SEGMENTATION OF RETINAL STRUCTURES USING IMAGE PROCESSING AND DEEP LEARNING TECHNIQUES WITH APPLICATIONS IN RETINAL DISEASE PREDICTION

ANUMEHA VARMA

CENTRE FOR APPLIED RESEARCH IN ELECTRONICS (CARE)
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JUNE 2025

Segmentation of Retinal Structures Using Image Processing and Deep Learning Techniques with Applications in Retinal Disease Prediction

by

Anumeha Varma

Centre for Applied Research in Electronics (CARE)

Submitted

in partial fulfillment of the requirement of the degree of

Doctor of Philosophy to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

June 2025

Dedicated to

My Family

THESIS CERTIFICATE

This is to certify that the thesis titled **Segmentation of Retinal Structures using Image Processing and Deep learning Techniques with Applications in Retinal Disease Prediction**, submitted by **Anumeha Varma**, to the Indian Institute of Technology, Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a bona fide record of the research work done by her under our supervision. The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Prof. Monika Aggarwal
Professor
Centre for Applied Research in Electronics (CARE)
IIT-Delhi

Place: New Delhi

Date:

ACKNOWLEDGEMENTS

First, I'd like to express my deepest gratitude to my supervisor, **Prof. Monika Aggarwal**. She has not only provided invaluable input for my research, but she has also been a constant source of motivation. It has been a privilege to work with someone with immense technical knowledge, attention to detail, and a lot of grace. She has been my true inspiration.

Next, I would also like to convey my sincere thanks to my student research committee members, **Prof. S D Joshi, Prof. Prabhu Babu,** and **Prof. Ananjan Basu** for their invaluable comments and suggestions. I am also thankful to the CARE department for providing me with the facilities to conduct my research work.

I am also grateful to my friends, my seniors, and my colleagues at IITD who have been supportive and have helped me either directly or indirectly with my dissertation. I am grateful for the countless joyful memories.

Lastly, I am thankful to my parents, **Mrs. Ranjana Varma** and **Mr. Himanshu Varma**, who have provided me with all the resources and moral support required to continue my education. My brother, **Shalabh Varma**, who consistently helped me overcome any challenges, technical or otherwise, and my sister-in-law, **Prerna Varma**, for her constant support.

ABSTRACT

KEYWORDS: Image decomposition; Retinal fundus image; Vessel segmentation; Deep learning; Illumination correction; Handcrafted Features; Optic Disc; Data Augmentation; Diabetic Retinopathy; Glaucoma; Classification.

Retinal vessels are the only vascular structure that is visible on the outside and can be captured through non-invasive procedures like using a fundus camera. These contain a wide range of information regarding a person's retinal health.

The vessel and optic disc segmentation directly aid in the diagnosis of various diseases, including, but not limited to, DR and glaucoma. The DR features include proliferate symptoms, which are red lesions (microaneursyms and haemorrhages) and bright lesions (soft and hard exudates). The glaucoma features are related to the rim, nerve fiber layer, circumlinear vessel, vessel trunk, optic disc and cup, and laminar dots.

Retinal vessel segmentation has various applications in the biomedical field. This includes early disease detection, biometric authentication using retinal scans, classification, and others. Many of these applications rely critically on an accurate and efficient segmentation technique. In the existing literature, a lot of work has been done to improve the accuracy of the segmentation task, but it relies heavily on the amount of data available for training as well as the quality of the images captured. Another gap is observed in terms of the resources used in these heavily trained algorithms. This work aims to address these gaps by using a resource-efficient unsupervised technique and also increasing the accuracy of retinal vessel segmentation using the Fourier decomposition method (FDM) along with the Gabor transform for image signals. A separate section makes a detailed comparison of the proposed method with several well-known methods and an analysis of the efficiency of the proposed method. The proposed method proves to be efficient in terms of time and resource requirements.

In our second contribution, we focus on thin vessel segmentation. This is an active research problem, with an emphasis on finding a universal approach for different types of fundus datasets. Enhancement of the thin vessels is the first and foremost task for proper segmentation, which is proposed to be done with the total variation (TV) decomposition method with layer-selective enhancement and illumination correction. The vessel segmentation task is carried out on two fronts. For thin vessels, we propose the attention UNet backbone, and for thick vessels, the modified Frangi method is used. The sensitivity perfor-

mance surpasses the state of the art.

Next, once the vessel map is segmented out, we move on to diabetic retinopathy (DR) features. The automated and early detection of symptoms of DR would aid strongly with the diagnosis and cure. In this work, four proliferative symptoms, namely, microaneursyms (MAs), haemorrhages (HAs), hard exudates (HEs), and soft exudates (SEs), are segmented. The red lesions (MAs and HAs) are segmented using mean shift clustering, and the bright lesions (HEs and SEs) are segmented using a basic UNet, concatenated with handcrafted features or feature UNet (FUNet).

This study also presents the use of image processing methods for optic disc segmentation using fine-tuned MedSAM and SegFormer models, which both are transformer-based architectures. Our primary objective is to achieve accurate segmentation of the optic disc in fundus images, which is crucial in diagnosing retinal diseases such as glaucoma and diabetic retinopathy. To refine the segmentation results, we integrated specific pre-processing and post-processing techniques. A comparative study with existing top-tier models reveals that the transformer-based model markedly improves the accuracy of optic disc segmentation.

The automated classification of glaucoma has a major impact on the medical field, and when additional descriptive features of glaucoma are also taken into consideration, it provides further beneficial insights. The images from the JustRAIGS dataset are classified as glaucomatous or not using YOLO V8, and for further classification, the Swin transformer model (STM) is used with data augmentation and ROI limiting.

सार

रेटिना वाहिकाएं एकमात्र संवहनी संरचना हैं जो बाहर से दिखाई देती हैं और इन्हें फंडस कैमरे का उपयोग करने जैसी गैर–आक्रामक प्रक्रियाओं के माध्यम से पकड़ा जा सकता है। इनमें किसी व्यक्ति के रेटिना स्वास्थ्य के बारे में विस्तृत जानकारी होती है।

वाहिका और ऑप्टिक डिस्क विभाजन विभिन्न रोगों के निदान में सीधे सहायता करते हैं, जिनमें डीआर और ग्लूकोमा शामिल हैं, लेकिन इन्हीं तक सीमित नहीं हैं। डी. आर. विशेषताओं में प्रसार के लक्षण शामिल हैं, जो लाल घाव (माइक्रोएनर्सिम्स और रक्तस्राव) और चमकीले घाव (नरम और कठोर एक्सुडेट) हैं। ग्लूकोमा की विशेषताएं रिम, तंत्रिका फाइबर परत, परिधीय वाहिका, वाहिका ट्रंक, ऑप्टिक डिस्क और कप और लैमिनार डॉट्स से संबंधित हैं।

रेटिना वाहिका विभाजन के जैव चिकित्सा क्षेत्र में विभिन्न अनुप्रयोग हैं। इसमें जल्दी बीमारी का पता लगाना, रेटिना स्कैन का उपयोग करके बायोमेट्रिक प्रमाणीकरण, वर्गीकरण और अन्य शामिल हैं। इनमें से कई अनुप्रयोग एक सटीक और कुशल विभाजन तकनीक पर गंभीर रूप से निर्भर करते हैं। मौजूदा साहित्य में, विभाजन कार्य की सटीकता में सुधार के लिए बहुत काम किया गया है, लेकिन यह प्रशिक्षण के लिए उपलब्ध डेटा की मात्रा के साथ–साथ कैप्चर की गई छवियों की गुणवत्ता पर बहुत अधिक निर्भर करता है। इन भारी प्रशिक्षित एल्गोरिदम में उपयोग किए जाने वाले संसाधनों के संदर्भ में एक और अंतर देखा जाता है। इस कार्य का उद्देश्य एक संसाधन–कुशल अनसुपरवाइज़्ड तकनीक का उपयोग करके इन अंतरालों को दूर करना और छवि संकेतों के लिए गैबर ट्रांसफॉर्म के साथ फूरियर अपघटन विधि (एफडीएम) का उपयोग करके रेटिना वाहिका विभाजन की सटीकता को बढ़ाना है। एक अलग खंड कई प्रसिद्ध विधियों के साथ प्रस्तावित विधि की विस्तृत तुलना करता है और प्रस्तावित विधि की दक्षता का विश्लेषण करता है। प्रस्तावित विधि समय और संसाधन आवश्यकताओं के संदर्भ में कुशल साबित होती है।

हमारे दूसरे योगदान में, हम पतले पात्र विभाजन पर ध्यान केंद्रित करते हैं। यह एक सक्रिय शोध समस्या है, जिसमें विभिन्न प्रकार के फंडस डेटासेट के लिए एक सार्वभौमिक दृष्टिकोण खोजने पर जोर दिया जाता है। उचित विभाजन के लिए पतली वाहिकाओं को बढ़ाना पहला और सबसे महत्वपूर्ण कार्य है, जिसे परत–चयनात्मक वृद्धि और रोशनी सुधार के साथ कुल भिन्नता (टीवी) अपघटन विधि के साथ किया जाना प्रस्तावित है। पोत विभाजन कार्य दो मोर्चों पर किया जाता है। पतली वाहिकाओं के लिए, हम ध्यान यूनेट रीढ़ की हड्डी का प्रस्ताव करते हैं, और मोटी वाहिकाओं के लिए, संशोधित फ्रैंगी विधि का उपयोग किया जाता है। संवेदनशीलता प्रदर्शन कला की स्थिति को पार कर जाता है।

इसके बाद, एक बार वाहिका मानचित्र को विभाजित करने के बाद, हम मधुमेह संबंधी रेटिनोपैथी (डीआर) विशेषताओं की ओर बढ़ते हैं। डी. आर. के लक्षणों का स्वचालित और जल्दी पता लगाने से निदान और इलाज में दृढ़ता से सहायता मिलेगी। इस काम में, चार प्रसारात्मक लक्षण, अर्थात्, माइक्रोएनर्सिम्स (एमएएस) रक्तस्राव (एचएएस) हार्ड एक्सुडेट्स (एचईएस) और सॉफ्ट एक्सुडेट्स (एसईएस) को विभाजित किया गया है। लाल घावों (एम. ए. और एच. ए.) को मीन शिफ्ट क्लस्टरिंग का उपयोग करके विभाजित किया जाता है, और चमकीले घावों (एच. ई. और एस. ई.) को एक बुनियादी यू. एन. ई. टी. का उपयोग करके विभाजित किया जाता है, जो

हस्तनिर्मित सुविधाओं या सुविधा यू. एन. ई. टी. (एफ. यू. एन. ई. टी.) के साथ जुड़ा होता है।

यह अध्ययन ठीक–ठाक मेडसैम और सेगफोरमर मॉडल का उपयोग करके ऑप्टिक डिस्क विभाजन के लिए छवि प्रसंस्करण विधियों के उपयोग को भी प्रस्तुत करता है, जो दोनों ट्रांसफार्मर–आधारित वास्तुकला हैं। हमारा प्राथमिक उद्देश्य फंडस छवियों में ऑप्टिक डिस्क का सटीक विभाजन प्राप्त करना है, जो ग्लूकोमा और मधुमेह रेटिनोपैथी जैसे रेटिना रोगों के निदान में महत्वपूर्ण है। विभाजन परिणामों को परिष्कृत करने के लिए, हमने विशिष्ट पूर्व–प्रसंस्करण और प्रसंस्करण के बाद की तकनीकों को एकीकृत किया। मौजूदा शीर्ष–स्तरीय मॉडलों के साथ एक तुलनात्मक अध्ययन से पता चलता है कि ट्रांसफार्मर–आधारित मॉडल ऑप्टिक डिस्क विभाजन की सटीकता में उल्लेखनीय रूप से सुधार करता है।

ग्लूकोमा के स्वचालित वर्गीकरण का चिकित्सा क्षेत्र पर एक बड़ा प्रभाव पड़ता है, और जब ग्लूकोमा की अतिरिक्त वर्णनात्मक विशेषताओं को भी ध्यान में रखा जाता है, तो यह आगे लाभकारी अंतर्दृष्टि प्रदान करता है। जस्टरैग्स डेटासेट की छवियों को ग्लोकोमेटस के रूप में वर्गीकृत किया गया है या योलो वी8 का उपयोग नहीं किया गया है, और आगे के वर्गीकरण के लिए, स्विन ट्रांसफॉर्मर मॉडल (एसटीएम) का उपयोग डेटा वृद्धि और आरओआई सीमा के साथ किया जाता है।

Contents

List of Figures

List of Tables

ABBREVIATIONS

AFF	Adaptive Feature Fusion
AHE	Adaptive Histogram Equalization
AMD	Age-Related Macular Degeneration
ANRI	Appearance Neuroretinal Rim Inferiorly
ANRS	Appearance Neuroretinal Rim Superiorly
AVR	Artery to Vein Ratio
BCLVI	Baring Circumlinear Vessel Inferiorly
BCLVS	Baring Circumlinear Vessel Superiorly
BL	Bright Lesion
CV	Cross Validation
CDF	Cohen–Daubechies–Feauveau
CDR	Cup-to-Disc Ratio
CHASE	Child Heart and Health Study in England
CLAHE	Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
CNN	Convolutional Neural Network
CRAUNet	Cascaded Residual Attention U-Net
DH	Disc Hemorrhages
DoS	Degree of Smoothening
DR	Diabetic Retinopathy
DRIVE	Digital Retinal Images for Vessel Extraction
DWT	Discrete Wavelet Transform
ECG	Electrocardiogram
EEG	Electroencephalography
EMD	Empirical Mode Decomposition
FA	Fluorescein Angiography
FDM	Fourier Decomposition Method
FFT	Fast Fourier Transform
FIBF	Fourier Intrinsic Band Functions
FN	False Negative
FoV	Field of View
FP	False Positive
FP	Fundus Photography
FT	Fourier Transform
FUNet	Feature UNet

GE	Green Channel Extraction
GWO	Grey Wolf Optimisation
HA	Haemorrhage
HE	Hard Exudate
HH	High-High
HL	High-Low
HRF	High-Resolution Fundus
IDMWT	Inverse Discrete Multiwavelet Transform
IDRiD	Indian Diabetic Retinopathy Image Dataset
IMF	Intrinsic Mode Function
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LC	Large Cup
LD	Laminar Dots
LH	Low-High
LL	Low-Low
LoG	Laplacian of Gaussian
LOO-CV	Leave One Out Cross Validation
LPF	Low Pass Filter
MA	Microaneurysm
MFCA	Multi-Scale Fusion Channel Attention
MSC	Mean Shift Clustering
MSS	Multi-Level Semantic Supervision
NLM	Non-Local Mean
NPDR	Non-Proliferative Diabetic Retinopathy
NRG	No Referable Glaucoma
NVT	Nasalisation of Vessel Trunk
OCTA	Optical Coherence Tomography Angiography
OC	Optic Cup
OD	Optic Disc
PDR	Proliferative Diabetic Retinopathy
PPM	Portable Pixmap
RCNN	Region-based Convolutional Neural Network
RG	Referable Glaucoma
RGB	Red, Green, Blue
RGC	Retinal Ganglion Cell
RNFLDI	Retinal Nerve Fiber Layer Defect Inferiorly
RNFLDS	Retinal Nerve Fiber Layer Defect Superiorly
sEMG	Surface Electromyogram
SE	Soft Exudate
SGD	Stochastic Gradient Descent

SNR	Signal to Noise Ratio
SFA	Scale-Aware Feature Aggregation
SLO	Scanning Laser Ophthalmoscope
STARE	Structured Analysis of the Retina
SVSN	Shallow Vessel Segmentation Network
TN	True Negative
TP	True Positive
TV	Total Variation
UWF	Ultra Wide Field
VMD	Variational Mode Decomposition
YOLO	You Only Look Once