

РОЗРОБКА ТА МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІБРИДНИХ МЕТОДІВ НА PYTHON

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Фільтрація зображень є важливим етапом цифрової обробки сигналів, що знаходить широке застосування у медичній діагностиці, супутниковому моніторингу, системах технічного зору та мультимедійних технологіях. У роботі розглядаються класичні методи фільтрації (фільтр Гаусса, білатеральний фільтр, керований фільтр, анізотропна дифузія) та запропоновано гібридний алгоритм, що поєднує анізотропну дифузію Перона-Маліка з білатеральним фільтром. Реалізовано програмне забезпечення з графічним інтерфейсом на Python для порівняльного аналізу ефективності методів фільтрації за метриками PSNR, SSIM та MSE. Наведено математичні описи алгоритмів та результати експериментального дослідження.

Ключові слова: фільтрація зображень, анізотропна дифузія, білатеральний фільтр, гібридний метод, PSNR, SSIM, OpenCV, Python.

Abstract

Image filtering is an important stage of digital signal processing, which is widely used in medical diagnostics, satellite monitoring, computer vision systems and multimedia technologies. This paper discusses classical filtering methods (Gaussian filter, bilateral filter, guided filter, anisotropic diffusion) and proposes a hybrid algorithm that combines Perona-Malik anisotropic diffusion with a bilateral filter. Software with a graphical interface in Python for comparative analysis of the effectiveness of filtering methods based on PSNR, SSIM and MSE metrics has been developed. Mathematical descriptions of the algorithms and results of the experimental study are provided.

Keywords: image filtering, anisotropic diffusion, bilateral filter, hybrid method, PSNR, SSIM, OpenCV, Python.

Вступ

Цифрова обробка зображень є фундаментальною галуззю комп'ютерних наук, що стрімко розвивається завдяки зростанню обчислювальних потужностей та попиту на якісний візуальний контент. Однією з ключових задач є фільтрація зображень – процес видалення шуму, що виникає під час отримання, передачі або зберігання зображень. Шум суттєво погіршує візуальну якість та ускладнює подальший аналіз зображень у задачах розпізнавання, сегментації та класифікації.

Класичні методи фільтрації, такі як фільтр Гаусса, білатеральний фільтр, керований фільтр та анізотропна дифузія, мають відомі обмеження: лінійні фільтри розмивають деталі, а нелінійні можуть бути обчислювально затратними або недостатньо ефективними при значному рівні шуму. Тому актуальним є дослідження можливостей поєднання різних підходів у гібридні алгоритми для досягнення кращого балансу між придушенням шуму та збереженням деталей зображення.

У межах дослідження реалізовано п'ять алгоритмів фільтрації – фільтр Гаусса, білатеральний фільтр, керований фільтр (Guided Filter), анізотропну дифузію Перона-Маліка та запропонований гібридний метод – з використанням бібліотек OpenCV, NumPy, scikit-image та SciPy. Розроблене програмне забезпечення з графічним інтерфейсом на PyQt5 забезпечує автоматизований порівняльний аналіз алгоритмів за метричними критеріями PSNR, SSIM та MSE.

Основна частина

Реалізований під час дослідження *фільтр Гаусса* є класичним лінійним фільтром низьких частот. Кожний піксель результуючого зображення обчислюється як зважене середнє сусідніх пікселів, де ваги визначаються гауссовою функцією:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

де σ – стандартне відхилення, що контролює ступінь згладжування. Фільтр ефективно видаляє гауссів шум, проте розмиває краї та дрібні деталі зображення.

Білатеральний фільтр є нелінійним фільтром, що зберігає краї. На відміну від гауссового, ваги залежать як від просторової відстані, так і від різниці інтенсивностей пікселів:

$$I_{filt}(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_s}(|p - q|) \cdot G_{\sigma_r}(|I(p) - I(q)|) \cdot I(q)$$

де G_{σ_s} – гауссова функція просторової відстані, G_{σ_r} – гауссова функція різниці інтенсивностей, W_p – нормалізуючий коефіцієнт. Параметри σ_s та σ_r контролюють ступінь просторового та фотометричного згладжування відповідно.

Керований фільтр (Guided Filter), запропонований He et al. (2013), використовує направляюче зображення для збереження структури при згладжуванні. Результат фільтрації є лінійною функцією направляючого зображення у кожному локальному вікні:

$$q_i = a_k \cdot I_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k$$

де a_k та b_k обчислюються за методом найменших квадратів для кожного вікна ω_k розміром $(2r + 1) \times (2r + 1)$, а параметр ϵ контролює ступінь згладжування.

Анізотропна дифузія Перона-Маліка є ітеративним нелінійним фільтром, що описується рівнянням:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \cdot \nabla I)$$

Дискретизація за методом скінченних різниць:

$$I^{(t+1)} = I^{(t)} + \gamma \cdot [c_N \nabla_N + c_S \nabla_S + c_E \nabla_E + c_W \nabla_W]$$

де $\nabla_N, \nabla_S, \nabla_E, \nabla_W$ – градієнти у чотирьох напрямках, а коефіцієнти дифузії обчислюються за допомогою експоненціальної функції зупинки на краях:

$$(c) = \exp\left(-\left(\frac{|\nabla I|}{\kappa}\right)^2\right)$$

Параметр κ визначає поріг чутливості до країв, $\gamma \leq 0.25$ – крок інтеграції для забезпечення стабільності.

Для подолання обмежень окремих методів запропоновано двоетапний гібридний алгоритм, що поєднує анізотропну дифузію з білатеральним фільтром:

Етап 1 – Анізотропна дифузія (з обмеженою кількістю ітерацій): видалення основної частини шуму зі збереженням структури країв. Використовується менше ітерацій, ніж для автономного застосування, щоб уникнути «сходінкового» ефекту.

Етап 2 – Легкий білатеральний фільтр: згладжування залишкового шуму та артефактів після дифузії. Оскільки основний шум вже видалений на першому етапі, білатеральний фільтр працює з малими параметрами згладжування та краще зберігає деталі.

Ключова ідея полягає у розділенні задачі на грубе видалення шуму (анізотропна дифузія) та тонке доведення якості (білатеральний фільтр), що дозволяє кожному компоненту працювати в оптимальному режимі.

Для кількісного порівняння методів застосовано три стандартні метрики: середньоквадратичну похибку (MSE), пікове відношення сигнал/шум (PSNR) та індекс структурної подібності (SSIM), який враховує три компоненти – яскравість, контраст та структуру – і оцінює перцептуальну подібність зображень у діапазоні $[-1, 1]$, де 1 відповідає ідентичним зображенням.

Програмне забезпечення реалізовано мовою Python 3.x з використанням бібліотек OpenCV, NumPy, scikit-image та SciPy для математичних обчислень та обробки. Графічний інтерфейс побудовано на PyQt5 та включає завантаження зображень, додавання різних типів шуму (гауссів, імпульсний «сіть та перець», пуассонів), вибір та застосування фільтрів, одночасне відображення оригінального, зашумленого та відфільтрованого зображень, а також автоматичне обчислення метрик якості. Система також реалізує сліпу оцінку рівня шуму за методом Donoho & Johnstone (1994) на основі медіанного абсолютного відхилення (MAD) лапласіану та адаптивне налаштування параметрів фільтрів відповідно до оціненого рівня шуму.

Результати дослідження

Проведено порівняльний аналіз ефективності алгоритмів фільтрації на зображеннях з різним рівнем шуму. Для об'єктивності оцінки використано адаптивне налаштування параметрів фільтрів на основі сліпої оцінки рівня шуму.

Таблиця 1 – Результати фільтрації при високому рівні шуму ($\sigma \approx 61$)

Фільтр	PSNR (дБ)	Δ PSNR	SSIM	Δ SSIM	MSE	Час (с)
Зашумлене (baseline)	16.33	0.00	0.3632	0.0000	1515.2	—
Гауссів фільтр	18.13	+1.81	0.5104	+0.1471	999.1	0.008
Білатеральний фільтр	22.91	+6.58	0.6664	+0.3032	332.8	0.066
Керований фільтр	21.15	+4.82	0.5777	+0.2145	499.2	0.160
Анізотропна дифузія	18.86	+2.54	0.5475	+0.1843	844.9	14.087
Гібридний фільтр	20.21	+3.88	0.5982	+0.2350	620.3	6.957

Аналіз результатів показав, що при високому рівні шуму ($\sigma \approx 61$) білатеральний фільтр забезпечує найкраще покращення PSNR (+6.58 дБ) та SSIM (+0.3032). Фільтр Гаусса при такому рівні шуму є практично неефективним (+1.81 дБ), оскільки ядро великого розміру розмиває зображення разом із шумом. Анізотропна дифузія, незважаючи на теоретичні переваги, є найповільнішим методом (14.087 с) через ітеративний характер обчислень – $O(\text{niter} \times N)$, де N – кількість пікселів, що робить її непридатною для інтерактивних застосувань.

Скріншоти результатів роботи програмного забезпечення наведено на рисунку 1.

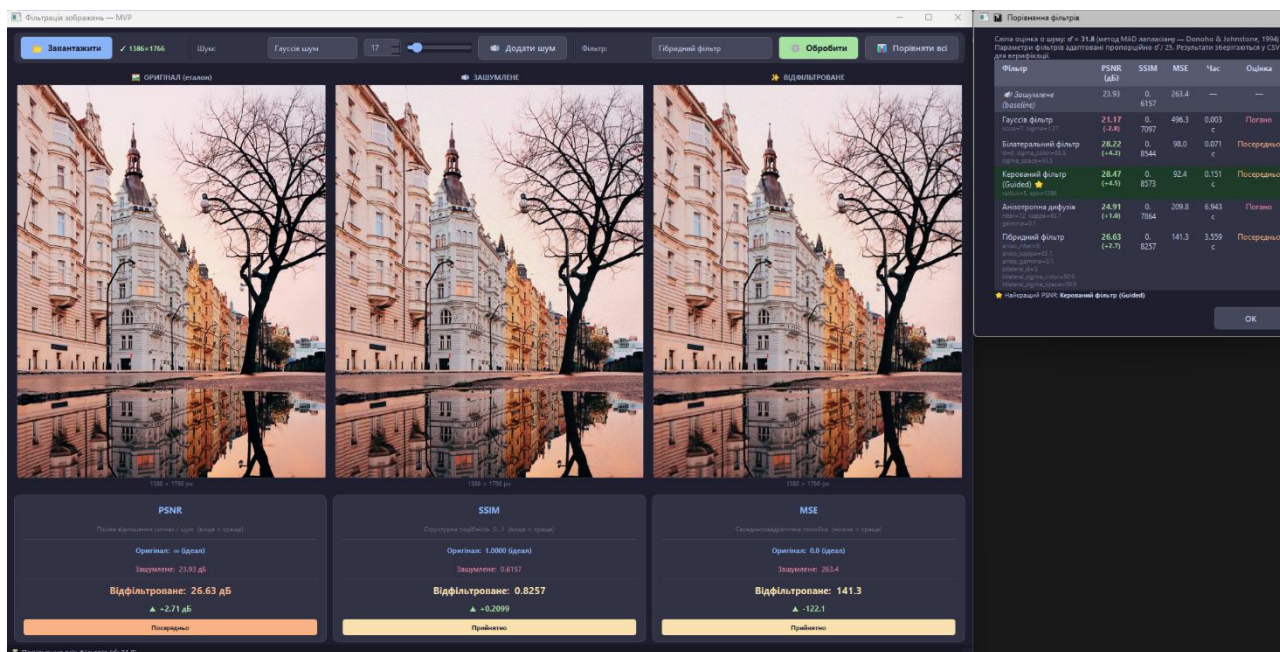


Рисунок 1 – Інтерфейс програмного забезпечення для порівняльного аналізу фільтрів

Висновки

Розроблено програмне забезпечення для порівняльного аналізу алгоритмів фільтрації зображень, що включає реалізацію п'яти методів фільтрації та оцінку їх ефективності за допомогою метрик PSNR, SSIM та MSE. Наведено математичні описи кожного алгоритму, що є важливим для розуміння принципів їх роботи та обмежень.

Запропоновано гібридний метод, що поєднує анізотропну дифузію Перона-Маліка з білатеральним фільтром у двоетапному конвеєрі. Ключова перевага гібридного підходу полягає у розділенні задачі на грубе видалення шуму та тонке доведення якості, що дозволяє кожному компоненту працювати в оптимальному режимі. Експериментальне дослідження підтвердило, що ефективність фільтрації суттєво залежить від рівня шуму та типу зображення. При високому рівні шуму нелінійні методи (білатеральний фільтр, гібридний метод) демонструють значні переваги, тоді як при помірному шумі простий гауссів фільтр може бути достатньо ефективним.

Реалізована система сліпої оцінки рівня шуму та адаптивного налаштування параметрів фільтрів підвищує автоматизацію процесу та зменшує необхідність ручного підбору параметрів. Подальший розвиток системи передбачає розширення функціональності за рахунок інструментів покращення деталей, налаштування яскравості та контрастності, а також розгортання у вигляді онлайн-сервісу для обробки зображень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Perona P., Malik J. "Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 12, no. 7, pp. 629–639, 1990.
2. He K., Sun J., Tang X. "Guided Image Filtering", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 35, no. 6, pp. 1397–1409, 2013.
3. Tomasi C., Manduchi R. "Bilateral Filtering for Gray and Color Images", Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 839–846, 1998.
4. Donoho D. L., Johnstone I. M. "Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage", Biometrika, vol. 81, no. 3, pp. 425–455, 1994.
5. Електронне джерело «OpenCV: Open Source Computer Vision Library» URL: <https://opencv.org/>
6. Електронне джерело «Scikit-image: Image processing in Python» URL: <https://scikit-image.org/>
7. Gonzalez R. C., Woods R. E. "Digital Image Processing", 4th ed., Pearson, 2018.

Ваколюк Євгеній Андрійович — студент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: evgeniy.vakolyuk@gmail.com

Софіна Ольга Юрївна — к.т.н., доцент кафедри АІТ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: olsofina@gmail.com

Evhenii Vakoliuk — Student of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: evgeniy.vakolyuk@gmail.com

Olga Sofina — PhD, Associate Professor of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: olsofina@gmail.com