

A neurocomputational model of reaching movements

Tesi di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione
XIII ciclo N.S.
A.A. 2014 - 2015

Candidato: ing. Antonio Parziale

Tutor: prof. Angelo Marcelli

Coordinatore: prof. Maurizio Longo

Abstract

Una delle tematiche che più affascina i ricercatori di diversi settori, come ad esempio quelli delle neuroscienze, della robotica e della psicologia, riguarda il modo in cui il cervello controlla l'esecuzione del movimento. Comprendere come ci muoviamo non è solo una curiosità intellettuale, ma è fondamentale per individuare nuove cure per le persone affette da malattie del sistema motorio, per definire nuove strategie riabilitative e per sviluppare nuove tecnologie robotiche.

Mentre è ampiamente riconosciuto il ruolo fondamentale della corteccia motoria primaria (M1) nell'esecuzione dei movimenti volontari, non c'è ancora accordo su quale siano le caratteristiche del movimento codificate dall'attività neurale di questa regione del cervello.

Questa tesi si propone di fornire nuovi elementi che aiutino a svelare il "codice" utilizzato dalla corteccia nel controllare il movimento. In particolare, questa finalità è stata perseguita andando a studiare come corteccia motoria primaria e midollo spinale cooperano nell'esecuzione di un movimento volto al raggiungimento di un target nello spazio (movimento di raggiungimento).

Sulla base di studi fisiologici sull'organizzazione topografica della corteccia motoria primaria, abbiamo ipotizzato che questa area del cervello codifichi sia gli aspetti cinematici del movimento, come ad esempio la direzione, che gli aspetti cinetici, come ad esempio il profilo di attivazione muscolare.

In questa tesi sosteniamo che l'esecuzione dei movimenti volontari è il risultato della cooperazione di diverse reti di neuroni disposte nella regione rostrale e nella regione caudale della corteccia motoria primaria, ognuna delle quali rappresenta aspetti diversi del movimento in esecuzione. In particolare, la regione rostrale codifica gli aspetti cinematici del movimento, che sono tradotti in attivazioni dei motoneuroni alfa dagli interneuroni presenti nel midollo spinale, mentre la regione caudale codifica le caratteristiche cinetiche del movimento regolando direttamente l'attivazione dei motoneuroni alfa e quindi la contrazione muscolare.

Le cellule cortico-motoneuronali (CM) della regione caudale realizzano sinergie muscolari che consentono alla corteccia di controllare direttamente l'attività muscolare. Invece, le reti di neuroni nella regione rostrale della corteccia M1 sono dedicate all'attivazione di differenti sottopopolazioni di interneuroni del midollo

spinale che sono organizzate in moduli funzionali. Ogni modulo spinale realizza una sinergia muscolare innata, cablata nel midollo dalla nascita, che regola l'attività di un sottoinsieme di muscoli che operano su uno o più giunti. Il modo in cui un modulo regola l'attività muscolare è legato alle sue proprietà strutturali. L'area rostrale recluta le primitive motorie del midollo come sinergie spazio-temporali, mentre l'area caudale ha accesso diretto ai motoneuroni alfa e può costruire nuove sinergie corticali utili all'esecuzione di movimenti molto complessi.

L'esistenza di queste due aree che regolano in modo diverso, una direttamente e l'altra indirettamente, l'attività muscolare spiegherebbe la controversia, esistente in letteratura, su quale siano i parametri del movimento codificati dal cervello.

La nostra congettura è che la corteccia rappresenti sia gli aspetti cinematici che cinetici del movimento. Per validarla, abbiamo sviluppato e implementato un modello computazionale del midollo spinale e delle sue connessioni con le regioni sopraspinali. Il modello è basato sulle principali caratteristiche anatomiche e fisiologiche dei neuroni nel midollo ed include gli interneuroni Ia, Ib, PN, le cellule di Renshaw e le loro interconnessioni. Gli interneuroni del modello ricevono segnali provenienti dalla regione rostrale, dal cervelletto (attraverso i tratti rubro- e reticolo-spinale), e da afferenze provenienti dagli organi del Golgi e dai fusi neuromuscolari. I motoneuroni alfa ricevono invece input dagli interneuroni del midollo, dalla regione caudale della corteccia M1 e dai fusi neuromuscolari.

Nella tesi è stata valutata l'esecuzione di movimenti flessori del braccio e pertanto è stato utilizzato un modello muscoloscheletrico ad un grado di libertà. Il movimento del braccio è stato limitato all'estensione/flessione del gomito e sono stati modellati tre muscoli: il Bicipite breve, il Brachiale e il Tricipite laterale.

Le simulazioni hanno mostrato che è possibile eseguire movimenti flessori del braccio diversi tra loro andando a reclutare e modulare opportunamente l'attività dei moduli funzionali del midollo spinale. I risultati ottenuti confermano ciò che è stato in precedenza ipotizzato in letteratura: il sistema nervoso centrale può controllare il movimento sfruttando l'organizzazione modulare del sistema motorio, ed in particolare delle reti del midollo.

Per valutare il ruolo svolto dalle diverse aree del cervello nel controllo motorio abbiamo verificato che i movimenti generati dal nostro modello soddisfacessero il compromesso tra velocità e accuratezza predetto dalla legge di Fitts. Le simulazioni hanno mostrato che il compromesso tra velocità ed accuratezza non è dovuto a limiti strutturali del sistema, che di per sé è in grado di eseguire movimenti veloci e precisi, ma è il risultato dalla strategia adottata per produrre movimenti più veloci a partire da un movimento appreso in precedenza per raggiungere la posizione obiettivo.

I risultati suggeriscono che le reti di neuroni della regione rostrale della corteccia M1 codifichino la direzione del movimento mentre le reti di neuroni CM nella regione caudale regolino il compromesso tra velocità ed accuratezza.

Dagli esperimenti condotti risulta che l'attivazione di una delle due aree non esclude l'attivazione dell'altra ma, al contrario, è necessario il contributo di entrambe le popolazioni di neuroni per avere comportamenti simulati quanto più corrispondenti a comportamenti reali.