

Studi

L'origine comune di linguaggio e azione

Alessandro D'Ausilio, Laura Maffongelli e Luciano Fadiga

Ricevuto l'8 ottobre 2012, accettato il 22 marzo 2013

Riassunto Il sistema motorio presenta un'organizzazione particolarmente interessante per via delle sue forti analogie con il linguaggio. In questa sede, prendendo spunto dai alcuni studi di neurofisiologia, neuroanatomia e neuroimmagine funzionale, saranno tracciate le similarità più importanti tra l'organizzazione cerebrale del linguaggio e quelle dell'azione. Queste analogie saranno da sostegno per successive speculazioni riguardo ai meccanismi di evoluzione funzionale tra i due sistemi. In particolar modo, suggeriremo che le caratteristiche computazionali alla base del funzionamento del sistema motorio possano aver fornito gli elementi di base per l'emergere della sintassi e semantica nel linguaggio.

PAROLE CHIAVE: Sistema motorio; Gerarchia motoria; Ricorsività; Linguaggio; Azione.

Abstract *The Shared Origin of Language and Action* – Motor system organization shows some interesting parallels with language organization. Here we point out possible commonalities between Action and Language, basing our claims on neurophysiological, neuroanatomical and neuroimaging data. Furthermore, we speculate that the motor system may have furnished the basic computational capabilities for the emergence of both semantics and syntax.

KEYWORDS: Motoric System; Motoric Hierarchy; Recursivity; Language; Action.



Gerarchie nel sistema motorio

IL SISTEMA MOTORIO È ORGANIZZATO intorno a una chiara gerarchia anatomico-funzionale, che spazia dalla generazione di intenzioni astratte all'implementazione dei parametri del controllo motorio, in dissociabili regioni corticali, sottocorticali e spinali.¹

Nei fatti però, il comportamento umano è costituito principalmente da complesse azioni

dirette a uno scopo, basate sulla composizione sinergica di atti motori più semplici. Tali catene di atti relativamente semplici sono ordinate in sequenze non casuali governate da una precisa "grammatica motoria".

In questo senso, il lavoro pionieristico di Nicolai Bernstein² ha posto le basi dello studio moderno sul sistema motorio. Infatti, la novità del suo approccio risiede nell'integrazione multidisciplinare tra biologia evolutiva e

A. D'Ausilio - Istituto Italiano di Tecnologia, RBCS – Robotics, Brain and Cognitive Sciences, Genova (✉)
E-mail: alessandro.dausilio@iit.it

L. Maffongelli - Istituto Italiano di Tecnologia, RBCS – Robotics, Brain and Cognitive Sciences, Genova
E-mail: laura.maffongelli@iit.it

L. Fadiga - Università di Ferrara, DSBTA – Sezione di Fisiologia Umana, Ferrara / Istituto Italiano di Tecnologia, RBCS – Robotics, Brain and Cognitive Sciences, Genova
E-mail: luciano.fadiga@iit.it

biomeccanica muscolo-scheletrica, per spiegare l'organizzazione di azioni complesse umane. Il modello di Bernstein introduce alcuni nuovi concetti tra i quali la centralità dello scopo dell'azione.³

Secondo questa visione, le azioni non sono una sequenza di sub-azioni semi-indipendenti, esse piuttosto sono pianificate fin dall'inizio in funzione dello scopo e per risolvere un dato problema. La discrepanza osservata tra azione programmata e azione effettivamente eseguita viene usata come segnale di apprendimento. Questa idea apparentemente semplice e scontata ai nostri giorni ha, di fatto, definito il *background* teorico che ha guidato i successivi 40 anni di ricerca sul sistema motorio.

Seguendo le argomentazioni di Bernstein, le azioni sono composte da più semplici costituenti motori che possono essere organizzati in sequenze complesse, pur mantenendo un buon grado di variabilità adattiva per venire incontro ai mutevoli e imprevedibili cambiamenti contestuali. In questa prospettiva, il sistema motorio può ricombinare o sostituire elementi motori per adattarsi ad un cambiamento nel contesto, dunque per raggiungere uno scopo.

Un altro concetto di particolare importanza è quello di ricorsività o anche l'abilità di accedere ripetutamente a elementi motori costituenti un'azione precedentemente appresi. L'idea della ricorsività motoria porta con sé conseguenze importanti per la relazione tra i domini del linguaggio e dell'azione.

Infatti il concetto di ricorsività è stato storicamente considerato una caratteristica specifica del linguaggio.⁴ Hauser, Chomsky e Fitch⁵ considerano la sintassi come l'aspetto essenziale del linguaggio umano. Inoltre la interpretano come il meccanismo computazionale che ne costituisce il nucleo e ipotizzano che sia stata proprio l'evoluzione di questo meccanismo (ricorsione) a determinare l'emergere del linguaggio.

Questi autori assumono una distinzione tra la facoltà del linguaggio in senso lato (FLB – *Faculty on Language in the Broad Sense*) e facoltà di linguaggio in senso stretto (FLN – *Faculty on Language in the Narrow Sense*).

Mentre il primo (FLB) è visto come un sistema computazionale che “lavora” per un verso con il sistema sensori-motorio e, per altro verso, con un sistema concettuale-intenzionale, il secondo (FLN) rappresenta il meccanismo/nucleo combinatorio e ricorsivo, quindi un sistema capace di produrre espressioni sempre più complesse, partendo da singole unità lessicali.

Il sistema motorio potrebbe effettivamente racchiudere una capacità primitiva di comporre singoli elementi in comportamenti sempre più complessi, ripetendo brevi sequenze per un numero di volte. Tuttavia, mentre la ricorsività linguistica esprime strutture annidate, i comportamenti motori ripetitivi rappresentano – nella loro forma più semplice – esclusivamente strutture sequenziali. In ogni caso, è opportuno sottolineare che la ricorsività nel sistema motorio può essere trovata almeno su due livelli: nella gestione della ridondanza dei gradi di libertà a livelli subcorticali e nella progettazione e uso di strumenti o anche strumenti per costruirne altri al livello più alto della rappresentazione motoria finalizzata a uno scopo.⁶

Di conseguenza, il sistema motorio potrebbe essere considerato come una struttura gerarchica diretta a uno scopo, capace di concatenare semplici atti motori. Questa struttura, nonché le regole che collegano i singoli elementi motori, potrebbero anticipare l'organizzazione sintattica del linguaggio. Inoltre, la variabilità adattiva che consente il raggiungimento di uno scopo a prescindere dal modo in cui la pianificazione motoria è realizzata, la co-articolazione e la ricorsività motoria sono tutte caratteristiche che mostrano una chiara analogia con il sistema linguistico.

Strutture gerarchiche simili a quelle sintattiche soddisfano le due proprietà richieste per la rappresentazione motoria finalizzata a uno scopo: le rappresentazioni dello scopo possono (a) essere riattivate come singola unità ogniqualvolta richieste e (b) avere le singole componenti riattivate una dopo l'altra o reassemblate per favorire l'apprendimento di comportamenti nuovi.

Nell'ambito della ricerca neurofisiologica è stato mostrato che nell'area F5 della scimmia, un'area premotoria ventrale, vengono rappresentati movimenti complessi di mano e bocca.⁷ Alcuni neuroni di questa regione si attivano durante l'esecuzione di un'azione specifica diretta a uno scopo (per esempio: afferrare, maneggiare, strappare, tenere), mentre non si attivano durante l'esecuzione di movimenti fatti con altre intenzioni.

È interessante notare che questi neuroni si attivano durante movimenti che hanno lo stesso scopo a prescindere dall'effettore usato per eseguirlo. Tuttavia, oltre alle loro proprietà motorie i neuroni appartenenti all'area F5 mostrano anche risposte visive complesse (neuroni visuo-motori).

Nell'area F5 della scimmia si distinguono due categorie di questi neuroni visuo-motori: neuroni canonici e neuroni specchio. Mentre i neuroni canonici si attivano quando la scimmia osserva un oggetto afferrabile o esegue le azioni di presa su questi oggetti,⁸ l'attivazione dei neuroni specchio avviene sia durante l'esecuzione di azioni sia durante l'osservazione delle stesse azioni compiute da altri.⁹

Le caratteristiche visive e motorie dei neuroni canonici mostrano una stretta congruenza tra i due tipi di risposta (un neurone che si attiva se la scimmia osserva un oggetto dalle piccole dimensioni si attiva anche durante una presa di precisione). L'interpretazione più probabile per la scarica visiva dei neuroni canonici è che ci sia uno stretto legame tra gli stimoli 3D più comuni e le azioni necessarie per interagire con essi.

I neuroni specchio invece, si attivano quando la scimmia agisce su un oggetto e se osserva un altro individuo eseguire una simile azione finalizzata a uno scopo. In genere, i neuroni specchio mostrano una congruenza tra le azioni osservate e quelle eseguite.

Il ruolo dell'area di Broca

In recenti studi comparativi citoarchitettonici della corteccia frontale dell'uomo e della scimmia si è cercato l'omologo umano dell'area

F5 della scimmia, dove originalmente erano stati scoperti i neuroni specchio e quelli canonici. L'area F5 è un'area premotoria, caratterizzata dall'assenza dello strato granulare IV, analoga alla corteccia premotoria ventrale (PMv) dell'uomo.

La *pars opercularis* (BA44, la parte posteriore dell'area di Broca) dispone di un rudimentale strato IV, mentre non è dotata di grandi corpi cellulari nello strato III. L'area BA44 dell'uomo, una corteccia disgranulare, mostra analogie importanti con un'area cerebrale della scimmia nella profondità del solco arcuato.

La *pars triangularis* (BA45, la parte anteriore dell'area di Broca) è caratterizzata dalla presenza di uno strato granulare IV molto grande e da corpi cellulari molto grandi nello strato III e per questo costituisce fondamentalmente una regione prefrontale.¹⁰

Questa differenza strutturale – tra la corteccia granulare (BA45) da una parte e tra quella agranulare (PMv) e quella disgranulare (BA44) dall'altra – è anche accompagnata da recenti studi sulla connettività nell'uomo¹¹ e nella scimmia.¹²

Questi studi dimostrano come l'area BA45 sia collegata anatomicamente alle aree temporali, mentre le ultime due (PMv e BA44) sono connesse per lo più al lobulo parietale inferiore e alla giunzione temporo-parietale. Dunque, le aree BA44 e PMv sono le candidate migliori per ospitare popolazioni di neuroni con caratteristiche analoghe ai neuroni specchio e i neuroni canonici.

Dal punto di vista funzionale, un crescente corpo di evidenze di neuroimmagine indica in effetti come l'area PMv e l'area posteriore di Broca (BA44) abbiano proprietà simili all'area F5 della scimmia. In conformità con le proprietà dei neuroni canonici nella scimmia, l'osservazione passiva di oggetti afferrabili è stata riscontrata nell'uomo in area motoria e PMv.¹³ Inoltre, la corteccia premotoria ventrale mostra attività anche durante la semplice osservazione di strumenti.¹⁴

Per esplorare le funzioni dei neuroni specchio, altri studi hanno focalizzato l'interesse

sull'attività cerebrale di partecipanti durante l'osservazione di azioni eseguite da altri riportando attività nell'area BA44 e nella la corteccia PMv, in analogia con quanto dimostrato nella scimmia.¹⁵

Oltretutto, gli afasici frontali senza aprasia risultano non riuscire in un compito di sequenziamento di azioni suggerendo inoltre l'interessante possibilità che l'area di Broca possa rappresentare la gerarchia degli scopi dell'azione – osservata o eseguita – piuttosto che rappresentare il programma motorio di base per poterle eseguire.¹⁶

Servendosi della stimolazione magnetica transcranica, simili risultati sono stati riscontrati in persone non affette da alcuna disfunzione bloccando temporaneamente la funzione dell'area BA44.¹⁷

■ Cosa ci dice l'azione sul linguaggio?

Finora abbiamo mostrato dati che favoriscono la rappresentazione di una struttura gerarchica dello scopo nel sistema motorio. Abbiamo inoltre descritto le funzioni integrative complesse osservate nell'area F5 della scimmia – contenente i neuroni specchio e canonici – e abbiamo tracciato il parallelo anatomico-funzionale tra l'area F5 e l'area di Broca.

È però interessante notare come l'emergenza della proto-semantica possa derivare dalla capacità di costruire la rappresentazione pragmatica di un oggetto o dalla capacità di convertire oggetti puramente percettivi in strumenti. Il processo di trasformazione da oggetto a strumento richiede diversi passaggi importanti. Prima di tutto richiede una conversione visuo-motoria delle complesse caratteristiche geometriche dell'oggetto in un codice sensori-motorio, appunto le *affordances* anche definibili come possibilità di interazione con l'oggetto stesso.¹⁸

Inoltre richiede l'inclusione dell'oggetto nello schema corporeo e della modifica dei modelli interni motori per rendere possibile la generazione di comandi motori che includano l'oggetto. In termini più semplici, il cervello deve costruire una rappresentazione sensori-

motoria continua e integrata dell'interazione tra oggetto e corpo.

Infine, ma molto più importante, il soggetto deve ri-mappare le nuove potenzialità di azione offerte dalla nuova unità corpo-oggetto.¹⁹ Ad esempio, le dita hanno delle specifiche caratteristiche geometriche e biomecchaniche che permettono una serie di azioni fra cui la presa di precisione; utilizzare una presa presente nel repertorio motorio di base, in interazione con nuovi strumenti come ad esempio un coltello, permette l'estensione di questo repertorio, rendendo possibile il raggiungimento di scopi completamente nuovi e offrendo quindi, un ampliamento delle possibilità di azione umana.

L'estensione dell'azione umana offre l'abilità cruciale di costruire alberi semantici via via più astratti. Infatti, la caratteristica astratta che definisce un "coltello" non è altro che la sua definizione pragmatica di "affilatezza". Questo consente l'inserimento di un'altra istanza specifica, per esempio "vetro rotto", nella stessa categoria sovraordinata di "utensili da taglio" attraverso una descrizione puramente funzionale/pragmatica.

In tale contesto, il processo di conversione da oggetto a utensile potrebbe aver fornito i meccanismi per costruire una struttura proto-semantica basata sulle azioni, rilevanti dal punto di vista comportamentale.

D'altro canto, si potrebbe ipotizzare che alcune delle caratteristiche salienti del sistema motorio abbiano costituito il nocciolo originale di una proto-sintassi. Infatti, il punto critico risiede nel passaggio da una rappresentazione seriale ad una gerarchica. Le strutture seriali richiedono un'ordinata rappresentazione di eventi organizzati temporalmente. Tuttavia, il comportamento umano non può essere rappresentato dai meccanismi puramente seriali.²⁰ Le strutture gerarchiche invece, offrono sia l'importante possibilità di astrazione dello scopo – come espresso da Bernstein – sia la capacità di pianificare e predire le implicazioni/conseguenze dell'azione.

Sebbene ulteriore ricerca sia necessaria in questo senso, lo scopo di un'azione astratta

può essere usato per anticipare l'intera struttura ad albero ad essa associata e quindi predire quale specifica sub-azione stia per essere eseguita. Inoltre, questa struttura ad albero permette la simulazione di azioni o parti di esse per apportare modifiche sulla base del contesto specifico che ci troviamo ad affrontare ogni qualvolta vogliamo raggiungere l'obiettivo desiderato. Come proposto da Bernstein, una flessibilità comportamentale tale è resa possibile solo con strutture gerarchiche come quelle sintattiche.

Pertanto suggeriamo che l'organizzazione gerarchica primitiva dell'azione disponga di tutte le caratteristiche basilari richieste dal linguaggio, includendo sia la ricorsività che il concatenamento in sequenze.

A questo proposito potrebbe essere interessante ricordare l'idea, originariamente proposta da Leroy-Gourhan,²¹ che la comparsa durante l'evoluzione della capacità di costruire e di utilizzare gli strumenti avrebbe potuto rappresentare la fase intermedia che collega l'azione e il linguaggio.

Come descritto in precedenza, sia la fabbricazione di strumenti che la stessa organizzazione dell'azione potrebbe, infatti, aver fornito la capacità di ricorsività,²² poi mutuata dal linguaggio. La fabbricazione di strumenti e il loro uso ampliano la complessità della pianificazione d'azione e proiettano le azioni in una dimensione temporale diversa da quella presente.

Ciò è particolarmente riscontrabile nel caso di strumenti fabbricati per costruirne altri, con nuove funzioni. Tutto questo costringe il cervello a rinviare l'obiettivo finale seguendo una complessa, nonché flessibile gerarchia di sotto-programmi/sotto-obiettivi.

L'ampliamento spazio-temporale dei gradi di libertà può aver offerto al cervello un primo esempio di ricorsività nel dominio dell'azione.

Note

¹ Cfr. M. GRAZIANO, *The Organization of Behavioral Repertoire in Motor Cortex*, in: «Annual Review of Neuroscience», vol. XXIX, 2006, pp. 105-134.

² Cfr. N.A. BERNSTEIN, *On Dexterity and its Development*, in: M.L. LATASH, M.T. TURVEY (eds.), *Dexterity and its Development*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah (NJ) 1996, pp. 3-236.

³ Cfr. N.A. BERNSTEIN, *The Co-ordination and Regulation of Movements*, Pergamon Press, Oxford 1967.

⁴ Cfr. N. CHOMSKY, *Syntactic Structures*, Mouton, The Hague 1957.

⁵ Cfr. M.D. HAUSER, N. CHOMSKY, W.T. FITCH, *The Faculty of Language: What is it, Who Has It, and How Did It Evolve?*, in: «Science», vol. CCXCVIII, n. 5598, 2002, pp. 1569-1579.

⁶ Cfr. L. FADIGA, A.C. ROY, P. FAZIO, L. CRAIGHERO, *From Hand Action to Speech: Evidence and Speculations*, in: P. HAGGARD, Y. ROSETTI, M. KAWATO (eds.), *Attention and Performance XXI: Sensori-motor Foundation of Cognition*, Oxford University Press, Oxford 2006, pp. 409-434.

⁷ Cfr. G. RIZZOLATTI, R. CAMARDA, L. FOGASSI, M. GENTILUCCI, G. LUPPINO, M. MATELLI, *Functional Organization of Inferior Area 6 in the Macaque Monkey. II. Area F5 and the Control of Distal Movements*, in: «Experimental Brain Research», n. LXXI, n. 3, 1988, pp. 491-507.

⁸ Cfr. A. MURATA, L. FADIGA, L. FOGASSI, V. GALLESE, V. RAOS, G. RIZZOLATTI, *Object Representation in the Ventral Premotor Cortex (area F5) of the Monkey*, in: «Journal of Neurophysiology», vol. LXXVIII, n. 4, 1997, pp. 2226-2230.

⁹ Cfr. V. GALLESE, L. FADIGA, L. FOGASSI, G. RIZZOLATTI, *Action Recognition in the Premotor Cortex*, in: «Brain», vol. CXIX, n. 2, 1996, pp. 593-609.

¹⁰ M. PETRIDES, G. CADORET, S. MACKEY, *Orofacial Somatomotor Responses in the Macaque Monkey Homologue of Broca's Area*, in: «Nature», n. CDXXXV, n. 7046, 2005, pp. 1235-1238.

¹¹ S. FREY, J.S. CAMPBELL, G.B. PIKE, M. PETRIDES, *Dissociating the Human Language Pathways with High Angular Resolution Diffusion Fiber Tractography*, in: «Journal of Neuroscience», vol. XXVIII, n. 45, 2008, pp. 11435-11444.

¹² M. PETRIDES, D.N. PANDYA, *Distinct Parietal and Temporal Pathways to the Homologues of Broca's Area in the Monkey*, in: «PLoS Biology», vol. VII, n. 8, 2009, e1000170.

¹³ Cfr. J. GREZES, J. DECETY, *Does Visual Perception of Object Afford Action: Evidence from a Neuroimaging Study*, in: «Neuropsychologia», vol. XL, n. 2, 2002, pp. 221-222.

¹⁴ Cfr. S.T. GRAFTON, L. FADIGA, M.A. ARBIB, G. RIZZOLATTI, *Premotor Cortex Activation During Observation and Naming of Familiar Tools*, in: «Neuroimage», vol. VI, n. 4, 1997, pp. 105-134.

¹⁵ Cfr. G. RIZZOLATTI, L. CRAIGHERO, *The Mirror-neuron System*, in: «Annual Review of Neuroscience», vol. XXVII, n. 1, 2004, 169-192.

¹⁶ Cfr. P. FAZIO, A. CANTAGALLO, L. CRAIGHERO, A. D'AUSILIO, A. ROY, T. POZZO, F. CALZOLARI, E. GRANIERI, L. FADIGA, *Encoding of Human Action in Broca's Area*, in: «Brain», vol. CXXXII, Pt. 7, 2009, pp. 1980-1988.

¹⁷ Cfr. E. CLERGET, A. WINDERICKX, L. FADIGA, E. OLIVIER, *Role of Broca's Area in Encoding Sequential Human Actions: A Virtual Lesion Study*, in: «Neuroreport», vol. XX, n. 16, 2009, pp. 1496-1499.

¹⁸ Cfr. J.J. GIBSON, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Houghton Mifflin, Boston 1979.

¹⁹ Cfr. M.A. ARBIB, J.B. BONAIUTO, S. JACOB, S.H. FREY, *Tool Use and the Distalization of the End-effector*, in: «Psychology Research», vol. LXXIII, n. 4, 2009, pp. 441-462.

²⁰ Cfr. K.S. LASHLEY, *The Problem of Serial Order in Behavior*, in: L.A. JEFFRESS (ed.), *Cerebral Mechanisms in Behavior*, Wiley, New York 1951, pp. 112-146.

²¹ Cfr. A. LEROY-GOURHAN, *Le Geste et la Parole*, Albin Michel, Paris 1964.

²² Il termine “ricorsività” si riferisce in prima istanza a un concetto matematico con il quale si indica il dominio dei numeri naturali che è un insieme infinito di unità discrete, ognuna delle quali non si può che definire ricorsivamente come la somma di un'unità al suo antecedente. In linguistica il termine assume il significato di “infinite use of finite means” e si definisce la conoscenza della lingua come un sistema generativo, un sistema di regole ricorsive che possono generare un numero di frasi potenzialmente illimitato (Chomsky). Analogamente, il sistema motorio dimostra di possedere proprietà generative dello stesso tipo. L'azione umana, infatti, nella sua infinità variabilità sembra essere riducibile alla composizione di più semplici e finiti elementi costituenti.