

ABSTRACT

EEG-based eye tracking (ET) is an emerging application of brain-computer interfaces (BCIs). EEG, typically used for recording brain activity, also captures eye movement artifacts that can be leveraged for tracking eye movement. This approach offers advantages over traditional camera-based ET, especially in poor lighting or with closed eyes. It also reduces hardware requirements and simplifies experiments that require both eye movement and EEG data. Despite its potential, EEG-based ET research has been limited to laboratory settings and expensive equipment. This thesis investigates its feasibility using consumer-grade hardware under more realistic conditions, filling a gap in current research. For this, methods based on Functional Data Analysis (FDA) are explored, a framework well-suited to the continuous nature of eye movement data, but one that has yet to be applied in this context.

The contents of this thesis are primarily structured around two main points: the creation of a novel EEG-ET dataset using consumer-grade hardware and the evaluation of models on this dataset, including the SpatialFilterCNN, a deep learning model and BMOTE, a white-box model that incorporates the physical processes of the eye through explicit modeling, as well as newly developed Functional Neural Networks (FNNs) based on FDA.

A major outcome is the introduction of the currently largest known EEG-ET dataset using consumer-grade hardware, with 11 hours and 45 minutes of continuous data from 113 participants. Results showed that EEG-based eye tracking is feasible with consumer-grade hardware, with the Spatial-FilterCNN achieving a Mean Euclidean Distance (MED) of 109.0 mm and 99.38 mm on the most challenging tasks of the dataset and FNNs achieving a MED of 127.5 mm and 100.8 mm on the same tasks, in both cases beating the mean baseline. The BMOTE displayed random performance on all tasks. Evaluating the FNNs on the related EEGEyeNet dataset revealed state-of-the-art performance, though similar results were obtained from non-functional models, leaving the role of functional layers inconclusive and suggesting further research is needed.

ZUSAMMENFASSUNG

EEG-basiertes Eye-Tracking (ET) ist ein vielversprechendes neues Anwendungsgebiet von Brain-Computer-Interfaces (BCIs). EEG, das normalerweise zur Erfassung der Gehirnaktivität verwendet wird, zeichnet auch elektrische Artefakte der Augenbewegungen auf, die für das Tracking dieser Bewegungen genutzt werden können. Dieser Ansatz bietet gegenüber herkömmlichem kamerabasiertem Eye-Tracking mehrere Vorteile, insbesondere unter schwierigen Bedingungen wie schlechten Lichtverhältnissen oder geschlossenen Augen. Außerdem können die Hardwareanforderungen reduziert und Versuchsaufbauten, die sowohl Augenbewegungen als auch EEG-Daten erfassen, vereinfacht werden. Trotz des Potenzials war EEG-basiertes Eye-Tracking bislang auf Anwendungen mit teurer Ausrüstung und unter Laborbedingungen beschränkt. Diese Arbeit untersucht die Machbarkeit des EEG-basierten Eye-Tracking mit kostengünstiger Hardware unter alltagsnahen Bedingungen und schließt damit eine Lücke in der aktuellen Forschung. Zu diesem Zweck werden Methoden basierend auf der Funktionalen Datenanalyse (FDA) untersucht, einem Rahmenwerk, das besonders gut für kontinuierliche Daten wie Augenbewegungen geeignet ist, jedoch bisher in diesem Zusammenhang nicht angewendet wurde.

Der Inhalt dieser Arbeit gliedert sich hauptsächlich in zwei Punkte: die Erstellung eines EEG-ET-Datensatzes auf Basis von kostengünstiger Hardware und die Evaluierung von Modellen auf diesem Datensatz, darunter das SpatialFilterCNN, ein Deep-Learning-Modell, und BMOTE, ein White-Box-Modell, das die physikalischen Prozesse des Auges explizit modelliert, sowie neu entwickelte Funktionale Neuronale Netze (FNNs) auf Basis von FDA.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Einführung des derzeit größten bekannten EEG-ET-Datensatzes, der mit verbrauchertauglicher Hardware erstellt wurde. Dieser umfasst 11 Stunden und 45 Minuten an kontinuierlichen Aufzeichnungen von 113 Teilnehmern. Die Ergebnisse zeigten, dass EEG-basiertes Eye-Tracking mit kostengünstiger Hardware möglich ist. Das SpatialFilterCNN erzielte dabei eine mittlere euklidische Distanz (MED) von 109.0 mm und 99.38 mm bei den anspruchsvollsten Aufgaben des Datensatzes, während die FNNs eine MED von 127.5 mm und 100.8 mm erreichten. Das BMOTE-Modell hingegen zeigte in allen Aufgaben zufällige Ergebnisse. Eine zusätzliche Evaluation der FNNs auf dem verwandten EEGEyeNet-Datensatz führte zu den bisher besten Ergebnissen auf diesem Datensatz, wobei ähnliche Resultate auch mit nicht-funktionalen Modellen erreicht wurden. Somit kann der Einfluss der funktionalen Schichten nicht abschließend geklärt werden, was weitere Forschungen erforderlich macht.