Андрій Нечепуренко, Мар'ян Опришко, Богдан Бекас, Володимир Паньків

[1] НЛТУ України, Львів, Україна, ORCID:0000-0003-3955-1849, andriy.nechepurenko@gmail.com

[2] НЛТУ України, Львів, Україна. ORCID: 0009-0009-7981-9249, m.opryshko@nltu.edu.ua

[3] НЛТУ України, Львів, Україна. ORCID: 0000-0002-3571-9600, Bogdan.Bekas@nltu.edu.ua

[4] НЛТУ України, Львів, Україна. ORCID: 0009-0006-2720-0864, pankiv.volodymyr@nltu.lviv.ua

Інтелектуальна система покращення якості зображень з використанням тріангуляції області

Анотація. *Розроблено інтелектуальну систему тріангуляції області, спрямовану на підвищення якості зображень шляхом адаптивної фільтрації. На відміну від класичних методів, що розмивають контури, та методів глибокого навчання, які використовують GPU, запропонована система використовує тріангуляцію Делоне для формування адаптивної геометричної сітки, яка зберігає контури об'єктів, відокремлюючи їх від шуму. У ході дослідження використано бібліотеки OpenCV та SciPy для геометричного моделювання, а також фреймворк joblib для паралельної оптимізації CPU-інтенсивних обчислювальних етапів.*

Ключові слова *– тріангуляція Делоне, паралельні обчислення, адаптивна фільтрація, Speedup, joblib, ORB, SSIM.*

Вступ. Якість цифрових зображень є критично важливою у багатьох сферах, включаючи комп'ютерний зір, медичну діагностику та системи безпеки. Однак шум, що виникає під час зйомки чи передачі даних, погіршує якість та призводить до втрати інформації. Існуючі підходи мають суттєві обмеження:

- Традиційні фільтри (Гаусса, медіанний) хоча й прості, але неминуче розмивають геометричні контури об'єктів разом із шумом, що знижує інформативність зображення.
- Методи глибокого навчання (DL) демонструють високу якість, але є обчислювально витратними та вимагають потужних, дорогих графіч-

* науковий керівник

них процесорів (GPU), що робить їх непридатними для багатьох систем реального часу або вбудованих систем.

Ця робота вирішує проблему розриву між якістю та обчислювальними вимогами. Метою дослідження є розробка інтелектуальної системи, що використовує геометричне моделювання на основі тріангуляції для адаптивного покращення якості зображень, з акцентом на паралельну оптимізацію для стандартних багатоядерних процесорів (CPU).

Математична модель. Математичне моделювання процесу побудови інтелектуальної тріангуляційної сітки охоплює не лише створення геометричної структури, але й критичний етап аналізу якості її елементів, що є важливим для забезпечення чисельної стійкості системи.

Ключовим кроком для забезпечення чисельної стійкості фільтрації є аналіз якості кожного елемента сітки. Витягнуті трикутники (з гострими кутами) можуть призводити до помилок при усередненні кольору. Для кількісної оцінки якості елемента використовується метрика співвідношення сторін (Aspect Ratio, AR), що є мірою його "витягнутості" або наближення до ідеального рівностороннього трикутника.

Для трикутника з довжинами сторін a, b, c використовується показник якості Qk, який є CPU-інтенсивним та обчислюється як:

$$Q_k = \frac{4\sqrt{3}*A}{a^2+b^2+c^2} \quad (1)$$

Цей показник нормалізований, де значення Qk→1 свідчить про високу якість (рівносторонній трикутник), а Qk→0 – про низьку якість (витягнутий елемент).

Моделювання аналізу якості дозволяє системі здійснювати інтелектуальне управління сіткою. Оскільки обчислення Qk виконується для всіх M трикутників, цей етап дозволяє виявити та позначити елементи з критично низькою якістю (Qk<Threshold). У подальшому програмному забезпеченні ці "погані" елементи можуть бути виключені з процесу фільтрації або вимагати додаткової обробки. Оскільки обчислення Qk є незалежним для кожного елемента, цей етап є критичною точкою для паралельної оптимізації [1].

* науковий керівник

Програмна реалізація. Система будує адаптивну геометричну модель (область) зображення замість фіксованої сітки пікселів.

Спочатку алгоритми комп'ютерного зору, як-от ORB, інтелектуально виявляють ключові точки на високоінформативних ділянках (кутах та контурах). Потім на основі цих точок будується тріангуляція Делоне (DT) за допомогою SciPy (що використовує Qhull) [2].

Завдяки властивостям DT, ребра трикутників природно пролягають уздовж контурів, діючи як "геометрична огорожа". Це створює адаптивну сітку: щільну на контурах і розріджену на однорідних ділянках. Для кожного трикутника в сітці, який за визначенням є однорідною зоною, застосовується проста та швидка операція усереднення кольору.

Це дозволяє досягти двох цілей одночасно:

- Збереження контурів: Фільтрація не "витікає" за межі трикутника, тому чіткість меж, визначених ребрами сітки, повністю зберігається.
- Усунення шуму: Усереднення кольору всередині однорідного трикутника ефективно гасить високочастотний шум.

CPU-інтенсивні етапи аналізу якості та адаптивної фільтрації тисяч трикутників вимагають паралелізації. Для обходу Python GIL, який блокує паралелізм потоків, ми використовуємо joblib на основі багатопроцесорності.

Проблемою стають надмірні накладні витрати (overhead) від запуску тисяч процесів та копіювання даних.

Рішення – стратегія "Часткового поділу": загальний масив M трикутників ділиться на N великих блоків (де N – кількість ядер CPU). Кожен процес обробляє один великий блок, що мінімізує накладні витрати та максимізує корисне обчислення.

Результатом виконання модуля відновлення якості та оцінки є покращене зображення де усунуто шуми, а контури збережено.

Фінальне Тестування проводилося на 4-ядерній (N=4) CPU-системі для оцінки двох ключових показників: якості та продуктивності.

* науковий керівник

Якість оцінювалася за допомогою метрики Structural Similarity Index (SSIM), яка порівнює відновлене зображення з оригіналом (до шуму). Зростання SSIM до 0.9322 підтверджує, що система ефективно усунула шум, зберігши при цьому ключові геометричні контури об'єктів.

Рисунок 1. Покращене зображення

Продуктивність вимірювалася для найбільш ресурсомісткого етапу – адаптивної фільтрації. Порівнювався час послідовного (T_seq) та паралельного (T_par) виконання (Рис.2).

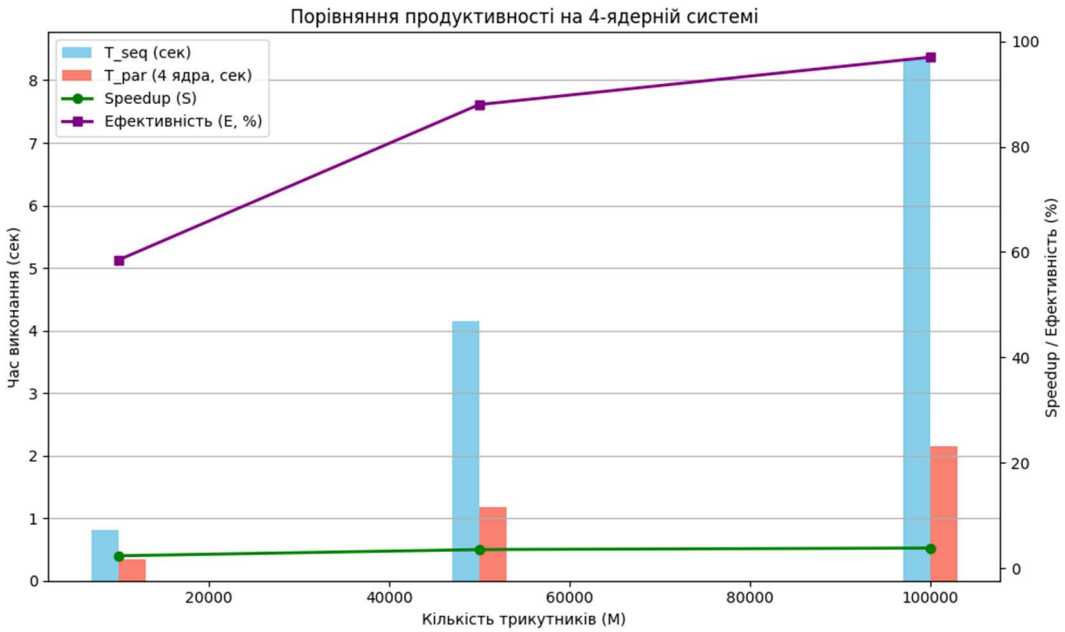

Рисунок 2. Результати тестування продуктивності

* науковий керівник

Результати демонструють, що зі збільшенням навантаження ефективність паралелізації зростає до 97.0%. Досягнуте прискорення 3.81x на 4 ядрах доводить, що стратегія "Часткового поділу" успішно подолала накладні витрати та обмеження GIL.

Висновок. У ході роботи було успішно розроблено та реалізовано інтелектуальну систему тріангуляції області, яка довела свою ефективність за двома ключовими напрямками. Система забезпечує високоякісну фільтрацію, що підтверджується значним зростанням метрики SSIM до 0.9322. Геометричний підхід на основі тріангуляції Делоне ефективно зберігає структурні контури об'єктів, долаючи головний недолік класичних фільтрів. Завдяки вдалій архітектурі та застосуванню стратегії паралелізації "Часткового поділу" з joblib, система демонструє високу продуктивність на стандартних CPU. Досягнуто коефіцієнта прискорення 3.81x при 97% ефективності на 4-ядерній системі.

Список використаних літературних джерел

[1] Jo Педрегоса Ф., Варо Г., Грамфорт А. та ін. Scikit-learn: Machine learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.

[2] Віртанен П., Гоммерс Р., Оліфант Т. Е. та ін. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17. P. 261–272.

Intelligent image quality enhancement system using area triangulation

Andriy Nechepurenko, Marian Opryshko, Bogdan Bekas, Volodymyr Pankiv

The study is dedicated to the development and research of an intelligent area triangulation system aimed at improving image quality through adaptive filtering. Unlike classic contour-blurring methods and GPU-required deep learning techniques, the proposed system uses Delaunay triangulation to form an adaptive geometric mesh that intelligently preserves the outlines of objects by separating them from noise. During the development, the OpenCV and SciPy libraries for geometric modeling were used, as well as the joblib framework for parallel optimization of CPU-intensive computational stages.

* науковий керівник