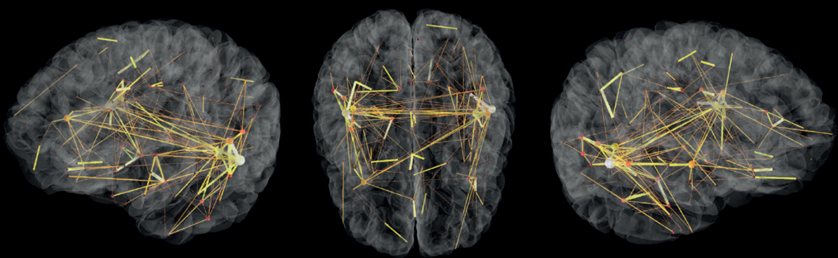
Real-Time Estimation and Visualization of Functional Connectivity in the Human Brain

Lorenz Esch



Technische Universität Ilmenau

Faculty of Computer Science and Automation
Institute for Biomedical Engineering and Informatics
Group for Biomedical Engineering

Dissertation

Real-Time Estimation and Visualization of Functional Connectivity in the Human Brain

M.Sc. Lorenz Esch

Supervisor	Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Haueisen
Reviewer 1	Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Haueisen Faculty of Computer Science and Automation Technische Universität Ilmenau
Reviewer 2	Prof. Matti S. Hämäläinen, PhD Department of Radiologoy Harvard Medical School
Reviewer 3	Prof. Dr. Nathan Weisz Centre for Cognitive Neuroscience University of Salzburg
Submission date	30. April 2020
Thesis defense date	25. September 2020

Berichte aus der Medizintechnik

Lorenz Esch

Real-Time Estimation and Visualization of Functional Connectivity in the Human Brain

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2020

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7773-5
ISSN 1431-1836

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Real-time processing of neural data provides new opportunities for neuroscience research. This approach yields more intuitive insights into instantaneous brain functions and creates the foundation for a wide range of neurofeedback scenarios. Real-time processing also allows early assessment of data quality and validity of the experiment setup. This enables early identification of possible problems and thus helps to optimize the measurement procedure. Magnetoencephalography (MEG) and Electroencephalography (EEG) are non-invasive electrophysiological methods with a high temporal resolution. Tools and software toolboxes have already been proposed that monitor and process M/EEG data in real-time.

This work introduces new tools to acquire and process electrophysiological data streams in real-time. A special emphasis is put on the estimation and visualization of functional connectivity networks. Functional connectivity estimation has been hardly ever considered in the real-time setting so far. The methods described in this work allow the real-time estimation and visualization of large functional connectivity networks based on sensor- and source-level M/EEG data. The new tools were integrated into the open-source MNE-CPP software, which provides an API and standalone GUI applications. The MNE-CPP project caters both software developers and users with little or no coding experience.

The new real-time tools introduced in this Thesis are able to process both spontaneous and evoked data. A proof-of-principle measurement was conducted to validate the new real-time functional connectivity tools on source-level evoked responses to electrical median nerve stimulation. The results show that the implemented tools work as expected and are able to gives insight to functional connectivity networks during an ongoing measurement session. The implemented tools open up new ways to monitor MEG measurements to eliminate possible setup problems early. Moreover, the real-time functional connectivity results can be used in subsequent processing steps, e.g., when the data are used in a neurofeedback setting.

Zusammenfassung

Aus neurowissenschaftlicher Sicht sind die Möglichkeiten für die Echtzeitverarbeitung neuronaler Daten vielfältig. Echtzeit-Tools ermöglichen nicht nur einen schnelleren und intuitiveren Einblick in augenblickliche Gehirnfunktionen, sondern schaffen eine Grundlage für eine Vielzahl von Neurofeedback-Szenarien. Darüber hinaus ermöglichen sie eine frühzeitige Beurteilung der Datenqualität und des Versuchsaufbaus. Dies erlaubt ein frühes Eingreifen und Beheben von möglichen Fehlern. Aufgrund ihrer hohen zeitlichen Auflösung sind Magnetoenzephalographie (MEG) und die Elektroenzephalographie (EEG) geeignete Messverfahren für die Echtzeitdatenverarbeitung.

Es existieren bereits Software-Toolboxen, welche in der Lage sind, M/EEG-Daten in Echtzeit zu überwachen und zu verarbeiten. Diese Arbeit stellt eine Reihe neuer Werkzeuge zur Erfassung und Verarbeitung elektrophysiologischer Datenströme vor. Die Methoden in dieser Arbeit ermöglichen die Schätzung und Visualisierung großer funktionaler Netzwerke in Echtzeit. Bereits existierende Arbeiten haben sich bisher stets auf Netzwerke mit wenigen Knoten konzentriert. Alle neuen Tools wurden in das Open-Source-Projekt MNE-CPP integriert, welches eine API und GUI-Anwendungen bereitstellt. Damit stehen die neuen Tools sowohl für Entwickler als auch Anwendern, welche keine oder nur wenig Programmiererfahrung besitzen, zur Verfügung.

Die neuen Echtzeit-Tools sind in der Lage funktionale Netzwerke auf Sensor- und Quellebene zu verarbeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Proof-of-Principle-Messung durchgeführt, welche funktionale Netzwerke auf Quellniveau und evozierten Reaktionen, die durch eine Stimulation des sog. Nervus medianus ausgelöst wurden, geschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die implementierten Echtzeit-Tools wie erwartet funktionieren und in der Lage sind, während einer laufenden Messung, Einblicke in funktionale Netzwerke zu geben. Die implementierten Tools ermöglichen es dadurch eine laufende Messung zu überwachen und Experiment- bzw. Einrichtungsprobleme frühzeitig zu erkennen. Weiterhin können die Echtzeitergebnisse genutzt werden, um neuartige Gehirn-Maschinen Schnittstellen zu entwerfen.

Acknowledgements

Over the last years I was fortunate enough to work with and be supported by exceptional people. Every single one of them helped me in shaping different parts of this work and its final outcome. I would like to express my gratitude to all of them.

Prof. Jens Haueisen, who has been supervising and mentoring me since my master thesis and always provides essential feedback as well as guidance. Prof. Matti Hämäläinen whose experience and knowledge have been a tremendous help. Prof. Yoshio Okada who graciously offered me to spend the first part of my studies at the Boston Children's Hospital.

I am very grateful to Christoph Dinh for his prior work on MNE-CPP, which provided a solid foundation for this dissertation. For their daily companionship at the BMTI I would like to thank Alexander Hunold and René Machts. A special thanks goes to Daniel Strohmeier for his work on the initial version and testing of the Connectivity library. In addition, I would like to point out four students, namely Viktor Klüber, Simon Heinke, Lars Debor, and Ruben Dörfel. Their work had a considerable impact on MNE-CPP as well as the present work and is much appreciated.

I would like to thank all my friends for supporting me, not only throughout the course of this work. Finally, I am deeply indebted to my family, especially my wife Anna-Maria, who are always by my side and helped me cope with every single phase of this dissertation.

Contents