

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АДАПТИВНОГО ВИРІВНЮВАННЯ ГІСТОГРАМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНТРАСТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

У роботі досліджено метод адаптивного вирівнювання гістограм Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) для покращення контрастності зображень очного дна. Застосовано попередню обробку з медіанним фільтруванням для зменшення шуму та CLAHE для усунення нерівномірного освітлення. Аналіз гістограм і функцій кумулятивного розподілу (CDF) показав, що CLAHE ефективно підвищує контрастність, виділяючи кровоносні судини та інші структури сітківки. Запропонований метод може бути використаний як етап попередньої обробки для подальшого аналізу зображень очного дна в задачах діагностики очних захворювань

Ключові слова: адаптивне вирівнювання гістограм, CLAHE, очне дно, контрастність, функція кумулятивного розподілу (CDF), гістограма інтенсивностей.

Abstract.

The study investigates the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) method for enhancing the contrast of fundus images. Preprocessing with median filtering was applied to reduce noise, followed by CLAHE to address uneven illumination. Analysis of histograms and cumulative distribution functions (CDF) demonstrated that CLAHE effectively enhances contrast, making blood vessels and other retinal structures more distinct. The proposed method can be utilized as a preprocessing step for further analysis of fundus images in the diagnosis of eye diseases.

Keywords: adaptive histogram equalization, CLAHE, fundus, contrast, cumulative distribution function (CDF), intensity histogram.

Вступ

Зображення очного дна є важливим інструментом для ранньої діагностики очних захворювань, таких як діабетична ретинопатія, глаукома та вікова макулярна дегенерація. Аналіз кровоносних судин та інших структур сітківки на таких зображеннях дозволяє виявляти патологічні зміни, зокрема мікроаневризми, крововиливи чи зміни діаметру судин, які є ранніми ознаками цих захворювань [1]. Проте зображення очного дна часто характеризуються низькою контрастністю та нерівномірним освітленням, що ускладнює візуалізацію таких дрібних об'єктів, як тонкі судини, зменшуючи її ефективність. Для удосконалення якості візуалізації таких об'єктів необхідні ефективні методи обробки зображень, які здатні покращувати їхню якість без підсилення шуму [2].

Одним із сучасних методів є адаптивне вирівнювання гістограм (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization – CLAHE), який дозволяє локально підвищувати контрастність зображень, враховуючи особливості розподілу інтенсивностей у різних областях [3]. Пропонується застосування CLAHE для покращення контрастності зображень очного дна з метою більш якісної візуалізації кровоносних судин. Такий підхід включає попередню обробку зображень за допомогою медіанного фільтрування із подальшим використанням CLAHE для усунення нерівномірного освітлення. Метою роботи є аналіз впливу CLAHE на якість зображень шляхом порівняння гістограм і функцій кумулятивного розподілу (CDF), а також оцінка його потенціалу як етапу попередньої обробки для подальшого аналізу в задачах діагностики очних захворювань.

Застосування адаптивного вирівнювання гістограм

Запропонований метод покращення контрастності зображень очного дна включає три основні етапи: попереднє фільтрування шуму, адаптивне вирівнювання гістограм за допомогою Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) та аналіз результатів через гістограми і функції кумулятивного розподілу (CDF). Практична реалізація методу здійснена на мові програмування Python з використанням бібліотек OpenCV [3] для обробки зображень та Matplotlib [4] для візуалізації. Обробка проводилася на зображеннях очного дна з бази даних HRF [5].

На першому етапі застосовуємо медіанне фільтрування з ядром 3×3 для зменшення імпульсного шуму (типу "сіть і перець"), що дозволяє підготувати зображення до подальшої обробки, зберігаючи краї кровоносних судин [2].

Наступним етапом є застосування CLAHE для адаптивного вирівнювання гістограм. Зображення ділиться на невеликі плитки розміром 20×20 пікселів, для кожної з яких обчислюється гістограма інтенсивностей. Гістограма $h(k)$, для інтенсивності k визначається як кількість пікселів у плитці з інтенсивністю k [1]:

$$h(k) = \sum_{i,j \in \text{плитка}} \delta(I(i,j), k) \quad (1)$$

де $I(i,j)$ — інтенсивність пікселя в позиції (i,j) , а δ — функція Кронекера, яка дорівнює 1, якщо $I(i,j)=k$, і 0 в іншому випадку. Щоб уникнути надмірного підсилення шуму, гістограма обрізається за параметром $\text{clipLimit}=5.0$. Значення clipLimit визначає поріг обрізання як

$$\text{clipLimit} \times \frac{N}{256} \quad (2)$$

де N — загальна кількість пікселів у плитці. Надлишкові значення, які перевищують цей поріг, перерозподіляються рівномірно по всіх бінах гістограми. Після обрізання для кожної плитки виконується локальне вирівнювання гістограми. Нова інтенсивність пікселя $I'(i,j)$ обчислюється на основі кумулятивної функції розподілу (CDF) для плитки [6]:

$$I'(i,j) = \text{CDF}_{\text{локальна}}(I(i,j)) = \sum_{m=0}^{I(i,j)} h'(m) \cdot \frac{255}{N} \quad (3)$$

де $h'(m)$ — обрізана гістограма, N — загальна кількість пікселів. Значення пікселів інтерполюються між сусідніми плитками для забезпечення плавного переходу. Такий підхід дозволяє локально підвищувати контрастність, враховуючи особливості освітлення у різних областях зображення, що особливо важливо для зображень очного дна з нерівномірним освітленням.

Для оцінки впливу CLAHE на якість зображень проводиться аналіз гістограм і функцій кумулятивного розподілу (CDF). Гістограма інтенсивностей оригінального зображення $h_{\text{orig}}(k)$, яка показує розподіл пікселів за інтенсивностями від 0 до 255, обчислюється за формулою:

$$h_{\text{orig}}(k) = \sum_{i,j \in \text{зображення}} \delta(I(i,j), k) \quad (4)$$

Далі визначається CDF як кумулятивна сума значень гістограми:

$$\text{CDF}(k) = \sum_{m=0}^k h_{\text{orig}}(m) \quad (5)$$

що відображає накопичення пікселів для кожної інтенсивності. Нормалізована CDF масштабується до діапазону $[0, 255]$ за формулою:

$$\text{CDF}_{\text{normalized}}(k) = \frac{\text{CDF}(k) - \text{CDF}_{\text{min}}}{\text{CDF}_{\text{max}} - \text{CDF}_{\text{min}}} \times 255 \quad (6)$$

де CDF_{min} — мінімальне ненульове значення CDF, CDF_{max} — максимальне значення CDF.

Нормалізована CDF є функцією трансформації, яка показує, як вхідні інтенсивності відображаються на нові значення після вирівнювання гістограми, що дозволяє оцінити, наскільки сильно змінюється

розподіл інтенсивностей. Її графік ілюструє, як кожна інтенсивність трансформується, що є важливим для розуміння ефекту вирівнювання та порівняння з оригінальним розподілом.

Після застосування CLAHE обчислюється гистограма обробленого зображення $h_{CLAHE}(k)$, що дозволяє порівняти розподіл інтенсивностей до і після обробки. Результати візуалізуються у вигляді графіків: оригінального зображення, обробленого зображення, гистограм до і після CLAHE, а також CDF, показаних на рисунку 1. Це дає змогу оцінити, як метод впливає на контрастність і видимість кровоносних судин.

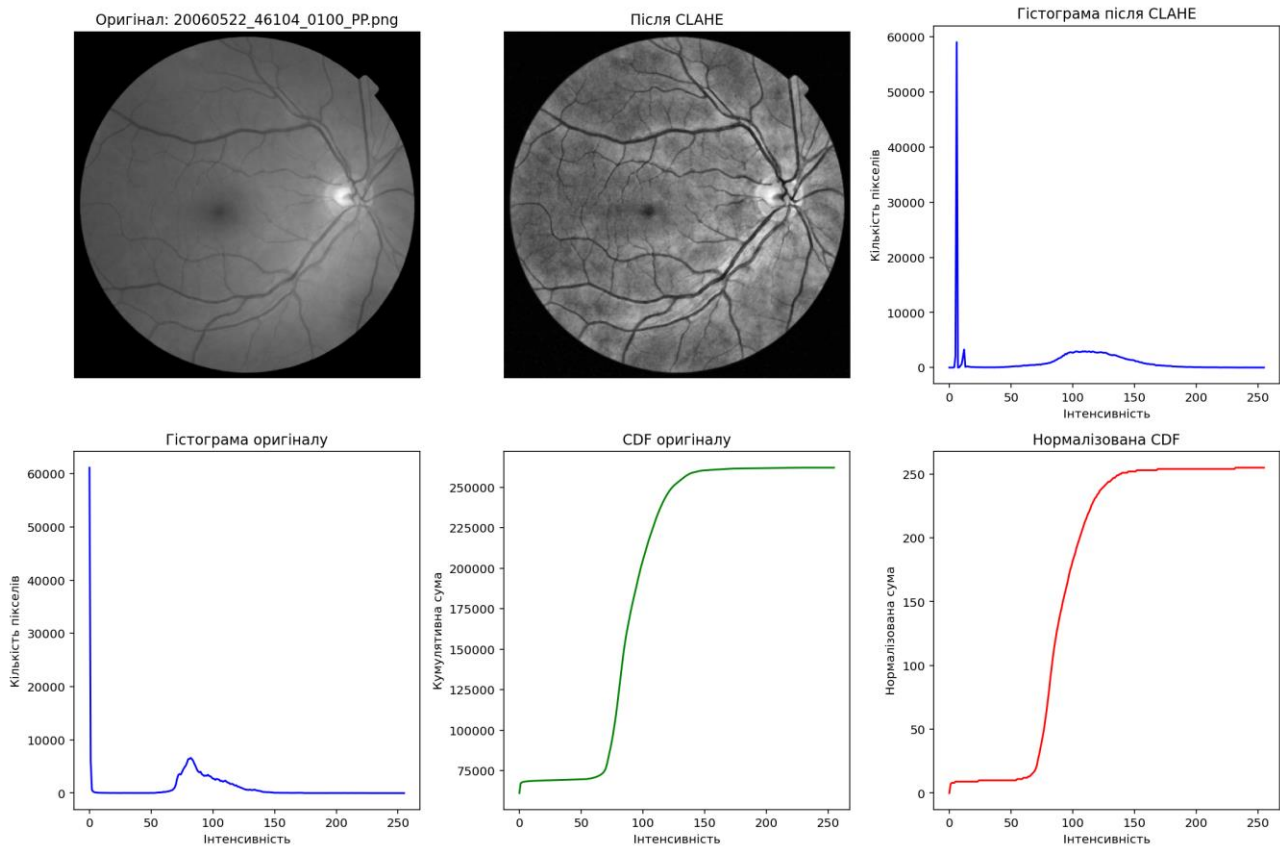


Рисунок 1 – Результати застосування методу

Застосування методу CLAHE до зображень очного дна дозволило значно підвищити контрастність, що підтверджується візуальним аналізом оброблених зображень та відповідними гистограмами. На оригінальному зображенні кровоносні судини слабо помітні через низький контраст, а гистограма інтенсивностей показує концентрацію пікселів у діапазоні 0–50 з невеликим піком біля 100, що свідчить про нерівномірний розподіл. Після застосування CLAHE судини стали чіткішими, а гистограма обробленого зображення демонструє більш рівномірний розподіл інтенсивностей у діапазоні 0–255, що вказує на ефективне розтягнення контрасту. CDF оригіналу швидко зростає на початку через велику кількість темних пікселів, тоді як нормалізована CDF ілюструє трансформацію інтенсивностей, підтверджуючи перерозподіл для підвищення контрастності.

Висновки

Отримані результати підтверджують ефективність методу адаптивного вирівнювання гистограм для покращення контрастності зображень очного дна. Застосування CLAHE дозволило значно підвищити чіткість візуалізації кровоносних судин, що підтверджується порівнянням гистограм і функцій кумулятивного розподілу (CDF) до і після обробки. Метод є перспективним у вирішенні проблеми нерівномірного освітлення, що є типовим для зображень очного дна, і може бути використаний як один із етапів попередньої обробки зображень для подальшого аналізу в задачах діагностики очних захворювань. У майбутніх дослідженнях доцільно інтегрувати цей підхід із методами глибокого навчання, зокрема з використанням архітектур SegNet або U-Net для автоматичної сегментації судин, що відкриває перспективи для удосконалення існуючих та створення нових автоматизованих систем підтримки прийняття рішень для сучасної діагностики захворювань в офтальмології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлов, С. В., Вовкотруб, Д. В., Довгалоук, Р. Ю., & Хані, А. -З. Інформаційні технології підвищення якості біомедичних зображень. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2012 № 21(2). С. 41-48 <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/52>
2. Павлов С. В. , Салдан Й. Р. , Злепко С. М. , Азаров О. Д. , Тимченко Л. І. , Абраменко Л. В. Методи попередньої обробки томографічних зображень очного дна . Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2019. № 2. С. 4-12. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30520>
3. Zuiderveld, Karel J.. “Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization.” *Graphics gems* (1994). <https://sci-hub.se/10.1016/b978-0-12-336156-1.50061-6>
4. OpenCV Team. (n.d.). OpenCV: Open Source Computer Vision Library. OpenCV. Retrieved March 26, 2025, from <https://opencv.org/>
5. Matplotlib Developers. (n.d.). Matplotlib Pyplot Tutorial. Matplotlib. Retrieved March 26, 2025, from <https://matplotlib.org/stable/tutorials/introductory/pyplot.html>
6. Dataset Ninja. Visualization Tools for High Resolution Fundus Dataset. Dataset Ninja; 2025. Accessed February 10, 2025. <https://datasetninja.com/high-resolution-fundus>

Андрікевич Сергій Анатолійович - здобувач наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 163 Біомедична інженерія, група 163-23а, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, andrikevuch.serhii@gmail.com.

Тужанський Станіслав Євгенович – к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, slavat@vntu.edu.ua.

Application of adaptive histogram equalization method to increase the contrast of fundus images

Andrikevych Serhii Anatoliiovych - Candidate for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 163 Biomedical Engineering, group 163-23a, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, andrikevuch.serhii@gmail.com.

Tuzhanskyi Stanislav Yevhenovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, slavat@vntu.edu.ua.