Digital Enhancement of EEG/MEG Signals

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Alina Santillán Guzmán

Kiel 2013

1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. med. Ulrich Stephani
Datum der mündlichen Prüfung:	19.12.2013

Arbeiten über Digitale Signalverarbeitung

Band 37

Alina Santillán Guzmán

Digital Enhancement of EEG/MEG Signals

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Kiel, Univ., Diss., 2013

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2665-8

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

"Las cosas hay que hacerlas bien, nada de al 'ahi se va' "...
Teniendo siempre presentes estas palabras y siguiendo tu ejemplo
de disciplina y constancia, es como he tratado de hacer las cosas siempre...
Besitos hasta el cielo mi abuelito hermoso.

"Everything has to be done perfectly well, not just ok"...
Bearing in my mind these words and following your example
of discipline and perseverance is how I have tried to do everything...
Kisses till heaven, grandpa.

Acknowledgments

“Meine Hoffnung und meine Freude, meine Stärke, mein Licht...Mein Gott”
Thank you God for being with me, and for always holding me in your Graceful arms.

It is time to thank to all people who contributed in the realization of this thesis.

I would like to start thanking my soul mate, my best friend, my eternal love, my Enrique...During these years he has given me nothing but his love, support, patience, and care, and I am very thankful for being married with such an amazing person.

I would not be who I am now, without the support of my exceptional family: my mom, aunt, grandpa (RIP), and grandma. Thanks for their endless love, their advices, and for letting me grow in an environment full of joy and harmony.

Many thanks to my supervisor Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute for giving me the chance to do my Ph.D under his supervision. I am very grateful for all his teachings, for the fruitful discussions, and for all his guidance during my whole project. Thanks as well for being so kind as a person and providing a family-like environment around us.

To my Co-supervisor, Prof. Dr. med. Ulrich Stephani, many thanks for providing the data to be processed and for the interesting meetings along these years.

Especial thanks to Dr. Andreas Galka, who shared with me many new ideas, guided me and helped me a lot to make them realizable.

Thanks to Prof. Dr.-Ing. Eckhard Quandt for the organization and active collaboration on the SFB 855 project, and for giving me the chance of being part of it. I would also like to thank the Deutsche Forschungsgemeinschaft for its funding through the collaborative research: “Biomagnetic Sensing”. Furthermore, I appreciate the help from all members of the SFB 855, especially from subprojects C3, D2, and D3.

I would also like to thank my colleagues from the Faculty of Engineering and from the Neurology and Neuropediatrics departments of Kiel University, who became my friends through these years. Thanks for their insight into the German culture, for the interesting discussions, and for their friendship.

Last but not least, thanks to my friends from all over the world, who even in the long distance have shown their support in the good and bad times.

Abstract

Electroencephalography (EEG) and Magnetoencephalography (MEG) recordings are commonly used for analyzing the brain. However, in most cases, the recordings not only contain brain waves, but also artifacts of physiological (ocular, muscle, ECG artifacts) or technical (electrode popping, power-line) origins, and noise from different sources. The main aim of the work described in this thesis is the noise reduction and artifact suppression from EEG and MEG signals.

Different techniques for artifact suppression have been used: A Low-Pass Filter (LPF), an instantaneous Independent Component Analysis (ICA) algorithm, a combination of ICA and LPF, a combination of ICA and State-Space Modeling (SSM), a combination of ICA and Wiener filters, and a hybrid filter (i.e., a filter that works in the time- and frequency-domains). These techniques have been tested only offline in the present work.

Additionally, two artifact suppression methods that could work either offline or in real-time have been tested in real-time. The first one is a recent approach used for signal enhancement, called Empirical Mode Decomposition (EMD). This method is employed in this work for denoising, for detrending, and for suppressing the muscle artifacts from EEG signals. The second method is an algorithm here called Classification-based Signal Enhancement (CBSE). It was also used to suppress muscle artifacts in EEG signals, in real-time, using Wiener filters for signal enhancement.

In order to use any artifact suppression technique, the artifacts to be removed have to be previously identified. If the artifact suppression is done offline, the detection can be carried out by visual inspection of the data by an expert, or in an automatic way. On the other hand, if the suppression of artifacts has to be done in real-time, the artifacts have to be detected automatically. A detection technique is proposed in the present work. First, different features are extracted from the independent components, and then a threshold-based classification is performed to determine which components are contaminated, what kind of artifacts they contain, and how the suppression of the artifacts is realized. This method was tested in an offline manner in this thesis.

The effectiveness of the proposed artifact suppression techniques was demonstrated by application to either "semi-simulated" EEG signals artificially contaminated with artifacts, or to real EEG/MEG data from a healthy subject or a patient suffering from epilepsy (inherently contaminated with different kinds of artifacts). It is shown by visual inspection and in a quantitative manner that, after applying the different techniques, the EEG/MEG

signals are enhanced.

To reduce the noise, an equalizer and a Wiener filter have been used. The signals employed for this purpose correspond to those from the newly developed magnetoelectric (ME) sensors at Kiel University.

Zusammenfassung

Elektroenzephalographie (EEG) und Magnetoenzephalographie (MEG) sind gängige Messtechniken für die Hirnstromanalyse. Die Aufnahmen enthalten jedoch meistens nicht nur Gehirnsignale, sondern auch Artefakte physiologischen Ursprungs (Augen-, Muskel-, Herzschlagartefakte) oder technischer Ursachen (Elektrodenbewegungen, Spannungsversorgungs-Einkoppelungen) sowie Rauschen aus verschiedenen Quellen. Hauptziel der in diese Arbeit beschriebenen Bemühungen sind die Rausch- und Artefaktreduktion für EEG- und MEG-Signale.

Unterschiedliche Techniken zur Artefaktunterdrückung wurden genutzt: Tiefpassfilterung (Low-Pass Filtering, LPF), Kurzzeitzerlegungen der Signale in unabhängige Komponenten (Independent Component Analysis, ICA), die Kombination von ICA mit einer Zustandsraum-Modellierung (State-Space Modelling, SSM) oder mit einem Wiener-Filter sowie ein so genanntes Hybridfilter, das sowohl Zeit- als auch Frequenzbereich zur Artefaktbereinigung nutzt. In der vorgestellten Arbeit wurden diese Techniken lediglich off-line realisiert.

Zusätzlich wurden zwei Artefaktunterdrückungsmethoden on-line getestet, die sowohl off-line wie in Realzeit verwendet werden können. Die erste Methode ist ein relativ neuer Ansatz für die Signalverbesserung, der als “Empirical-Mode Decomposition” (EMD) bezeichnet wird. Sie wird hier zur Rauschreduktion, zur Beseitigung von “Trends” (d.h. langsam veränderlichen Gleichanteilen) und zur Unterdrückung von Muskelartefakten in EEG-Aufahmen verwendet. Die zweite ist ein Algorithmus, der hier als “Signalverbesserung auf Klassifikationsbasis” bezeichnet wird (Classification-based Signal Enhancement, CBSE) und ebenfalls zur Echtzeit-Reduktion von Muskelartefakten im EEG herangezogen wurde; er beruht im Kern auf einem Wiener-Filter.

Vor jeder Anwendung eines Verbesserungsansatzes müssen die zu bekämpfenden Artefakte identifiziert werden. Bei einer Off-line-Technik kann das mittels visueller Inspektion der Signale durch einen Experten geschehen oder auch automatisch. Zur Echtzeit-Signalverbesserung muss die Detektion automatisch vorgenommen werden. Ein Detektionsverfahren wird in dieser Arbeit vorgeschlagen. Dabei werden zunächst verschiedene Merkmale aus den unabhängigen Komponenten extrahiert; damit entscheidet dann eine Klassifikation auf Schwellwertbasis, welche Komponenten gestört sind, welche Artefaktarten sie enthalten und wie zur Beseitigung vorzugehen ist. Der Ansatz wurde in Off-line-Simulationen getestet.

Die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Artefaktunterdrückungen wurde nachgewiesen, indem sie auf "semi-simulierte" EEG-Signalen angewandt wurden, die künstlich durch Addition (realer) Artefakte gestört wurden. Demonstriert wurde sie darüber hinaus durch die Verwendung realer, durch verschiedene Artefakte gestörter EEG- und MEG-Daten eines Gesunden und eines Epilepsiepatienten. Die visuelle Prüfung wie auch ein quantitatives Maß zeigen, dass tatsächlich Verbesserungen erzielt werden.

Zur Rauschminderung wurden ein Wiener-Filter und ein Entzerrer eingesetzt. Die dafür herangezogenen Signale entsprechen denen aus an der Universität Kiel neu entwickelten magnetoelektrischen Sensoren.

Contents