

# Abstract

Language is a distinctive human ability that supports our daily life interactions. A deep understanding of the brain mechanisms behind language processing is fundamental to create physiological models and find possible alterations derived from specific pathologies.

In the last decades, the general technological advancement and the development of more precise and less invasive investigation techniques have increased dramatically our knowledge of the neural correlates of language processing. However, the great variety of human languages, the possibility to communicate across multiple and different channels and the uncertainty about the actual role of some linguistic features leave several open questions with a concrete possibility of neuroscientific innovation. For instance, the features of a highly inflected language like Italian can provide interesting research questions and additional insights on how our brain processes linguistic information.

The main aim of this work is to explore in greater details the influence of the linguistic distributional factors on the neural correlates of both language production and comprehension by exploiting the richness of the Italian language. Therefore, three functional magnetic resonance imaging (fMRI) experiments were performed by using both classical parametric and novel naturalistic frameworks. Two fast event-related fMRI experiments investigated the influence of the language distributional factors on the neural correlates of the inflectional process, whereas a third experiment was dedicated to providing additional insights on the linguistic prediction mechanism during natural language comprehension by modelling the neural response with two statistical language models.

The first experiment addresses the influence of the inflectional classes (i.e. the conjugations) and their distributional features (e.g. the size, the productivity, and the ortho-phonological consistency) on the generation of the past participle of the Italian verbs by analyzing both neural and behavioral data. The study reports significant effects of the conjugations on the cognitive operations and, for the first time, differential cortical activations in the left middle frontal gyrus, left the supplementary motor area and left anterior cingulate cortex for verbs from different conjugations supporting the hypothesis that the neural correlates of the verb inflection are influenced by specific properties of the inflectional classes.

The second experiment explores the influence of the noun inflectional classes and their properties (e.g. the consistency, number and cumulative frequency of members) on the nominal inflection by analyzing the neural data of a group of participants involved in overt inflection task from the singular to plural and vice versa. The study reports an extensive bilateral cortical network involving the cingulate cortex, frontal and temporal areas, and the cerebellum, revealing that the neural activations are modulated by specific distributional features of the noun inflectional paradigm.

The third experiment investigates the neural correlates of the linguistic prediction underlying the natural language processing during narrative listening. The interest, therefore, shifts from word (verb or noun) production to structured text understanding. This is done by fitting the fMRI data with models that encode the probabilistic features of the language via the estimation of the so-called surprisal, that is a measure that quantifies the unexpectedness of a word given the previous ones. Two stochastic language models were estimated on a large written Italian corpus to obtain two versions of surprisal: a lexical-only version, based only on the lexical information of the chosen stimulus and a novel semantics-weighted model that integrates both lexical and semantic features.

Our study reports better prediction accuracy and better fitting of the fMRI data for the semantics-weighted model. The two models produced both overlapping and distinct activations: while lexical-only surprisal activated secondary auditory areas in the superior temporal gyri and the cerebellum, semantics-weighted surprisal additionally activated the left inferior frontal gyrus. The results support the usefulness of the

surprisal models to describe the linguistic prediction and suggest that the proper inclusion of semantics information in the surprisal model may increase its the sensitivity in higher-order language-related areas, with possible implications for future naturalistic fMRI studies of language under normal and (clinically or pharmacologically) modified conditions.

Besides the investigation of the influence of the language distributional factors on the neural correlates of both language production and comprehension, an additional aim of this work is the proposal of an innovative procedure in the broader field of the fMRI-neurofeedback (fMRI-NF).

In general, the fMRI-NF has been successfully applied in several cognitive domains and it is a procedure based on the possibility to self-modulate the neural signal of a brain region to explore and induce behavioral changes. The proposed method integrates the representational similarity analysis (RSA) and the fMRI-NF framework to train the subjects in modulating their mental state rather than simply regulating the neural signal of a region. The method has been tested in a pilot experiment at 7 Tesla where the subject was asked to imagine concrete objects. The results show that the presented approach is feasible suggesting further investigations and future applications in several domains, including representational and distributional aspects of language processing.

## Riassunto

Il linguaggio è una caratteristica tipica del genere umano ed è alla base di tutte le nostre interazioni quotidiane. Per questo motivo lo studio delle sue basi neurali è fondamentale per la creazione di modelli fisiologici e l'individuazione di possibili alterazioni tipiche di alcune patologie.

Negli ultimi decenni, l'avanzamento tecnologico e lo sviluppo di modelli e strumenti, allo stesso tempo più precisi e meno invasivi, ci hanno permesso di aumentare le nostre conoscenze sulle basi neurali del linguaggio. Tuttavia, il grande numero di lingue presenti in tutto il mondo, la loro diversità e il fatto che il linguaggio umano può essere espresso sotto varie forme (e.g. scritta, orale) lascia aperte numerose domande, ampi spazi di ricerca scientifica e concrete possibilità di innovazione.

Questo lavoro si concentra su alcune di queste domande, ancora senza risposta, analizzando dati di risonanza magnetica funzionale acquisiti all'interno sia di classici paradigmi sperimentali parametrici sia di innovativi paradigmi di tipo naturalistico. Inoltre, l'utilizzo della lingua italiana come argomento di studio ci permette di espandere le nostre conoscenze sulle basi neurali del linguaggio e dei processi grammaticali per via delle sue caratteristiche e differenze rispetto ad altre lingue più comunemente e intensamente studiate come l'Inglese. Per questo motivo, due esperimenti di risonanza magnetica funzionale con paradigma di tipo fast event-related sono stati condotti su due gruppi di volontari sani per indagare le basi neurali del processo di flessione linguistica, mentre un esperimento con paradigma naturalistico è stato condotto per studiare la predizione linguistica durante l'ascolto di un brano.

Il primo esperimento è stato dedicato allo studio dei processi cerebrali che sono alla base della creazione del participio passato dei verbi Italiani provenienti da tutte e tre le coniugazioni. L'innovazione di questo esperimento risiede nel fatto che, rispetto agli studi sulla lingua Inglese che si sono potuti concentrare solo sulle differenze tra verbi regolari e irregolari, l'Italiano presenta tre classi flessive per i verbi caratterizzate ognuna da specifiche peculiarità nella formazione del participio passato. Questo studio riporta, per la prima volta, delle differenze di attivazione corticale nel giro frontale medio sinistro, nell'area supplementare premotoria sinistra e nel cingolo sinistro anteriore per verbi appartenenti a differenti coniugazioni supportando l'ipotesi che le attivazioni cerebrali siano modulate da specifiche proprietà delle classi flessive.

Il secondo esperimento di risonanza magnetica funzionale è dedicato allo studio dei processi neurali che guidano la flessione dei sostantivi. Per questo motivo, i soggetti sono stati coinvolti in un compito di flessione ad alta voce del sostantivo, dalla sua forma singolare a quelle plurale e viceversa. L'ipotesi è che la flessione dei sostantivi sia influenzata dal suffisso della forma lessicale, dalla selezione del paradigma flessivo e dall'identificazione del genere grammaticale. I risultati dello studio riportano delle attivazioni nella corteccia cingolata, nelle aree frontali e temporali e nel cervelletto suggerendo che queste siano modulate dalle caratteristiche tipiche del paradigma flessivo del sostantivo.

Il terzo esperimento differisce dai primi due nel tipo di paradigma sperimentale usato e nell'argomento studiato. Infatti, lo scopo di questo esperimento è lo studio della predizione linguistica durante l'ascolto di un brano (scenario naturalistico) modellando il dato neurale con due modelli probabilistici stimati su un grande corpus dell'Italiano scritto: un modello solo lessicale, già usato in studi precedenti, e uno totalmente nuovo che combina informazione lessicale e semantica. I risultati dello studio mostrano che la combinazione di informazioni lessicali e semantiche aumenta la capacità predittiva del modello e quella di spiegare il segnale neurale. In aggiunta, oltre alle attivazioni comuni tra i due modelli nelle aree uditive secondarie, si nota come l'integrazione dell'informazione semantica con quella lessicale migliori la sensibilità in aree considerate importanti nella rete neurale del linguaggio come il giro frontale inferiore. In generale, i risultati supportano l'uso di modelli statistici del linguaggio per spiegare i processi di predizione

linguistica a livello neurale e la combinazione di più informazioni linguistiche, aprendo possibili scenari per l'uso di questi paradigmi nello studio della comprensione linguistica anche a livello clinico.

Oltre agli studi dedicati all'esplorazione dei processi neurolinguistici, questo lavoro contiene la proposta di un nuovo paradigma sperimentale nel campo più ampio ed emergente dell'interazione cervello-computer con risonanza magnetica funzionale (fMRI-neurofeedback). In generale, le tecniche di fMRI-neurofeedback sono state applicate in molti campi delle neuroscienze dimostrando la possibilità di influire su comportamenti esterni con la auto-modulazione del segnale cerebrale stimato da una regione di interesse. Il modello proposto integra il paradigma del fMRI-neurofeedback con il modello della representation similarity analysis (RSA) in modo tale da allenare il soggetto a modulare il suo stato cerebrale e non semplicemente a modificare il singolo segnale di attivazione estratto da una regione. Il metodo è stato implementato e testato sui dati di un esperimento pilota, contenente un task immaginativo, condotto con uno scanner di risonanza magnetica ad alto campo (7 Tesla). I risultati, sebbene preliminari, mostrano che la tecnica è applicabile facilmente a un esperimento di fMRI-neurofeedback e suggeriscono l'implementazione di nuovi esperimenti in altri ambiti applicativi, compreso lo studio dei processi linguistici.