

University of Groningen

## Visualization and exploration of multichannel EEG coherence networks

Ji, Chengtao

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2018

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Ji, C. (2018). Visualization and exploration of multichannel EEG coherence networks. [Groningen]: University of Groningen.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

VISUALIZATION AND EXPLORATION OF MULTICHANNEL  
EEG COHERENCE NETWORKS

CHENGTAO JI

The research work described in this thesis was carried out at the Scientific Visualization and Computer Graphics (svcg) group of the Bernoulli Institute for Mathematics, Computer Science and Artificial Intelligence, University of Groningen, The Netherlands. This work was financially supported by the China Scholarship Council (csc) under scholarship number 201406240159.



Visualization and Exploration of Multichannel EEG Coherence Networks

Chengtao Ji  
Thesis Rijksuniversiteit Groningen

ISBN 978-94-034-1056-2 (printed version)  
ISBN 978-94-034-1077-7 (electronic version)



university of  
 groningen

# Visualization and Exploration of Multichannel EEG Coherence Networks

**PhD thesis**

to obtain the degree of PhD at the  
 University of Groningen  
 on the authority of the  
 Rector Magnificus Prof. E. Sterken  
 and in accordance with  
 the decision by the College of Deans.

This thesis will be defended in public on  
 Monday 15 October 2018 at 11.00 hours

by

**Chengtao Ji**

born on 10 March 1988  
 in Shandong, China

**Supervisors**

Prof. J. B. T. M. Roerdink

Prof. N. M. Maurits

**Assessment committee**

Prof. B. Preim

Prof. M. M. Lorist

Prof. A. C. Telea

## SUMMARY

---

The brain is the most complicated organ of our body. Modern imaging techniques provide a way to help us to understand mechanisms of brain function underlying human behaviour. Based on brain imaging techniques, researchers have proposed many methods to extract more abstract features from the imaging data to describe brain properties. One direction of studying these data is to analyze synchrony properties among activities from different brain areas under various conditions. Electroencephalography (EEG) is a technique which is used to measure electric brain potentials under certain conditions. An EEG coherence network may then be constructed based on the obtained EEG signals, where coherence is a measure of the degree of synchrony between EEG signals.

In many cases, the properties of the EEG coherence network can be studied through existing graph techniques and these properties can be used for further applications, for example, as an indication of a specific disease or human reaction to a particular task. However, at the start of a scientific investigation, we usually do not know what kind of information (features) about the data can be useful for further study, and in that case the existing analytical methods are not suitable for the data at hand. For example, two brain networks may have the same node degree distribution while the distribution of their edge strengths is totally different. For these cases, first visually exploring all the available data could give us an impression of striking patterns or deviations in the data. These observations can then help researchers to propose detailed hypotheses about the data. However, due to the complexity of the data at hand, most existing visualization methods used for a particular task or situation cannot be easily generalized to other cases. Therefore, the visual data exploration should include the context of the visualized structures and take into account requirements from domain experts.

This thesis provides a number of visualization methods to help researchers analyze both static and dynamic EEG coherence networks. Firstly, in Chapter 1, we introduce some background about brain connectivity and basic methods used to analyze brain connectivity. In Chapter 2, a design and implementation of a visualization framework for dynamic EEG coherence networks are presented. This framework was designed to satisfy specific requirements collected from domain researchers. Chapter 3 proposes a method to enhance the identification of patterns in dynamic EEG coherence networks. It uses a dimensionality reduction technique to map the coherence network to a two-dimensional space for identifying the evolution patterns of dynamic coherence. In Chapter 4, a quantitative method is proposed for

## SUMMARY

comparing brain connectivity networks. It simultaneously accounts for connectivity, spatial character and local structure, which are all important for brain connectivity analysis. In Chapter 5, a method for the detection of brain regions of interest is provided based on the community structure of an EEG coherence network. This method not only considers the coherence values but also the spatial properties of the nodes in the coherence network. Finally, in Chapter 6 we summarize the most important insights and technical contributions of this thesis. In addition, we also discuss some possibilities for future work.

## SAMENVATTING

---

De hersenen zijn het meest ingewikkelde orgaan van ons lichaam. Moderne beeldvormingstechnieken bieden een manier om ons te helpen met het begrijpen van het mechanisme van de hersenen dat ten grondslag ligt aan menselijk gedrag. Op basis van de beeldvormingstechnieken hebben onderzoekers veel methoden voorgesteld om de abstractere kenmerken te extraheren en de eigenschappen van de hersenen vanuit de beeldgegevens te beschrijven. Een manier om deze gegevens te bekijken, is door de synchroniteitseigenschappen tussen activiteit in paren van hersengebieden te analyseren onder verschillende omstandigheden. Elektro-encefalografie (EEG) is een van deze beeldvormende technieken die wordt gebruikt om onder bepaalde omstandigheden de elektrische hersenactiviteit te meten. Het EEG-coherentienetwerk wordt vervolgens geconstrueerd op basis van de verkregen EEG-signalen, zodat de coherentie een maat is voor de mate van synchronisatie tussen EEG-signalen.

In de meeste gevallen kunnen de eigenschappen van het EEG-coherentienetwerk worden verkregen door middel van bestaande graaftheorie en deze eigenschappen kunnen vervolgens worden gebruikt voor verdere toepassingen, bijvoorbeeld als een maat voor een specifieke ziekte of menselijke reactie op een specifieke taak. Echter, bij aanvang van een nieuwe wetenschappelijke studie weten we meestal niet wat voor soort informatie (kenmerken) over de gegevens nuttig kunnen zijn om verder te onderzoeken, met name doordat de bestaande analysemethoden niet altijd geschikt zijn voor de beschikbare gegevens. Twee hersennetwerken kunnen bijvoorbeeld dezelfde ‘node degree distribution’, een maat voor de samenhang in het netwerk, hebben terwijl de verdeling van de verbindingen in de netwerken totaal verschillend is. Voor deze gevallen zou het nuttig kunnen zijn om eerst te onderzoeken of de gegevens ons een indruk kunnen geven van een specifiek patroon of van opvallende afwijkingen in de gegevens. Deze waarnemingen kunnen onderzoekers helpen om verdere hypothesen over de gegevens op te stellen. Vanwege de complexiteit en specificiteit van de beschikbare gegevens kunnen de meeste bestaande visualisatiemethoden die voor een bepaalde taak of situatie worden gebruikt, echter niet worden gegeneraliseerd naar andere gevallen. Daarom moet de visuele exploratie van gegevens rekening houden met de context waarin ze zich bevinden; dit moet afhangen van de context en de eisen die domeinexperts aan de visualisatie en exploratie van gegevens stellen.

Dit proefschrift beschrijft nieuwe visualisatiemethoden om onderzoekers te helpen bij het analyseren van zowel statische als dynamische EEG-coherentienetwerken. Ten eerste introduceren we in hoofdstuk 1



enige achtergrondinformatie over de connectiviteit van de hersenen en basismethoden die worden gebruikt om hersenconnectiviteit te analyseren. In hoofdstuk 2 wordt een ontwerp en implementatie van een visualisatie framework voor dynamische EEG-coherentienetwerken gepresenteerd. Het framework is ontworpen om te voldoen aan de verzamelde vereisten van de domein experts. In hoofdstuk 3 wordt een methode voorgesteld om de identificatie van patronen in dynamische EEG-coherentienetwerken te verbeteren. Hier wordt een dimensionaliteitsreductietechniek gebruikt om het coherentienetwerk te transformeren naar een 2D-ruimte zodat het evolutiepatroon van dynamische coherentie geïdentificeerd kon worden. In hoofdstuk 4 wordt een kwantitatieve methode voorgesteld voor het vergelijken van hersenconnectiviteitsnetwerken. Deze methode houdt rekening met de connectiviteit, het ruimtelijke karakter en de lokale structuur, die belangrijk zijn voor de analyse van de hersenconnectiviteit. Hoofdstuk 5 beschrijft een methode voor het detecteren van interessante regio's op basis van de 'community structure', een andere netwerkeigenschap, van een EEG-coherentienetwerk. Bij deze methode wordt niet alleen gebruik gemaakt van de mate van coherentie, maar ook van de ruimtelijke samenhang van knopen in het coherentienetwerk. Ten slotte vatten we in hoofdstuk 6 de belangrijkste inzichten en technische bijdragen van dit proefschrift samen. Daarnaast bespreken we ook enkele mogelijkheden voor verder onderzoek.

## PUBLICATIONS

---

This thesis is based on the following manuscripts (approximately in order of the corresponding chapters):

### JOURNAL PAPERS

- Chengtao Ji, Jasper J. van de Gronde, Natasha M. Maurits & Jos B. T. M. Roerdink. Visual Exploration of Dynamic Multichannel EEG Coherence Networks (*invited paper*). *Submitted to Computer Graphics Forum* (**Chapter 2**)
- Chengtao Ji, Natasha M. Maurits & Jos B. T. M. Roerdink. Data-Driven Visualization of Multichannel EEG Coherence Networks Based on Community Structure Analysis (*invited paper*). *Applied Network Science*, *Accepted* (**Chapter 5**)

### CONFERENCE PAPERS

- C. Ji, J.J. van de Gronde, N.M. Maurits, and J.B. T. M. Roerdink. Visualizing and Exploring Dynamic Multichannel EEG Coherence Networks. In S. Bruckner, A. Hennemuth, B. Kainz, I. Hotz, D. Merhof, and C. Rieder, editors, *Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine (VCBM)*. The Eurographics Association, 2017. ISBN 978-3-03868-036-9. DOI 10.2312/vcbm.20171238. URL <http://dx.doi.org/10.2312/vcbm.20171238> (**Chapter 2**)
- Chengtao Ji, Natasha M. Maurits & Jos B. T. M. Roerdink. Visual Analysis of Evolution of Network Communities Employing Multidimensional Scaling. *Submitted to VCBM 2018* (**Chapter 3**)
- Chengtao Ji, Natasha M. Maurits & Jos B. T. M. Roerdink. Comparison of Brain Connectivity Networks Using Local Structure Analysis. *Submitted to Conference on Complex Networks & Their Applications* (**Chapter 4**)
- C. Ji, N. M. Maurits, and J. B. T. M. Roerdink. Visualization of multichannel EEG coherence networks based on community structure analysis. In *Studies in Computational Intelligence*, pages 583–594. Springer International Publishing, Nov 2017. ISBN 978-3-319-72150-7. DOI 10.1007/978-3-319-72150-7\_47. URL [https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-72150-7\\_47](https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-72150-7_47) (**Chapter 5**)

## PUBLICATIONS

### POSTERS

- C. Ji, J. J. van de Gronde, N. M. Maurits, and J. B. T. M. Roerdink. Tracking and Visualizing Dynamic Structures in Multichannel EEG Coherence Networks. In T. Isenberg and F. Sadlo, editors, *EuroVis 2016 - Posters*. The Eurographics Association, 2016. ISBN 978-3-03868-015-4. DOI 10.2312/eurp.20161134. URL <http://dx.doi.org/10.2312/eurp.20161134>
- C. Ji, J. J. van de Gronde, N. M. Maurits, and J. B. T. M. Roerdink. Exploration of Complex Dynamic Structures in Multichannel EEG Coherence Networks via Information Visualization Techniques. In *CCS 2016 - Posters*, 2016

# CONTENTS

---

1	INTRODUCTION	1
1.1	Brain Connectivity	1
1.1.1	Structural Connectivity	1
1.1.2	Functional Connectivity	2
1.1.3	Effective Connectivity	2
1.2	Electroencephalography (EEG)	3
1.2.1	Brain potentials	3
1.2.2	Event-Related and Evoked Potential (ERP)	4
1.2.3	EEG Recording	4
1.3	Complex Network Analysis	5
1.3.1	Multichannel EEG Coherence Network	6
1.3.2	Network Parameter Analysis	6
1.3.3	Network Visualization	7
1.3.4	Visual Design	9
1.4	Thesis Contribution and Organization	10
2	VISUAL EXPLORATION OF DYNAMIC MULTICHANNEL EEG COHERENCE NETWORKS	13
2.1	Introduction	13
2.2	Related Work	16
2.3	Design	18
2.3.1	Requirements	18
2.3.2	Design	20
2.3.3	Data Model and Dynamic FU Detection	21
2.4	Dynamic Network Visualization	26
2.4.1	Augmented Timeline-based Representation	26
2.4.2	Time-annotated FU Map and Vertex Coloring	28
2.4.3	Interaction	31
2.5	User Study	32
2.5.1	Evaluation Procedure	32
2.5.2	Results	34
2.6	Conclusions and Future Work	39
3	VISUAL ANALYSIS OF EVOLUTION OF NETWORK COMMUNITIES EMPLOYING MULTIDIMENSIONAL SCALING	41
3.1	Introduction	41
3.2	Related Work	43
3.3	Method	45
3.3.1	Timeline-based Representation	46
3.3.2	Distance Function	46

## CONTENTS

3.3.3	Multidimensional Scaling	49
3.3.4	Color Space Selection	49
3.3.5	MDS Slice Flipping	50
3.4	Method Demonstration	52
3.5	Conclusion	55
4	COMPARISON OF BRAIN CONNECTIVITY NETWORKS USING LOCAL STRUCTURE ANALYSIS	57
4.1	Introduction	57
4.2	Related Work	59
4.3	Methods	60
4.3.1	Data Model	61
4.3.2	Distance between Coherence Networks	63
4.3.3	Performance	65
4.4	Case Study	71
4.4.1	Experimental Setup	71
4.4.2	Experimental Results	71
4.5	Conclusions and Future Work	74
5	DATA-DRIVEN VISUALIZATION OF MULTICHANNEL EEG COHERENCE NETWORKS BASED ON COMMUNITY STRUCTURE ANALYSIS	75
5.1	Introduction	75
5.2	Related Work	78
5.3	Method	80
5.3.1	EEG Coherence	80
5.3.2	Data Representation and EEG Coherence Network	81
5.3.3	Community Clique Detection	82
5.3.4	FU Detection using the MCB and IWB Method	90
5.3.5	FU Visualization	93
5.3.6	Comparison of Methods applied to Synthetic EEG Coherence Networks	94
5.4	Results	95
5.4.1	Experimental Setup	95
5.4.2	Comparison of Methods Applied to Real EEG Coherence Networks	96
5.4.3	FU <sup>CCB</sup> maps	99
5.5	Conclusions and Future Work	102
6	CONCLUSION	103
6.1	Summary	103
6.2	Limitations and Future Work	105
6.3	Conclusion	106

BIBLIOGRAPHY	107
--------------	-----

ACKNOWLEDGEMENTS 123

