghi (2001) in cui, in un successivo esperimento, si chiedeva ai partecipanti di pronunciare sillabe stampate sulla faccia visibile di solidi di grandi e piccole dimensioni, mentre essi erano afferrati con la mano. Gli autori trovarono che sia i parametri connessi al livello di potenza della voce che all'apertura delle labbra erano influenzati dalle caratteristiche cinematiche della prensione con la mano, legate a loro volta alla dimensione dell'oggetto da afferrare (Fig. 2). Ancora, in uno studio del 2004, Gentilucci e collaboratori (Gentilucci et al., 2004a) trovarono che il movimento di portare alla bocca frutti di diverse dimensioni modificava la formante (F) 2 dello spettro vocale della sillaba /ba/ pronunciata simultaneamente al movimento. Tale effetto era selettivo per elementi del parlato, mentre non vi erano effetti dell'azione di portare alla bocca sulla produzione di suoni non legati alla lingua dei partecipanti. In altre parole, azioni transitive brachio-manuali, che potenzialmente coinvolgono anche la bocca, possono essere funzionalmente connesse al controllo degli organi articolatori implicati nella produzione del parlato.

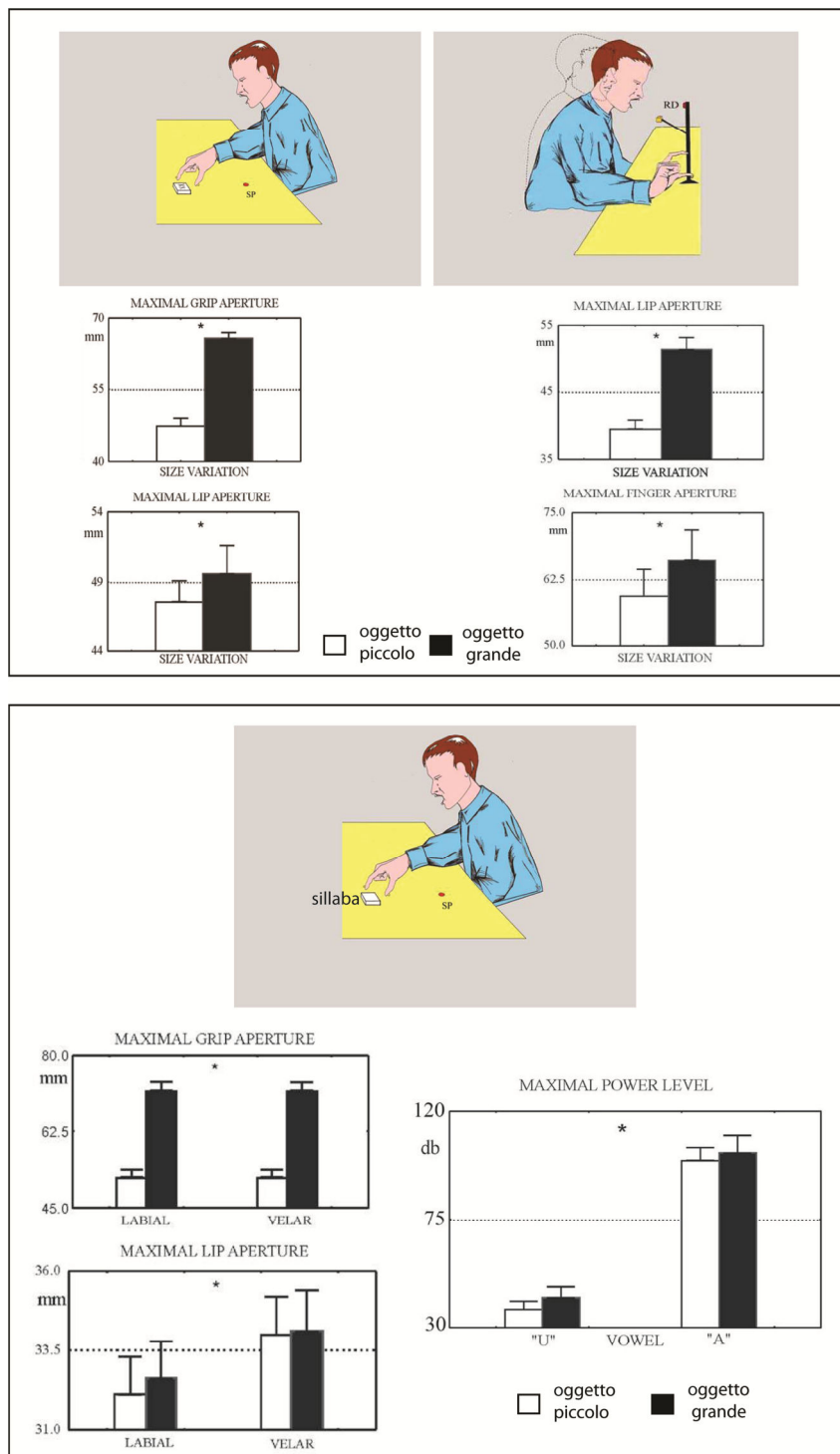


Figura 2. Risultati degli esperimenti dello studio di Gentilucci e collaboratori (2001): in alto a sinistra sono riportati gli effetti dell'esecuzione di prensioni con la mano sulla contemporanea apertura della bocca. Viceversa, in alto a destra sono riportati gli effetti della prensione con la bocca sulla contemporanea apertura delle dita della mano. Nella parte inferiore delle figura sono rappresentati gli effetti della prensione manuale sulla contemporanea produzione di sillabe (figure tratte da Gentilucci et al, 2001).

Anche l'osservazione di un altro individuo che compie un'azione può influenzare la pronuncia di unità fonemiche. Se si chiede a un partecipante di pronunciare una sillaba mentre osserva un altro individuo afferrare con la mano oggetti di grandi e piccole dimensioni, è possibile notare che la pronuncia di sillabe risulta influenzata dalla cinematica della prensione (Gentilucci, 2003; Gentilucci et al., 2004b). Più nello specifico, l'apertura delle labbra e la formante (F) 1 dello spettro vocale, durante la pronuncia di /ba/, aumentavano per l'osservazione della prensione dell'oggetto grande rispetto alla prensione dell'oggetto piccolo. È importante notare che la sola analisi visiva della dimensione dell'oggetto e l'osservazione di uno stimolo non biologico che si muoveva verso gli oggetti con la stessa velocità con cui si muoveva il braccio dell'attore, non avevano effetti comparabili sullo spettro vocale (Gentilucci, 2003). La stessa variazione di F1 è stata osservata per la pronuncia della sillaba /da/ in seguito all'osservazione di prensioni di frutti di diverse dimensioni, mentre non sono stati riscontrati effetti analoghi né in seguito all'osservazione d'interazioni tra piede e oggetti di varie dimensioni, né in seguito alla semplice osservazione di oggetti (Gentilucci et al., 2009). In questo caso, dunque, è stata provata la specificità delle relazioni tra mano e bocca.

Gli effetti dell'osservazione di azioni manuali sull'apertura delle labbra e sullo spettro vocale di sillabe (Gentilucci 2003) sembravano dipendere dalla cinematica del movimento del braccio e non dalla tipologia di oggetti presentati. Infatti, gli stessi effetti si osservavano presentando sia frutti che solidi geometrici, e anche quando non era presentato alcun oggetto e l'azione veniva unicamente mimata (Gentilucci et al., 2004b). Gentilucci e collaborati (Gentilucci e Corballis, 2006; Gentilucci e Dalla Volta, 2008) suggeriscono pertanto che l'attività del sistema specchio e del sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca possa essere congiunta. In altre parole, per mezzo del sistema specchio, l'osservazione di un'azione brachio-manuale, transitiva o intransitiva, può portare all'attivazione di rappresentazioni motorie legate all'azione osservata al fine di interpretarne il significato. Per azioni manuali

funzionalmente legate ad azioni oro-facciali, il comando motorio è inviato anche alla bocca e ciò porterebbe al raggiungimento della soglia per l'esecuzione, quando la bocca è già attivata dalla pronuncia di sillabe (Gentilucci, 2003; Gentilucci et al., 2001, 2004a, b, 2009).

Sulla base dei risultati sopra descritti, Gentilucci e colleghi (Gentilucci e Corballis, 2006; Gentilucci e Dalla Volta, 2008) hanno proposto un'ipotesi evolutiva secondo cui, originariamente nell'ambito dei movimenti d'ingestione, grazie al sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca sviluppatosi in questo stesso contesto, azioni che coinvolgevano entrambi gli effettori mano e bocca possono essere state associate all'attività di organi articolatori. Questi ultimi, con il tempo, sarebbero stati utilizzati per il linguaggio parlato. Le azioni considerate erano originariamente ingestive e solo in seguito adattate alla funzione comunicativa. Secondo gli stessi autori, tale possibilità evolutiva risulta avvalorata dal fatto che le pantomime sembrano influenzare i parametri dello spettro vocale analogamente all'osservazione di azioni transitive (Gentilucci 2004b). Tale fenomeno rende plausibile l'idea che, nel corso dell'evoluzione, i nessi tra azioni manuali e vocalizzazioni siano diventati sempre più astratti.

2. I GESTI ED IL LORO RAPPORTO CON L'ESPRESSIONE VERBALE

2.1. Cenni introduttivi

Ogni giorno, tutti noi produciamo dei gesti, ossia impieghiamo parti visibili del nostro corpo per esprimerci, e ciò, dal punto di vista funzionale, avviene in modo analogo a quando ci esprimiamo verbalmente. A volte usiamo il gesto in concomitanza al parlato, altre volte esso completa o sostituisce parti del discorso. Ma quali sono gli "attuali" rapporti tra gesti e linguaggio?

Ci sono due principali posizioni riguardo alla relazione tra gesti e linguaggio parlato. La prima li considera due sistemi di comunicazione distinti (Hadar et al., 1998; Krauss e Hadar, 1999; Levelt et 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. I gesti, dunque, potrebbero rappresentare una sorta di epifenomeno nei processi di facilitazione lessicale.

Secondo McNeill (1992; vedere anche Kendon, 2004; Sassenberg e Van Der Meer, 2010), i gesti prodotti simultaneamente al parlato sono a esso strettamente connessi. Gesto e parola sono elementi inseparabili della comunicazione, due facce della stessa medaglia, poiché sono ancorati agli stessi processi mentali. La visione 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 (Arbib, 2005; Armstrong, 1999; Armstrong et al., 1995; Corballis, 1992, 2002; Donald, 1991; Gentilucci e Corballis, 2006; Givòn, 1995; Hewes, 1973; Rizzolatti e Arbib, 1998; Ruben, 2005; Whishaw et al., 2010) si trova in accordo a tale concezione del rapporto tra gesto e linguaggio.

Secondo i risultati sperimentali precedentemente descritti, l'osservazione di pantomime influenza il parlato in modo simile a quanto avviene per l'osservazione di azioni transitive (Gentilucci, 2004b). Secondo Donald (1991), nel corso dell'evoluzione la pantomima di azioni potrebbe essere stata impiegata per rappresentare iconicamente caratteristiche di oggetti e azioni. Con il tempo, però, le 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 in un simbolo, si parla di "convenzionalizzazione" (Burling, 1999). I gesti che ne derivano sono emblematici e non necessariamente ricalcano la forma fisica di oggetti e azioni cui si riferiscono, ma sono loro connessi in modo convenzionale. Pertanto, potrebbe esser plausibile

che il gesto simbolico si sia evoluto a partire da azioni transitive e che, negli esseri umani, lo stesso sistema responsabile dei nessi funzionali tra azioni manuali e produzione di unità fonemiche possa essere alla base dei nessi intercorrenti tra gesto e parola (Gentilucci e Dalla Volta, 2008).

2.2. Classificazione dei gesti

Nel 1982 Kendon propone una classificazione dei gesti in pantomime, segni, gesti simbolici e gesticolazioni. Nel 1992 McNeill riprende tale classificazione, analizzandola lungo un continuum definito in relazione al fatto che i gesti prodotti necessitino o meno della contemporanea presenza del parlato per essere compresi. La classificazione di Kendon (1982) viene quindi rinominata “Continuum di Kendon” (McNeill, 1992). A un estremo del continuum troviamo gesti altamente convenzionali, la cui funzione è indipendente dal parlato: essi sono appunto quelli che compongono il linguaggio dei *segni*. All’estremo opposto del continuum troviamo le *gesticolazioni* o, in altre parole, movimenti spontanei delle mani e delle braccia, che necessariamente accompagnano l’espressione verbale. Tra queste due tipologie di gesti, troviamo poi le *pantomime* (verso le gesticolazioni) e una classe gestuale altamente convenzionalizzata (verso i segni), composta dai *gesti simbolici* (o *emblemi*).

McNeill è esplicitamente interessato alle gesticolazioni; egli infatti scrive:

“By virtue of idiosyncrasy, co-expressive speech-synchronized gestures open a ‘window’ onto thinking that is otherwise curtained. Such a gesture displays mental content, and does so instantaneously, in real time...”

(McNeill e Duncan, 2000)

Trasversalmente al continuum di Kendon, McNeill (1992) propone una classificazione dei gesti in termini di come essi possano essere interpretati, come atti simbolicamente

espressivi, in relazione al contesto creato dal contenuto del parlato, all'interno del quale i gesti sono prodotti. La prima distinzione è tra gesti immaginistici e non immaginistici. I gesti *immaginistici* sono quelli i cui movimenti sono compiuti al fine riprodurre la forma di un oggetto o per rappresentare pattern di movimenti; essi sono gesti che veicolano un'immagine. I gesti *non immaginistici*, invece, includono i *gesti di puntamento* (o *gesti deittici*) e i gesti che sembrano semplicemente gesti ritmici, ma che invece marcano segmenti del discorso o la struttura ritmica del parlato. Essi sono i *gesti di battuta* e sono movimenti che, in genere, non rappresentano significati e che consistono in semplici movimenti dall'alto al basso, in cui la mano non è portata verso nessuna specifica porzione dello spazio in cui il gesto è eseguito.

I gesti immaginistici sono a loro volta divisi in gesti iconici e metaforici, in accordo al ruolo, nel discorso, dell'immagine da essi veicolata. I *gesti iconici* mostrano, tramite il modo in cui sono prodotti, aspetti concreti del contesto creato dal parlato. I *gesti metaforici* forniscono anch'essi un'immagine tramite la loro forma e il loro movimento, ma l'immagine fornisce una rappresentazione di contenuti più astratti. La distinzione tra gesti iconici e metaforici risiede, comunque, nel modo in cui l'immagine "dipinta" dal gesto è usata dal parlante all'interno del discorso; se essa è usata per rappresentare un'idea astratta, allora il gesto è metaforico.

2.2.1. Classificazione funzionale del gesto

Abbiamo chiarito che la comunicazione comprende sia di modalità espressive verbali che gestuali, ma in che modo i gesti contribuiscono al significato espresso dalla comunicazione? Secondo Kendon (2004) la componente gestuale della comunicazione può contribuire alla comprensione del suo contenuto referenziale e vi sono due modi in cui ciò può verificarsi. Il gesto può fornire una concreta rappresentazione di un aspetto dell'oggetto della comunicazione, oppure può contribuire a specificare il contenuto proposizionale della comunicazione con un diretto puntamento all'oggetto cui la comunicazione si riferisce.

Vi sono stati vari tentativi di classificare i gesti in relazione alla loro funzione *rappresentazionale* (o referenziale; Wundt 1973; Mandel 1977; Kendon 1980; 1988b; Poggi e Caldognetto 1998; Calbris 1990; Muller 1998) e sebbene tra le varie classificazioni persistano delle differenze, esse propongono di distinguere le funzioni rappresentazionali dei gesti in funzione di modellamento, funzione di pantomima e funzione rappresentativa. Quando il gesto ha *funzione di modellamento*, una parte del corpo viene utilizzata come modello di un oggetto. Quando a questo scopo sono utilizzate le mani, esse possono assumere una configurazione che può ricalcare la forma dell'oggetto cui la comunicazione si riferisce. Se il gesto ha la *funzione di pantomima*, la parte corporea coinvolta in esso può produrre un pattern d'azione le cui caratteristiche sono analoghe a reali pattern di azioni cui la comunicazione si riferisce. Infine, quando il gesto ha *funzione rappresentativa*, le parti corporee coinvolte, spesso proprio le mani, che assumono configurazioni differenti in base a ciò che "raffigurano", utilizzano un pattern di movimento che viene riconosciuto proprio come la "creazione dell'oggetto nell'aria" (Kendon, 2004).

Secondo Kendon (2004), il riconoscimento del gesto come tale e il riconoscimento degli oggetti e delle azioni rappresentate, implicano la comprensione del contesto all'interno del quale i gesti sono prodotti. Spesso il contesto è specificato dall'espressione verbale, ma ciò non significa che la parola fornisca interamente il significato del gesto. A volte, i movimenti gestuali possiedono intrinsecamente un significato molto generale e, quando prodotti congiuntamente al parlato, essi possono essere compresi in modo più specifico.

2.3. Rapporto tra gesto e linguaggio verbale: evidenze empiriche

Come già anticipato, le gesticolazioni (Kendon, 1982; McNeill, 1992) possono essere considerate l'esempio per eccellenza della stretta relazione tra processi legati all'azione e al linguaggio, poiché, senza l'espressione verbale, esse perdono il loro significato. Tuttavia, solo

recentemente l'attenzione dei vari studi si è concentrata sull'indagine delle modalità di integrazione di gesti ed espressione verbale e sulle strutture neurali deputate a tale funzione. A questo proposito, Kelly e collaboratori (2004) sono ricorsi all'uso dei potenziali evento-correlati (ERP), misurati mentre i soggetti osservavano un gesto manuale che descriveva le dimensioni di un oggetto. Se il gesto era preceduto da una parola presentata uditivamente, indicante una proprietà dell'oggetto che non corrispondeva a quella descritta dal gesto, si osservava la comparsa di un effetto N400. Gli effetti N400 si osservano frequentemente negli studi sul linguaggio, quando la processazione semantica della parola è difficilmente integrabile nel contesto (vedere ad esempio Brown et al., 2000; Kutas e van Petten, 1994). Sulla base di tale risultato, Kelly e collaboratori (2004) hanno proposto che l'effetto N400 indica che anche l'osservazione del gesto manuale può dar luogo a un'analisi semantica. Tuttavia, una questione rimasta in sospeso riguarda il come le elaborazioni semantiche evocate dal gesto siano comparabili a quelle connesse a materiale più squisitamente linguistico, come le parole. Sempre utilizzando i potenziali evento-correlati, Özyürek e colleghi (2007) presentavano uditivamente ai soggetti frasi in cui una parola critica era accompagnata da un gesto. O la parola o il gesto erano però semanticamente incongruenti con il contesto frasale. I risultati dell'esperimento rivelavano un effetto N400 sia per gesti che per parole semanticamente anomale e la latenza con cui l'effetto si presentava non differiva per i due segnali comunicativi. Ciò suggerisce che l'integrazione delle informazioni semantiche con il contesto frasale probabilmente avviene con la stessa tempistica, sia quando esse sono veicolate dal gesto che quando a fornirle è la parola. In uno studio di risonanza magnetica funzionale (Willems et al., 2007) si è osservato che la processazione di gesti e parole anomale in senso semantico portavano a un aumento dell'attivazione in regioni sovrapposte della corteccia frontale inferiore di sinistra. In un successivo studio di risonanza magnetica funzionale, gli stessi autori (Willems et al., 2009) presentavano ai soggetti video mostranti combinazioni parola-

gesticolazione semanticamente congruenti o incongruenti e parola-pantomima, anch'esse semanticamente congruenti o incongruenti. Gli autori osservarono che, tra le aree d'interesse coinvolte nei processi di integrazione multimodale, solo l'attivazione del giro frontale inferiore di sinistra era presente sia per la presentazione simultanea e semanticamente congruente di parola e gesticolazione che per la presentazione simultanea e semanticamente congruente di parola e pantomima. I risultati di questi studi suggeriscono quindi che il giro frontale inferiore (area di Broca) sia specificamente coinvolto nell'integrazione di informazioni linguistiche e gestuali legate da relazioni semantiche di diverso tipo (Gentilucci et al., 2006).

Un'altra classe di gesti manuali, studiata per comprendere la natura del legame tra gesti e parole, è quella dei gesti simbolici (Kendon, 1982; McNeill, 1992). Questa classe di gesti è più convenzionalizzata delle gesticolazioni e il loro significato permane anche in assenza di espressione verbale. In uno studio di Bernardis e Gentilucci (2006), ai partecipanti erano presentate per iscritto parole al cui significato corrispondeva anche un segnale gestuale, ossia CIAO, NO e STIOP. Il lettore rispondeva alla presentazione degli stimoli in diversi modi, e cioè: a) ripetendo la parola ad alta voce; b) eseguendo il gesto corrispondente alla parola; c) eseguendo il gesto corrispondente alla parola e ripetendo contemporaneamente la parola stessa. L'esperimento prevedeva anche due condizioni di controllo in cui, o i soggetti pronunciavano la parola ed eseguivano contemporaneamente un gesto senza significato, o pronunciavano una pseudo-parola contenente le stesse vocali della parola-stimolo da cui derivava (es. /lao/), simultaneamente all'esecuzione casuale di uno dei tre gesti simbolici. I risultati dell'esperimento mostrarono che, rispetto alla condizione in cui la parola era pronunciata isolatamente, la formante (F) 2 dello spettro vocale aumentava se simultaneamente a essa era eseguito il gesto corrispondente. Tale effetto non si osservava se il gesto eseguito simultaneamente alla pronuncia della parola era privo di significato. Durante l'esecuzione del gesto, i valori dei parametri cinematici del braccio diminuivano quando esso era prodotto

simultaneamente alla pronuncia della parola, rispetto alla condizione in cui esso era eseguito isolatamente. Inoltre, effetti sulla cinematica del braccio, comparabili a quello appena descritto, non si osservavano se ai partecipanti era richiesto di pronunciare pseudo-parole. Ancora, lo stesso effetto non si osservava nemmeno nello studio di Barbieri e colleghi (2009), in cui erano presentati gesti simbolici e parole ad essi incongruenti in termini di significato. La spiegazione funzionale dei fenomeni osservati nei due studi appena descritti si basa, secondo gli autori, sull'idea che il sistema di controllo del gesto fornisca comandi facilitatori al sistema di controllo della bocca, impegnato nella pronuncia di parole corrispondenti al gesto. Una volta ricevuti i comandi, il sistema di controllo della bocca agirebbe retroattivamente sul sistema di controllo braccio-manuale, i cui prodotti gestuali diverrebbero ridondanti.

Nello stesso di studio Bernardis e Gentilucci (2006), in un secondo esperimento, gli autori hanno studiato la risposta verbale a gesti comunicativi presentati attraverso diverse modalità sensoriali. Lo scopo di tale indagine era quello di determinare se l'osservazione o l'ascolto di segnali comunicativi coinvolgesse gli stessi processi legati all'esecuzione di azioni. A tal proposito, ai partecipanti erano presentate sullo schermo di un PC o la parola CIAO, o la parola NO, o la parola STOP. A ciascuna di esse seguiva uno di tre possibili tipologie di filmati. In un primo tipo di video un'attrice pronunciava la stessa parola; nel secondo tipo di filmati l'attrice eseguiva il gesto corrispondente alla parola e infine, nel terzo tipo di video, l'attrice pronunciava la parola e produceva simultaneamente il gesto corrispondente. In ogni caso i soggetti rispondevano allo stimolo pronunciando la parola presentata. I risultati mostrarono che, in seguito alla presentazione isolata sia della parola che del gesto, la F2 della parola pronunciata aumentava rispetto alla condizione di base in cui il soggetto leggeva semplicemente la parola mostrata sullo schermo, senza che vi fosse presentazione di uno dei tre possibili tipi di filmato. Inoltre, si riscontrava un ulteriore aumento di F2 quando la risposta seguiva la presentazione contemporanea di gesto e parola. Gli autori hanno suggerito che

quando l'osservatore risponde verbalmente al gesto presentato, egli simula internamente il gesto, grazie all'attività del sistema specchio. Ne deriva che, in virtù dei nessi tra mano e bocca, un comando motorio sia mandato direttamente anche al sistema di controllo della bocca. Ciò causerebbe una modificazione della postura articolatoria, a sua volta responsabile degli effetti sulla F2.

Per quanto concerne il significato funzionale dell'aumento della F2, Bernardis e Gentilucci (2006) ricordano che l'aumento di questo parametro deriva probabilmente dalla protrusione della lingua (Leoni e Maturi, 2002). Nei primati non umani, sia l'apertura della bocca che la protrusione della lingua accompagnano i tipici gesti di avvicinamento tra conspecifici (vedere per esempio Van Hooff, 1962; 1967 per la scimmia). Gli autori propongono, quindi, che durante l'osservazione di segnali comunicativi emessi da un individuo, l'osservatore tenda alla diretta interazione con l'emittente. Quindi, chi percepisce il primo segnale potrebbe assumere posture articolatorie tali da facilitare la diretta interazione con altri individui e, se l'aumento della F2 è associato alle posture articolatorie in questione, tale parametro potrebbe essere connesso alla codifica dell'intenzione sociale alla base del segnale comunicativo.

2.3.1. L'area di Broca e il legame tra gesto e parola

Una volta descritti i rapporti tra gesto e parola, probabilmente derivanti dall'attività congiunta del sistema specchio e del sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca, rimarrebbero da approfondire i substrati neurali e le modalità con cui avviene la loro integrazione.

Vari studi di neuroimaging funzionale hanno riportato un'attivazione dell'area di Broca durante l'osservazione di gesti manuali dotati di significato (Gallagher e Frith, 2004; Buccino et al., 2001; Grèzes et al., 1998; Decety et al., 1997; Grafton et al., 1996). Altri risultati

mostrano il coinvolgimento dell'area di Broca nella rappresentazione di unità fonologiche in termini di gesti articolatori della bocca (Paulesu et al., 1993; Demonet et al., 1992; Zatorre et al., 1992; Bookheimer, 2002).

Sulla base di tali dati, Gentilucci e collaboratori (Gentilucci e Corballis, 2006; Gentilucci et al., 2006) hanno ipotizzato che l'area di Broca possa essere coinvolta nel trasferimento di vari aspetti della rappresentazione del gesto manuale a gesti articolatori della bocca. Gli aspetti in questione consisterebbero nello scopo del gesto (Buccino et al., 2001; Buccino et al., 2004) e/o nell'intenzione che lo guida (Iacoboni et al., 2005). Partendo da tale presupposto teorico, Gentilucci e colleghi (2006) hanno ulteriormente testato il ruolo dell'area di Broca nei processi d'integrazione tra gesto e parola, inattivandola con una stimolazione magnetica transcranica ripetitiva (rTMS) a bassa frequenza (1 Hz). In seguito all'inattivazione dell'area di Broca, gli autori eseguirono lo stesso esperimento descritto nello studio di Bernardis e Gentilucci (2006), ossia ai partecipanti era presentata sullo schermo di un PC o la parola CIAO o la parola NO o la parola STOP. Ciascuna parola era poi seguita da un filmato che poteva mostrare o l'attrice che pronunciava la stessa parola, o l'attrice che eseguiva il gesto corrispondente alla parola, o l'attrice che produceva contemporaneamente la stessa parola e il gesto a essa corrispondente. Anche in questo caso i soggetti rispondevano allo stimolo pronunciando la parola presentata prima del filmato. In seguito all'inattivazione dell'area di Broca, gli autori non osservarono più la modulazione della F2 osservata nello studio di Bernardis e Gentilucci (2006). Al contrario, stimolando a 1 Hz l'area simmetrica dell'emisfero destro ed eseguendo una "finta" stimolazione dell'area di Broca essi osservarono un aumento della F2 della risposta verbale che seguiva la presentazione o della parola o del gesto e un ulteriore aumento della F2 dopo la contemporanea presentazione di gesto e parola, rispetto alla condizione di base (semplice lettura della parola non seguita da alcun filmato). In un successivo esperimento di controllo del medesimo studio, Gentilucci e colleghi (2006)

dimostrarono che l'inattivazione dell'area di Broca aveva effetti diversi per risposte conseguenti a segnali comunicativi e non comunicativi. Quindi, essi presentarono i segnali comunicativi CIAO, NO e STOP e segnali che si riferivano a colori. La presentazione dei colori avveniva in diverse modalità: a) presentazione scritta delle parole GIALLO, ROSA e ROSSO; b) presentazione di filmati mostranti un'attrice che pronunciava le stesse parole; c) presentazioni di video mostranti l'attrice che eseguiva i gesti comunicativi CIAO, NO, STOP, ma sulla cui mano comparivano punti colorati (giallo, rosa e rosso). Anche in questo caso i soggetti rispondevano pronunciando le parole corrispondenti ai colori presentati. I risultati dell'esperimento non mostrarono alcuna modulazione nella F2 in funzione della modalità con cui i colori erano presentati, né in seguito a stimolazione dell'area di Broca, né in seguito alla "finta" stimolazione della stessa area e all'inattivazione dell'area simmetrica dell'emisfero destro. Gli autori conclusero, dunque, che l'area di Broca fosse implicata nel trasferimento di aspetti squisitamente comunicativi, caratterizzanti la rappresentazione del gesto manuale, ai gesti articolatori della bocca.

3. SCOPO DELLA TESI

La presente tesi si compone di due studi cinematici volti a indagare ulteriormente il funzionamento del sistema di doppi comandi motori alla mano e alla bocca, la cui esistenza nell'essere umano è stata proposta da Gentilucci e colleghi (2001). Come già detto, secondo gli autori, tale sistema potrebbe fornire una base per comprendere le origini delle relazioni esistenti tra gesto e linguaggio verbale e, in termini evolutivi, dei processi attraverso i quali la comunicazione verbale si è evoluta a partire da un sistema basato sul gesto manuale.

A questo proposito, nella parte iniziale della prima ricerca mi concentrerò sulle caratteristiche funzionali del sistema alla base delle interazioni tra i movimenti della mano e

della e bocca e sulla specificità delle loro relazioni, rispetto a quelle che questi due effettori distali mantengono con altri effettori (piede). Nella seconda parte del primo studio analizzerò il legame tra movimenti di prensione manuale e produzione di unità fonemiche, utilizzando anche l'analisi dello spettro vocale dei partecipanti.

A partire dai risultati della prima ricerca che descriverò, ma non solo, nel secondo studio cinematico della presente tesi (nel quale utilizzerò nuovamente anche l'analisi dello spettro vocale) mi focalizzerò maggiormente sui legami intercorrenti tra gesto e linguaggio verbale, analizzando l'influenza del gesto manuale sul parlato e viceversa. Esaminerò, quindi, la natura di tale relazione, cercando di capire fino a che punto essa possa essere di natura semantica.

(Per una descrizione più dettagliata degli scopi dei due studi descritti nella presente tesi, si rimanda ai “Cenni introduttivi” nelle sezioni dedicate a ciascuno di essi).

Studio I

PRESUPPOSTI TEORICI E SCOPO DELLO STUDIO

Nel loro studio del 2001, Gentilucci e collaboratori dimostrarono che l'esecuzione di prensioni manuali di oggetti di diverse dimensioni, cui pertanto corrispondevano differenti cinematiche e aperture delle dita, influenzava la contemporanea apertura della bocca, nonostante fosse richiesto ai partecipanti di aprirla di una quantità costante tra le prove (Fig. 2). Viceversa, anche la prensione con la bocca di oggetti di dimensioni differenti portava a una variazione della contemporanea apertura delle dita della mano (Fig. 2). A partire da questi dati, Gentilucci e collaboratori (2001) suggerirono che uno stesso circuito potesse essere coinvolto sia nel controllo di movimenti di prensione con la mano che di prensioni con la bocca e ciò potrebbe fornire una base per comprendere le origini delle relazioni esistenti tra gesto e linguaggio verbale (Gentilucci e Dalla Volta, 2008).

Tuttavia, i due esperimenti dello studio di Gentilucci e colleghi (2001) appena descritti lasciano irrisolti alcuni aspetti delle caratteristiche funzionali del sistema di doppi comandi motori alla mano e alla bocca. In primo luogo, Gentilucci e collaboratori (2001) osservavano che la prensione eseguita con un effettore distale (la mano o la bocca) influenzava la contemporanea assunzione di posture da parte dell'altro effettore (la bocca o la mano). Tuttavia, gli autori non hanno verificato il contrario, e cioè se la postura di un effettore, implicitamente connessa all'interazione con oggetti di diverse dimensioni, fosse in grado di influenzare il controllo motorio della prensione eseguita dall'altro effettore distale. Eppure, se si dimostrasse che la postura di un effettore (mano o bocca) è sufficiente a influenzare il movimento eseguito dall'altro effettore (bocca o mano), ciò supporterebbe fortemente l'ipotesi che il sistema che stabilisce interazioni tra posture e movimenti di mano e bocca possa essere il precursore del sistema responsabile dei legami esistenti tra gesto e parola.

Infatti, la pronuncia di parole e l'esecuzione di gesti non si basano solo su movimenti di bocca e mano, ma anche sulle posture che i due effettori sono in grado di assumere.

Un secondo aspetto da chiarire, dello studio di Gentilucci e collaboratori (2001), concerne il fatto che le interazioni reciproche osservate tra mano e bocca non siano semplicemente dovute a una sincronia tra i movimenti dei due effettori. In tale studio, infatti, la prensione con un effettore avveniva simultaneamente all'assunzione della postura di apertura da parte dell'altro. Al fine di escludere questa spiegazione, nello studio che descriverò in seguito, gli effettori assumeranno una postura di apertura o chiusura e, solo dopo il completamento di questa fase, l'altro effettore inizierà il proprio movimento di prensione.

Infine, lo studio di Gentilucci e collaboratori (2001) non stabilisce se le interazioni motorie osservate tra mano e bocca siano specifiche per questi effettori distali o estendibili ad altri effettori.

Lo studio che descriverò a breve si propone di chiarire tutti i dubbi circa gli esperimenti precedentemente citati dello studio di Gentilucci e colleghi (2001), ricorrendo a quattro nuovi esperimenti. Nei primi due, ci concentreremo sugli eventuali effetti di posture manuali sul successivo movimento di prensione con la bocca. In particolare, nell'esperimento 1, la mano assumerà posture in cui le dita possono essere flesse o estese e che prevedranno sempre anche l'opposizione del pollice alle altre dita. In altre parole, le posture manuali considerate saranno connesse alla pantomima di prese di forza (oggetto di grandi dimensioni) e di precisione (oggetti di piccole dimensioni). Nell'esperimento 2, le posture manuali richiederanno la semplice flessione o estensione delle dita, senza alcuna opposizione del pollice. L'obiettivo primario di questo secondo esperimento è quello di rendere le configurazioni della mano più simili alle modalità di movimento della bocca durante la prensione. E' inoltre necessario che le posture della mano e i loro effetti sulla prensione con la bocca siano confrontabili con quelli di posture di bocca e piede sulla prensione eseguita con la

mano, effetti che saranno analizzati in due ulteriori esperimenti. Infatti, nell'esperimento 3, si studieranno gli effetti di posture di bocca, che richiedono un semplice innalzamento e abbassamento della mandibola, mentre, nell'esperimento 4, si studieranno gli effetti di posture di piede, che richiederanno la semplice flessione o estensione delle dita. In entrambi gli esperimenti, dopo avere assunto le posture richieste, i partecipanti eseguiranno una prensione manuale.

In un ulteriore esperimento dello studio di Gentilucci e colleghi (2001), i partecipanti afferravano con la mano oggetti piccoli e grandi e contemporaneamente pronunciavano una sillaba. I risultati rivelarono che la cinematica della prensione manuale influenzava la pronuncia della sillaba (vedere Fig. 2). Tuttavia, gli autori non osservarono effetti della postura della bocca interna, connessa alla pronuncia dell'unità fonemica, sulla prensione manuale. Tale mancanza di effetti potrebbe però essere dovuta al fatto che la pronuncia della sillaba avveniva dopo l'inizio della prensione manuale e, probabilmente, la durata della pronuncia sillabica era troppo breve rispetto alla durata del movimento di prensione perché essa riuscisse a influenzarlo. Dunque, per diverse ragioni, i processi connessi alla pronuncia della sillaba potrebbero aver avuto scarso accesso ai processi di pianificazione e controllo del movimento di prensione. Per tutti questi motivi, nel presente studio, sarà svolto un quinto esperimento in cui si testerà l'eventuale effetto del parlato sul movimento di prensione manuale, richiedendo ai partecipanti di pronunciare vocali aperte e chiuse e, solo in seguito, di afferrare con la mano oggetti di differenti dimensioni, continuando a pronunciare la vocale per tutta la durata del movimento. Per ricollegarci ai precedenti esperimenti del presente studio, è utile considerare che la pronuncia di vocali richiede specifiche posture della bocca interna (Browman e Goldstein, 1995; Leoni e Maturi, 2002). In altre parole, la pronuncia di vocali aperte (/a/) richiede una maggiore apertura della bocca interna, mentre la pronuncia di vocali chiuse (/i/) implica un'apertura minore. Nell'esperimento 3, saranno studiati gli effetti

di posture della bocca (esterna) sul controllo della prensione manuale, nell'esperimento 5 potrebbe essere possibile osservare anche l'effetto di specifiche posture della bocca interna sul movimento di prensione con la mano.

ESPERIMENTO 1

4. MATERIALI E METODI

4.1. Partecipanti

Per questo primo esperimento, sono stati reclutati dieci soggetti volontari (7 femmine e 3 maschi, età 23-30 anni; lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e non a conoscenza degli scopi dell'esperimento.

L'intero studio è stato approvato dal Comitato Etico della Facoltà di Medicina dell'Università di Parma, secondo quanto prescritto dalla dichiarazione di Helsinki.

4.2. Apparato, stimoli e procedura

Durante l'esperimento, i partecipanti sedevano davanti ad un tavolo, su cui posavano la loro mano destra. A essi era richiesto di raggiungere con il capo e afferrare con la bocca una caramella di due possibili dimensioni (target piccolo: 1 x 1 x 2 cm; target grande: 1,5 x 1,5 x 3 cm). All'inizio di ciascuna prova, casualmente, una delle due caramelle era posizionata su di un supporto posto sul piano del tavolo, in modo che essa distasse circa 24 cm dalla bocca del partecipante, in posizione di partenza e con gli occhi chiusi. (Fig. 3A). I movimenti di raggiungimento e prensione della caramella avvenivano in tre diverse condizioni sperimentali, nelle quali la postura della mano destra variava casualmente tra: a) assunzione di una postura consistente nella pantomima di una presa di forza (utilizzata

normalmente per interagire con oggetti di grandi dimensioni); b) mantenimento della mano distesa e rilassata sul tavolo (condizione di controllo); c) assunzione di una postura consistente nella pantomima di una presa di precisione (utilizzata normalmente per interagire con oggetti di piccole dimensioni; Fig. 3A). Nella postura corrispondente alla presa di forza la mano era aperta e le dita distese, mentre il pollice era in opposizione alle altre dita. Nella postura corrispondente alla presa di precisione le dita erano flesse e il pollice era in opposizione all'indice.

All'inizio di ogni prova, i partecipanti avevano bocca e occhi chiusi ed era loro chiesto di assumere una delle tre posture manuali. Quando i soggetti erano sicuri di avere assunto la postura corretta, era loro richiesto di aprire spontaneamente gli occhi e di raggiungere e afferrare l'oggetto, mantenendo la mano in postura per tutta la durata del movimento. Inoltre ai partecipanti era chiesto di muoversi in modo spontaneo e con velocità naturale.

In questo, come nei successivi esperimenti del presente studio, la postura era assunta senza controllo visivo dell'effettore. Tuttavia, in questo caso (e anche nell'esperimento 2), durante il movimento del capo (nella fase di raggiungimento), i partecipanti potevano intravedere la loro mano servendosi della visione periferica.

Le tre condizioni sperimentali si susseguivano in ordine pseudo-casuale all'interno di un'unica sessione sperimentale. Per ciascuna condizione si avevano 16 prove (in 8 prove era utilizzata la caramella grande, nelle restanti 8 la caramella piccola). Ciascuna sessione sperimentale comprendeva complessivamente 48 prove.

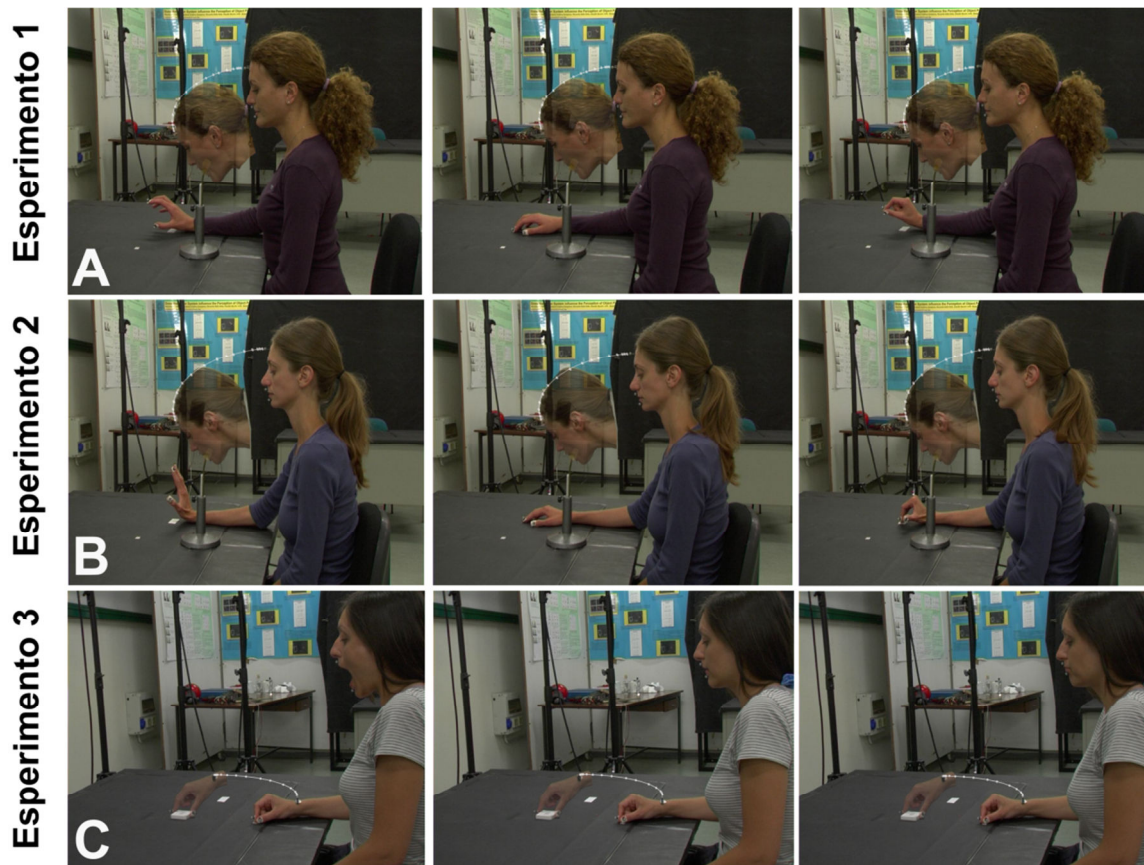


Figura 3. A) Setting sperimentale, stimoli ed esempi di movimenti di raggiungimento con il capo e di prensione con la bocca nell'esperimento 1. Le linee bianche rappresentano esempi di traiettorie dei movimenti eseguiti. Nei pannelli di sinistra, centrale e di destra sono presentate le condizioni in cui la postura della mano era connessa alla presa di forza, in cui la mano era mantenuta rilassata e, infine, in cui la postura della mano era connessa alla presa di precisione. B) Setting sperimentale, stimoli ed esempi di raggiungimento con il capo e di prensione con la bocca nell'esperimento 2. Le linee bianche rappresentano esempi di traiettorie di tali movimenti. Nei pannelli di sinistra, centrale e di destra sono presentate le condizioni in cui la postura della mano corrispondeva con l'estensione delle dita, il rilassamento delle dita e la flessione delle dita. C) Setting sperimentale, stimoli ed esempi di raggiungimento con il braccio e di prensione con la mano nell'esperimento 3. Le linee bianche rappresentano esempi di traiettorie. Nei pannelli di sinistra, centrale e di destra sono presentate le condizioni posturali in cui la bocca era mantenuta aperta, rilassata e chiusa.

4.3. Registrazione e analisi dei dati

I movimenti del capo, della bocca e le posture della mano destra dei partecipanti erano registrati utilizzando il sistema 3D-optoelettronico SMART (BTS Bioingegneria®, Milano, Italia) Il sistema SMART da me utilizzato si compone di sei telecamere in grado di captare raggi infrarossi riflessi da piccoli marcatori passivi (diametro 5 mm), posti sulle parti corporee d'interesse. La risoluzione spaziale del sistema è di 0,3 mm, quella temporale di 120 Hz. Normalmente, i dati registrati sono filtrati usando un filtro lineare passa-basso (filtro

triangolare), per mezzo del quale ogni valore riferito al movimento equivale a una media calcolata su cinque campionamenti, in una finestra temporale di 33,3 ms.

Nel presente esperimento, sono stati utilizzati tre marcatori posti rispettivamente sul labbro superiore, sul labbro inferiore e sulla fronte di ogni partecipante. Altri due marcatori erano posti su pollice e indice della mano destra.

I marcatori posti sulle labbra erano utilizzati per studiare la cinematica della prensione eseguita con la bocca. Partendo con le labbra chiuse, il decorso temporale di questo tipo di prensione è normalmente costituito da una fase di apertura delle labbra fino a un massimo (massima apertura delle labbra), seguita da una fase di chiusura delle labbra sull'oggetto (Gentilucci et al., 2001). Per studiare la prensione si è analizzato il picco di velocità e la massima apertura delle labbra.

Al fine di studiare il movimento di raggiungimento con il capo è stata invece analizzata la cinematica del marcatore posto sulla fronte. A tal fine, sono stati analizzati il tempo del movimento di raggiungimento e il picco di velocità del movimento di raggiungimento.

Infine, è stata analizzata la cinematica dei marcatori posti su indice e pollice della mano destra per misurarne l'apertura media rispetto all'intera durata del movimento di raggiungimento, nelle tre condizioni considerate. In tale misurazione, a causa di problemi tecnici durante l'acquisizione, i dati di un partecipante sono stati eliminati.

Per quanto concerne l'analisi statistica, sono state eseguite ANOVA a misure ripetute sui valori medi dei parametri cinematici misurati. I fattori entro i soggetti erano la *dimensione del target* (grande vs piccolo) e la *postura della mano* (presa di forza vs mano rilassata vs presa di precisione). Per tutte le analisi sono stati eseguiti confronti post-hoc con procedura di Newman-Keuls. Il livello di significatività era fissato a $p=0,05$. Quando l'effetto di un fattore

o delle interazioni tra fattori si rivelava significativo, si definiva l'entità dell'effetto, calcolando l' $\eta^2_{p(\text{arziale})}$.

5. RISULTATI

Le ANOVA a misure ripetute rivelavano che la dimensione del target influenzava il picco di velocità e la massima apertura delle labbra ($F(1,9)=11,2$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,55$; $F(1,9)=51,8$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,85$), determinando un significativo aumento di tali parametri nell'interazione con l'oggetto di grandi dimensioni, rispetto all'oggetto piccolo. Il picco di velocità del movimento di raggiungimento tendeva invece ad aumentare quando la bocca afferrava l'oggetto di piccole dimensioni (effetto della dimensione del target: $F(1,9)=4,8$, $p=0,056$), rispetto a quando essa interagiva con l'oggetto grande.

Il risultato più rilevante del presente esperimento consiste però nell'effetto della postura assunta dalla mano sulla massima apertura delle labbra ($F(2,18)=6,2$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,41$) che, come rivelato dai confronti post-hoc, era significativamente maggiore nelle condizioni in cui la mano assumeva la postura connessa alla presa di forza o era mantenuta rilassata, rispetto alla condizione in cui essa assumeva la postura connessa alla presa di precisione (Fig. 4).

Infine, si osservava un effetto della postura della mano sull'apertura media delle dita ($F(2,16)=78,4$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,90$), che dai confronti post-hoc, risultava significativamente maggiore per la postura corrispondente alla presa di forza, diminuiva significativamente quando la mano era rilassata e diminuiva ancora significativamente quando la mano assumeva la postura corrispondente alla presa di precisione (Fig. 4).

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori assunti dai parametri cinematici nelle varie condizioni considerate, si rimanda alla Tabella 1 (Appendice A).

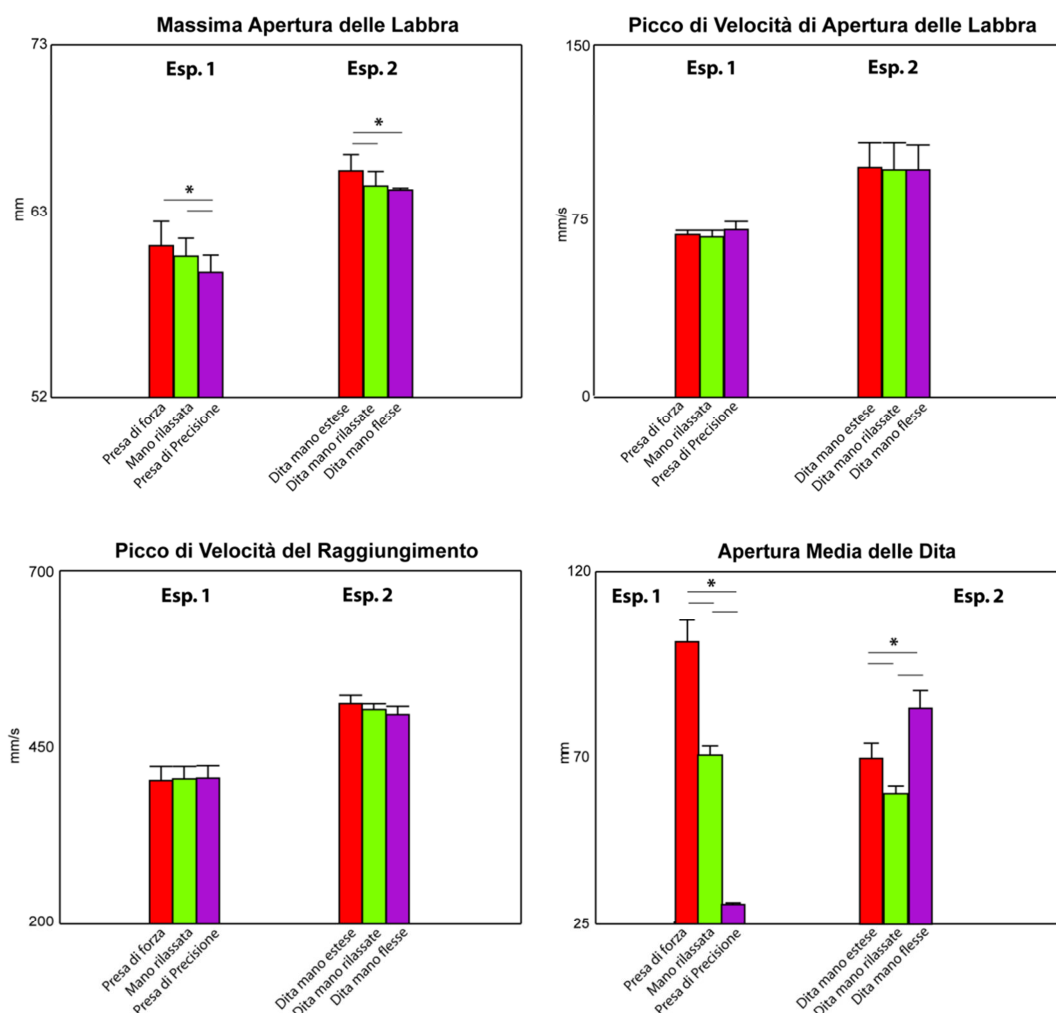


Figura 4. Valori medi dei parametri cinematici dei movimenti di prensione con la bocca e di raggiungimento con il capo, nelle tre condizioni sperimentali, in cui variava la postura della mano (esperimenti 1 e 2). Le barre verticali raffigurano l'errore standard, le linee orizzontali e gli asterischi indicano le significatività risultanti dalle ANOVA.

Come anticipato, le posture della mano assunte in questo esperimento comprendevano sia una flessione o estensione delle dita, che un'opposizione del pollice alle altre dita. Poiché negli esperimenti successivi del presente studio saranno considerati gli effetti di posture assunte da bocca (esperimento 3) e piede (esperimento 4) sulla prensione eseguita con la

mano, per rendere gli effetti delle posture manuali maggiormente comparabili a quelle di questi due altri effettori distali, nell'esperimento 2, abbiamo chiesto ai soggetti di assumere posture manuali che richiedessero una semplice estensione o flessione delle dita, ma non l'opposizione del pollice.

ESPERIMENTO 2

6. MATERIALI E METODI

6.1. Partecipanti

Per il secondo esperimento, è stato reclutato un nuovo campione di dieci soggetti volontari (9 femmine e 1 maschio, età 26-30 anni; lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e all'oscuro degli scopi dell'esperimento.

6.2. Apparato, stimoli e procedura

L'apparato, gli stimoli e la procedura erano gli stessi utilizzati nell'esperimento 1, con la differenza che le posture manuali assunte dai partecipanti differivano da quelle del primo esperimento e consistevano: a) nell'estensione delle dita indice, medio, anulare e mignolo; b) nel mantenimento delle dita della mano rilassate (postura di controllo analoga a quella analizzata nel primo esperimento); c) nella flessione delle dita indice, medio, anulare e mignolo. Nelle due posture in cui le dita erano flesse o estese, il pollice non era né in opposizione al palmo, né in opposizione alle altre dita (Fig. 3B).

6.3. Registrazione e analisi dei dati

La procedura di acquisizione del movimento e l'analisi cinematica avvenivano analogamente all'esperimento 1. Nelle ANOVA a misure ripetute, i fattori entro i soggetti erano la *dimensione del target* (grande vs piccolo) e la *postura della mano* (dita della mano estese vs dita della mano rilassate vs dita delle mano flesse).

7. RISULTATI

Per ciò che concerne l'effetto della dimensione del target, le ANOVA a misure ripetute rivelavano che esso influiva significativamente sulla massima apertura delle labbra, causando un aumento del parametro per la prensione dell'oggetto di grandi dimensioni, rispetto alla prensione all'oggetto piccolo ($F(1,9)=40$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,81$). Inoltre, tale fattore causava una diminuzione del tempo del movimento di raggiungimento per l'interazione con l'oggetto di piccole dimensioni ($F(1,9)=10,3$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,53$).

Un risultato molto rilevante del secondo esperimento consisteva nella significatività dell'effetto del fattore postura ($F(2,18)=3,9$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,30$) sulla massima apertura delle labbra, che, dai confronti post-hoc, risultava maggiore nella condizione in cui le dita erano estese rispetto a quando esse erano mantenute rilassate o flesse (Fig. 4).

L'apertura media delle dita risultava significativamente influenzata dalla postura della mano ($F(2,18)=12,6$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,58$) e, dai confronti post-hoc, essa risultava significativamente diversa nelle tre condizioni posturali. E' importante notare, in Figura 4, che la variazione dell'apertura delle labbra non può essere associata alla distanza spaziale tra indice e pollice della mano durante l'assunzione delle varie posture.

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori assunti dai parametri nelle varie condizioni considerate si rimanda alla Tabella 2 (Appendice A).

Nell'esperimento 2, le posture in cui le dita erano rilassate o flesse influivano allo stesso modo sull'apertura della bocca, mentre, nell'esperimento 1, la postura in cui la mano era rilassata incideva sull'apertura della bocca analogamente alla postura corrispondente alla presa di forza (Fig. 4). Tali risultati, a prima vista contraddittori, possono essere spiegati considerando che, nell'esperimento 1, la postura in cui la mano era in posizione rilassata potrebbe essere stata più facilmente associata alla postura manuale connessa alla presa di forza (Fig. 3A), mentre, nell'esperimento 2, la mano in posizione rilassata potrebbe essere stata più frequentemente associata alla postura in cui le dita della mano erano flesse (Fig. 3B).

ESPERIMENTO 3

8. MATERIALI E METODI

8.1. Partecipanti

Per il terzo esperimento è stato nuovamente reclutato un campione di dieci soggetti volontari (8 femmine e 2 maschi, età 26-30 anni; lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e all'oscuro degli scopi dell'esperimento.

8.2. Apparato, stimoli e procedura

I partecipanti sedevano davanti ad un tavolo, su cui posavano la loro mano destra con indice e pollice a pinza (posizione di partenza). A essi era richiesto di raggiungere con il braccio e afferrare con la mano un oggetto solido a forma di parallelepipedo, di due possibili dimensioni (target piccolo: 3 x 3 x 1 cm; target grande: 5 x 5 x 1 cm). All'inizio di ogni prova, uno dei due target era posizionato sul piano del tavolo, in modo tale che esso fosse distante circa 24 cm dalla mano del soggetto, in posizione di partenza (Fig. 3C).

I movimenti di raggiungimento e prensione con la mano avvenivano in tre diverse condizioni sperimentali, nelle quali la postura della bocca di ciascun partecipante poteva variare tra: a) mantenere la bocca aperta; b) mantenere la bocca chiusa, ma rilassata (condizione di controllo); c) mantenere la bocca chiusa, serrandola (Fig. 3C).

All'inizio di ciascuna prova, i partecipanti avevano gli occhi chiusi ed era loro richiesto di assumere una delle tre possibili posture di bocca. Quando si sentivano sicuri di avere assunto la postura corretta, era loro richiesto di aprire spontaneamente gli occhi e di eseguire la prensione manuale, mantenendo la bocca in postura per l'intera durata del movimento. Ai soggetti era inoltre chiesto di muoversi in modo spontaneo e con velocità naturale.

L'apparato, gli stimoli e i movimenti eseguiti nell'esperimento 3 sono mostrati in Figura 3C.

La restante procedura era analoga a quella descritta per l'esperimento 1.

8.3. Registrazione e analisi dei dati

Il sistema di registrazione ad analisi del movimento era analogo a quello descritto nell'esperimento 1. In questo caso, tuttavia, sono stati utilizzati tre marcatori posti sulla punta del pollice, su quella dell'indice e sul polso della mano destra di ciascun partecipante. Altri due marcatori erano posti sul labbro superiore e su quello inferiore.

I marcatori posti sull'indice e sul pollice erano utilizzati per studiare la cinematica della prensione eseguita con la mano. Partendo con le dita chiuse, il decorso temporale di tale tipo di prensione è normalmente costituito da una fase di apertura delle dita fino a un massimo (massima apertura delle dita), seguita da una fase di chiusura delle dita sull'oggetto (Jeannerod, 1988). Per studiare la prensione sono stati analizzati il picco di velocità e la massima apertura delle dita.

Al fine studiare il movimento di raggiungimento è stata invece analizzata la cinematica del marcatore posto sul polso. A tal fine, sono stati analizzati il tempo del movimento di raggiungimento e il picco di velocità del movimento di raggiungimento.

Infine, è stata analizzata la cinematica dei marcatori posti sulle labbra per misurarne l'apertura media rispetto all'intera durata del movimento di raggiungimento nelle tre condizioni considerate. In tale misurazione, a causa di problemi tecnici durante l'acquisizione, sono stati eliminati i dati di due partecipanti.

Sono state svolte ANOVA a misure ripetute sui valori medi dei parametri cinematici dei movimenti di raggiungimento e prensione con la mano e sui parametri cinematici di apertura della bocca. I fattori entro i soggetti erano la *dimensione del target* (grande vs piccolo) e la *postura della bocca* (bocca aperta vs bocca rilassata vs bocca chiusa).

9. RISULTATI

L'analisi statistica svolta (ANOVA a misure ripetute) ha rivelato un significativo effetto della dimensione del target sul picco di velocità e sulla massima apertura delle dita ($F(1,9)=11,6$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,56$; $F(1,9)=156$ $p<0,01$, $\eta^2_p=0,94$). Nello specifico, tali parametri aumentavano al crescere delle dimensioni dell'oggetto. Era inoltre presente una tendenza alla significatività dell'effetto della dimensione del target per il picco di velocità del movimento di raggiungimento, che cresceva all'aumentare delle dimensioni dell'oggetto ($F(1,9)=4,5$, $p=0,06$).

Il picco di velocità di apertura delle dita e la massima apertura delle dita erano significativamente influenzati dalla postura assunta dalla bocca ($F(2,18)=3,4$, $p=0,05$, $\eta^2_p=0,27$; $F(2,18)=7,2$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,44$; Fig. 5). Dai confronti post-hoc risultava che entrambi i parametri aumentavano significativamente nella condizione di apertura della bocca,

rispetto alle condizioni in cui essa era chiusa e rilassata (Fig. 5). La massima apertura delle dita era inoltre significativamente maggiore nella condizione in cui la bocca era rilassata, rispetto a quando essa era mantenuta chiusa (Fig. 5).

Il picco di velocità del movimento di raggiungimento era anch'esso significativamente influenzato dalla postura della bocca ($F(2,18)=3,9$ $p<0,05$, $\eta^2_p=0,30$) e, dai confronti post-hoc, esso risultava significativamente maggiore quando la bocca era aperta o chiusa, rispetto a quando essa era mantenuta rilassata (Fig. 5). Per tale parametro cinematico, non sono state riscontrate differenze nelle condizioni di apertura e chiusura della bocca (Fig. 5).

L'apertura media delle labbra differiva significativamente durante l'assunzione delle tre possibili posture di bocca ($F(2,14)=78,1$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,91$). Come si evince dai confronti post-hoc, essa diminuiva significativamente quando la bocca era chiusa, aumentava significativamente quando rispetto a quando la bocca era rilassata e aumentava ulteriormente quando la bocca era aperta (Fig. 5).

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori assunti dai parametri nelle varie condizioni considerate si rimanda alla Tabella 3 (Appendice A).

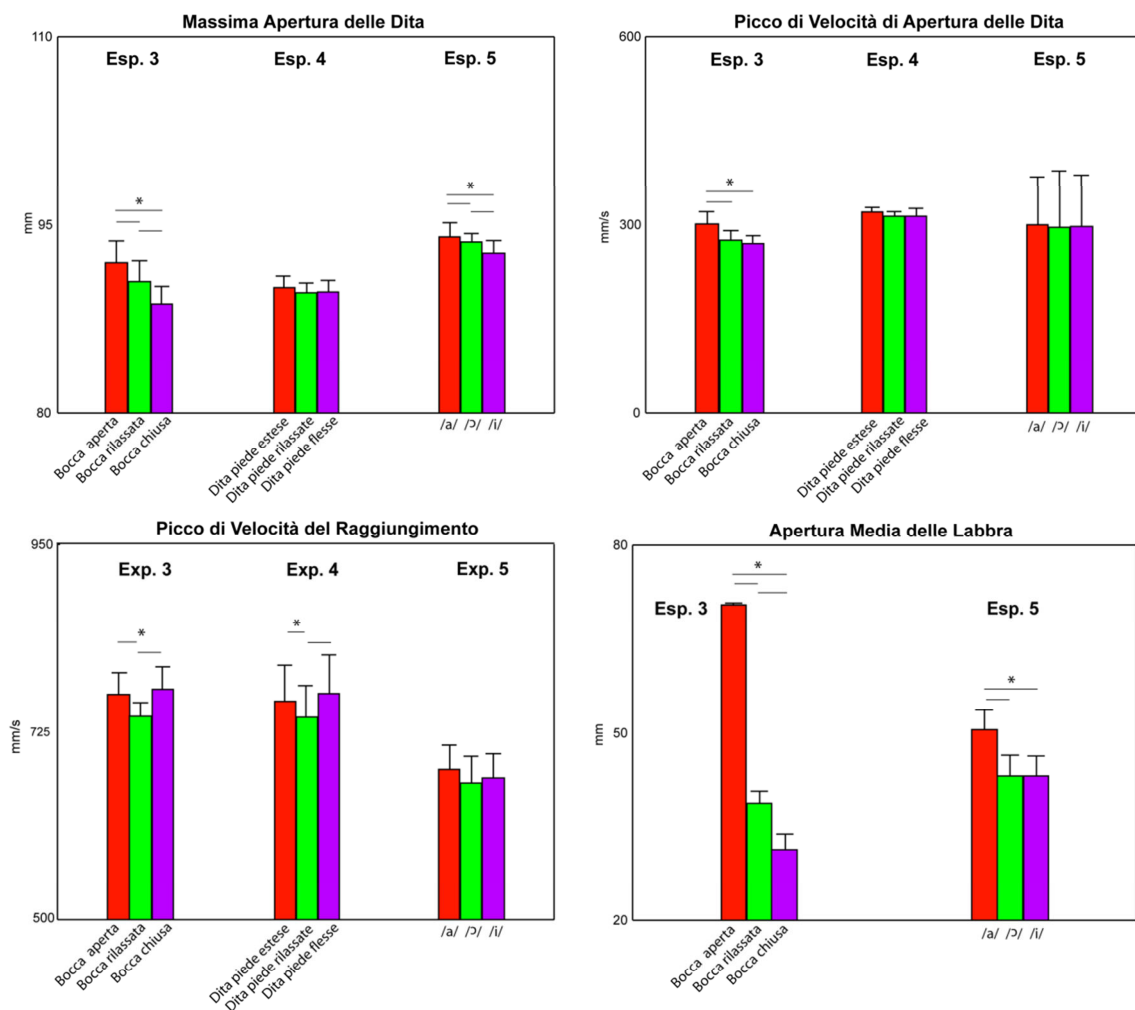


Figura 5. Valori medi dei parametri cinematici dei movimenti di prensione con la mano e di raggiungimento con il braccio, nelle tre condizioni sperimentali, in cui variavano la postura della bocca (esperimento 3), del piede (esperimento 4) e il tipo di vocale (esperimento 5). Le barre verticali raffigurano l'errore standard, le linee orizzontali e gli asterischi indicano le significatività risultanti dalle ANOVA.

Negli esperimenti 1 e 2, il movimento di raggiungimento era eseguito con il capo e tale movimento era o tendeva a essere meno rapido, se l'interazione avveniva con l'oggetto di grandi dimensioni (vedere le tabelle 1 e 2, Appendice A). Questi risultati sembrano a prima vista in contrasto con quello ottenuto per il movimento di raggiungimento analizzato nell'esperimento 3, in cui si osservava una tendenza alla diminuzione della velocità di raggiungimento nell'interazione con oggetti di piccole dimensioni (Tab. 3, Appendice A). Tale apparente discrepanza può essere spiegata riflettendo sul fatto che, secondo la legge di Fitts, se l'indice di difficoltà del movimento aumenta, ciò provoca un rallentamento del

movimento stesso (Fitts, 1954). L'indice di difficoltà potrebbe essere maggiore per la prensione dell'oggetto di grandi dimensioni con la bocca, poiché in questo caso sarebbe più complicato aumentare l'apertura della bocca al crescere delle dimensioni dell'oggetto. Al contrario, aumentare l'apertura delle dita per la prensione manuale di oggetti di grandi dimensioni potrebbe non essere così difficoltoso.

Gli effetti delle posture della bocca sull'apertura delle dita (esperimento 3) sono dunque conciliabili con gli effetti delle posture della mano sull'apertura della bocca (esperimenti 1 e 2). Tuttavia, nel caso delle posture di bocca, esse avevano un effetto anche sul picco di velocità del movimento di raggiungimento, che portava a una significativa diminuzione della velocità di movimento verso il target quando la bocca era rilassata, rispetto a quando essa era mantenuta aperta o chiusa. Al fine di spiegare tale fenomeno, è possibile ammettere che l'atto di afferrare con la mano è probabilmente meno controllato di quello eseguito con la bocca e, conseguentemente, gli effetti delle posture di bocca sulla pianificazione del movimento braccio-manuale potrebbero non essere stati attenuati dal controllo dell'esecuzione. Ciò, al contrario, si verifica nel caso dei movimenti di raggiungimento-prensione con la bocca, in cui l'esecuzione è maggiormente controllata, giacché il movimento di raggiungimento dell'oggetto con il capo è meno abituale di quello eseguito con il braccio.

Negli esperimenti 1 e 2 la visione periferica della postura manuale, durante l'esecuzione della prensione, non era impedita, mentre nell'esperimento 3 il controllo visivo della postura della bocca era inevitabilmente impossibile. Nonostante tali differenze, l'effetto delle posture assunte dalla bocca era simile a quello delle posture manuali assunte negli esperimenti 1 e 2. Ciò suggerisce che le posture manuali fossero comunque scarsamente controllate dalla visione periferica durante l'esecuzione della prensione con la bocca.

ESPERIMENTO 4

10. MATERIALI E METODI

10.1. Partecipanti

Per il quarto esperimento, è stato reclutato un nuovo campione di nove soggetti volontari (5 femmine e 4 maschi, età 22-27 anni; lingua nativa italiano), anch'essi destrimani (Oldfield, 1971) e all'oscuro degli scopi dell'esperimento.

10.2. Apparato, stimoli e procedura

L'apparato, gli stimoli e la procedura sperimentale erano analoghi a quelli descritti nell'esperimento 3. I movimenti di raggiungimento e prensione manuale avvenivano però nelle seguenti condizioni sperimentali, in cui il soggetto assumeva tre possibili posture di piede (destro), prima e durante l'esecuzione dell'intera azione manuale: a) dita del piede estese; b) dita del piede rilassate; c) dita del piede flesse. Il piede destro poggiava sul pavimento.

La restante procedura era analoga a quanto descritto nell'esperimento 3.

10.3. Registrazione e analisi dei dati

La registrazione e l'analisi dei movimenti della mano avvenivano analogamente a quanto descritto per l'esperimento 3. L'unica differenza risiedeva nel fatto che, nel presente esperimento, la registrazione dei movimenti del piede di ciascun partecipante era eseguita per mezzo di una telecamera digitale, poiché la contemporanea registrazione di tali movimenti e di quelli manuali non era attuabile con il sistema SMART, per problemi di risoluzione. In altre parole, all'interno di un campo così ampio, l'accuratezza della registrazione eseguita nel

presente esperimento non sarebbe stata confrontabile con quella dei restanti esperimenti. Tuttavia, per ciascun partecipante, è stato verificato che, in ogni prova, la postura del piede fosse assunta e mantenuta correttamente durante l'esecuzione dell'intera azione manuale.

Nelle ANOVA a misure ripetute, condotte sui parametri cinematici dei movimenti di raggiungimento e prensione, i fattori entro i soggetti erano la *dimensione del target* (grande vs piccolo) e la *postura del piede* (dita del piede estese vs dita del piede rilassate vs dita del piede flesse).

11. RISULTATI

Le ANOVA a misure ripetute mostravano che l'effetto della dimensione del target risultava significativo per il picco di velocità e la massima apertura delle dita $F(1,8)=15,9$ $p<0,05$, $\eta^2_p=0,66$; $F(1,8)=251,2$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,96$), con un significativo aumento di entrambi i parametri durante l'interazione con l'oggetto di grandi dimensioni, rispetto a quello piccolo.

L'analisi statistica non rivelava effetti della postura assunta dal piede sulla cinematica della prensione manuale. Al contrario, si riscontrava un effetto delle posture di piede sul tempo e sul picco di velocità del movimento di raggiungimento ($F(2,16)=3,8$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,32$; $F(2,16)=3,8$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,32$; Fig. 5). I confronti post-hoc sul tempo di tale movimento non mostravano alcuna differenza significativa tra i valori del parametro nella condizione di estensione e nelle restanti condizioni, anche se, nella condizione in cui le dita del piede erano rilassate, i valori erano significativamente maggiori che nella condizione di flessione (vedere Tabella 4, Appendice A). I confronti post-hoc sul picco di velocità del movimento di raggiungimento mostravano, invece, che non vi era differenza tra le condizioni in cui le dita del piede erano flesse ed estese, mentre i valori assunti dal parametro in tali

condizioni differivano significativamente da quelli assunti nella condizione in cui il piede era rilassato.

L'analisi dei filmati ottenuti con la telecamera digitale confermava che tutti i soggetti avevano correttamente assunto la postura richiesta in ciascuna prova.

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori assunti dai parametri nelle varie condizioni considerate si rimanda alla Tabella 4 (Appendice A).

ESPERIMENTO 5

12. MATERIALI E METODI

12.1. Partecipanti

Per il quinto esperimento è stato reclutato un nuovo campione di dieci soggetti volontari (5 femmine e 5 maschi, età 25-30 anni; lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e all'oscuro degli scopi dell'esperimento.

12.2. Apparato, stimoli e procedura

L'apparato, gli stimoli e la procedura sperimentale erano analoghi a quelli descritti nell'esperimento 3. In questo caso, tuttavia, era richiesto ai partecipanti di raggiungere e afferrare gli oggetti con la mano, dopo la pronuncia delle seguenti vocali: a) /a/ (vocale aperta, associata ad una maggiore apertura della bocca interna); b) /ɔ/ (vocale di controllo); c) /i/ (vocale chiusa, associata a una minore apertura della bocca interna). La scelta di utilizzare /ɔ/ come vocale di controllo risiedeva nel fatto che essa richiede, per la sua pronuncia, un'apertura della bocca interna intermedia rispetto a quella che caratterizza la pronuncia delle vocali "a" (/a/) e "i" (/i/). Una volta iniziata la pronuncia della vocale, era richiesto ai soggetti

di continuare a produrla per l'intera durata dei movimenti di raggiungimento e prensione manuale degli oggetti.

12.3. Registrazione e analisi dei dati

La registrazione e l'analisi dei movimenti di raggiungimento e prensione con la mano avvenivano analogamente a quanto descritto per l'esperimento 3. Inoltre, per la registrazione dello spettro vocale dei partecipanti, essi indossavano un microfono (Shure, modello WH20; frequenza di registrazione 50-15.000 Hz) collegato a un PC per mezzo di una scheda audio (16 PCI Sound Blaster; CREATIVE Technology Ltd, Singapore). I dati vocali erano acquisiti per mezzo del software professionale Avisoft SASLab (Avisoft Bioacoustics, Germania) e analizzati con il software PRAAT (www.praat.org). Per mezzo di quest'ultimo si sono calcolati i valori medi delle formanti (F) 1 e 2 della voce di ciascun partecipante, rispetto alla durata dell'intero movimento di raggiungimento. E' utile ricordare che le formanti 1 e 2 definiscono univocamente ciascuna vocale da un punto di vista acustico (Leoni e Maturi, 2002; vedere Fig. 9, Studio II).

Per problemi di registrazione, i dati vocali di un partecipante sono stati eliminati.

I valori medi dei parametri cinematici e dei parametri dello spettro vocale sono stati sottoposti ad ANOVA a misure ripetute, in cui erano considerati come fattori entro i soggetti la *dimensione del target* (grande vs piccola) e la *vocale* (/a/ vs /ɔ/ vs /i/).

13. RISULTATI

13.1. Parametri vocali

Le ANOVA a misure ripetute hanno rivelato che le F1 e F2 variavano significativamente durante la pronuncia delle diverse vocali (effetto della vocale:

$F(2,16)=235,5$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,96$; $F(2,16)=283,6$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,97$; Fig. 6). In altre parole, i confronti post-hoc mostravano che la F1 cresceva gradualmente e significativamente passando dalla vocale “i” (/i/) alla vocale neutra, alla vocale “a” (/a/), mentre, al contrario, la F2 decresceva significativamente.

Non si sono riscontrate ulteriori significatività per tali parametri.

13.2. Parametri cinematici

Per quanto concerne gli effetti della dimensione del target, le ANOVA a misure ripetute rivelavano che sia il picco di velocità che la massima apertura delle dita erano significativamente influenzati da tale fattore ($F(1,9)=18,1$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,66$; $F(1,9)=127,1$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,93$), con un significativo aumento di entrambi i parametri durante l’interazione con l’oggetto di grandi dimensioni, rispetto all’interazione con l’oggetto piccolo.

I parametri massima apertura delle dita e apertura media delle labbra erano significativamente influenzati dalla pronuncia delle vocali ($F(2,18)=6,5$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,40$; $F(2,18)=20$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,69$; Fig. 5). Più nello specifico, si riscontrava nei confronti post-hoc un aumento della massima apertura delle dita per la pronuncia della vocale “a” (/a/) rispetto alla “i” (/i/) e per la pronuncia della vocale “intermedia” (/ɔ/) rispetto alla /i/ (Fig. 5). L’apertura media delle labbra era maggiore nella condizione di pronuncia di /a/ rispetto alla pronuncia di /ɔ/ e di /i/ (Fig. 5), mentre i confronti post-hoc non rivelavano, per tale parametro, differenze tra le condizioni di pronuncia di /ɔ/ e /i/.

Per una visione riassuntiva dei risultati dell’analisi statistica e dei valori assunti dai parametri nelle varie condizioni considerate si rimanda alla Tabella 5 (Appendice A).

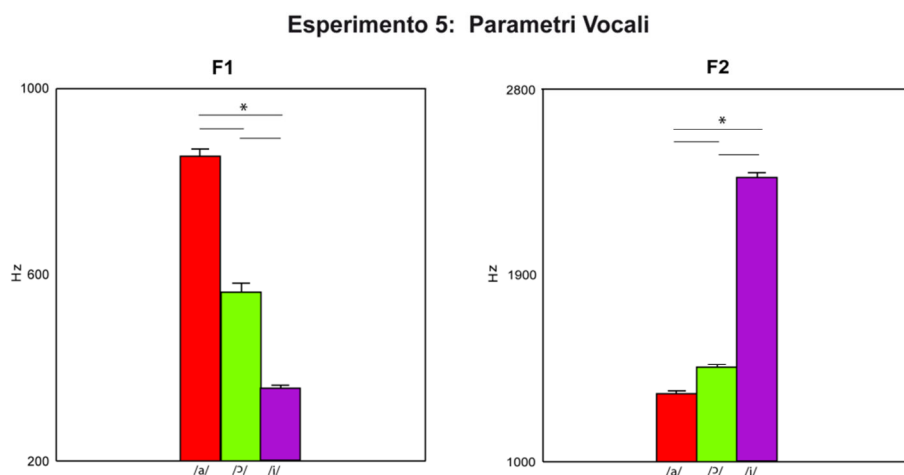


Figura 6. Valori medi dei parametri vocali connessi alla produzione delle tre diverse vocali dell'esperimento 5, rispetto alla durata dell'intero movimento di raggiungimento. Le barre verticali raffigurano l'errore standard. Le linee orizzontali e gli asterischi indicano le significatività risultanti delle ANOVA.

14. DISCUSSIONE GENERALE

14.1. Caratteristiche funzionali del sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca.

Negli esperimenti 1 e 2, le posture assunte dalla mano influenzavano la cinematica di prensioni successivamente eseguite con la bocca, mentre nell'esperimento 3 le posture della bocca influenzavano la cinematica di prensioni successivamente eseguite con la mano. Al contrario, nell'esperimento 4, le posture assunte dal piede non avevano effetti sulla prensione manuale. I risultati ottenuti confermano l'esistenza di una stretta relazione tra mano e bocca (Gentilucci et al., 2001).

In passato è stato proposto che comandi motori di prensione con la mano siano inviati alla bocca, e viceversa (Gentilucci e Corballis, 2006). Ciò ben si accorda alla scoperta che alcuni neuroni rinvenuti nell'area F5 della corteccia premotoria della scimmia si attivano sia quando l'animale afferra un oggetto con la mano che quando compie lo stesso atto con la bocca (Rizzolatti et al., 1988). Anche i dati sull'uomo, riportati da Gentilucci e collaboratori

(2001), rivelavano l'esistenza di reciproche interazioni tra i movimenti di mano e bocca. I risultati del presente studio mostrano che le relazioni funzionali tra effettori distali si stabiliscono già a livello del controllo delle loro posture, oltre che dei loro movimenti. In altre parole, la postura di un effettore (la mano o la bocca) può costituire un modello per la configurazione che sarà assunta dall'altro effettore nel successivo atto di prensione (con la bocca o con la mano). In particolare, le configurazioni tipiche delle prese manuali di forza e precisione (esperimento 1) e le posture di estensione e flessione delle dita della mano (esperimento 2) erano "trasferite" alla prensione con la bocca, sotto forma di comandi di aumento e restringimento dell'apertura delle labbra. Simmetricamente, le posture di apertura e chiusura della bocca (esperimento 3) erano "trasferite" alla mano, che avrebbe successivamente eseguito una prensione, sotto forma di comandi di aumento e restringimento dell'apertura delle dita.

Poiché le posture dei vari effettori distali erano assunte prima dell'inizio della prensione, la possibilità che la reciproca relazione funzionale tra mano e bocca si stabilisca sulla base di un semplice meccanismo di accoppiamento temporale tra i movimenti dei due effettori può essere esclusa. Piuttosto, le posture considerate influenzano, probabilmente, il processo di trasformazione visuo-motoria compiuto durante la pianificazione del movimento di prensione con l'altro effettore, che presumibilmente avrebbe luogo in seguito all'assunzione della postura. I risultati dell'esperimento 2 mostrano che perfino la semplice estensione o flessione delle dita della mano è sufficiente a influenzare il movimento della bocca. Ciò è plausibile, se si considera che la prensione con la bocca si basa su movimenti di abbassamento e sollevamento della mandibola, movimento, questo, più facilmente associabile a quelli di estensione e flessione delle dita.

Nell'esperimento 4, l'estensione e la flessione delle dita del piede non influenzavano la prensione con la mano. Tuttavia, alcuni dati sperimentali (Baldissera et al., 2006)

supportano l'ipotesi che il controllo di movimenti della mano possa essere associato al controllo dei movimenti del piede, suggerendo l'esistenza di un accoppiamento temporale tra i movimenti dei due effettori. Per spiegare tale apparente contraddizione è necessario considerare che, nel presente studio, abbiamo analizzato gli effetti di posture di un effettore sulla pianificazione dell'azione svolta con un altro effettore distale, piuttosto che gli effetti sincronici di movimenti contemporanei di diversi effettori distali. In più, è utile considerare che, nell'essere umano, il piede ha perso la sua capacità di interagire in modo raffinato con oggetti di diverse forme e dimensioni e, per tale ragione, in un compito in cui l'effetto del tipo di interazione con gli oggetti è testato solo implicitamente, mano e piede potrebbero non interagire a livello funzionale, come invece accade per mano e bocca, che sono più strettamente connesse a livello anatomico e funzionale. Se riconsideriamo i dati dello studio di Buccino e collaboratori (2001), essi rivelano, infatti, che l'area premotoria responsabile della pianificazione di azioni di piede è separata dall'area premotoria coinvolta nella pianificazione di azioni manuali. Al contrario, le aree responsabili del controllo di mano e di bocca risultano essere adiacenti e parzialmente sovrapposte.

Il "trasferimento" di posture di un effettore a movimenti eseguiti da altri effettori sembrava essere specifico per atti motori distali (prensione). A riprova di ciò, le componenti assiali e prossimali del movimento di raggiungimento non sembravano essere modulate dalla configurazione specifica connessa alle varie posture. Nell'esperimento 3, il movimento di raggiungimento del braccio risultava, rispetto alla condizione di controllo, più rapido quando la muscolatura della bocca era contratta, ossia quando essa era mantenuta aperta o chiusa, anche se non si riscontrava un effetto diversificato delle posture di apertura e chiusura sul movimento del braccio. Un fenomeno analogo si osservava anche nell'esperimento 4, in cui le posture del piede, che richiedevano una contrazione muscolare (estensione e flessione delle dita), sembravano influenzare la velocità di movimento del braccio in modo aspecifico, ma

significativamente diverso rispetto a quando i soggetti mantenevano il piede in posizione rilassata. Come già detto, nel caso del piede non vi era però alcun effetto delle sue posture sul movimento della mano. Di conseguenza, i risultati circa l'effetto delle posture sulla componente assiale e prossimale del movimento potrebbero essere imputati a una semplice e aspecifica attivazione di due gruppi muscolari.

14.2. Influenza della pronuncia di unità fonemiche sul movimento di prensione manuale

Nello studio del 2001, Gentilucci e collaboratori osservavano che il controllo di movimenti di prensione manuale era in grado di influenzare la produzione di unità fonemiche. Da tali risultati gli autori ipotizzarono che, nel corso dell'evoluzione, il sistema di doppi comandi motori alla mano e alla bocca fosse stato utilizzato come tramite per lo sviluppo un sistema di comunicazione basato sul linguaggio verbale (movimenti articolatori della bocca), a partire da un sistema comunicativo prevalentemente basato su movimenti brachio-manuali (Gentilucci e Corballis, 2006; Gentilucci e Dalla Volta, 2008; Gentilucci et al., 2008). In più gli stessi autori proposero che il sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca potesse essere alla base delle interazioni reciproche tra gesti e parlato (Barbieri et al., 2009; Bernardis e Gentilucci, 2006; Gentilucci et al., 2006). I risultati dell'esperimento 5 sembrano validare ulteriormente tale ipotesi, poiché essi mostrano che anche la pronuncia di vocali è in grado di influenzare i movimenti di prensione manuale, e non solo viceversa. In altre parole, nell'esperimento 5 del presente studio, si osservava un graduale aumento dell'apertura delle dita all'aumentare dell'apertura della bocca interna in relazione alla pronuncia di vocali chiuse (/i/) e aperte (/a/). È importante notare che tale risultato non può essere imputato alla variazione dell'apertura delle labbra, che non si diversificava per la pronuncia della vocale di controllo /ɔ/ e della vocale chiusa /i/. Al contrario, i parametri dello spettro vocale

aumentavano (F1) e diminuivano (F2), o in altre parole, differivano significativamente nelle tre condizioni di produzione vocale (Fig. 6). Ad esempio, per quanto riguarda la F1, strettamente legata all'apertura interna della bocca (Leoni e Maturi, 2002, vedere Fig. 9, Studio II), si riscontrava un suo graduale e significativo aumento passando dalla pronuncia di /i/ alla pronuncia di /a/.

Sfortunatamente, una possibile limitazione dell'esperimento 5, consiste nel fatto che la misurazione dell'apertura della bocca interna è inevitabilmente imprecisa e unicamente indiretta; per questo motivo non è stato possibile correlare la variazione dell'apertura delle dita a specifiche posture degli organi della bocca interna, coinvolti nel controllo vocale. Questi ultimi sono infatti responsabili della variazione della configurazione della bocca e quindi della variazione dei parametri vocali. Tuttavia, i risultati dell'esperimento 5 possono contribuire a risolvere la questione centrale nell'ambito degli studi sull'evoluzione del linguaggio, di come sia avvenuta l'associazione tra simboli astratti (le parole) ed i vari aspetti del mondo reale. Come già accennato nell'Introduzione della presente tesi, la "schematopoeia" (Paget, 1930) postula che le parole siano inizialmente nate da un parallelismo tra suono e significato. Ad esempio, le vocali aperte sono spesso contenute in parole che si riferiscono a un oggetto di grandi dimensioni, mentre le vocali sono spesso chiuse in parole che si riferiscono a un oggetto piccolo (ad esempio nelle parole *gr/a/nde* e *p/i/ccolo* o in *gr/a/nd* e *pet/i/t*). I risultati dell'esperimento 5 potrebbero, almeno parzialmente, supportare tale teoria, poiché per la pronuncia di /a/, rispetto alla pronuncia di /i/, si osservava un aumento dell'apertura delle dita, come se a livello motorio vi fosse la codifica di un oggetto più grande. E' infatti noto che, durante la prensione, la massima apertura delle dita aumenta al crescere delle dimensioni dell'oggetto afferrato (Gentilucci et al., 1994; Jeannerod, 1988).

Studio II

PRESUPPOSTI TEORICI E SCOPO DELLO STUDIO

I risultati dello studio precedentemente descritto mostrano che posture manuali e della bocca, connesse implicitamente alla prensione di oggetti di grandi e piccole dimensioni, sono rispettivamente in grado di influenzare la successiva prensione con la bocca e con la mano. Tal effetto si traduceva, durante la prensione, in un aumento dell'apertura di un effettore in seguito all'assunzione, da parte dell'altro, di una postura implicitamente connessa all'interazione con un oggetto grande. Viceversa, si riscontrava una diminuzione dell'apertura di un effettore, se la postura dell'altro era implicitamente connessa all'interazione con un oggetto di piccole dimensioni.

Se l'ipotesi che il sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca è precursore di un sistema deputato alla connessione reciproca di gesto e parola è valida, allora la pronuncia di vocali, o in generale di unità fonemiche legate a posture della bocca interna, potrebbe anch'essa influenzare il controllo della prensione eseguita con la mano. Ed è proprio ciò che si verificava nell'ultimo esperimento dello studio precedente, nel quale si osservava che, in seguito alla pronuncia di una vocale aperta, /a/, l'apertura delle dita durante la successiva prensione manuale aumentava rispetto a quando era pronunciata /i/, caratterizzata da una minore apertura della bocca interna.

Un successivo problema da chiarire, al fine di provare che il sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca sia precursore del sistema responsabile delle interazioni tra gesto manuale e parola, riguarda la possibilità che posture della mano esprimenti gesti dotati di significato influenzino o meno la produzione di unità fonemiche. Appurata l'eventuale presenza di tali effetti, andrebbe chiarito se essi sono osservabili anche durante la produzione di parole il cui significato corrisponde a quello del gesto. Il presente studio si propone di affrontare questo problema e, a questo scopo, si è scelto di studiare gli effetti di gesti

rappresentazionali, il cui significato si riferisce alla dimensione di un oggetto (GRANDE o PICCOLO), sulla pronuncia di vocali (/a/ e /i/, esperimento 1), sulla produzione di parole dello stesso significato dei gesti (/’grande/ (“grande”) e /’pikkolo/ (“piccolo”), esperimento 2) e, infine, come controllo, sulla produzione di pseudo-parole (/’skranta/ (“scrànta”) e /’zbikkara/ (“sbiccarà”), esperimento 3). I gesti GRANDE e PICCOLO utilizzati saranno rispettivamente prodotti per mezzo di apertura e chiusura o di pollice e indice della mano destra (gesto uni manuale) o dei palmi delle due mani (gesto bi manuale). Poiché abbiamo ipotizzato che il sistema che lega il controllo motorio della mano destra e la pronuncia di vocali sia il precursore di quello che lega gesto e parola, è lecito aspettarsi effetti simili della produzione del gesto sulla pronuncia delle vocali isolate e sulla pronuncia delle vocali contenute nelle parole. In più, per quanto concerne le relazioni che legano gesto e parola, si ipotizza che i gesti GRANDE e PICCOLO codifichino una rappresentazione della dimensione maggiormente distribuita e astratta, indipendente dal fatto che il gesto sia prodotto con una o due mani.

E’ infine utile precisare che l’esperimento 3, di controllo, è stato disegnato con l’intento di determinare se responsabile degli eventuali reciproci effetti tra gesto e produzione di vocali incluse nelle parole (esperimento 2) sia effettivamente il significato delle stesse, piuttosto che la semplice produzione di stringhe di lettere.

ESPERIMENTO 1

15. MATERIALI E METODI

15.1. Partecipanti

Per il primo esperimento, è stato reclutato un campione di otto soggetti volontari (4 femmine e 4 maschi, età 23- 30 anni, lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e non a conoscenza degli scopi dell'esperimento. Lo studio è stato approvato dal Comitato Etico della Facoltà di Medicina dell'Università di Parma, secondo le disposizioni della Dichiarazione di Helsinki.

15.2. Apparato, stimoli e procedura

I soggetti sedevano di fronte ad un tavolo, su cui ponevano i palmi di entrambe le mani. Le dita erano estese e unite e i palmi erano posizionati simmetricamente l'uno all'altro, rispetto alla linea mediana del partecipante, con i due medi distanti tra loro 11 cm. Per mezzo del monitor di un PC (19' SONY LCD, risoluzione spaziale di 1024×768 pixel e risoluzione temporale di 60 Hz), posto a 83 cm dal busto del partecipante, erano presentati stimoli costituiti da immagini statiche di un'attrice che produceva gesti manuali rappresentazionali, che si riferivano o a un oggetto GRANDE o a un oggetto PICCOLO. In particolare, a ciascun partecipante, erano presentate posture di gesti che coinvolgevano o unicamente la mano destra dell'attrice (gesto uni manuale, consistente nell'apertura o nella chiusura di pollice e indice) o entrambe le mani dell'attrice (gesto bi manuale, che prevedeva l'allontanamento o l'avvicinamento di entrambe le mani). Inoltre, accanto all'attrice vi era in una vignetta in cui poteva essere stampata o la vocale "a" o la vocale "i". La figura 7 mostra le otto possibili

immagini dell'attrice, mostranti tutte le combinazioni tra vocali e posture gestuali da lei assunte.

Ciascun'immagine dell'attrice permaneva sullo schermo per 1 s ed era presentata simultaneamente a un segnale acustico ("beep"), che permaneva per soli 200 ms e segnava l'inizio della prova. L'intervallo temporale tra una prova e l'altra o, in altre parole, tra un'immagine e l'altra dell'attrice era di 6 s, durante i quali era presentata una schermata nera e i partecipanti eseguivano il compito (Fig. 8).

Il compito di ciascun soggetto consisteva, dopo attenta osservazione dello stimolo, nel riprodurre il gesto presentato e solo in seguito nel pronunciare la vocale stampata nella vignetta. Ai soggetti era chiesto di continuare a pronunciare la vocale per circa 1-2 s, mantenendo la postura manuale del gesto almeno fino al termine della pronuncia. Inoltre, ai partecipanti era raccomandato di non iniziare a riprodurre il gesto finché l'immagine non fosse scomparsa dallo schermo e di pronunciare la vocale solo quando sicuri di avere assunto correttamente la postura manuale.

A partire dalla posizione di partenza, il gesto GRANDE era prodotto aumentando la distanza tra l'indice e il pollice della mano destra (gesto uni manuale) o tra i palmi delle due mani (gesto bi manuale, Fig. 8), mentre il gesto PICCOLO era prodotto accorciando la distanza tra indice e pollice della mano destra (gesto uni manuale) o tra gli indici delle due mani (gesto bi manuale).

Ai soggetti era esplicitamente richiesto di non imitare il gesto osservato, ma di assumere le posture che meglio descrivessero la loro rappresentazione di un oggetto GRANDE o PICCOLO, usando le stesse configurazioni manuali mostrate nelle immagini. La figura 8 mostra l'apparato ed un partecipante, mentre svolge il compito sperimentale.

Il disegno sperimentale comprendeva due possibili vocali, "a" e "i", la possibilità di utilizzare una sola mano o entrambe le mani e, infine, due possibili gesti, uno connesso alla

rappresentazione di GRANDE e l'altro connesso alla rappresentazione di PICCOLO. Ciascuna delle otto condizioni risultanti era ripetuta 8 volte in ordine pseudo-casuale, per un totale di 64 prove.

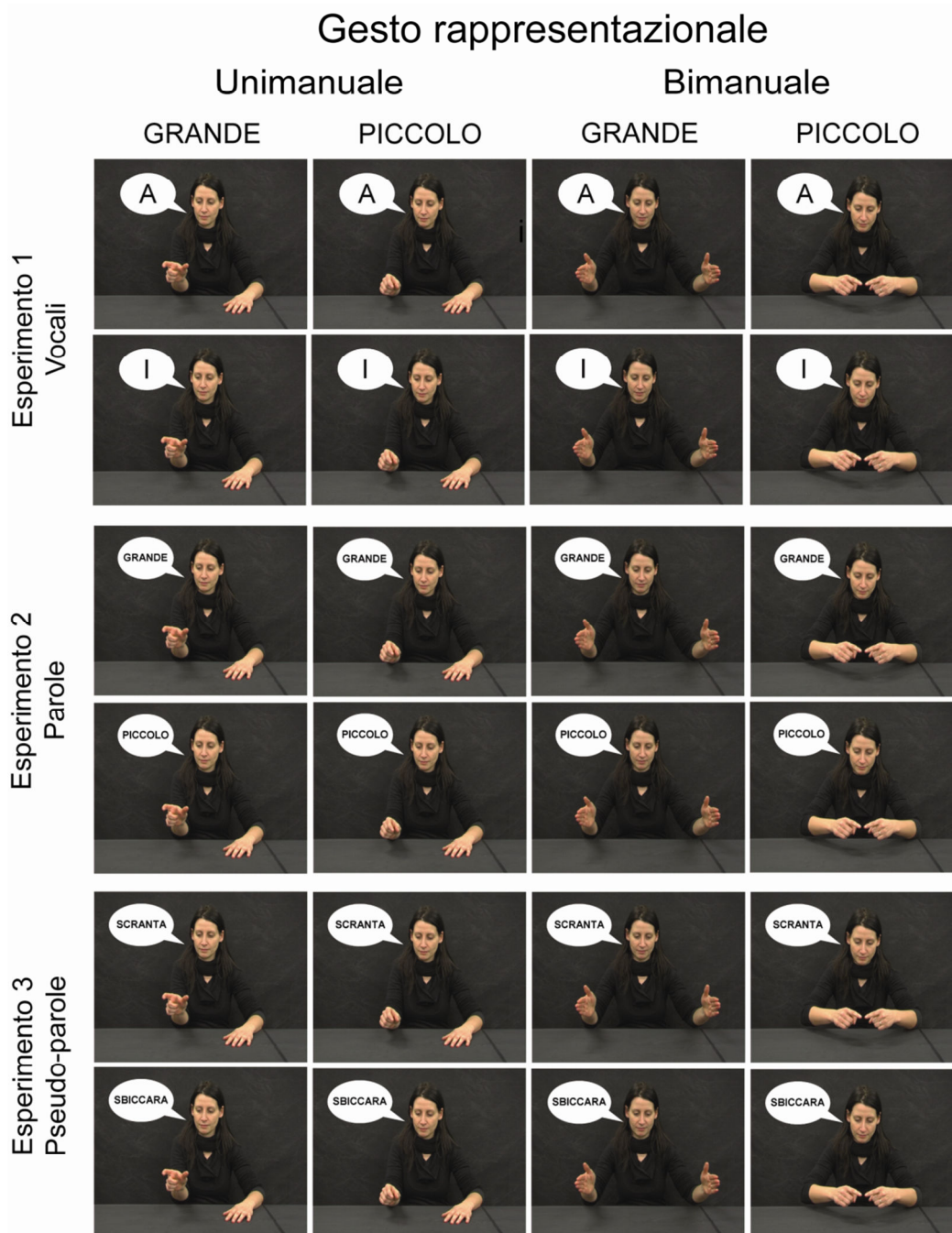


Figura 7. Stimoli presentati negli esperimenti 1-3. I pannelli mostrano le possibili combinazioni tra i gesti e le vocali (“a” e “i”, esperimento 1), i gesti e le parole (“grande” e “piccolo”, esperimento 2) e i gesti e le pseudo-parole (“scranta” e “sbiccara”, esperimento 3). I gesti rappresentazionali GRANDE e PICCOLO potevano essere eseguiti con la mano destra (gesti uni manuali) o con entrambe le mani (gesti bi manuali).

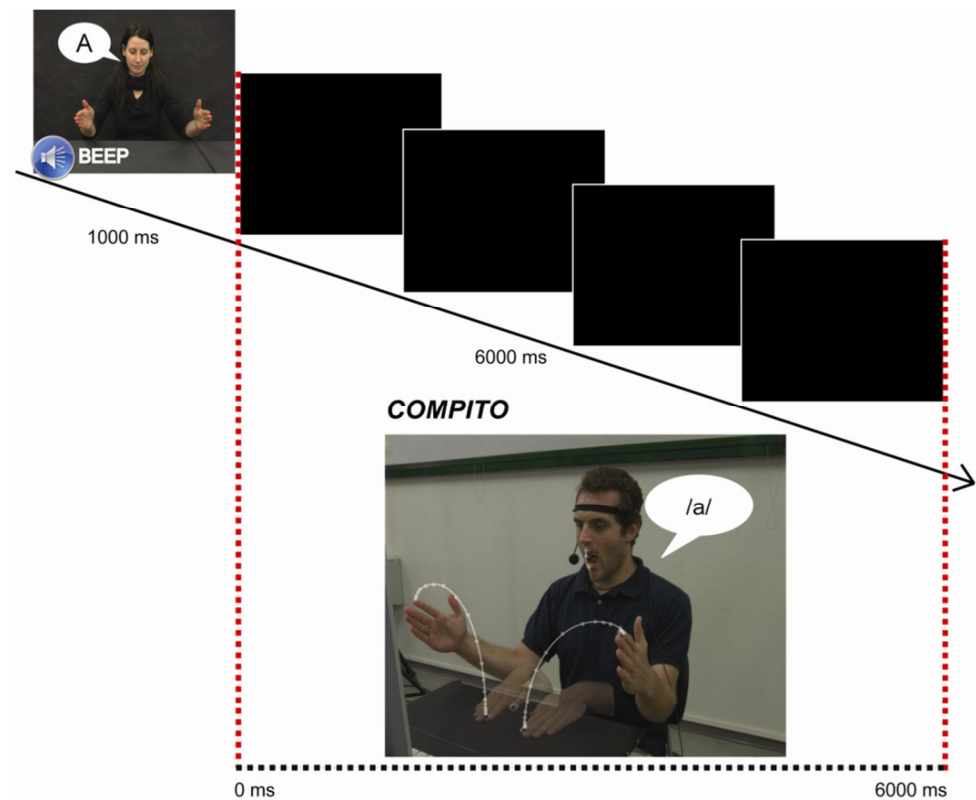


Figura 8. Rappresentazione schematica della presentazione degli stimoli (pannello superiore) ed esempio del compito svolto dai partecipanti (pannello inferiore). Quest'ultimo mostra un partecipante che produce un gesto rappresentazionale corrispondente a GRANDE con entrambe le mani (gesto bi manuale) e che, in seguito a questo, pronunciava la vocale "a" (esperimento 1). Le linee bianche mostrano un esempio di traiettorie durante la produzione del gesto.

15.3. Registrazione e analisi dei dati

Per la registrazione dello spettro vocale dei partecipati, essi indossavano un microfono (Shure, modello WH20; frequenza di registrazione 50-15.000 Hz), collegato a un PC per mezzo di una scheda audio (16 PCI Sound Blaster; CREATIVE Technology Ltd, Singapore). I dati vocali erano acquisiti per mezzo del software professionale Avisoft SASLab (Avisoft Bioacoustics, Germania) e analizzati con il software PRAAT (www.praat.org). Per mezzo di quest'ultimo si sono calcolati i valori medi delle formanti (F) 1 e 2 della voce di ciascun partecipante, durante i primi 500 ms della produzione della vocale. La figura 9 mostra l'andamento dei parametri vocali durante la pronuncia di /a/ e /i/ che definiscono univocamente ciascuna vocale da un punto di vista acustico (Leoni e Maturi, 2002). La F1,

connessa all'apertura della bocca interna, aumenta per la vocale aperta (/a/) e diminuisce per la vocale chiusa (/i/). La F2, connessa prevalentemente al movimento della lingua, aumenta per la vocale chiusa (/i/) e diminuisce per la vocale aperta (/a/).

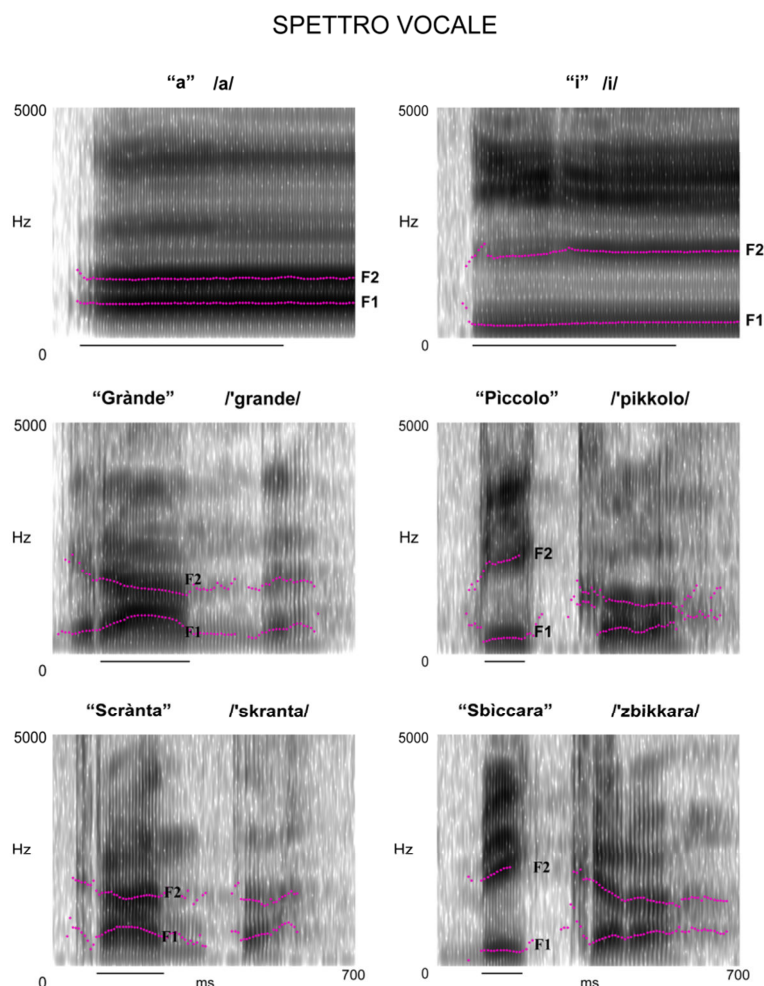


Figura 9. Esempi di spettri vocali durante la pronuncia delle vocali “a” e “i” (esperimento 1, pannello superiore), delle parole “grande” e “piccolo” (esperimento 2, pannello centrale) e delle pseudo-parole “scranta” e “sbiccara” (esperimento 3, pannello inferiore). La figura mostra l’andamento temporale delle formanti (F) 1 e 2; le barre orizzontali al di sotto delle ascisse rappresentano il tempo considerato nelle analisi delle vocali /a/ e /i/ prodotte da sole o all’interno delle parole e delle pseudo-parole. Nella pronuncia delle parole e delle pseudo-parole (esperimenti 2 e 3), l’accento cadeva sempre sulla vocale e la transizione formantica era inclusa nell’analisi. Come già noto, /a/ è caratterizzata da una maggiore F1 e da una minore F2 rispetto a /i/.

La registrazione dei movimenti della bocca e della mano avveniva nuovamente per mezzo del sistema 3D-optoelettronico SMART (BTS Bioingegneria®, Milano, Italia). Ancora una volta, il sistema SMART utilizzato per le registrazioni del presente studio si componeva

di sei telecamere in grado di captare raggi infrarossi riflessi da piccoli marcatori passivi (diametro 5 mm), posti sulle parti corporee d'interesse. La risoluzione spaziale del sistema era di 0,3 mm, quella temporale di 120 Hz. Anche in questo caso, i dati registrati sono stati filtrati usando un filtro lineare passa-basso (filtro triangolare), per mezzo del quale ogni valore riferito al movimento equivaleva a una media calcolata su cinque campionamenti, in una finestra temporale di 33,3 ms.

Nel presente studio, per le registrazioni dei movimenti compiuti dai partecipanti, si usavano due marcatori posti sulle labbra (uno sul labbro superiore, l'altro sul labbro inferiore) e altri tre marcatori posti su pollice e indice della mano destra e sull'indice della mano sinistra.

I marcatori posti sulle labbra dei soggetti erano utilizzati per studiare la cinematica dell'apertura e della chiusura della bocca durante la pronuncia delle vocali. A tal fine, si analizzava la distanza nel tempo tra i due marcatori. I parametri cinematici d'interesse erano il picco di velocità e la massima apertura delle labbra.

Per misurare la cinematica dei movimenti connessi ai gesti uni manuali compiuti con la mano destra, si analizzava nel tempo la distanza tra i marcatori posti su pollice e indice, mentre per studiare la cinematica dei movimenti eseguiti per riprodurre i gesti bi manuali si analizzava la distanza nel tempo tra i marcatori posti sull'indice della mano destra e sull'indice della mano sinistra. Poiché i gesti corrispondenti a GRANDE erano eseguiti tramite un'apertura, in questo caso si estrapolava a si analizzava la massima apertura delle dita, al contrario, poiché i gesti corrispondenti a PICCOLO si eseguivano per mezzo di una chiusura, in questo caso si analizzavano i valori della minima apertura delle dita.

Per quanto concerne l'analisi statistica, sono state eseguite ANOVA a misure ripetute sui valori medi dei parametri vocali e cinematici di bocca e mani, considerando come fattori entro i soggetti la *vocale* ("a" vs "i"), l'*effettore* (uni manuale vs bi manuale) e il *gesto*

(GRANDE vs PICCOLO). Anche in questo studio, per ciascun'analisi, si eseguivano confronti post-hoc con procedura di Newman-Keuls. Il livello di significatività era fissato a $p=0,05$. Quando l'effetto di un fattore o delle loro interazioni si rivelava significativo, si definiva l'entità dell'effetto, calcolando l' $\eta^2_{p(arziale)}$.

16. RISULTATI

Data la notevole quantità di dati, per questo e i successivi esperimenti saranno riportanti e discussi solo i risultati rilevanti ai fini della verifica delle ipotesi che guidano lo studio. Per una visione complessiva di tutti i risultati delle analisi statistiche si rimanda alle tabelle dell'Appendice B.

16.1. Parametri vocali

L'ANOVA a misure ripetute mostrava che la F1 era influenzata dall'interazione tra i fattori effettore e gesto ($F(1,7)=13,53$, $p<0,01$, $\eta^2_p=0,66$). Nello specifico, le analisi post-hoc rivelavano che, quando il gesto prodotto era uni manuale, la F1 era significativamente maggiore per la produzione del gesto GRANDE, rispetto a quando era prodotto il gesto PICCOLO; al contrario, la F1 non variava in seguito alla produzione di gesti corrispondenti a GRANDE e PICCOLO nella condizione di bi manualità (Fig. 10). L'analisi statistica rivelava, inoltre, che i valori della F1 nelle condizioni di bi manualità erano, in generale, minori rispetto a quando era prodotto un gesto uni manuale corrispondente a GRANDE, mentre erano maggiori rispetto ai valori corrispondenti alla produzione uni manuale del gesto PICCOLO (Fig. 10).

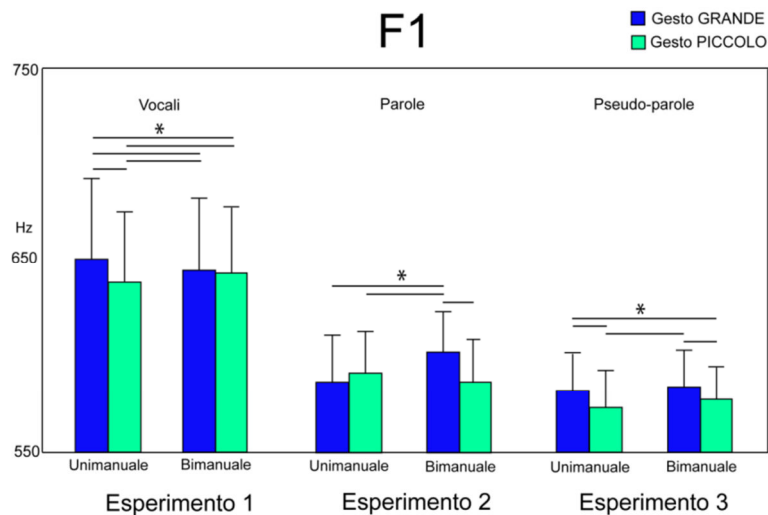


Figura 10. Effetti del gesto sulla formante (F) 1 delle vocali pronunciate isolatamente (esperimento 1), delle vocali incluse nelle parole (esperimento 2) e delle vocali incluse nelle pseudo-parole (esperimento 3), prodotte in seguito all'esecuzione dei gesti corrispondenti a GRANDE e PICCOLO, uni manuali e bi manuali. Le barre verticali raffigurano l'errore standard. Le linee orizzontali e gli asterischi mostrano le significatività statistiche risultate dalle ANOVA.

16.2. Parametri cinematici

Uno dei risultati più rilevanti mostrati dalle ANOVA a misure ripetute consisteva nel fatto che la massima apertura delle labbra era maggiore durante la produzione del gesto GRANDE rispetto alla produzione del gesto PICCOLO (effetto del gesto: $F(1,7)=11,05$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,61$; Fig. 11).

Per il parametro massima/minima apertura delle dita non si riscontravano né significativi effetti del fattore vocale, né significative interazioni tra il fattore vocale e gli altri fattori (Fig. 12).

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori dei parametri nelle varie condizioni considerate si rimanda alla Tabella 1 (Appendice B).

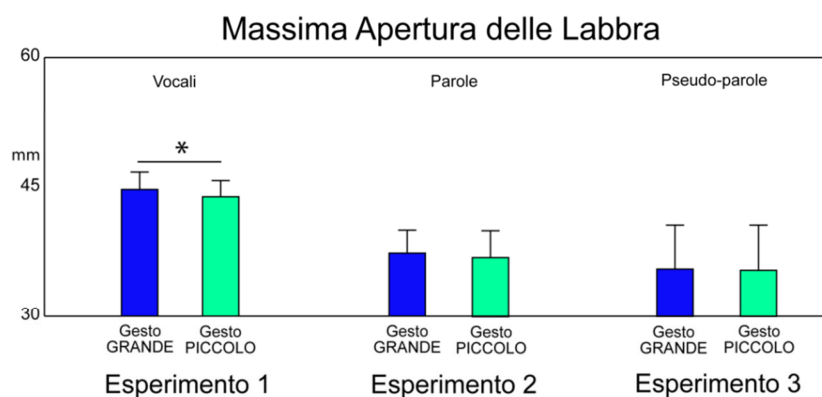


Figura 11. Effetti dei gesti sulla massima apertura delle labbra, durante la pronuncia di vocali isolate o incluse in parole e pseudo-parole (esperimenti 1, 2 e 3, rispettivamente). Le barre verticali rappresentano l'errore standard. Le linee orizzontali e gli asterischi mostrano le significatività statistiche rivelate dalle ANOVA.

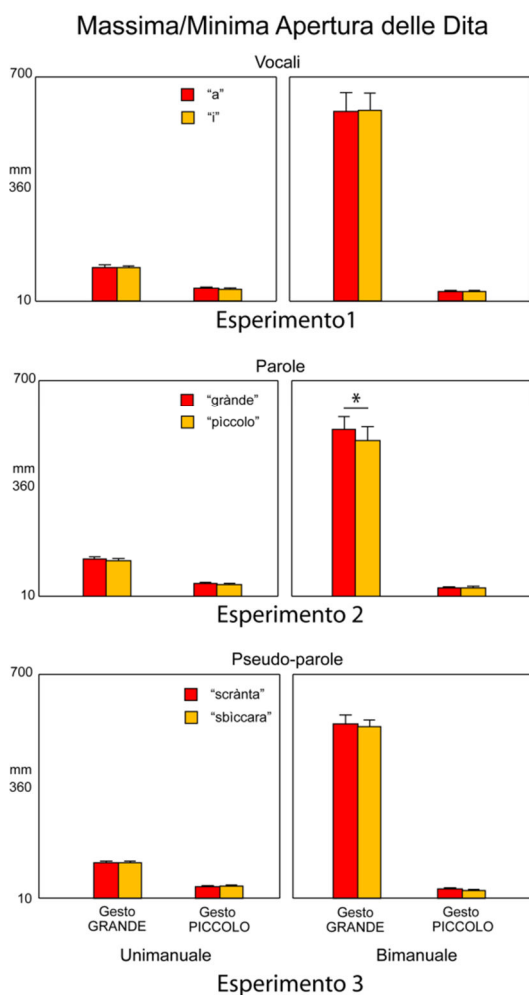


Figura 12. Effetti della pronuncia di vocali (esperimento 1), parole (esperimento 2) e pseudo-parole (esperimento 3) sulla massima/minima apertura delle dita, durante la produzione dei gesti GRANDE e PICCOLO, uni manuali e bi manuali. Le barre verticali raffigurano l'errore standard. Le linee orizzontali e gli asterischi mostrano le significatività statistiche risultanti dalle ANOVA.

ESPERIMENTO 2

17. MATERIALI E METODI

17.1. Partecipanti

Per il secondo esperimento è stato reclutato un nuovo campione di otto soggetti volontari (3 femmine e 5 maschi, 22-27 anni, lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e non a conoscenza degli scopi dell'esperimento.

17.2. Apparato, stimoli e procedura

L'apparato e gli stimoli erano analoghi a quelli descritti nell'esperimento 1, con la sola eccezione che nelle vignette contenute in ciascun'immagine-stimolo erano stampate o la parola "grande" (/ˈgrande/) o la parola "piccolo" (/ˈpikkolo/, Fig. 7).

La procedura era analoga a quella del precedente esperimento (Fig. 8): ai partecipanti era richiesto di produrre il gesto presentato e, in seguito, di pronunciare la parola stampata nella vignetta.

17.3. Registrazione e analisi dei dati

Sono stati analizzati i medesimi parametri vocali considerati nell'esperimento 1 (F1 e F2). Le F1 e 2 sono state analizzate rispetto alle vocali /a/ e /i/ contenute nelle parole "grande" e "piccolo", rispettivamente (Fig. 9). La transizione formantica era inclusa nell'analisi. È importante notare che, in entrambe le parole, l'accento cadeva sulla vocale.

La registrazione e l'analisi della cinematica dei movimenti di bocca e mani avvenivano analogamente all'esperimento 1.

Nelle ANOVA a misura ripetute, eseguite separatamente sui valori medi dei parametri vocali e cinematici, sono stati considerati i fattori entro i soggetti *parola* (“grande” vs “piccolo”), *effettore* (uni manuale vs bi manuale) e *gesto* (GRANDE vs PICCOLO).

18. RISULTATI

18.1. Parametri vocali

Come mostrato dall'ANOVA a misure ripetute, la F1 era significativamente influenzata dall'interazione tra i fattori effettore e gesto ($F(1,7)=7,61$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,52$). Le analisi post-hoc mostravano che la F1 era significativamente maggiore in seguito alla produzione dei gesti corrispondenti a GRANDE, rispetto a quelli corrispondenti a PICCOLO, ma ciò si verificava solo nella condizione di bi manualità (Fig. 10). Inoltre, sempre dai confronti post-hoc si poteva osservare che la F1 aumentava significativamente in seguito alla produzione del gesto GRANDE nella condizione di bi manualità, rispetto a quando entrambi i gesti GRANDE e PICCOLO erano prodotti con una sola mano. Al contrario, i valori della F1 per il gesto PICCOLO bimanuale non differivano dai valori di F1 per entrambi i gesti uni manuali (Fig. 10).

18.2. Parametri cinematici

Le ANOVA a misure ripetute mostravano che il picco di velocità di apertura delle labbra tendeva a crescere per la produzione del gesto GRANDE rispetto al gesto PICCOLO (effetto del gesto: $F(1,7)=4,64$, $p=0,06$; Fig. 13).

La massima/minima apertura delle dita risultava significativamente influenzata dall'interazione tra i fattori effettore e gesto ($F(1,7)=119,13$, $p<0,001$, $\eta^2_p=0,94$): come si evinceva dai test post-hoc, tutti i confronti risultavano significativi ad eccezione di quello tra

gesti corrispondenti a PICCOLO nelle condizioni di uni manualità e bi manualità. Infine, la massima/minima apertura delle dita risultava essere significativamente influenzata dall'interazione tra i fattori parola, effettore e gesto ($F(1,7)=5,27$, $p=0,05$, $\eta^2_p=0,40$). L'effetto più rilevante, in seguito ai confronti post-hoc, consisteva nel fatto che per la produzione del gesto GRANDE bi manuale, in seguito alla presentazione della parola “grande”, si osservava un significativo aumento dell'apertura delle dita rispetto a quanto avveniva dopo la presentazione della parola “piccolo”. Lo stesso effetto non si osservava se i gesti prodotti erano uni manuali (Fig. 12).

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori assunti dai parametri nelle varie condizioni considerate si rimanda alla Tabella 2 (Appendice B).

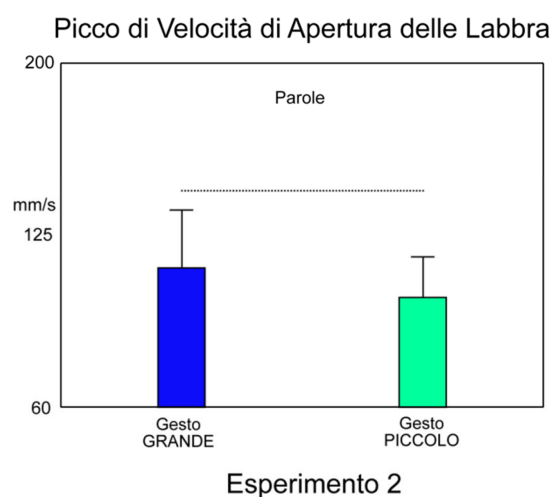


Figura 13. Effetti dei gesti sul picco di velocità di apertura delle labbra, durante la pronuncia di vocali incluse nelle parole (esperimento 2). Le barre verticali rappresentano l'errore standard. La linea orizzontale tratteggiata indica la tendenza alla significatività rivelata dall'ANOVA.

ESPERIMENTO 3

19. MATERIALI E METODI

19.1. Partecipanti

Per il terzo esperimento, è stato reclutato un nuovo campione di otto soggetti volontari (4 femmine e 4 maschi, età 23-29 anni, lingua nativa italiano), destrimani (Oldfield, 1971) e non a conoscenza degli scopi dell'esperimento.

19.2. Apparato, stimoli e procedura

L'apparato e gli stimoli dell'esperimento 3 erano analoghi a quelli descritti per l'esperimento 1, se non per il fatto che nelle vignette erano stampate le pseudo-parole “scrànta” (/skranta/) o “sbiccara” (/zbikkara/, Fig. 7). Anche la procedura era analoga a quella dall'esperimento 1: ai partecipanti era richiesto di produrre il gesto presentato e in seguito pronunciare la pseudo-parola stampata nella vignetta. (Fig. 8).

19.3. Registrazione e analisi dei dati

La registrazione vocale avveniva come nell'esperimento 1. In questo caso, però, si analizzavano le vocali /a/ e /i/ incluse nelle pseudo-parole “scrànta” e “sbiccara”. La transizione formantica era inclusa nelle analisi (Fig. 9). È utile notare che in /kran/ di /skranta/ e in /gran/ di /grande/, così come in /bik/ di /zbikkara/ e in /pik/ di /pikkolo/, le consonanti che precedevano e seguivano le vocali richiedevano il rilascio dell'occlusione da parte dei medesimi organi fonatori (Browman e Goldstein, 1995). Inoltre, anche in “scrànta” e “sbiccara” l'accento cadeva sulle vocali /a/ e /i/, rispettivamente.

La registrazione dei movimenti e l'analisi dei parametri cinematici avvenivano analogamente all'esperimento 1. Nelle ANOVA a misure ripetute, eseguite su valori medi dei parametri vocali e cinematici, i fattori entro i soggetti erano la *pseudo-parola* ("scrànta" vs "sbìccara"), l'*effettore* (uni manuale vs bimanuale) e il *gesto* (GRANDE vs PICCOLO).

20. RISULTATI

20.1. Parametri vocali

L'analisi statistica (ANOVA a misure ripetute) mostrava che la F1 era significativamente influenzata dal fattore gesto, e ciò si traduceva in un suo aumento in seguito alla produzione del gesto corrispondente a GRANDE rispetto a quello corrispondente a PICCOLO ($F(1,7)=10,18$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,60$; vedere Fig. 10).

20.2. Parametri cinematici

L'ANOVA a misure ripetute mostrava che il picco di velocità di apertura delle labbra era significativamente influenzato dall'interazione tra i fattori pseudo-parola, effettore e gesto ($F(1,7)=12,09$, $p<0,05$, $\eta^2_p=0,63$). Tuttavia, i confronti post-hoc non mostravano alcun effetto del gesto su questo parametro, né la presenza di altri effetti rilevanti ai fini dello studio.

Non sono state riscontrate sul parametro massima/minima apertura delle dita né significatività del fattore pseudo-parola, né significative interazioni tra questo e i restanti fattori.

Per una visione riassuntiva dei risultati dell'analisi statistica e dei valori assunti dai parametri nelle varie condizioni considerate, si rimanda alla Tabella 3 (Appendice B).

21. DISCUSSIONE GENERALE

21.1. Risultati dell'analisi vocale ed effetto del gesto rappresentazionale sul parlato

Tra i risultati più rilevanti del presente studio, notiamo che la produzione di gesti rappresentazionali sembra influenzare i parametri dello spettro vocale in modo diversificato, a seconda che si pronunciano vocali, parole con significato analogo ai gesti o pseudo-parole. Il significato dei gesti uni manuali influenzava la pronuncia di vocali, quello dei gesti bi manuali la pronuncia di parole, mentre la pronuncia di pseudo-parole era influenzata dal significato dei gesti, sia che essi fossero prodotti con una mano che con due. Più nello specifico, la F1 delle vocali /a/ e /i/, pronunciate isolatamente, era maggiore in seguito alla produzione del gesto GRANDE uni manuale, rispetto al gesto PICCOLO uni manuale (esperimento 1). La F1 delle vocali /a/ e /i/ contenute in “grande” e “piccolo” aumentava in seguito alla produzione del gesto bi manuale corrispondente a GRANDE, rispetto alla produzione del gesto bi manuale corrispondente a PICCOLO (esperimento 2). Infine, la F1 delle vocali /a/ e /i/, contenute nelle pseudo-parole “scránta” e “sbíccara”, era maggiore in seguito alla produzione di gesti corrispondenti a GRANDE rispetto a quelli corrispondenti a PICCOLO, sia che essi fossero uni manuali che bi manuali (esperimento 3).

Il risultato dell'esperimento 1, mostrante l'effetto del gesto eseguito con una sola mano sulla pronuncia della vocale, ben si accorda ai risultati dello studio di Gentilucci e collaboratori (2001) e ai risultati dello studio precedentemente descritto nella presente trattazione, i quali già supportavano l'ipotesi che il controllo di posture della mano destra fosse strettamente connesso al controllo di posture interne della bocca, specificamente implicate nella produzione di unità fonemiche. Ciò, inoltre, spiegherebbe la mancanza di un analogo effetto della produzione di gesti bi manuali, per i quali è fondamentale il controllo

della posizione di entrambe le braccia (segmenti prossimali), piuttosto che delle dita (segmenti distali), sulla pronuncia delle vocali. Probabilmente, i meccanismi connessi al controllo dei gesti bi manuali avevano scarso accesso ai processi di controllo della pronuncia della sola vocale.

I risultati dell'esperimento 2 mostrano, invece, che la produzione dei gesti bi manuali modulava la F1 di /a/ e /i/ contenute nelle parole "grande" e "piccolo", provocandone un aumento quando il gesto corrispondeva a GRANDE rispetto a quando esso corrispondeva a PICCOLO. Un effetto analogo non si riscontrava se il gesto prodotto era uni manuale. Una possibile spiegazione dello specifico effetto del gesto bi manuale sulla pronuncia delle parole potrebbe considerare che, nell'esperimento 2, diversamente dagli altri due esperimenti, simultaneamente al gesto erano presentate le parole. Esse, sin dall'inizio della prova, potevano essere lette silenziosamente e processate semanticamente. Tali processi potrebbero avere inciso sullo svolgimento del compito richiesto ai partecipanti, portandoli a categorizzare i gesti come GRANDE o PICCOLO, in seguito a una comparazione tra le quattro possibili configurazioni gestuali. Probabilmente, la categorizzazione avveniva indipendentemente dal fatto che i gesti fossero prodotti con una o due mani, e considerando le dimensioni rappresentate, in modo assoluto. Verosimilmente, il gesto GRANDE bi manuale era l'unico a essere categorizzato come "rappresentante" di tale dimensione, poiché, in questo caso, la grandezza da esso riprodotta era di molto maggiore delle dimensioni rappresentate dai restanti gesti, che erano probabilmente categorizzati come PICCOLO. Perciò, presumibilmente in virtù dei nessi funzionali tra mano e bocca, e compatibilmente al processo di categorizzazione, un comando connesso alla codifica di GRANDE o PICCOLO era inviato alle strutture responsabili del controllo dell'apertura della bocca interna. Quest'ultimo processo era probabilmente connesso a una variazione della F1, che si traduceva in un suo aumento quando i gesti che precedevano la pronuncia di parole erano stati categorizzati come

GRANDI, e in una sua diminuzione quando essi erano stati categorizzati come PICCOLI. La possibilità che alla bocca interna arrivasse semplicemente un comando di apertura proporzionale a quello delle dita può essere esclusa se si considera che non si riscontravano differenze significative nella F1 in seguito alla produzione del gesto uni manuale corrispondente a GRANDE e i gesti corrispondenti a PICCOLO, sia uni manuali che bi manuali. Al contrario si osservava un significativo aumento dell'apertura delle dita per la produzione di gesti corrispondenti a GRANDE (massima apertura), rispetto ai gesti corrispondenti a PICCOLO (minima apertura), e ciò confermerebbe l'ipotesi di una categorizzazione dei gesti presentati, unicamente nelle due classi (GRANDE e PICCOLO) corrispondenti al significato delle parole presentate (“grande” e “piccolo”).

I gesti uni manuali e bi manuali avevano lo stesso effetto sulla pronuncia di /a/ e /i/ contenute nelle pseudo-parole “scránta” e “sbíccara”. Questo risultato potrebbe essere spiegato considerando che, in questo caso, i partecipanti potrebbero aver cercato di attribuire un significato alle pseudo-parole, essendo esse presentate simultaneamente ai gesti rappresentazionali GRANDE e PICCOLO. Tuttavia, tale tentativo potrebbe non essere andato sempre a buon fine e, probabilmente, /a/ e /i/ potrebbero essere state considerate, talune volte, al pari delle vocali isolate, e pertanto influenzabili dai gesti uni manuali, e altre volte come vocali contenute in parole dotate di significato, e quindi influenzabili dai gesti eseguiti con due mani. Dunque, la sporadica e incerta attribuzione di significato alle pseudo-parole non avrebbe permesso la costruzione di una rappresentazione della dimensione comune a gesti uni manuali e bi manuali, come accadeva nel caso della presentazione di parole.

Riassumendo, compatibilmente a quanto proposto nello studio precedente della presente trattazione (vedere anche Gentilucci et al., 2001), e quindi in accordo con l'ipotesi che la bocca interna e la mano destra siano controllate da uno stesso sistema, il controllo della pronuncia di vocali isolate risulta essere legato al controllo di gesti uni manuali.

Diversamente, il controllo della pronuncia di parole è anch'esso associato a quello dei gesti, tuttavia tale processo è indipendente dall'effettore usato (una sola mano o due mani), ma è mediato da un processo di codifica del significato, piuttosto che da un semplice meccanismo di accoppiamento funzionale tra specifici effettori, come avviene per la pronuncia di vocali. Durante il processo di codifica del significato, sarebbe costruita una rappresentazione astratta della dimensione, comune a tutti gli effettori usati. Rispetto a tale rappresentazione, tutti i gesti, sia uni manuali che bi manuali, sono categorizzati come GRANDE o PICCOLO e comandi di apertura congruenti con l'avvenuta categorizzazione, una volta prodotto il gesto, sarebbero inviati agli organi di controllo dei movimenti della bocca interna. Pertanto, gli stessi comandi motori che giungono agli organi di controllo della bocca, potrebbero essere inviati da strutture di controllo di effettori diversi (una mano o due mani), se il significato (GRANDE o PICCOLO) delle posture assunte dagli effettori coincide. In altre parole, nella situazione riprodotta nell'esperimento 2, la connessione tra mano e bocca sarebbe più distribuita e complessa di quanto non avvenga nell'esperimento 1.

Un ultimo aspetto da considerare circa i risultati dell'esperimento 2 riguarda il fatto che la produzione del gesto categorizzato come GRANDE portava a un aumento della F1 sia per la parola "grande" che per la parola "piccolo". Sempre nell'esperimento 2, la produzione del gesto categorizzato come PICCOLO portava a una diminuzione della F1 sia della parola "piccolo" che della parola "grande". In altri termini, il gesto non influenzava selettivamente la pronuncia delle vocali contenute nelle parole, in relazione al fatto che il significato della parola coincidesse o meno con quello veicolato dal gesto. La spiegazione di tale dato potrebbe risiedere nel fatto che il sistema responsabile delle relazioni tra gesto e parola deriva con molta probabilità dal sistema che lega il controllo di posture della mano a quello di posture della bocca interna, connesse alla produzione di vocali (esperimento 1). Infatti, anche nel caso delle vocali (/a/ e /i/) non si osservava un effetto selettivo del gesto sulla loro pronuncia e tale

proprietà, caratterizzante entrambi i sistemi, è stata probabilmente conservata nel corso dell'evoluzione perché vantaggiosa. Infatti, nella situazione riprodotta nel presente studio si osserva una predominanza del significato del gesto su quello della parola. Tale proprietà funzionale permetterebbe, oltre che di pronunciare la parola in modi diversi, una più flessibile elaborazione del suo significato. Ad esempio, il significato della parola "piccolo" potrebbe rimandare a dimensioni più o meno estese, se accompagnata dal gesto GRANDE o PICCOLO.

21.2. Risultati dell'analisi cinematica e discussione della relazione tra gesto e parola

L'analisi cinematica mostra che la massima apertura delle labbra era influenzata dal gesto durante la pronuncia di vocali, mentre il picco di velocità di apertura delle labbra era influenzato dal gesto durante la produzione di parole dotate di significato. Entrambi i parametri aumentavano se il significato del gesto prodotto rimandava a GRANDE, rispetto a quando esso rimandava a PICCOLO e tali effetti si osservavano sia quando i gesti erano uni manuali, che quando essi erano bi manuali. Tali risultati potrebbero sembrare in contrasto con quelli sulla F1. Tuttavia, è bene tener presente che la F1 è connessa all'apertura interna della bocca, mentre la parte esterna della bocca contribuisce solo scarsamente alla variazione di tale parametro vocale. Più nello specifico, la produzione di unità fonemiche non è connessa alla postura della parte esterna della bocca, se non per il rilascio dell'occlusione durante la pronuncia di consonanti labiali e ciò, nel presente studio, avviene solo per la pronuncia di /'pikkolo/ ("piccolo"). L'importanza dei risultati mostranti l'effetto del gesto sulla cinematica di apertura delle labbra risiede nel fatto il comando di apertura alla bocca (esterna) può essere trasmesso anche a partire del controllo del segmento prossimale (il braccio), indipendentemente dal fatto che a essere prodotta sia una vocale o una parola.

La massima/minima apertura delle dita, durante la produzione dei gesti, era influenzata dalla presentazione delle parole, ma non dalla presentazione delle vocali isolate e delle pseudo-parole. Tale risultato potrebbe essere nuovamente spiegato dal fatto che gesti e parole (“grande” e “piccolo”) erano presentati simultaneamente. E’ pertanto probabile che i soggetti leggessero le parole e producessero i gesti ripetendo silenziosamente le parole presentate. A partire da tale supposizione, sarebbe senz’altro plausibile aspettarsi un effetto di compatibilità tra significato di parola e gesto, in accordo all’ipotesi secondo cui essi sono controllati dallo stesso sistema (vedere Gentilucci e Corballis, 2006; Gentilucci et al., 2008; Gentilucci e Dalla Volta, 2008). Tuttavia, tale effetto di compatibilità si verifica solo per il gesto GRANDE bi manuale, probabilmente perché in questo caso l’effetto della parola sul gesto poteva essere più evidente.

I risultati mostranti la relazione reciproca tra gesto rappresentazionale e parole a esso corrispondenti in termini di significato sono in accordo con i risultati dello studio di Chieffi e colleghi (2009), in cui si sono studiate le relazioni tra gesti deittici (QUA e LÀ, ovvero un puntamento verso il corpo dell’agente e un puntamento in un punto remoto, distante dal corpo dell’agente, rispettivamente) e parole a essi corrispondenti in termini di significato. Tuttavia, a differenza del presente studio, in quello di Chieffi e collaboratori (2009) sono stati osservati effetti di facilitazione e interferenza motoria del gesto, a seconda che esso fosse semanticamente congruente o incongruente alla parola. La discrepanza tra i dati dei due studi potrebbe essere spiegata considerando che, nello studio di Chieffi e colleghi (2009), i gesti deittici indicavano una direzione. E’ pertanto plausibile che il movimento connesso al gesto fosse più veloce in caso di congruenza di significato, poiché la direzione era meglio precisata. Al contrario, l’incongruenza tra significato di gesto e parola, la direzione codificata dai due segnali era opposta e per questo motivo il gesto rallentato. Per quanto concerne il presente studio, se si considera ad esempio la cinematica dell’apertura della bocca, la dimensione

espressa dal gesto rappresentazionale sembra incidere direttamente su di essa, senza che sia tenuto conto della congruenza tra significato di gesto e parola, fenomeno che avrebbe probabilmente prodotto effetti di facilitazione o interferenza motoria. Nel nostro caso, ciò non accade, probabilmente perché, se vi fosse facilitazione in seguito alla congruenza semantica tra la parola “piccolo” e il gesto corrispondente a PICCOLO, ciò si potrebbe tradurre in un aumento dell’apertura della bocca, ma tale fenomeno sarebbe fortemente in contrasto con l’idea che aspetti semantici connessi al gesto manuale siano trasferiti al controllo della bocca, durante la produzione linguistica.

21.3. Gesto e linguaggio verbale: alcune precisazioni sulle loro interazioni

Le relazioni tra gesto e parola sono state studiate anche durante la produzione di segnali comunicativi come CIAO, NO e STOP (Barbieri et al., 2008; Bernardis e Gentilucci, 2006; Gentilucci et al., 2006). Tra i dati più rilevanti di questi studi, vi è quello che mostra che l’intenzione sociale, ossia l’intenzione di interagire con un altro individuo, sia trasferita dal gesto alla parola, modificando alcuni parametri dello spettro vocale. In seguito a tale fenomeno, il sistema di controllo della bocca sembra modificare a sua volta la cinematica delle parti prossimali e distali dell’arto superiore. Gli autori (Bernardis e Gentilucci, 2006) hanno proposto che ciò possa essere dovuto al fatto che gli aspetti codificati dal gesto, connessi all’intenzione sociale, divengono ridondanti. In altre parole, il significato del gesto, sia in termini sociali che in riferimento alle caratteristiche fisiche dell’oggetto cui i gesti si riferiscono, sembra in grado di modulare il controllo del parlato. Tuttavia, la modalità con cui tale interazione si esplicita dipende dal tipo di gesto considerato.

21.4. Relazione tra gesto e parlato: i circuiti cerebrali implicati

In passato, Gentilucci e collaboratori (2006) proposero che l'area di Broca, localizzata nel giro frontale inferiore (GFI), giocasse un ruolo fondamentale nel controllo delle relazioni funzionali reciproche tra gesto e parola (Bernardis e Gentilucci, 2006; Gentilucci e Dalla Volta, 2008). I risultati del presente studio permettono di ampliare tale ipotesi e suggeriscono l'esistenza di due circuiti parzialmente sovrapposti, coinvolti nel controllo di tali relazioni. Il primo circuito sarebbe coinvolto nel controllo della produzione di vocali e di gesti eseguiti con la sola mano destra. La sua funzione potrebbe essere legata al circuito, localizzato nella parte orbitale del GFI, coinvolto nella codifica di rappresentazioni fonologiche in termini di gesti articolatori della bocca (Demonet et al., 1992; Paulesu et al., 1993; Zatorre et al., 1992) e nella manipolazione di oggetti (Binkofski et al., 1999), e sarebbe parte del circuito specchio umano (Kilner et al., 2009; Gazzola e Keysers, 2009; vedere anche Rizzolatti and Craighero, 2004). Il secondo circuito sarebbe invece maggiormente coinvolto nel controllo delle relazioni tra gesto e parlato, per ciò che riguarda l'aspetto più semantico di tali segnali. Esso sarebbe più esteso del circuito precedentemente descritto e comprenderebbe anche la parte orbitale del GFI, settore, questo, maggiormente coinvolto nella codifica semantica (Bookheimer, 2002). Gli studi di neuroimaging funzionale condotti da Willems e collaboratori (2007) e da Xu e collaboratori (2009) mostrano un circuito comune, che comprende le porzioni opercolare, triangolare e orbitale del GFI, attivato dalla processazione del gesto e della parola. Esso potrebbe rendere possibile un accesso comune di gesto e parola alla semantica e quindi l'integrazione dei due segnali a tale livello. Nel presente studio, la categorizzazione di gesti eseguiti con una o due mani, a partire dal significato della parola con essi presentata, potrebbe aver luogo proprio a partire dall'attività di tale circuito, che sarebbe quindi responsabile degli effetti diretti del significato della parola sulla produzione del gesto. D'altra parte, a causa dell'attività del medesimo circuito, aspetti semantici del gesto rappresentazionale (dimensione

dell'oggetto) potrebbero essere trasferiti al parlato, con una conseguente variazione dello spettro vocale.

CONCLUSIONI

I risultati della prima ricerca descritta sono coerenti con i dati degli studi precedenti, i quali rivelavano la presenza di reciproche interazioni funzionali tra mano e bocca. Nel caso specifico dello studio qui presentato, le posture assunte da un effettore influenzavano la configurazione dell'altro durante la successiva prensione. I risultati suggeriscono l'esistenza di un meccanismo che va oltre il semplice accoppiamento temporale tra movimenti dei due effettori distali, mostrando che, durante la fase di pianificazione dell'azione di prensione con un effettore, a essere trasferiti sono proprio gli aspetti cinematici legati alla postura precedentemente assunta dall'altro. Tali effetti non si osservano per ulteriori effettori distali (ad esempio il piede) e sembrano essere specifici per mano e bocca.

Sempre a partire dai risultati del primo studio descritto, se concentriamo la nostra attenzione sugli effetti di posture della bocca interna, connesse alla pronuncia di vocali, sulla successiva prensione eseguita con la mano, è possibile osservare che anche la produzione di elementi del parlato influenza il controllo della successiva prensione eseguita con la mano, simmetricamente a quanto era stato riportato da Gentilucci e collaboratori (2001) riguardo l'influenza del movimento di prensione con la mano sulla produzione di unità fonemiche. I risultati del primo studio supportano quindi l'ipotesi, suggerita da Gentilucci e collaboratori (2001), che la bocca e la mano destra siano controllate da uno stesso sistema (*di doppi comandi alla mano e alla bocca*) e che i due effettori siano tra loro direttamente interconnessi a livello funzionale. Inoltre, tali risultati sembrano corroborare l'ipotesi di Gentilucci e collaboratori (Barbieri et al., 2009; Bernardis e Gentilucci, 2006; Gentilucci et al., 2006), i quali propongono che l'attività del sistema alla base degli effetti descritti possa spiegare anche le interazioni esistenti tra gesto manuale e parlato. In particolare, essi suggeriscono che il sistema in questione possa aver funto da tramite per l'evoluzione di un sistema di

comunicazione basato sul linguaggio verbale, a partire da un sistema di comunicazione basato sul gesto manuale (Gentilucci e Corballis, 2006; Gentilucci e Dalla Volta, 2008; Gentilucci et al., 2008).

Il secondo studio descritto nella presente trattazione si concentra proprio sulle relazioni esistenti tra gesto manuale e linguaggio parlato e sull'effettivo ruolo del sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca nello stabilirsi di tali nessi. I suoi risultati confermano ed ampliano le ipotesi degli studi precedentemente condotti, in cui si osservavano interazioni durante la produzione di unità fonemiche e azioni manuali più o meno esplicitamente dirette ad un target, mostrando la presenza di nessi tra mano e bocca anche durante la produzione di vocali e gesti uni manuali legati a proprietà più astratte dell'oggetto. Ma ancora più rilevante appare il risultato mostrante che le interazioni tra gesto e parola si stabiliscono a partire da processi di categorizzazione semantica: risulta, infatti, che in seguito a presentazione simultanea di gesti rappresentazionali e parole, il cui significato era in entrambi i casi riferito alla dimensione di oggetti (grandi o piccoli), la codifica del significato della parola portava alla categorizzazione semantica del gesto. Tale processo sembrava concorrere alla costruzione di una rappresentazione del significato del gesto comune a più effettori (in questo caso: una mano, due mani e bocca). Poiché i fenomeni descritti implicano processi di codifica semantica, è plausibile ipotizzare che un circuito più esteso, il cui nucleo originario coinciderebbe con il sistema di doppi comandi alla mano e alla bocca, sia alla base delle interazioni tra gesto manuale e linguaggio parlato. Pertanto, mostrando l'attività di un sistema che lega gesto a parola a livello semantico, in contrapposizione ai nessi più squisitamente motori tra prensione manuale e produzione di vocali, i risultati del secondo studio, ci permettono di compiere un passo avanti nell'indagine sulla natura delle interazioni tra gesto e parlato.

BIBLIOGRAFIA

Arbib MA (2005). From monkey-like action recognition to human language: An evolutionary framework for neurolinguistics. *Behavioral and Brain Sciences*, 28: 105-168.

Armstrong DF (1999). *Original Signs: Gesture, sign, and the source of language*. Gallaudet University Press, Washington.

Armstrong DF, Stokoe WC, Wilcox SE (1995). *Gesture and the nature of language*. Cambridge University Press, Cambridge.

Baldissera FG, Cavallari P, Esposti R (2006). Synchrony of hand-foot coupled movements: is it attained by mutual feedback entrainment or by independent linkage of each limb to a common rhythm generator? *BMC Neuroscience*, 26: 70-87.

Barbieri F, Buonocore A, Dalla Volta R, Gentilucci M (2009). How symbolic gestures and words interact with each other. *Brain and Language*, 110: 1-11.

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.

Bates E, Dick F (2002). Language, gesture, and the developing brain. *Developmental Psychobiology*, 40: 293–310.

Bates E, Snyder LS (1987). The cognitive hypothesis in language development. In: Ina E, Uzgiris C, McVicker Hunt EJ (Eds), *Infant performance and experience: new findings with the ordinal scales*. University of Illinois Press, Urbana, IL, USA: 168–204.

Bernardis P, Gentilucci M (2006). Speech and gesture share the same communication system. *Neuropsychologia*, 44: 178-190.

Bickerton D (1995). *Language and human behavior*. University of Washington Press, Seattle, WA.

Binkofski F, Buccino G, Posse S, Seitz RJ, Rizzolatti G, Freund H (1999). A fronto-parietal circuit for object manipulation in man: evidence from an fMRI-study. *European Journal of Neuroscience*, 11: 3276-3286.

Bookheimer S (2002). Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25: 151-188.

Browman CP, Goldstein LF (1995). Dynamics and articulatory phonology. In: van Gelder T, and Port RF (Eds), *Mind as motion*. MIT Press, Cambridge, Mass: 175-193.

Browman CP, Goldstein L (1989). Articulatory gestures as phonological units. *Phonology*, 6: 201–251.

Brown CM, Hagoort P, Kutas M (2000). Postlexical integration processes in language comprehension: evidence from brain-imaging research. In: Gazzaniga MS (Ed), *The cognitive neurosciences*. MIT Press, Cambridge, Mass: 881–895.

Broca P (1861). Remarques sur le siege de la faculté du langage articulé; suivies d'une observation d'aphemie. *Bulletin de la Societé natomique de Paris*, 6: 330-357.

Buccino G, Lui F, Canessa N, Patteri I, Lagravinese G, Benuzzi F, Porro CA, Rizzolatti G (2004). Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconpecifics: an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16: 1–14.

Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Seitz RJ, Zilles K, Rizzolatti G, Freund HJ (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: King BJ (Ed), *The origins of language: what nonhuman primates can tell us*. School of American Research Press, Santa Fe, NM: 307–350.

Calbris G (1990). *The Semiotics of French Gesture*. Indiana University Press, Bloomington.

Campbell AW (1905). *Histological studies on the localisation of cerebral function*. Cambridge University Press, Cambridge.

Cattaneo L, Rizzolatti G (2009). The mirror neuron system. *Archives of Neurology*, 66: 557-560.

Chieffi S, Secchi C, Gentilucci M (2009). Deictic word and gesture production: Their interaction. *Behavioural Brain Research*, 203: 200-206.

Corballis MC (2010). Mirror neurons and the evolution of language. *Brain & Language*, 112: 25–35.

Corballis MC (2009). Language as gesture. *Human Movement Science*, 8: 556-565.

Corballis MC (2002). *From hand to mouth: the origins of language*. Princeton University Press, Princeton.

Corballis MC (1992). On the evolution of language and generativity. *Cognition*, 44: 197-226.

Decety J, Grezes J, Costes, N, Perani D, Procyk E, Grassi F, Jeannerod M, Fazio F (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, 120: 1763-1777.

de Condillac EB (1971). An essay on the origin of human knowledge: being a supplement to Mr. Locke's essay on the human understanding (A facsimile reproduction of the 1756 translation by T. Nugent of Condillac's 1747 essay). *Scholars' Facsimiles and Reprints*, Gainesville, FL.

Coudé G, Ferrari PF, Rodà F, Maranesi M, Borelli E, Veroni V, Monti F, Rozzi S, Fogassi L (2001). Neurons controlling voluntary vocalization in the macaque ventral premotor cortex. *PLoS One*, 6: e26822.

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

de Saussure F (1959). *Course in General Linguistics*, McGraw-Hill.

Donald M (1991). *Origins of the modern mind*. Harvard University Press, Cambridge.

Emmorey K (2002). *Language, cognition, and brain: insights from sign language research*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

Ferrari PF, 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.

Fitts PM (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47: 381-391.

Fogassi L, Ferrari PF, Gesierich B, Rozzi S, Chersi F, Rizzolatti G (2005). Parietal lobe: from action organization to intention understanding. *Science*, 308: 662-667.

Galaburda AM, Pandya DN (1982). Role of architectonics and connections in the study of primate brain evolution. In Armstrong E, Falk D (Eds), *Primate Brain Evolution*. Plenum, New York: 203-216.

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

Gallagher HL, Frith CD (2004). Dissociable neural pathways for the perception and recognition of expressive and instrumental gestures. *Neuropsychologia*, 42: 1725-1736.

Gazzola V, Keysers C (2009). The observation and execution of actions share motor and somatosensory voxels in all tested subjects: single-subject analyses of unsmoothed fMRI data. *Cerebral Cortex*, 19: 1239-1255.

Gentilucci M, Dalla Volta R (2008). Spoken language and arm gestures are controlled by the same motor control system. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (Colchester)*, 61: 944-957.

Gentilucci M, Dalla Volta R, Gianelli C (2008). When the hands speak. *Journal of Physiology - Paris*, 102: 21–30.

Gentilucci M, Campione GC, 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, 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, Corballis MC (2006). From manual gesture to speech: a gradual transition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 30: 949-960.

Gentilucci M, Santunione P, Roy AC, 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 AC, Santunione P (2004b). Action observation and speech production: study on children and adults. *Neuropsychologia*, 42: 1554-1567.

Gentilucci M (2003). Grasp observation influences speech production. *European Journal of Neuroscience*, 17: 179-184.

Gentilucci M (2002). Object motor representation and reaching-grasping control. *Neuropsychologia*, 40: 1139-1353.

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, 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.

Goldin-Meadow S. (2003). *Hearing gesture: how our hands help us think*. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA, US.

Goldin-Meadow S, McNeill D (1999). The role of gesture and mimetic representation in making language the province of speech. In: Corballis MC, Lea SEG (Eds), *The descent of mind*. Oxford University Press, Oxford, UK: 155–172.

Goldstein L, Byrd D, Saltzman E (2006). The role of vocal tract gestural action units in understanding the evolution of phonology. In: Arbib MA (Ed), *Action to language via the mirror neuron system*. Cambridge University Press, Cambridge, UK: 215–249.

Goodall J (1986). *The chimpanzees of Gombe: patterns of behavior*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L, Rizzolatti G (1996). Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. 2. Observation compared with imagination. *Experimental Brain Research*, 112: 103-111.

Grezes J, Costes N, Decety J (1998). Top down effect of the strategy on the perception of human biological motion: a PET investigation. *Cognitive Neuropsychology*, 15: 553-582.

Hadar U, Wenkert-Olenik D, Krauss R, Soroker N (1998). Gesture and the processing of speech: neuropsychological evidence. *Brain and Language*, 62: 107-126.

Hewes GW (1973). Primate communication and the gestural origins of language. *Current Anthropology*, 14: 5-24.

Hockett CF (1958). *A Course in Modern Linguistics*. Macmillan.

Holland M, Wertheimer M. (1964) Some physiognomic aspects of naming or maluma and takete revisited. *Perceptual and Motor Skills*, 19: 111–117.

Horwitz B, Amunts K, Bhattacharyya R, Patkin D, Jeffries K, Zilles K, Braun AR (2003). Activation of Broca's area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis. *Neuropsychologia*, 41: 1868–1876.

Iverson JM, Goldin-Meadow S (2005). Gesture paves the way for language development. *Psychological Science*, 16: 367–371.

Jeannerod M (1988). *The neural and behavioural organization of goal-directed movements*. Clarendon Press, Oxford.

Jurgens U (2009). The neural control of vocalization in mammals: a review. *Journal of Voice*, 23: 1-10.

Jurgens U (1995). Neural control of vocal production in non-human and human primates. In: Zimmerman E, Newman JD, Jurgens U (Eds), *Current Topics in Primate Vocal Communication*. Plenum Press: 199–206.

Kelly SD, Kravitz C, Hopkins M (2004). Neural correlates of bimodal speech and gesture comprehension. *Brain and Language*, 89: 253–260.

Kendon A (2004). *Gesture: visible action as utterance*. Cambridge University Press, Cambridge.

Kendon A (1988). *Sign languages of Aboriginal Australia: cultural, semiotic and communication perspectives*. Cambridge University Press.

Kendon A (1982). The study of gesture: some remarks on its history. *Recherches Sémiotiques/Semeiotic Inquiry*, 2: 45-62.

Kendon A (1980). A description of a deaf-mute sign language from the Enga Province of Papua New Guinea with some comparative discussion. Part III: aspects of utterance construction. *Semiotica*, 32: 245-313.

Kilner JM, Neal A, Weiskopf N, Friston KJ, and Frith CD (2009). Evidence of mirror neurons in human inferior frontal gyrus. *The Journal of Neuroscience*, 29: 10153-10159.

Kohler E, Keysers C, Umiltà MA, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297: 846–848.

Krauss RM, 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: 93-116.

Kutas M, van Petten CK (1994). Psycholinguistics electrified: event-related brain potential investigations. In: Gernsbacher MA (Ed), *Handbook of psycholinguistics*. Academic Press, San Diego, CA: 83–143.

Leoni AF, Maturi P (2002). *Manuale di Fonetica*. Carocci, Roma.

Levelt WJ, Richardson G, La Heij W (1985). Pointing and voicing in deictic expressions. *Journal of Memory and Language*, 24: 133–164.

Lieberman AM (1996). *Speech: a special code*. MIT Press.

Lieberman AM (1993). Some assumptions about speech and how they changed. In *Haskins Laboratories Status Report on Speech Research*, 113: 1–32.

Lieberman, AM, Mattingly IG (1989). A specialization for speech perception. *Science*, 243: 489–494.

Lieberman AM, Mattingly IG (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21: 1–36.

Lieberman AM, Cooper FS, Shankweiler DP, Studdert-Kennedy M. (1967) Perception of the speech code. *Psychological Review*, 74: 431–461.

Lieberman D (1998). Sphenoid shortening and the evolution of modern cranial shape. *Nature*, 393: 158–162.

Lui F, Buccino G, Duzzi D, Benuzzi F, Crisi G, Baraldi P, Nichelli P, Porro CA, Rizzolatti G. (2008). Neural substrates for observing and imagining non object-directed actions. *Social Neuroscience*, 3: 261-275.

MacLean PD (1993). Perspectives on cingulate cortex in the limbic system. In: Vogt BA, Gabriel M (Eds), *Neurobiology of cingulate cortex and limbic thalamus: a comprehensive handbook*. Birkhauser: 1-15.

MacNeilage PF (2008). *The Origin of Speech*. Oxford University Press.

MacNeilage PF (1998). The frame/content theory of evolution of speech. *Behavioral and Brain Sciences*, 21: 499–546.

Mandel M (1977). Iconic devices in American Sign Language. In: Friedman LA (Ed). *On the other hand*. Academic Press, London: 57-107.

Masataka N (2001). Why early linguistic milestones are delayed in children with Williams syndrome: late onset of hand banging as a possible rate-limiting constraint on the emergence of canonical babbling. *Developmental Science*, 4: 158–164.

Matelli M, Luppino G, Rizzolatti G (1985). Patterns of cytochrome oxidase activity in the frontal agranular cortex of macaque monkey. *Behavioural Brain Research*, 18: 125– 137.

Mattingly IG, Liberman AM (1990) Speech and other auditory modules. In: Edelman GM, Gall WE, Cowan WM (Eds), *Signal and sense: local and global order in perceptual maps*. John Wiley & Sons: 501–519.

McNeill D (2000). *Language and Gesture: window into thought and action*. Cambridge University Press, Cambridge.

McNeill D, Duncan S (2000). Growth points in thinking-for-speaking. In: McNeill D (Ed), *Language and gesture*. Cambridge University Press, Cambridge:141-161.

McNeill D (1992). *Hand and mind: what gestures reveal about thought*. Chicago University Press, Chicago.

Muller C (1998). *Redebegleitende gesten. Kulturgeschichte – theorie – sprachvergleich (Gestures with speech. Cultural history, theory, comparison)*. Arno Spitz, Berlin.

Murata A, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Raos V, Rizzolatti G (1997). Object representation in the ventral premotor cortex (area F5) of the monkey. *Journal of Neurophysiology*, 78: 2226-2230.

Muthukumaraswamy SD, Johnson BW, McNair NA (2004). Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Cognitive Brain Research*, 19: 195–201.

Neidle C, Kegl J, MacLaughlin D, Bahan B, Lee RG (2000). *The Syntax of American Sign Language*. MIT Press, Cambridge, MA.

Oldfield RC (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97–113.

Özyürek A, Willems RM, Kita S, Hagoort P (2007). On-line integration of semantic information from speech and gesture: insights from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19: 605-616.

Paget R (1963). *Human speech: some observations, experiments and conclusions as to the nature, origin, purpose and possible improvement of human speech*, Routledge and Kegan Paul, London.

Paget R (1930). *Human speech*. Harcourt Brace, New York.

Passingham R. (1993). *The frontal lobes and voluntary action*. Oxford University Press.

Paulesu E, Frith CD, Frackowiak RS (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362: 342-345.

Petrides M, Pandya DN (1994). Comparative architectonic analysis of the human and the macaque frontal cortex. In: Boller F, Grafman J (Eds), *Handbook of neuropsychology* (Vol. IX). Elsevier: 17–58.

Petitto LA, Marentette PF (1991). Babbling in the manual mode: evidence for the ontogeny of language. *Science*, 251: 1493-1496

Ploog, D (2002). Is the neural basis of vocalisation different in non-human primates and *Homo sapiens*? In: Crow TJ (Ed), *The speciation of modern Homo sapiens*. Oxford University Press, Oxford: 121–135.

Poggi I, Caldognetto E (1998). *Mani che parlano*. Unipress, Padova.

Puce A, Perrett D (2003). Electrophysiology and brain imaging of biological motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 358: 435-445.

Rizzolatti G, Craighero L (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27: 169-92.

Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2: 661–670.

Rizzolatti G, Arbib MA (1998). Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*, 21: 188–194.

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, 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.

Rubén RJ (2005). Sign language: its history and contribution to the understanding of the biological nature of language. *Acta Oto-Laryngologica*, 125: 464-467.

Sassenberg U, Van Der Meer E (2010). Do we really gesture more when it is more difficult? *Cognitive Science*, 34: 643-664.

Sauer E, Levine SC, Goldin-Meadow S (2010). Early gesture predicts language delay in children with pre- or perinatal brain lesions. *Child Development*, 81: 528-539.

Sakata H, Taira M, Murata A, Mine S (1995). Neural mechanisms of visual guidance of hand action in the parietal cortex of the monkey. *Cerebral Cortex*, 5: 429-438.

Sakreida K, Schubotz RI, Wolfensteller U, von Cramon DY (2005). Motion class dependency in observers' motor areas revealed by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 25: 1335-1342.

Studdert-Kennedy M (2005). How did language go discrete? In: Tallerman M (Ed), *Language origins: perspectives on evolution*. Oxford University Press, Oxford: 48-67.

Studdert-Kennedy M. (1998) The particulate origins of language generativity: from syllable to gesture. In: Hurford J, Studdert-Kennedy M, Knight C (Eds), *Approaches to the Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*. Cambridge University Press: 202-221.

Van Hooff J (1967). The facial displays of the catarrhine monkeys and apes. In: Morris D. (Ed), *Primate Ethology*. Weidenfield and Nicolson, London: 7-68.

Van Hooff J (1962). Facial expressions in higher primates. *Symposia of the Zoological Society of London*, 8: 97-125.

Vico GB (1953/1744). *La scienza nuova*. Laterza, Bari.

Volterra V, Bates E, Benigni L, Bretherton I, Camaioni L (1979). First words in language and action: a qualitative look. In: Bates E, Benigni L, Bretherton I, Camaioni L, Volterra V (Eds), *The emergence of symbols: cognition and communication in infancy*. Academic Press, New York: 141-222.

Von Bonin G, Bailey P (1947). *The neocortex of Macaca Mulatta*, University of Illinois Press.

Umiltà MA, Kohler E, Gallese V, Fogassi L, Fadiga L, Keysers C, Rizzolatti G (2001). I know what you are doing: a neurophysiological study. *Neuron*, 31 :155-165.

Warren RM, Obusek CJ, Farmer RM, Warren RP (1969). Auditory sequence: confusion of patterns other than speech or music. *Science* 164, 586-587.

Weiss JH (1964). Phonetic symbolism re-examined. *Psychological Bulletin*, 61: 454-458.

Whalen DH, Liberman AM (1987). Speech perception takes precedence over non-speech perception. *Science*, 237: 169-171.

Whishaw IQ, Sacey LA, Travis SG, Gholamrezaei G, Karl JM (2010). The functional origins of speech-related hand gestures. *Behavioural Brain Research*, 214: 206-215.

Willems RM, Özyürek A, Hagoort P (2009). Differential roles for left inferior frontal and superior temporal cortex in multimodal integration of action and language. *NeuroImage*, 47: 1992-2004.

Willems RM, Hagoort P (2007). Neural evidence for the interplay between language, gesture, and action: A review. *Brain and Language*, 101: 278–289.

Willems RM, Özyürek A, Hagoort P (2007). When language meets action: the neural integration of gesture and speech. *Cerebral Cortex*, 17: 2322-2333.

Xu J, Gannon PJ, Emmorey K, Smith JF, Braun AR (2009). Symbolic gestures and spoken language are processed by a common neural system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106: 20664-20669.

Wundt W (1973). *The language of gestures*. The Hague, Mouton.

Zatorre RJ, Evans AC, Meyer E, Gjedde A (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256: 846-849.

Appendice A: risultati dello studio I

Tabella 1. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici misurati nell'esperimento 1

Fattori e interazioni	Dimensione del target (Grande vs piccolo)	Postura della mano (Preso di forza vs mano rilassata vs preso di precisione)	Dimensione del target* Postura della mano
<u>Parametri cinematici</u>			
Picco di velocità di apertura delle labbra (mm/s)	F(1,9)=11,2, p<0,01, $\eta^2_p=0,55$; Grande=72,5 Piccolo=67	F(1,9)=0,05, n.s.	F(2,18)=1,1, n.s.
Massima apertura delle labbra (mm)	F(1,9)=51,8, p<0,01, $\eta^2_p=0,85$; Grande=61,4 Piccolo=59,1	F(1, 9)=6,2, p<0,01, $\eta^2_p=0,41$; Fig. 4	F(2,18)=0,3, n.s.
Tempo del movimento di raggiungimento (ms)	F(1,9)=2,6, n.s.	F(1, 9)=1,8, n.s.	F(2,18)=1,1, n.s.
Picco di velocità del movimento di raggiungimento (mm/s)	F(1,9)=4,8, p=0,056, Grande=400,2 Piccolo=410	F(1, 9)=0,1, n.s.	F(2,18)=0,1, n.s.
Apertura media delle dita (mm)	F(1,8)=0,7, n.s.	F(1,8)=78,4, p<0,01, $\eta^2_p=0,90$; Fig. 4	F(2,16)=0,03, n.s.

Tabella 2. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici misurati nell'esperimento 2

Fattori e interazioni	Dimensione del target (Grande vs piccolo)	Postura della mano (Dita estese vs dita rilassate vs dita flesse)	Dimensione del target* Postura della mano
<u>Parametri cinematici</u>			
Picco di velocità di apertura delle labbra (mm/s)	F(1,9)=1,1, n.s.	F(2,18)=0,1, n.s.	F(2,18)=0,5, n.s.
Massima apertura delle labbra (mm)	F(1,9)=40, p<0,01, $\eta^2_p=0,81$; Grande=66,9 Piccolo=62,7	F(2,18)=3,9, p<0,05, $\eta^2_p=0,30$; Fig. 4	F(2,18)=3,3, n.s.
Tempo del movimento di raggiungimento (ms)	F(1,9)=10,3, p<0,01, $\eta^2_p=0,53$; Grande=1491,1 Piccolo=1434,5	F(2,18)=0,6, n.s.	F(2,18)=0,3, n.s.
Picco di velocità del movimento di raggiungimento (mm/s)	F(1,9)=0,1, n.s.	F(2,18)=2,0, n.s.	F(2,18)=0,4, n.s.
Apertura media delle dita (mm)	F(1,9)=0,4, n.s.	F(2,18)=12,6, p<0,01, $\eta^2_p=0,58$; Fig. 4	F(2,18)=0,3, n.s.

Tabella 3. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici misurati nell'esperimento 3

Fattori e interazioni	Dimensione del target (Grande vs piccolo)	Postura della bocca (Bocca aperta vs bocca rilassata vs bocca chiusa)	Dimensione del target* Postura della bocca
<u>Parametri cinematici</u>			
Picco di velocità di apertura delle dita (mm/s)	F(1,9)=11,6 p<0,01, $\eta^2_p=0,56$; Grande=306,4 Piccolo=267,5	F(2,18)=3,4, p=0,05, $\eta^2_p=0,27$; Fig. 5	F(2,18)=0,5, n.s.
Massima apertura delle dita (mm)	F(1,9)=156, p<0,01, $\eta^2_p=0,94$; Grande=98 Piccolo=88,7	F(2,18)=7,2, p<0,01, $\eta^2_p=0,44$; Fig. 5	F(2,18)=2,2, n.s.
Tempo del movimento di raggiungimento (ms)	F(1,9)=0,8, n.s.	F(2,18)=0,2, n.s.	F(2,18)=0,4, n.s.
Picco di velocità del movimento di raggiungimento (mm/s)	F(1,9)=4,5, p=0,06, Grande=772,5 Piccolo=755,2	F(2,18)=3,9, p<0,05, $\eta^2_p=0,30$; Fig.5	F(2,18)=1, n.s.
Apertura media delle labbra (mm)	F(1,7)=3, n.s.	F(2,14)=78,1, p<0,01, $\eta^2_p=0,91$; Fig. 5	F(2,14)=2,9, n.s.

Tabella 4. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici misurati nell'esperimento 4

Fattori e interazioni	Dimensione del target (Grande vs piccolo)	Postura del piede (Dita estese vs dita rilassate vs dita flesse)	Dimensione del target* Postura del piede
<u>Parametri cinematici</u>			
Picco di velocità di apertura delle dita (mm/s)	F(1,8)=15,9 p<0,01, $\eta^2_p=0,66$; Grande=337,4 Piccolo=277,6	F(2,16)=0,9, n.s.	F(2,16)=0,1, n.s.
Massima apertura delle dita (mm)	F(1,8)=251,2, p<0,01, $\eta^2_p=0,96$; Grande=97,1 Piccolo=81,6	F(2,16)=0,5, n.s.	F(2,16)=1,4, n.s.
Tempo del movimento di raggiungimento (ms)	F(1,8)=0,5, n.s.	F(2,16)=3,8, p<0,05, $\eta^2_p=0,32$; Dita piede estese= 637,17 Dita piede rilassate=637,1 Dita piede flesse=621,3	F(2,16)=1,2, n.s.
Picco di velocità movimento raggiungimento (mm/s)	F(1,8)=1,9, n.s.	F(2,16)=3,8, p<0,05, $\eta^2_p=0,32$; Fig. 5	F(2,16)=2,9, n.s.

Tabella 5. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri vocali e cinematici misurati nell'esperimento 5

Fattori e interazioni	Dimensione del target (Grande vs piccolo)	Vocale /a/ vs /ɔ/ vs /i/	Dimensione del target* Vocale
<u>Parametri cinematici</u>			
Picco di velocità di apertura delle dita (mm/s)	F(1,9)=18,1, p<0,01, $\eta^2_p=0,66$; Grande=314,3 Piccolo=280,9	F(2,18)=0,1, n.s.	F(2,18)=0,3, n.s.
Massima apertura delle dita (mm)	F(1,9)=127,1, p<0,01, $\eta^2_p=0,93$; Grande=101 Piccolo= 85,9	F(2,18)=6,5, p<0,01, $\eta^2_p=0,40$; Fig. 5	F(2,18)=0,1, n.s.
Tempo del movimento di raggiungimento (ms)	F(1,9)=0,7, n.s.	F(2,18)=1, n.s.	F(2,18)=0,1, n.s.
Picco di velocità del movimento di raggiungimento (mm/s)	F(1,9)=0,1, n.s.	F(2,18)=1,4, n.s. Fig. 5	F(2,18)=0,5, n.s.
Apertura media delle labbra (mm)	F(1,9)=0,5, n.s.	F(2,18)=20, p<0,01, $\eta^2_p=0,69$; Fig. 5	F(2,18)=0,4, n.s.
<u>Parametri vocali</u>			
Formante 1 (Hz)	F(1,8)=0,2, n.s.	F(2,16)=235, p<0,01, $\eta^2_p=0,96$; Fig. 6	F(2,16)=0,4, n.s.
Formante 2 (Hz)	F(1,8)=0,7, n.s.	F(2,16)=283,6, p<0,01, $\eta^2_p=0,97$; Fig. 6	F(2,16)=0,6, n.s.

Appendice B: risultati dello studio II

Tabella 1. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici e vocali misurati nell'esperimento 1

Fattori e Interazioni	Vocale ("a" vs "i")	Effettore (Unimanuale vs bimanuale)	Gesto (GRANDE vs PICCOLO)	Vocale* Effettore	Vocale* Gesto	Effettore* Gesto	Vocale* Effettore* Gesto
<u>Parametri vocali</u>							
F1 (Hz)	F(1,7)=371, p<0,01, $\eta^2_p=0,98$; "a"=896 "i"=392	F(1,7)=0,01, n.s.	F(1,7)=1,25, n.s.	F(1,7)=0,04, n.s.	F(1,7)=0,33 n.s.	F(1,7)=13,53 p<0,01, $\eta^2_p=0,66$; Fig. 10	F(1,7)=0,25 n.s.
F2 (Hz)	F(1,7)=144,9, p<0,01, $\eta^2_p=0,95$; "a"=1408 "i"=2444	F(1,7)=0,76, n.s.	F(1,7)=0,06, n.s.	F(1,7)=1,84, n.s.	F(1,7)=0,7 n.s.	F(1,7)=1,75, n.s.	F(1,7)=1,76, n.s.
<u>Parametri cinematici</u>							
Picco di velocità di apertura delle labbra (mm/s)	F(1,7)=3,01, n.s.	F(1,7)=0,41, n.s.	F(1,7)=4,1, n.s.	F(1,7)=2,15, n.s.	F(1,7)=0,4, n.s.	F(1,7)=0,03, n.s.	F(1,7)=0,55, n.s.
Massima apertura delle labbra (mm)	F(1,7)=9,36, p<0,05, $\eta^2_p=0,57$; "a"=47 "i"=41	F(1,7)=0,7, n.s.	F(1,7)=11,05, p<0,05, $\eta^2_p=0,61$ Fig. 11	F(1,7)=15,75, p<0,01, $\eta^2_p=0,69$ "a": Unimanuale=48 Bimanuale=47 "i": Unimanuale= 41 Bimanuale= 41	F(1,7)=0,63 n.s.	F(1,7)=1,41, n.s.	F(1,7)=0,16, n.s.
Massima/minima apertura delle dita (mm)	F(1,7)=0,001, n.s.	F(1,7)=86,31, p<0,01, $\eta^2_p=0,92$; Unimanuale= 80 Bimanuale= 317	F(1,7)=103,8, p<0,01, $\eta^2_p=0,94$; GRANDE=354 PICCOLO=43	F(1,7)=0,29, n.s.	F(1,7)=0,73 n.s.	F(1,7)=96,83, p<0,01, $\eta^2_p=0,93$; Unimanuale: GRANDE=112 PICCOLO=47 Bimanuale: GRANDE=596 PICCOLO=39	F(1,7)=0,071, n.s. Fig. 12

Tabella 2. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici e vocali misurati nell'esperimento 2

Fattori e interazioni	Parola ("Grande" vs "Piccolo")	Effettore (Unimanuale vs bimanuale)	Gesto (GRANDE vs PICCOLO)	Parola* Effettore	Parola* Gesto	Effettore* Gesto	Parola* Effettore* Gesto
<u>Parametri vocali</u>							
F1 (Hz)	F(1,7)=132, p<0,01, $\eta^2_p=0,95$; "Grande"=802 "Piccolo"=381	F(1,7)=5,6, p<0,05, $\eta^2_p=0,44$; Unimanuale=589 Bimanuale=594	F(1,7)=1,9, n.s.	F(1,7)=1,06, n.s.	F(1,7)=0,02, n.s.	F(1,7)=7,61, p<0,05, $\eta^2_p=0,52$; Fig. 10	F(1,7)=0,18, n.s.
F2 (Hz)	F(1,7)=87,91, p<0,01, $\eta^2_p=0,93$; "Grande"=1541 "Piccolo"=2357	F(1,7)=1,04, n.s.	F(1,7)=0,37, n.s.	F(1,7)=0,51, n.s.	F(1,7)=0,21, n.s.	F(1,7)=0,87, n.s.	F(1,7)=1,14, n.s.
<u>Parametri cinematici</u>							
Picco di velocità di apertura delle labbra (mm/s)	F(1,7)=0,25, ns.	F(1,7)=1,92, n.s.	F(1,7)=4,64, p=0,06 Fig. 13	F(1,7)=0,75, n.s.	F(1,7)=1,39, n.s.	F(1,7)=1,04, n.s.	F(1,7)=0,64, n.s.
Massima Apertura delle labbra (mm)	F(1,7)=0,03, n.s.	F(1,7)=1,59, n.s.	F(1,7)=1,14, n.s.	F(1,7)=1,21, n.s.	F(1,7)=2,01, n.s.	F(1,7)=3,94, n.s.	F(1,7)<0, n.s.
Massima/minima apertura delle dita (mm)	F(1,7)=3,01, n.s.	F(1,7)=105,69, p<0,01, $\eta^2_p=0,94$; Unimanuale= 87 Bimanuale= 280	F(1,7)=137,18 p<0,01, $\eta^2_p=0,95$; GRANDE=324 PICCOLO=43	F(1,7)=2,31, n.s.	F(1,7)=3,25, n.s.	F(1,7)=119,13, p<0,01, $\eta^2_p=0,94$; Unimanuale: GRANDE=126 PICCOLO=49 Bimanual: GRANDE=523 PICCOLO=37	F(1,7)=5,27, p=0,05; $\eta^2_p=0,40$ Fig. 12

Tabella 3. Risultati delle ANOVA eseguite sui parametri cinematici e vocali misurati nell'esperimento 3

Fattori e Interazioni	Pseudo-parola ("Scrànta" vs "sbiccara")	Effettore (Unimanuale vs bimanuale)	Gesto (GRANDE vs PICCOLO)	Pseudo-parola* Effettore	Pseudo-parola* Gesto	Effettore* Gesto	Pseudo-parola* Effettore* Gesto
<u>Parametri vocali</u>							
F1 (Hz)	F(1,7)=397,97, p<0,01, $\eta^2_p=0,98$; "Scrànta"=787 "Sbiccara"=371	F(1,7)=1,58, n.s.	F(1,7)=10,18, p<0,05, $\eta^2_p=0,60$; GRANDE= 583 PICCOLO= 575	F(1,7)=3,57, n.s.	F(1,7)=3,59, n.s.	F(1,7)=0,41, n.s. Fig. 10	F(1,7)=1,7, n.s.
F2 (Hz)	F(1,7)=620,88, p<0,01, $\eta^2_p=0,99$; "Scrànta"=1481 "Sbiccara"=2347	F(1,7)=1,62, n.s.	F(1,7)=0,15, n.s.	F(1,7)=0,01, n.s.	F(1,7)=0,47, n.s.	F(1,7)=2,29, n.s.	F(1,7)=0,35, n.s.
<u>Parametri cinematici</u>							
Picco di velocità di apertura delle labbra (mm/s)	(1,7)=1,68, n.s.	F(1,7)=0,8, n.s.	F(1,7)=0,53, n.s.	F(1,7)=0,01, n.s.	F(1,7)=2,09, n.s.	F(1,7)=0,35, n.s.	F(1,7)=12,09, p<0,05, $\eta^2_p=0,63$;
Massima Apertura delle labbra (mm)	F(1,7)=1,08, n.s.	F(1,7)=0,06, n.s.	F(1,7)=0,49, n.s.	F(1,7)=0,61, n.s.	F(1,7)=0,06, n.s.	F(1,7)=1, n.s.	F(1,7)=0,25, n.s.
Massima/minima apertura delle dita (mm)	F(1,7)=0,22, n.s.	F(1,7)=312,23, p<0,01, $\eta^2_p=0,98$; Unimanuale= 83 Bimanuale= 290	F(1,7)=545,60, p<0,01, $\eta^2_p=0,99$; GRANDE=331 PICCOLO=42	F(1,7)=0,93, n.s.	F(1,7)=0,09, n.s.	F(1,7)=362,31 p<0,01, $\eta^2_p=0,98$; Unimanuale: GRANDE=118 PICCOLO=47 Bimanuale: GRANDE=544 PICCOLO=36	F(1,7)=0,05, n.s. Fig. 12