

DISS. ETH NO. 24282

Brain Network Imaging based on High-density Electroencephalography

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH (Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Quanying Liu

M.Eng. in Computer Science – Lanzhou University

born on 14.06.1989

citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Peter Achermann

Prof. Dante Mantini

Prof. Nicole Wenderoth

2017

Abstract

The brain is the most complex organ of the human body. In order to understand its functioning, advanced brain imaging techniques, such as functional magnetic resonance imaging (fMRI), magnetoencephalography (MEG) and electroencephalography (EEG) have been developed in the last decades. These brain imaging techniques allow us to non-invasively measure brain activity at different spatial and temporal scales, giving us insight into the neuronal mechanisms associated with behavior. An important area of research is the one that focuses on brain dynamics in the so-called resting state, rather than during the execution of explicit task sets. In an idling condition, the brain is thought to prepare itself for future demands by generating coordinated dynamics that largely overlap with patterns of previous activity. These coordinated dynamics can be studied by using functional connectivity methods. If different areas of the brain are functionally connected, these are said to form a brain network. Conversely, areas of the brain that are only weakly connected, are considered to be part of different brain networks. Accordingly, functional connectivity analyses permit to investigate the functional architecture of the human brain. Functional connectivity is typically measured using fMRI data, which are spatially very accurate but are sampled only every few seconds, and reflect hemodynamic processes that are only indirectly linked to neuronal activity. On the other hand, few studies have alternatively used MEG for brain network imaging. MEG has very high temporal resolution and can provide measures of neural activity, but its applications are limited by the fact that it has very high requirements in terms of necessary infrastructure and maintenance. No EEG study has ever been successful in the imaging of brain network. However, recent developments in the field of EEG, particularly the introduction of the high-density EEG (hdEEG) technology, open new perspectives. One of the most important limiting factors for the use of hdEEG as brain imaging tool remains its spatial resolution. The main goal of this PhD work is to develop the necessary methodological approaches that are needed to improve the spatial resolution of hdEEG, and to permit brain network imaging using this technique. In particular, here we have developed tools for signal preprocessing, head modelling, brain activity reconstruction and connectivity analysis. As for the hdEEG connectivity tools, we have implemented both data-driven and hypothesis-driven analysis strategies, as those used in fMRI and MEG connectivity studies. The developed techniques were extensively validated, and the potential advantages brought by the use of hdEEG connectivity as compared to fMRI connectivity was demonstrated. Although the proposed methods were applied to resting data, the same approach can be used for task-related data. We believe that our analysis tools for hdEEG can find several applications in the field of brain imaging and neuroscience.

Abstract

Il cervello è il più complesso organo del corpo umano. Per capirne il funzionamento, negli ultimi decenni sono state sviluppate tecniche avanzate di brain imaging, tra le quali la risonanza magnetica funzionale (fMRI), la magnetoencefalografia (MEG) e l'elettroencefalografia (EEG). Queste tecniche di brain imaging consentono di misurare in maniera non-invasiva l'attività del cervello a diverse scale spaziali e temporali, aprendo una finestra sui meccanismi neuronali associati al comportamento. Un'importante area di ricerca è quella dedicata allo studio delle dinamiche cerebrali durante il cosiddetto "resting state", piuttosto che durante l'esplicita esecuzione di un compito. Si pensa che, durante questa condizione di riposo, il cervello si prepari a soddisfare le future richieste generando un'attività coordinata che corrisponde in gran parte ai pattern dinamici dell'attività precedente. Questa attività coordinata può essere studiata tramite metodi di connettività funzionale. Se diverse aree del cervello sono funzionalmente connesse, si dice che esse formano una rete cerebrale. D'altra parte, nel caso che diverse aree del cervello siano solo debolmente connesse sono considerate appartenenti a diverse reti cerebrali. Pertanto, le analisi di connettività funzionale consentono di studiare l'architettura funzionale del cervello umano. La connettività funzionale è tipicamente misurata tramite dati fMRI, che sono spazialmente molto accurati, sebbene abbiano una risoluzione temporale di solo alcuni secondi e riflettano processi emodinamici che sono solo indirettamente connessi all'attività neuronale. In alternativa, alcuni studi hanno usato la MEG per rilevare le reti cerebrali. La MEG ha un'elevata risoluzione temporale e può fornire misure dirette dell'attività neuronale, ma la sua applicazione è molto limitata dal fatto che ha requisiti molto restrittivi in termini di infrastruttura e manutenzione. Ad oggi, non ci sono stati studi che abbiano dimostrato la ricostruzione di reti cerebrali tramite EEG. Ciononostante, recenti sviluppi nel campo dell'EEG tra i quali, in particolare, l'introduzione di sistemi EEG con un elevato numero di elettrodi (hdEEG), hanno aperto nuove prospettive. Uno dei principali fattori limitanti per l'uso dell'hdEEG come strumento di brain imaging è la sua risoluzione spaziale. L'obiettivo principale del mio lavoro di dottorato è stato lo sviluppo di approcci metodologici necessari per migliorare la risoluzione spaziale dell'hdEEG, e permettere l'individuazione delle reti cerebrali utilizzando questa tecnica di imaging. In particolare, sono stati sviluppati metodi per il processamento del segnale, la modellizzazione della testa, la ricostruzione dell'attività cerebrale e l'analisi della connettività. Per quanto riguarda la connettività misurata con hdEEG, sono state implementate strategie di analisi sia data-driven e hypothesis-driven, in linea con gli approcci usati per la connettività misurata con fMRI e MEG. Le tecniche sviluppate sono state validate estensivamente e sono stati dimostrati i potenziali vantaggi apportati dalla connettività basata su hdEEG rispetto a quella basata su fMRI. Sebbene i metodi proposti siano stati applicati su dati di resting state, lo stesso approccio può essere usato per dati acquisiti durante task. Riteniamo che i nostri metodi sviluppati per l'analisi di dati da hdEEG possano trovare molte applicazioni nel campo del brain imaging e delle neuroscienze.