

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІЗКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ

Запропоновано та експериментально досліджено лінійні оператори, що можуть мати застосування для підвищення різкості цифрованих зображень, спотворених мікрорухом камери фіксації.

Постановка проблеми. Важливим чинником позитивного сприйняття цифрового зображення, зокрема фото, є його реалістичність, при цьому однією зі складових, що є визначальними у висновку щодо реалістичності, є різкість (чіткість) зображення. Головними причинами спотворень, що призводять до погіршення чіткості, є обмежена розрішувальна властивість системи, що формує, розфокусування, наявність середовища, що спотворює (наприклад, атмосфери), рух камери по відношенню до об'єкта, що реєструється [1]. При цьому, спотворення типу розфокусування або змазування проявляються в послабленні верхніх просторових частот зображень, через те, що системи, які формують, являють собою фільтри нижніх частот.

У свою чергу, названі причини спотворень доволі варіабельні за своїм впливом. Надалі розглянемо обробку зображень, отриманих в умовах мікроруку камери фіксації. Дана вада є найбільш поширеною при нештативній фотозйомці або зйомці з платформи, яка може підлягати деякому механічному впливу, наприклад, мікрівібрації (аерофотозйомка, тощо). На відміну від інших, наслідок мікроруку може бути усунено або, принаймні, значно нівельовано, не тільки за рахунок апаратних засобів, але й процедур математичної обробки, що функціонують у режимі реального часу. Отже, актуальною є задача отримання відповідних процедур підвищення різкості зображень, які б мали низьку обчислювальну складність та при реалізації у програмних продуктах забезпечували б опрацювання у режимі реального часу.

Аналіз досліджень та постановка задачі. На загал, у припущенні ізопланатичності системи спостереження для розподілу інтенсивності $I(x)$ зображення об'єкта, що формується в площині x його реєстрації,

$$I(x) = \int O(y)H(x-y)dy, \quad (1)$$

де $O(y)$ - розподіл інтенсивності відбиття від об'єкту світлового опроміювання в картинній площині y ; $H(x)$ - розподіл інтенсивності в зображенні осевого точкового джерела (імпульсний відклик або інакше – функція розсіювання точки системи).

Іншими словами, вираз (1) подає зображення, що реєструється у вигляді згортки істинного зображення та імпульсного відклику системи реєстрації. Отже, [1], значення інтенсивності вихідного зображення «розмазується» в кожній з точок реєстрації у відповідності з видом функції $H(x)$.

Для ліквідації проблем, пов'язаних з мікрорухом камери фіксації, зокрема в сучасній фототехніці, використовують стабілізатори зображень, які можна поділяти на три загальні типи [3; 4].

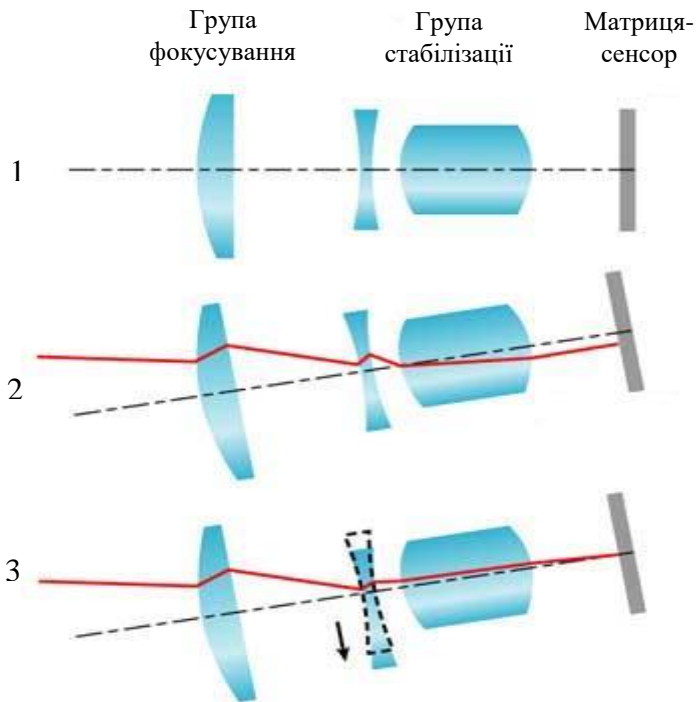


Рис. 1. Схематичний вид об'єктиву, в якому є стабілізатор. Початкове зображення (1). Зміщення при коливанні (2). Стабілізація (3).

Першим типом є механічні стабілізатори (рис.1), вони є найбільш ефективними. Існує багато видів запатентованих систем стабілізації різних фірм, але концептуально вони схожі між собою, а саме – мають гіродатчики, які фіксують незначні зміни положення камери у просторі, обробляють отримані данні за допомогою мікропроцесорів та посилають відповідні команди у блок стабілізації об'єктиву, від'ємну лінзу, що може змінювати своє просторове положення в трьох (або двох) напрямках, проектуючи промені коректно на світлочутливі матриці.

Другим типом стабілізаторів зображень є електронні стабілізатори. Принцип роботи таких приборів також оснований на механічному русі елементів прибору для зйомки, а саме матриці-сенсору. Є два способи фіксування положення камери для таких стабілізаторів: цифровий (фокусування камери на якусь частину зображення) та механічний (гіродатчики, що мають аналогічну конструкцію до механічних стабілізаторів). Такі стабілізатори мають не завжди позитивні результати застосування (особливо на цифрових датчиках).

Останній тип стабілізаторів зображень – цифрові. Вони не є способом боротьби з причиною нерізкого зображення у фото- та відео матеріалах, навпаки, призначені для ліквідації наслідків – тобто для постфіксаційної математичної обробки цифрових даних.

Існує чимало методів відтворення нечітких зображень [1;2;5]: алгебраїчні, на основі просторової фільтрації (інверсна фільтрація, фільтри Вінера), на основі лінійних операторів, фрактальні, за застосуванням нейронних мереж, тощо. Проте, серед ефективних процедур підвищення різкості цифрового зображення (цифрової стабілізації), що задовольняють вимозі фактичної обробки в режимі реального часу, перевагу варто віддати тим, що досягають цільової функції обробки при мінімумі обчислювальних операцій. По факту такими є лінійні оператори, отримані у вигляді дискретної згортки кольорових складових растру та масок фільтрів-стабілізаторів.

Якщо припускати, що спотворення вихідного зображення спричинене мікрорухом камери фіксації, то, згідно зроблених зазначень, прийнятним для цифрованого зображення можна вважати подання

$$P_{i,j} = L(p_{i,j}) = \sum_{ii=i-r_i}^{i+r_i} \sum_{jj=j-r_j}^{j+r_j} \gamma_{ii-i, jj-j} P_{ii, jj}^0, \quad (2)$$

$$i = -\frac{k_i}{2}, \frac{k_i}{2}, \quad j = -\frac{k_j}{2}, \frac{k_j}{2},$$

де $P_{i,j}$ – кольорова складова растру (наприклад, червона, зелена або си-

ня); $L(i, j)$ – лінійний оператор низькочастотної фільтрації зображення; (i, j) – індекс піксела растру; k_i, k_j – розміри кадру зображення; $p_{ii, jj}^0$ – кольорова складова растру ідеального неспотвореного зображення; $\gamma_{ii-i, jj-j}$ – елемент маски низькочастотного фільтру; $(2r_i + 1) \times (2r_j + 1)$ – розмір маски низькочастотного фільтру.

Зауважимо, що маска γ є наперед невідомою і може вважатись випадковою. В роботах [6; 7] подано контрастні фільтри, визначені як зворотні до низькочастотних фільтрів, отриманих з явних виглядів двовимірних локальних сплайнів на основі B -сплайнів другого-п'ятого порядків. Застосування таких фільтрів для зображень з кольоровими складовими растру (2) може бути виправданим і ефект «покращення» досягається, так само як і при використанні поширених у засобах автоматизованої обробки контрастних фільтрів на основі лапласіанів [2; 5]. З іншого боку, в роботі [8] подано приклад побудови комбінованих фільтрів на основі операторів контрастування та бінарного subdivision зі гладжуванням на основі сплайнів, близьких до інтерполяційних у середньому [9]. Показано [8], що згадані комбіновані фільтри є менш залежними від величин похибок, набутих при фіксації, а отже й більш «стійкими» у використанні та менше залежним від величин осциляцій послідовності кольорових складових растру.

В даній статті проведемо експериментальні дослідження якості роботи лінійних операторів, отриманих за використанням бінарного subdivision на основі сплайну, що є лінійною комбінацією B -сплайнів п'ятого порядку [10; 11], контрастних фільтрів [6; 7] за підходом побудови їх, що викладений в [8].

Виклад основного матеріалу. Нехай задано деякий растр, кожному пікселу якого поставлено у відповідність двійка індексів $\{(i, j)\}_{i, j \in \mathbb{Z}}$, що визначають його місцеположення. Не зменшуючи загальності позначимо $\{p_{i, j}\}_{i, j \in \mathbb{Z}}$ – послідовність кольорової складової деякого вихідного растру, $\{p_{i, j}^*\}_{i, j \in \mathbb{Z}}$ – послідовність відповідної кольорової складової растру після цифрової стабілізації. Введемо до розгляду лінійні оператори $C(p_{i, j})$, такі, що

$$p_{i, j}^* = C(p_{i, j}),$$

а якість стабілізації будемо вважати прийнятною, якщо з урахуванням (2), буде виконуватись

$$p_{i,j}^* \approx p_{i,j}^{\circ}, \quad i, j \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

для випадкової маски γ .

В роботі [8] подано лінійний оператор, що може мати використання при стабілізації зображення:

$$C_0(p_{i,j}) = \sum_{ii=i-2}^{i+2} \sum_{jj=j-2}^{j+2} \gamma_{ii-i, jj-j}^{(0)} p_{ii, jj}, \quad i, j \in \mathbb{Z}, \quad (4)$$

де

$$\gamma^{(0)} = \frac{1}{3136} \begin{pmatrix} 1 & 8 & -74 & 8 & 1 \\ 8 & 64 & -592 & 64 & 8 \\ -74 & -592 & 5476 & -592 & -74 \\ 8 & 64 & -592 & 64 & 8 \\ 1 & 8 & -74 & 8 & 1 \end{pmatrix}.$$

Введемо такі лінійні оператори:

$$C_l(p_{i,j}) = \sum_{ii=i-r_l}^{i+r_l} \sum_{jj=j-r_l}^{j+r_l} \gamma_{ii-i, jj-j}^{(l)} p_{ii, jj}, \quad i, j \in \mathbb{Z}, \quad (5)$$

де

$$l = 1, 2, 3, 4; \quad r_1 = r_2 = 3; \quad r_3 = r_4 = 4;$$

$$\gamma^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,75457\text{E-}09 & 8,93587\text{E-}07 & 5,40282\text{E-}06 & -7,38748\text{E-}05 & \dots \\ 8,93587\text{E-}07 & 0,000212674 & 0,001285871 & -0,01758221 & \dots \\ 5,40282\text{E-}06 & 0,001285871 & 0,007774658 & -0,106305883 & \dots \\ -7,38748\text{E-}05 & -0,01758221 & -0,106305883 & 1,45356119 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix};$$

$$\gamma^{(2)} = \begin{pmatrix} 1,24562\text{E-}08 & 2,96456\text{E-}06 & 1,59314\text{E-}05 & -0,000149424 & \dots \\ 2,96456\text{E-}06 & 0,000705566 & 0,003791678 & -0,035562919 & \dots \\ 1,59314\text{E-}05 & 0,003791678 & 0,020376288 & -0,191113331 & \dots \\ -0,000149424 & -0,035562919 & -0,191113331 & 1,792490633 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix};$$

$$\gamma^{(3)} = \begin{pmatrix} 1,6236\text{E-}10 & 4,1165\text{E-}08 & 9,20847\text{E-}07 & 2,14132\text{E-}06 & -1,8949\text{E-}05 & \dots \\ 4,1165\text{E-}08 & 1,0437\text{E-}05 & 0,000233473 & 0,000542915 & -0,004804375 & \dots \\ 9,20847\text{E-}07 & 0,000233473 & 0,00522272 & 0,012144825 & -0,107472272 & \dots \\ 2,14132\text{E-}06 & 0,000542915 & 0,012144825 & 0,028241375 & -0,249914233 & \dots \\ -1,8949\text{E-}05 & -0,004804375 & -0,107472272 & -0,249914233 & 2,211546853 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix};$$

$$\gamma^{(4)} = \begin{pmatrix} 5,26177\text{E-}10 & 1,32248\text{E-}07 & 2,7676\text{E-}06 & 4,92362\text{E-}06 & -3,85865\text{E-}05 & \dots \\ 1,32248\text{E-}07 & 3,32391\text{E-}05 & 0,000695605 & 0,001237494 & -0,009698272 & \dots \\ 2,7676\text{E-}06 & 0,000695605 & 0,014557157 & 0,025897446 & -0,202958992 & \dots \\ 4,92362\text{E-}06 & 0,001237494 & 0,025897446 & 0,046072025 & -0,361067725 & \dots \\ -3,85865\text{E-}05 & -0,009698272 & -0,202958992 & -0,361067725 & 2,829697678 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}.$$

Зауважимо, що коефіцієнти масок $\gamma^{(l)}$, $l = \overline{1,4}$ можна визначити з урахуванням симетрії відповідних матриць.

Візуального «покращення» спотвореного зображення можна досягати і шляхом застосування контрастних фільтрів, у тому числі з робіт [6; 7]:

$$K_l(p_{i,j}) = \sum_{ii=i-r_l}^{i+r_l} \sum_{jj=j-r_l}^{j+r_l} \gamma_{ii-i, jj-j}^{(l)} p_{ii, jj}, \quad i, j \in \mathbb{Z}, \quad (6)$$

де

$$l = 1, 2, 3; \quad r_1 = r_2 = 2; \quad r_3 = 4;$$

$$\gamma_{\kappa}^{(1)} = \frac{1}{1156} \begin{pmatrix} 1 & -8 & 48 & -8 & 1 \\ -8 & 64 & -384 & 64 & -8 \\ 48 & -384 & 2304 & -384 & 48 \\ -8 & 64 & -384 & 64 & -8 \\ 1 & -8 & 48 & -8 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{\kappa}^{(2)} = \frac{1}{196} \begin{pmatrix} 1 & -6 & 24 & -6 & 1 \\ -6 & 36 & -144 & 36 & -6 \\ 24 & -144 & 576 & -144 & 24 \\ -6 & 36 & -144 & 36 & -6 \\ 1 & -6 & 24 & -6 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{\kappa}^{(3)} = \begin{pmatrix} 0,000000451 & 0,000032858 & -0,000173172 & 0,000543531 & -0,001478877 & \dots \\ 0,000032858 & 0,002394093 & -0,012617568 & 0,039602551 & -0,107753344 & \dots \\ -0,000173172 & -0,012617568 & 0,066498257 & -0,20871698 & 0,567891511 & \dots \\ 0,000543531 & 0,039602551 & -0,20871698 & 0,655096535 & -1,782431695 & \dots \\ -0,001478877 & -0,107753344 & 0,567891511 & -1,782431695 & 4,84976271 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}.$$

В літературі з цифрової обробки зображень для контрастування зображень за використанням лінійних операторів часто пропонують застосовувати фільтри на основі лапсасіанів [2; 5]. Зокрема можна реалізувати при обробці такий оператор [2]:

$$G(p_{i,j}) = \sum_{ii=i-1}^{i+1} \sum_{jj=j-1}^{j+1} \Delta_{ii-i, jj-j} p_{ii, jj}, \quad i, j \in \mathbb{Z}, \quad (7)$$

де

$$\Delta = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -1 & -4 & -1 \\ -4 & 26 & -4 \\ -1 & -4 & -1 \end{pmatrix}.$$

Для отримання лінійного оператора $L(p_{i,j})$ з (2), визначимо маску низькочастотного фільтру наступним чином. Нехай $\{p_i^{\circ}\}_{i \in \mathbb{Z}}$ – одновимірна послідовність деякої функції (для визначеності), а $\{p_i\}_{i \in \mathbb{Z}}$ – послідовність, отримана після згладжування. Якщо

$$p_i = p_i^{\circ} + \alpha \Delta^2 p_i^{\circ} + \beta \Delta^4 p_i^{\circ},$$

де

$$\begin{aligned} \Delta^2 p_i^{\circ} &= p_{i-1}^{\circ} - 2p_i^{\circ} + p_{i+1}^{\circ}; \\ \Delta^4 p_i^{\circ} &= \Delta^2 p_{i-1}^{\circ} - 2\Delta^2 p_i^{\circ} + \Delta^2 p_{i+1}^{\circ}, \\ \alpha &\in [0,05; 0,5], \end{aligned} \quad (8)$$

то

$p_i = \beta p_{i-2}^{\circ} + (\alpha - 4\beta) p_{i-1}^{\circ} + (1 - 2\alpha + 6\beta) p_i^{\circ} + (\alpha - 4\beta) p_{i+1}^{\circ} + \beta p_{i+2}^{\circ}$,
отже з умови додатності (як для низькочастотного фільтру) коефіцієнтів при p_i° , $i \in \mathbb{Z}$, маємо:

$$\begin{cases} \beta \geq 0, \\ \alpha - 4\beta \geq 0, \\ 1 - 2\alpha + 6\beta \geq 0, \end{cases} \quad \begin{cases} \beta \geq 0, \\ \beta \leq 0, 25\alpha, \\ \beta \geq 0, 333 \cdot (\alpha - 0,5), \end{cases}$$

$$\beta \in [0; 0, 25\alpha]. \quad (9)$$

За аналогією з одновимірним випадком неважко отримати маску низькочастотного фільтру розміром 5×5 , для визначення оператора (2), а саме (з урахуванням симетрії):

$$\gamma = \begin{pmatrix} \beta^2 & \alpha\beta - 4\beta^2 & \beta - 2\alpha\beta + 6\beta^2 & \dots \\ \alpha\beta - 4\beta^2 & (\alpha - 4\beta)^2 & (\alpha - 4\beta)(1 - 2\alpha + 6\beta) & \dots \\ \beta - 2\alpha\beta + 6\beta^2 & (\alpha - 4\beta)(1 - 2\alpha + 6\beta) & (1 - 2\alpha + 6\beta)^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

де α та β визначаються як рівномірно розподілені випадкові реалізації, що задовольняють умовам (8) та (9).

Нехай n, m - розміри растру, $N = n \cdot m$ - кількість пікселів растру. Похибка відтворення зображення в кожному пікселі визначається так:

$$\varepsilon_{i,j} = p_{i,j}^* - p_{i,j}^o, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

тоді середня похибка відтворення по кожній складовій дорівнює

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varepsilon_{i,j};$$

незсунена дисперсія похибки -

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\varepsilon_{i,j} - \bar{\varepsilon})^2.$$

Для перевірки виконання умови (3) при аналізі відтворених зображень широко застосовують міру відношення сигналу до шуму (peak-to-peak signal-to-noise ratio - PSNR), яка визначається так:

$$PSNR = 10 \cdot \lg \frac{255^2}{\sigma_{\varepsilon}^2} = 10 \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \ln \frac{255^2}{\sigma_{\varepsilon}^2}.$$

Загальний PSNR для зображення визначається шляхом усереднення PSNR кожної з кольорових складових

Інтерпретація PSNR доволі проста: чим більшим є значення статистики, тим більшою є відповідність поміж двома зображеннями.

Для перевірки якості відтворення зображення операторами (4) - (7) пі-

для спотворення (2), проведемо експеримент на основі імітаційного моделювання за наступною схемою.

Крок 1. Генеруємо рівномірно розподілені α , β та вимагаємо їх відповідність умовам (8) та (9).

Крок 2. Для перевірки роботи кожного з дев'яти операторів (4) – (7) моделюємо спотворення оператором (2), згідно згенерованих α , β та маски γ .

Крок 3. Для кожного результату відтворення зображення визначаємо середній *PSNR*, порівнюючи з вихідним зображенням.

Крок 4. Повторюємо експеримент 400 разів.

Результати експерименту зведено в таблицю (табл.1). Для наочності отриманих результатів усі підсумки експериментів були відсортовані за величиною α , також було проведено усереднення *PSNR* в межах інтервалів зміни α (в останній колонці вказано кількість значень за якими було усереднення).

Табл.1.

Значення усереднених *PSNR* після проведення експерименту

α	$\max \beta$	γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	N
[0,05;0,1)	0.0235	38,73849	44,77572	37,71818	32,35721	28,35858	41
[0,1;0,15)	0.0340	43,98148	49,35406	42,37825	35,04397	30,28478	48
[0,15;0,2)	0.0474	45,7946	46,9347	44,81747	37,56944	32,17712	53
[0,2;0,25)	0.0589	42,83499	41,16095	43,1387	39,88584	34,79463	38
[0,25;0,3)	0.0637	40,7402	38,50291	41,46732	41,71586	36,89772	37
[0,3;0,35)	0.0829	38,37078	36,73771	38,96636	40,56728	37,20889	38
[0,35;0,4)	0.0973	36,43578	35,18418	36,89537	39,81749	37,9436	43
[0,4;0,45)	0.1002	34,04021	33,29069	34,31427	36,23808	36,87641	44
[0,45;0,5]	0.1201	32,73673	32,21276	32,93596	34,41253	35,57243	57
[0,05;0,5]		39,1156	39,7277	38,9605	37,211	37,8732	400

Табл.1 (продовження).

Значення усереднених $PSNR$ після проведення експерименту

α	$\max \beta$	Δ	γ_{κ_1}	γ_{κ_2}	γ_{κ_3}	N
[0,05;0,1)	0.0235	24,53323	37,10809	30,85309	25,47077	41
[0,1;0,15)	0.0340	26,0291	41,99055	33,75512	27,63283	48
[0,15;0,2)	0.0474	27,51385	43,40175	37,05467	30,1845	53
[0,2;0,25)	0.0589	30,03952	40,94116	39,55621	34,48744	38
[0,25;0,3)	0.0637	31,80445	39,64439	40,04673	35,58739	37
[0,3;0,35)	0.0829	32,76737	37,37544	37,25013	34,1755	38
[0,35;0,4)	0.0973	33,1531	35,81767	36,06434	33,24441	43
[0,4;0,45)	0.1002	33,90213	33,68308	34,20912	32,84494	44
[0,45;0,5]	0.1201	32,94135	32,43282	32,72505	31,31435	57
[0,05;0,5]		30,2358	35,458	31,4304	34,3174	400

Примітка до таблиці: в шапці таблиці (табл.1) вказано маски відповідних операторів, що мали застосування.

Аналізуючи результати проведеного експерименту можна відмітити наступні відмінності

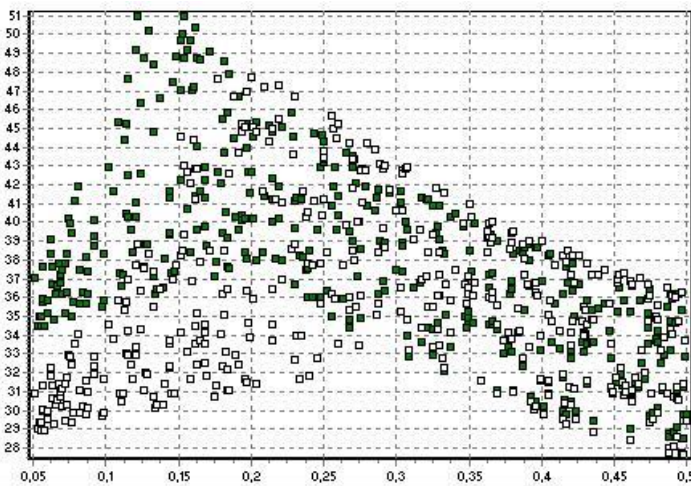


Рис.2. Значення $PSNR$ при застосуванні операторів з масками γ_{κ_1} (темні квадрати) та γ_{κ_2} (світлі квадрати).

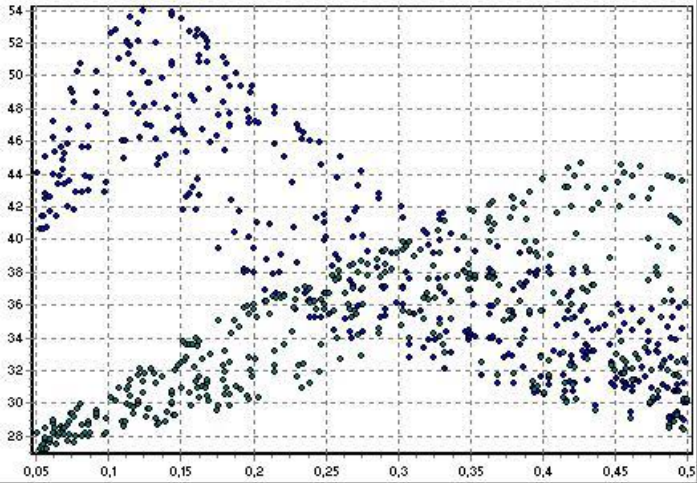


Рис.3. Значення $PSNR$ при застосуванні операторів з масками γ_1 (значення більші при менших α) та γ_4 .

Контрастні фільтри (6) при $l = 1, 2$, забезпечують прийнятний рівень відтворення, проте зі зростанням значення α , максимальний $PSNR$ спадає (рис.2). Фільтр $K_3(p_{i,j})$ в автоматичному режимі застосовувати не варто.

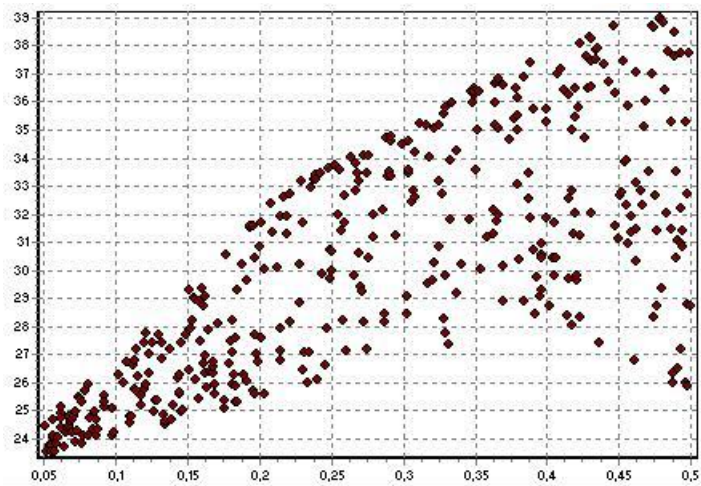


Рис.4. Значення $PSNR$ при застосуванні оператора (7).

Оператори (4), (5) в середньому забезпечують більш якісне відтворення (за $PSNR$), ніж фільтри, згадані вище. Оператор (4) практично має еквівалентні результати, як і фільтр з маскою γ_2 . Максимальний $PSNR$ при застосуванні операторів (5) досягається при зростанні α ординарно індексу l . Так для $C_2(p_{i,j})$ максимальний $PSNR$ приблизно при $\alpha = 0,125$, у той час, як для $C_4(p_{i,j})$ - при $\alpha = 0,45$ (рис.3). Варто звернути увагу (рис.4) на те, що оператор (7) забезпечує результати обробки, аналогічні, як і оператор $C_4(p_{i,j})$, проте величина $PSNR$ після останнього – значущо вище.

Відслідковуючи тенденцію залежності $PSNR$ від α та β при застосуванні операторів (5), можна вважати, що для подолання проблем, пов'язаних з «збільшенням» спотворення ($\alpha > 0,5$), варто зосередити зусилля на отриманні нових аналогічних операторів, за використанням сплайнів з більш широким локальним носієм (тобто, на основі B -сплайнів порядків вище п'ятого). Крім того, подальші дослідження можуть бути спрямовані на пошук критеріїв автоматичного визначення ступеня спотворення (оцінка величини α) зображення, задля прийняття рішення про застосування конкретного типу оператора стабілізації.

Окрім описаного, було проведено експеримент, спрямований на порівняння роботи операторів (4), (5) та фільтрів покращення різкості, що представлені в середовищі обробки цифрованих зображень Adobe PhotoShop CS2 [12] (русіфікована версія). Зокрема, порівняння проводилось з двома фільтрами «Резкість» та «Резкість +», представленими в пункті меню «Фільтр», підменю «Резкість». Застосування таких фільтрів не потребує додаткових налаштувань, тому, напевно, самі фільтри являють собою оператори за конструкцією подібною (4) та (5). На жаль опис згаданих фільтрів у вільному доступі не виявлено, тому порівняльний аналіз проводився наступним чином.

Крок 1. Генеруємо рівномірно розподілені α , β та вимагаємо їх відповідність умовам (8) та (9).

Крок 2. Для перевірки роботи кожного з п'яти операторів (4), (5) та фільтрів «Резкість» та «Резкість +», що представлено в Adobe PhotoShop CS2 моделюємо спотворення оператором (2), згідно згенерованих α , β та маски γ .

Крок 3. Для кожного результату відтворення зображення визначаємо $PSNR$, порівнюючи з вихідним зображенням.

Крок 4. Повторюємо експеримент 24 рази.

Кількість повторів експерименту (крок 4) не велика, що (на відміну від

попереднього експерименту) обумовлено неможливістю автоматизувати роботу з серіями зображень в Adobe PhotoShop CS2. Проте, як видно з результатів експерименту (табл.2), навіть така кількість повторів наочно демонструє перевагу в застосуванні фільтрів (4), (5). Вартим буде звернути увагу на наступну закономірність. Величина $PSNR$ за результатами застосування фільтра «Резкість» суттєво корелює з величинами $PSNR$ після застосування операторів $C_0(p_{i,j})$ та $C_2(p_{i,j})$, але перевага залишається за фільтрами, що досліджуються в даній роботі. Те ж саме стосується і фільтра «Резкість +» та оператора $C_4(p_{i,j})$.

Табл.2.

Значення $PSNR$ після проведення експерименту порівняння з фільтрами Adobe PhotoShop CS2

№	α	β	γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	«Резкість»	«Резкість +»
1	0,06003	0,00097	39,87	46,42	38,71	32,92	28,77	36,85	28,27
2	0,07743	0,00657	40,36	47,50	39,18	33,24	29,00	37,17	28,43
3	0,08533	0,0009	43,54	51,20	41,88	34,71	30,06	39,73	29,50
4	0,09678	0,01427	40,37	47,68	39,24	33,34	29,08	37,11	28,45
5	0,1226	0,00797	47,77	50,61	45,44	36,49	31,28	42,67	30,58
6	0,1527	0,01274	51,43	46,63	49,14	38,34	32,50	46,10	31,68
7	0,17326	0,02473	50,95	48,90	48,50	37,89	32,17	44,15	31,17
8	0,17365	0,04012	41,40	48,00	40,44	34,45	29,93	37,75	28,99
9	0,22971	0,00407	37,43	36,20	37,76	38,91	36,62	38,42	36,63
10	0,24989	0,00879	36,91	35,77	37,23	38,64	36,98	37,84	37,06
11	0,28518	0,01956	36,47	35,37	36,80	38,60	37,80	37,38	37,92
12	0,29498	0,03736	39,30	37,30	39,92	43,63	39,48	41,13	37,98
13	0,29504	0,03268	38,23	36,59	38,74	41,73	39,36	39,71	38,49
14	0,31059	0,07654	43,04	42,51	43,30	38,79	33,14	40,32	31,24
15	0,36104	0,01354	32,33	32,04	32,44	33,05	33,21	32,44	32,87
16	0,36322	0,02906	33,71	33,15	33,90	35,06	35,95	34,11	35,88
17	0,37001	0,0009	31,11	31,01	31,17	31,44	31,33	31,02	30,49
18	0,37427	0,06638	38,35	36,55	38,97	44,31	42,85	39,87	38,84
19	0,39046	0,08296	39,84	37,71	40,65	46,78	40,30	41,06	35,99
20	0,39988	0,02496	32,03	31,75	32,15	32,77	33,07	32,15	32,77
21	0,4038	0,05305	34,55	33,76	34,82	36,69	38,73	35,21	38,69
22	0,48595	0,10096	35,94	34,75	36,35	39,81	44,01	36,83	38,91
23	0,4881	0,0434	30,89	30,73	30,97	31,40	31,66	30,91	31,19
24	0,49757	0,01782	29,32	29,39	29,35	29,35	29,11	29,08	27,91
Середні:			38,55	39,23	38,21	36,76	34,43	37,46	33,33

Висновки. Представлені та досліджені в роботі лінійні оператори (4) та (5) можуть бути рекомендовані при автоматизованій обробці цифрованих зображень спотворених завадою на кшталт мікроруху камери фіксації. При цьому, залежно від розрішення кадру можливо застосування таких

операторів i в автоматичному режимі, а саме: чим більшим є розрішення, тим більшим варто обирати індекс l маски фільтру γ_l , $l = \overline{1, 4}$.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на отримання аналогічних операторів з більшою шириною вікна маски фільтрів та поширення даного підходу на обробку цифрованих відеопотоків. Вартим уваги будуть дослідження роботи фільтрів (4), (5) при інших типах завдань, ніж розглянуто в даній роботі.

Бібліографічні посилання

1. **Грузман И.С.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие / Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
2. Новейшие методы обработки изображений. / Под ред. А.А.Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
3. Интернет ресурс: <http://www.compress.ru/Archive/CP/2006/8/4>.
4. Интернет ресурс: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Линза_\(оптика\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Линза_(оптика)).
5. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
6. **Приставка П.О.** Побудова контрастних фільтрів за використанням поліноміальних сплайнів / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій.- Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту.- 2007. -Т.11. –С.15-22.
7. **Чолишкіна О.Г.** Застосування поліноміальних сплайнів на основі B -сплайнів п'ятого порядку при побудові фільтрів / Вісн. НАУ.- К.: НАУ.- 2009.-№1. -С. 214-218.
8. **Приставка П.О.** Застосування комбінованих фільтрів на основі поліноміальних сплайнів при обробці растрових зображень / Вісн. НАУ.- К.: НАУ.- 2008.-№4. -С. 104-107.
9. **Приставка П.О.** Поліноміальні сплайни при обробці даних – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. – 236 с.
10. **Приставка П.О., Чолишкіна О.Г.** Дослідження B -сплайну п'ятого порядку та їх лінійної комбінації / Математичне моделювання. –2007. – №1(16). – С.14-17.
11. **Приставка П.О., Чолишкіна О.Г.** Дослідження двовимірного поліноміального сплайну на основі B -сплайнів п'ятого порядку / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій : Зб. наук. праць. - Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту.- 2008. -Т.12. –С.14-27.
12. Интернет ресурс: <http://www.adobe.com/photoshop>.