UNDERSTANDING NEURAL CORRELATES OF OBJECT RECOGNITION

SHEFALI GUPTA

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JULY 2024

UNDERSTANDING NEURAL CORRELATES OF OBJECT RECOGNITION

by

SHEFALI GUPTA

Department of Electrical Engineering

Submitted

in the fulfillment of the requirements for the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JULY 2024

Dedicated to ***my family*** *.....*

”The eye sees only what the mind is prepared to comprehend.”

—Robertson Davies

”The important thing is to not stop questioning. Curiosity has its own reason for existing.”
— Albert Einstein

The purpose of life is not to be happy. It is to be useful, to be honorable, to be compassionate, to have it make some difference that you have lived and lived well.”

— Ralph Waldo Emerson

”The greatest glory in living lies not in never falling, but in rising every time we fall.”

— Nelson Mandela

”Success is not the key to happiness. Happiness is the key to success. If you love what you are doing, you will be successful.” *— Albert Schweitzer*

”Research is to see what everybody else has seen, and to think what nobody else has thought.”

— Albert Szent-Gyorgyi

Certificate

This is to certify that the thesis titled **"Understanding Neural Correlates of Object Recognition"** being submitted by **Shefali Gupta** to the **Department of Electrical Engineering**, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of the original, bonafide research work carried out by her under our supervision and guidance. In our opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations related to the award of the degree.

The work presented in this thesis has not been submitted elsewhere, either in part or in full, for the award of any degree or diploma to the best of our knowledge.

Prof. Tapan Kumar Gandhi
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016, India

Prof. Pawan Sinha
Dept. of Brain and Cognitive Sciences
Massachusetts Institute of Technology
Cambridge, Massachusetts, USA

Acknowledgements

I would like to express my heartfelt gratitude to my supervisors, **Prof. Tapan Kumar Gandhi** and **Prof. Pawan Sinha**, for their unwavering support, invaluable guidance, and constant encouragement throughout my PhD journey. Their expertise, patience, and mentorship have been instrumental in shaping my research and personal growth. I consider myself fortunate to have had the opportunity to work under the mentorship of these two outstanding individuals.

I am deeply grateful to Prof. Tapan for believing in me and granting me the opportunity to be a part of his research lab. His confidence in my abilities has been a source of inspiration and motivation throughout my journey. His guidance and support have been instrumental in my growth as a researcher. Prof. Tapan's encouragement has not only helped me overcome challenges but has also pushed me to strive for excellence in all my endeavors. Working under his mentorship has been a transformative experience, and I am immensely thankful for the valuable insights and knowledge he has imparted to me.

I feel truly blessed and lucky to have the opportunity to work with Prof. Pawan. I am incredibly grateful to Tapan Sir for introducing me to him. I still vividly remember meeting Prof. Pawan for the first time on January 5, 2018, at Shroff Hospital. Before the meeting, I was quite nervous, but his kind words and demeanor transformed that day into one of the best days of my life. I was astonished by how humble, kind, and simple a professor from MIT could be. It's always a pleasure to be around him. He is such an amazing and wonderful person who genuinely cares for everyone he knows. I will cherish the time I have spent with him and the MIT science team for the rest of my life.

I express my gratitude to the members of my SRC committee, Professor Sumantra Dutta Roy, Professor Lalan Kumar, and Professor Amit Mehndiratta, for their insightful suggestions, constructive feedback, and encouragement at every stage of my research. Their expertise and guidance have immensely enriched my work. Their suggestions have consistently guided me forward on my research journey.

I am thankful to all my labmates from the Multimedia Lab, specifically Shubham Choudhary, for the numerous discussions about research and life. Your insights and camaraderie have been invaluable throughout this journey. My heartfelt thanks also go to all my labmates from the Neurocomputing Lab, including Sapna, Raghav, Rohit, Kritika, Dr. Rijul, Chandra Bhushan, Shipra, Anupam, Dr. Sidharth Gautam, Aashirbad, Amit, Dr.

Taranjit, and Dr. Chetan. I am especially grateful to Sapna and Raghav for their valuable feedback on proofreading my work, which has greatly improved its quality.

I am profoundly grateful to Prof. Tapan and Prof. Pawan for involving me in Project Prakash. Working with the Project Prakash MIT Science team, including Sharon Gilad-Gutnick, Shlomit Ben-Ami, Sruti Raja, and many others, has been an enriching and rewarding experience. From collecting data to recording for various media platforms, this journey has been unforgettable and has significantly shaped my academic and personal growth.

I also want to thank everyone from Shroff Charity Eye Hospital (Project Prakash unit), including Dr. Priti, Shakeela Bi, Rakesh, Ajay, and Abhishek, for the coordination and support required to work with Project Prakash subjects. It was always a pleasure to work with all the Project Prakash participants, whose involvement was crucial to the success of the research.

Additionally, I would like to express my sincere appreciation to all the participants who generously contributed their time and efforts to my research studies. Without their co-operation, this work would not have been possible. Special thanks are due to the Ethical Committee of IIT Delhi for approving the experimental protocols and ensuring the ethical conduct of my research.

I would also like to acknowledge the role of my family and friends outside the academic sphere. Their unwavering support, patience, and encouragement have been a constant source of strength. My family's belief in my abilities has always motivated me to strive for excellence, and my friends' understanding and patience have allowed me to dedicate the necessary time and effort to my studies without feeling isolated.

This PhD journey has been a challenging yet immensely rewarding experience, and I am grateful to everyone who has been a part of it. Finally, I extend my deepest thanks to all those who, in one way or another, have played a role in my academic journey but whose names may not appear here. Your support, however indirect, has been invaluable and is deeply appreciated.

This experience has been a time of not only academic growth but also personal development. Each challenge and success has contributed to shaping me into a better researcher and individual. To everyone who has been a part of this journey, thank you for your unwavering support and encouragement.

Shefali Gupta

Abstract

Object perception refers to the process by which an organism recognizes, interprets, and understands objects in its environment. It involves the brain's ability to take in sensory information from the surroundings, such as visual, auditory, tactile, or other sensory inputs, and make sense of these inputs to identify and understand objects. Object perception is crucial for various cognitive processes, including navigation, social interactions, problem-solving, and everyday tasks. It involves complex interactions between sensory systems, brain regions, and cognitive processes to create a coherent and meaningful representation of the world. This thesis primarily focuses on understanding the neural underpinning of object perception in the brain. The main objective is to evaluate how the brain learns to see and perceive an object.

A pivotal question emerges concerning whether object recognition abilities are predominantly inherent or influenced by environmental factors. In other words, it unfolds an inquiry into how experience-dependent plasticity shapes object recognition skills compared to the potential contribution of innate neural structures that facilitate particular aspects of object recognition. We are presented with a unique opportunity to work with individuals from 'Project Prakash'. This initiative uniquely combines the humanitarian goal of restoring sight to curably blind children with the scientific objective of investigating fundamental questions about brain development and visual learning.

In this thesis, we have attempted to understand the neural mechanism of object recognition in detail using electrophysiological techniques, i.e. EEG on different subject groups, viz., healthy controls and Project Prakash subjects. The healthy controls were the participants with normal sight. We explored two facets of object perception in the two groups: basic structure perception, encompassing perceptual grouping ability, and complex structure perception, involving face perception ability.

These unique Project Prakash subjects were assessed in two dimensions: firstly, by examining the evolution of object perception skills following extended periods of post-surgical visual experiences, and secondly, by monitoring the development of object recognition skills in post-surgery and follow-up assessments. In the first case, they are referred to as long-term subjects (LTS), and in the second case, they are called newly-sighted subjects (NSS). Our focus is on investigating whether congenitally blind children, treated several years after birth, possess the capacity to perceive and comprehend objects in a manner congruent with that of typically sighted children. Moreover, our studies highlight

whether these abilities are innate or acquired through experience, while also addressing the significance of a sensitive period in their development.

Firstly, this thesis examines how perceptual grouping ability develops for LTS over extended periods following visual surgery. Participants who had undergone cataract surgery were exposed to images containing structured and non-structured elements and were tasked with identifying structures within them. Healthy individuals of similar age, social, and economic backgrounds were included as controls. EEG data was collected from both the cataract group and the control group, and the resulting ERPs were analyzed to identify different ERP components. Our findings reveal high brain activation in response to structured stimuli, indicating enhanced perceptual grouping compared to random stimuli. This suggests the acquisition of perceptual grouping skills among those who underwent surgery between one to five years prior to the study.

Our work also investigates the development of face (i.e., complex object) perception ability in NSS (i.e., visually deprived children after visual restoration surgery). Analysis of ERP responses from occipito-temporal electrodes in these subjects reveals an ability to discriminate faces from objects post-surgery, with this capability improving over time. Interestingly, the ERP responses of these subjects converge towards those of healthy individuals as time progresses, indicating significant enhancements in face categorization abilities after vision restoration interventions among previously visually impaired individuals. These improvements manifest in various aspects, including visual acuity, behavioral responses, and EEG patterns observed in Project Prakash subjects. These findings suggest that the development of face perception ability may be influenced by experience rather than solely relying on early visual input.

The thesis aims to comprehend object recognition processes in the brain, utilizing EEG and behavioral experiments to gather relevant brain signals and understand basic and complex object perception. Conclusions drawn from ERP, functional connectivity, and acuity results imply that object perception abilities may be influenced by experiences and environmental factors beyond early visual exposure, offering avenues for further exploration into how experiences shape complex object perception, particularly in cases with limited early visual input. The thesis suggests utilizing data from these unique subjects for future investigations, enriching the understanding of the interplay between experience, brain function, and object perception. The collected data from these unique subjects holds the potential to address even more intriguing questions.

सार

वस्तु धारणा (ऑब्जेक्ट परसेप्शन) उस प्रक्रिया को संदर्भित करती है जिसके माध्यम से एक जीव अपने वातावरण में वस्तुओं को पहचानता, व्याख्या करता और समझता है। इसमें मस्तिष्क की यह क्षमता शामिल होती है कि वह अपने परिवेश से दृश्य, श्रवण, स्पर्श या अन्य संवेदी इनपुट जैसी संवेदी जानकारी ले और इन इनपुट्स का उपयोग करके वस्तुओं की पहचान और समझ कर सके। वस्तु धारणा विभिन्न संज्ञानात्मक प्रक्रियाओं के लिए महत्वपूर्ण है, जिसमें नेविगेशन, सामाजिक संपर्क, समस्या-समाधान, और दैनिक कार्य शामिल हैं। इसमें संवेदी प्रणालियों, मस्तिष्क क्षेत्रों और संज्ञानात्मक प्रक्रियाओं के बीच जटिल अंतःक्रियाएँ शामिल होती हैं ताकि दुनिया का एक सुसंगत और सार्थक प्रतिनिधित्व तैयार किया जा सके। यह शोध प्रबंध मुख्य रूप से मस्तिष्क में वस्तु धारणा की तंत्रिका आधार को समझने पर केंद्रित है। मुख्य उद्देश्य यह मूल्यांकन करना है कि मस्तिष्क वस्तु को देखना और समझना कैसे सीखता है। एक महत्वपूर्ण प्रश्न उभरता है कि क्या वस्तु पहचान की क्षमताएँ मुख्य रूप से जन्मजात होती हैं या पर्यावरणीय कारकों से प्रभावित होती हैं। दूसरे शब्दों में, यह सवाल उठता है कि अनुभव-निर्भर लचीलापन (एक्सपीरियंस-डिपेंडेंट प्लास्टिसिटी) वस्तु पहचान की क्षमताओं को कैसे आकार देता है, इसकी तुलना में कि किस हद तक जन्मजात तंत्रिका संरचनाएँ (न्यूरल स्ट्रक्चर) वस्तु पहचान के विशिष्ट पहलुओं को सुगम बनाती हैं। हमें 'प्रोजेक्ट प्रकाश' के अंतर्गत व्यक्तियों के साथ काम करने का एक अनूठा अवसर मिला है। यह पहल उन बच्चों की दृष्टि बहाल करने के मानवीय लक्ष्य को वैज्ञानिक उद्देश्य के साथ अद्वितीय रूप से जोड़ती है जो इलाज योग्य अंधे हैं, और साथ ही मस्तिष्क विकास और दृश्य अधिगम (विसुअल लर्निंग) के बारे में बुनियादी सवालों की जांच करता है। इस शोध प्रबंध में, हमने विभिन्न विषय समूहों पर विद्युत् शरीर क्रियाविज्ञान तकनीकों (जैसे एलेक्ट्रोएन्सेफलोग्राफी (ईईजी)) का उपयोग करके वस्तु पहचान के तंत्रिका तंत्र को विस्तृत रूप से समझने का प्रयास किया है, जिसमें स्वस्थ नियंत्रण समूह और प्रोजेक्ट प्रकाश के विषय शामिल हैं। स्वस्थ नियंत्रण वे प्रतिभागी थे जिनकी दृष्टि सामान्य थी, जबकि प्रोजेक्ट प्रकाश के विषय वे बच्चे थे जिनकी दृष्टि बहाल की गई थी। हमने दोनों समूहों में वस्तु धारणा के दो पहलुओं का अध्ययन किया: मूलभूत संरचना धारणा, जिसमें धारणा समूहण क्षमता (पर्सेप्टुअल ग्रुपिंग एबिलिटी) शामिल है, और जटिल संरचना धारणा, जिसमें चेहरे की पहचान क्षमता (फेस परसेप्शन एबिलिटी) शामिल है। इस अध्ययन का उद्देश्य यह समझना है कि स्वस्थ और दृष्टि बहाल किए गए व्यक्तियों के बीच वस्तु पहचान कैसे भिन्न होती है और तंत्रिका तंत्र इसमें क्या भूमिका निभाता है। इन अनूठे प्रोजेक्ट प्रकाश विषयों का मूल्यांकन दो आयामों में किया गया: सबसे पहले, शल्य चिकित्सा के बाद विस्तारित अवधियों के दृश्य अनुभवों के बाद वस्तु धारणा कौशल के विकास की जांच करके, और दूसरा, शल्य चिकित्सा के बाद और अनुवर्ती मूल्यांकन में वस्तु पहचान कौशल के विकास की निगरानी करके। पहले मामले में, उन्हें दीर्घकालिक विषय (एलटीएस) कहा जाता है, और दूसरे मामले में, उन्हें नवदृष्ट विषय (एनएसएस) कहा जाता है। हमारा ध्यान इस बात की जांच पर है कि जन्मजात दृष्टिहीन बच्चे, जिन्हें जन्म के कई साल बाद उपचारित किया गया है, क्या वस्तुओं को देखने और समझने की क्षमता रखते हैं जो सामान्य दृष्टि वाले बच्चों के समान होती है। इसके अलावा, हमारे अध्ययन यह भी स्पष्ट करते हैं कि क्या ये क्षमताएं जन्मजात हैं या अनुभव के माध्यम से अधिग्रहित की जाती हैं, साथ ही उनके विकास में एक संवेदनशील अवधि के महत्व को भी संबोधित करते हैं। इन अनूठे प्रोजेक्ट प्रकाश विषयों का मूल्यांकन दो आयामों में किया गया: सबसे पहले, शल्य चिकित्सा के बाद विस्तारित अवधियों के दृश्य अनुभवों के बाद वस्तु धारणा कौशल के विकास की जांच करके, और दूसरा, शल्य चिकित्सा के बाद और अनुवर्ती मूल्यांकन में वस्तु पहचान कौशल के विकास की निगरानी करके। पहले मामले में, उन्हें दीर्घकालिक विषय (एलटीएस) कहा जाता है, और दूसरे मामले में, उन्हें नवदृष्ट विषय (एनएसएस) कहा जाता है। हमारा ध्यान इस बात

की जांच पर है कि जन्मजात दृष्टिहीन बच्चे, जिन्हें जन्म के कई साल बाद उपचारित किया गया है, क्या वस्तुओं को देखने और समझने की क्षमता रखते हैं जो सामान्य दृष्टि वाले बच्चों के समान होती है। इसके अलावा, हमारे अध्ययन यह भी स्पष्ट करते हैं कि क्या ये क्षमताएं जन्मजात हैं या अनुभव के माध्यम से अधिग्रहित की जाती हैं, साथ ही उनके विकास में एक संवेदनशील अवधि के महत्व को भी संबोधित करते हैं।

हमारा कार्य नवदृष्ट विषयों (एनएसएस) में चेहरे (यानी जटिल वस्तु) धारणा क्षमता के विकास की भी जांच करता है, जो दृश्य पुनर्स्थापना सर्जरी के बाद दृश्य से वंचित बच्चे हैं। इन विषयों में ऑक्सिपिटो-टेम्पोरल इलेक्ट्रोड्स से प्राप्त ईआरपी प्रतिक्रियाओं का विश्लेषण दर्शाता है कि सर्जरी के बाद यह बच्चे चेहरों और वस्तुओं के बीच अंतर करने की क्षमता रखते हैं, और समय के साथ यह क्षमता सुधरती जाती है। दिलचस्प बात यह है कि इन विषयों की ईआरपी प्रतिक्रियाएं समय के साथ स्वस्थ व्यक्तियों की प्रतिक्रियाओं के समान होती जाती हैं, जिससे संकेत मिलता है कि दृश्य पुनर्स्थापना हस्तक्षेपों के बाद पूर्व दृष्टिहीन व्यक्तियों में चेहरे की श्रेणीकरण क्षमताओं में महत्वपूर्ण सुधार होता है। ये सुधार विभिन्न पहलुओं में दिखाई देते हैं, जिसमें दृश्य तीक्ष्णता, व्यवहारिक प्रतिक्रियाएं, और प्रोजेक्ट प्रकाश विषयों में देखे गए ईईजी पैटर्न शामिल हैं। ये निष्कर्ष सुझाव देते हैं कि चेहरे की पहचान क्षमता का विकास प्रारंभिक दृश्य इनपुट पर निर्भर रहने के बजाय अनुभव से प्रभावित हो सकता है।

यह थीसिस मस्तिष्क में वस्तु पहचान प्रक्रियाओं को समझने का उद्देश्य रखती है, जिसके लिए ईईजी और व्यवहारिक प्रयोगों का उपयोग किया गया है ताकि संबंधित मस्तिष्क संकेतों को एकत्र किया जा सके और मूलभूत और जटिल वस्तुओं (बेसिक एंड काम्प्लेक्स ऑब्जेक्ट्स) की धारणा को समझा जा सके। ईआरपी, फंक्शनल कनेक्टिविटी, और तीक्ष्णता (एक्यूटी) के परिणाम से निकाले गए निष्कर्ष इस इशारे करते हैं कि वस्तु पहचान क्षमताएं प्रारंभिक दृश्य प्रवेश से परे अनुभव और पर्यावरणीय कारकों से प्रभावित हो सकती हैं, जो जटिल वस्तु पहचान में कैसे अनुभवों का निर्माण करते हैं उसे और अधिक अध्ययन के लिए मार्ग प्रस्तुत करते हैं, विशेष रूप से उन मामलों में जहां प्रारंभिक दृश्य प्रवेश सीमित होता है। यह थीसिस सुझाव देती है कि इन अद्वितीय विषयों से प्राप्त डेटा का भविष्य के लिए अध्ययन उच्चतम करने के लिए उपयोग किया जाए, जिससे अनुभव , मस्तिष्क कार्य , और वस्तु धारणा (ऑब्जेक्ट परसेप्शन) के बीच के संबंध को समझा जा सके। इन अद्वितीय विषयों से संकलित डेटा और भी रोमांचक प्रश्नों का समाधान करने की संभावना रखता है।

Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

EEG	**E**lectro **E**ncephalo **G**raphy
ERP	**E**vent **R**elated **P**otential
PLV	**P**hase **L**ocking **V**alue
MST	**M**inimum **S**panning **T**ree
PS	**P**hase **S**ynchronisation
PP	**P**roject **P**rakash
LTS	**L**ong **T**erm **S**ubject
NSS	**N**ewly **S**ighted **S**ubjects
LPC	**L**ate **P**ositive **C**omponent
LH	**L**eft **H**emisphere
RH	**R**ight **H**emisphere
LF	**L**eft **F**rontal
RF	**R**ight **F**rontal
LO	**L**eft **O**ccipital
RO	**R**ight **O**ccipital
ISI	**I**nterval **S**timulus **I**nterval
LE	**L**eft **E**ye
RE	**R**ight **E**ye
BE	**B**oth **E**ye
HM	**H**and **M**otion
FC	**F**inger **C**ounting
FCCF	**F**inger **C**ounting **C**lose to **F**ace
IEC	**I**nstitution **E**thics **C**ommittee
ICMR	**I**ndian **C**ouncil of **M**edical **R**esearch