

УДК 004.932

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-10

БЕДРАТЮК Г. І.

Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ЯКОСТІ МЕТОДІВ ПОВОРОТУ ЗОБРАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОМЕНТНИХ ІНВАРІАНТІВ

У роботі запропоновано новий метод оцінки якості повороту напівтонових зображень на основі статистичних поворотних інваріантів зображення. Поворотні моменти довільного порядку не змінюються при повороті зображень і тому можуть слугувати мірою для оцінки зміни якості зображень при поворотах. Проведені числові експерименти показали, що поворотні моменти ефективно виявляють спотворення зображення і поводять себе аналогічно, як і відомі індекси якості зображень.

Ключові слова: якість зображення, поворот, інтерполяція зображення, індекси якості, поворотні інваріанти.

BEDRATYUK A.

Khmelnitsky National University

ROTATION IMAGE QUALITY ASSESSMENT VIA GEOMETRIC MOMENT INVARIANTS

Digital image processing often results in a loss of image quality, which is expressed in the appearance of unwanted distortion on the converted image. Visual image quality measurement is important for image and video processing programs. There are about a hundred different metrics, measuring image quality, the most popular of which are root mean square error (MSE), peak signal to noise ratio (PSNR), universal image quality index (UQI), structural similarity index (SSIM), descriptor index similarity (FSIM), gradient similarity measure (GSM), noise level measure (NQM). One of the most common standard image processing methods is to rotate an image centered at any point in the plane. In fact, rotation is a resampling of an image followed by interpolation. There have been many different rotation algorithms recently, which makes it important to study methods for assessing their quality.

In this article, we propose a new method for estimating the quality of rotation based on geometric invariant moments of the image. Geometric moments and their invariants were first introduced and are intensively used in computer vision and pattern recognition. Global image descriptors are built on moments, which characterize the shape of objects in the image and are resistant to simple transformations – parallel transfer, rotation and uniform scaling. In this paper, we offer a set of invariants that are resistant only to turns. The fact that the torques do not change for the original and perfectly interpolated image allows you to use the torques as a measure of the quality of interpolation when rotating.

The paper proposes a new method for estimating the quality of rotation of grayscale images based on statistical rotational invariants of the image. The geometric moment invariants of arbitrary order do not change under rotating images and therefore can serve as a measure to assess the image quality. Numerical experiments have shown that the invariants effectively detect image distortion and behave similarly to known image quality indices.

Keywords: image quality, rotation, image interpolation, quality indices, rotation invariants.

1. Вступ. Цифрова обробка зображення часто призводить до втрати якості зображення, яка виражається у появі на перетвореному зображенні небажаних спотворень. Вимірювання якості візуального зображення має важливе значення для програм обробки зображень та відео. Існує біля сотні різноманітних метрик, див. [1]-[5] для вимірювання якості зображення, найбільш популярні з них – середня квадратична помилка (MSE), пікове співвідношення сигналу до шуму (PSNR), універсальний індекс якості зображення (UQI), індекс структурної схожості (SSIM), індекс дескрипторної схожості (FSIM), градієнтна міра подібності (GSM), міра рівня шуму (NQM). Одним із найпоширеніших стандартних методів обробки зображень є поворот зображення з центром у довільній точці площини. Фактично, поворот є передискретизацією зображення з наступною інтерполяцією. Останнім часом з'явилося багато різноманітних алгоритмів повороту [6–10], що робить актуальним вивчення методів оцінки їхньої якості.

У статті ми пропонуємо новий метод оцінки якості повороту на основі геометричних інваріантних моментів зображення. Геометричні моменти та їхні інваріанти вперше були введені в роботі [12] і інтенсивно використовуються в комп'ютерному зорі та розпізнаванні образів. На основі моментів будуються глобальні дескриптори зображення, які характеризують форму об'єктів на зображенні і є стійкими до простих перетворень – паралельного перенесення, поворотів і рівномірного масштабування. В даній роботі ми пропонуємо множину інваріантів які стійкі лише до поворотів. Той факт, що поворотні моменти не змінюються для оригінального та ідеально інтерпольованого зображення, дозволяє використати поворотні моменти як міру якості інтерполяції при повороті.

Стаття організована наступним чином. В розділі 2 поняття геометричних моментів та геометричних моментів які є інваріантами відносно повороту зображення, без зміни його розміру. Також вводиться поняття моментної метрики. В розділі 3 дана коротка характеристика методів інтерполяції які будуть аналізуватися – інтерполяція за найближчим сусідом, лінійна інтерполяція та віконна інтерполяція Ланцоша.

В розділі 4 наводяться результати числових експериментів з обчислення поворотних моментів та аналізу якості повороту при інтерполяції.

2. Ротаційні моментні інваріанти та моментна метрика. Введення моментних інваріантів на початку 60-х років було одним з перших прикладних застосувань класичної теорії інваріантів до широкого класу задач з розпізнавання образів. В важливій роботі [12] було вперше запропоновано для вирішення проблем розпізнавання розглядати добре відомі в математиці статистичні моменти. Дано необхідні означення. Під цифровим зображенням ми будемо розуміти функцію від двох змінних $f(x, y)$, яка інтегровна на деякій множині Ω площини \mathbb{R}^2 . **Геометричним моментом** порядку $p + q$ функції $f(x, y)$ називається вираз:

$$m_{pq}(f(x, y)) = m_{pq} = \iint_{\Omega} x^p y^q f(x, y) dx dy, \Omega \subset \mathbb{R}^2.$$

У роботі [13] повна система геометричних інваріантів описана в термінах власних векторів $e_d(\lambda)$ лінійного оператора

$$D_d(m_{p,q}) = qm_{p+1,q-1} - pm_{p-1,q+1}, d = p + q,$$

де $e_d(\lambda) = \sum_{j=0}^d i^j \mathcal{K}_j\left(\frac{1}{2}(d-\lambda), d\right) m_{d-j,j}$, $\lambda \in \Lambda_d = \{d, d-2, \dots, -(d-2), -d\}$, $i \mathcal{K}_n(x, N)$ є бінарними многочленами Кравчука. Можна довести, що всі поворотні інваріанти описуються трьома типами інваріантів:

$$e_{2d}(0), e_d(\lambda)e_d(-\lambda), e_d(\lambda)e_1(-1)^\lambda.$$

Ми будемо використовувати такі п'ять поворотних моментів малих порядків:

$$\varphi_0 = e_0(0) = m_{0,0},$$

$$\varphi_1 = e_1(1)e_1(-1) = m_{1,0}^2 + m_{0,1}^2,$$

$$\varphi_2 = e_2(0) = m_{2,0} + m_{0,2},$$

$$\varphi_3 = e_2(2)e_2(-2) = m_{2,0}m_{0,2} - m_{1,1}^2,$$

$$\varphi_4 = e_2(2)e_{-1}^2 = (m_{0,2} - m_{2,0})(m_{0,1}^2 - m_{1,0}^2) + 4 m_{1,1}m_{1,0}m_{0,1},$$

$$\varphi_5 = e_2(0) = m_{4,0} + 2 m_{2,2} + m_{0,4}.$$

При виконання повороту зображення на деякий кут, вирази φ_i , обчислені на зображенні до і після повороту, теоретично мають залишатися однаковими. Проте це не так, оскільки реальні зображення є дискретними а не неперервними. При переході до дискретного зображення розміру $M \times N$ -пікселів, інтеграли замінюються сумами, вираз для геометричних моментів приймає такий вигляд

$$m_{p,q} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} x^p y^q f(x, y),$$

і при обчисленні виникають помилки округлення. Крім того, при поворотах має місце неспівпадіння растрової сітки, і зображення зазнає повторної дискретизації. Тому реальні обчислення призводять до відхилення від теоретичних результатів. Для оцінки таких спотворень зображення f до і після повороту \tilde{f} існують різноманітні методи, найбільш поширеним є середньо квадратичне відхилення. Проте, як зазначають різні автори, див. наприклад [14], не існує сильної кореляції між зоровою деградацією якості зображення та середньо квадратичним відхиленням. У більшій мірі структуру зображення відображають універсальний індекс якості UQI і індекс структурної схожості SSIM. Також, якісна метрика повинна задовольняти природну умову – якщо при масштабуванні відбулися спотворення зображення, то чим більші ці спотворення тим більшою повинна бути відстань між оригіналом і інтерпольованим зображенням. В розділі 3 ми експериментально підтвердимо що поворотні інваріанти задовольняють цій умові неперервності, вивчаючи їхню поведінку при поворотах зображень. Крім того ми вводимо такі дві метрики як міру оцінки якості повороту зображень:

$$DistAbs(f, f') = \sqrt{\sum_{y=0}^s (\varphi_1(f) - \varphi_1(f'))^2},$$

$$DistSqrt(f, f') = \sum_{y=0}^s |\varphi_1(f) - \varphi_1(f')|,$$

тут $\varphi_i, i = 0, 1, \dots, s$ – деяка система незалежних поворотних інваріантів.

Ми оцінимо якість методів повороту та порівняємо як різні метрики реагують на спотворення при різних поворотах.

3. **Алгоритми інтерполяції для повороту.** Поворот навколо центру координат на кут θ переводить старі координати пікселя (x, y) у нові (x', y') за формулами:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

Формули для перерахунку координат пікселя для повороту виконаного навколо довільної точки площини з координатами (x_c, y_c) на кут θ , мають вигляд:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}.$$

Головна проблема при довільному геометричному перетворенні зображення полягає у тому, що пікселі є елементами дискретної растрової сітки, а не неперервної площини, тому може статися так, що нові координати пікселя (x', y') , обчислені за формулами перетворення не є цілими числами. На рис. 1 показано ситуація яка виникає при повороті одного пікселя, який в новому положенні не потрапляє повністю в клітинку растрової сітки:

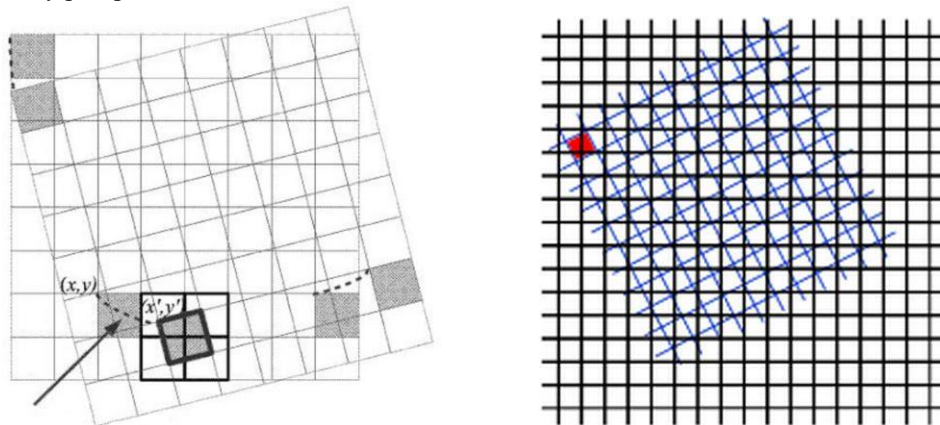


Рис. 1. Поворот растрової сітки

Проблема вирішується екстраполяцією місцеположення відсутніх пікселів в новому зображенні та інтеполяцією їхніх значень, а такий процес в цілому називається **інтерполяцією** зображення. Всі відомі алгоритми інтерполяції зводяться до методів присвоєння пікселям таких значень, щоб інтерпольоване зображення було візуально схожим на оригінал, і не містило нової небажаної інформації. Існує велика кількість алгоритмів інтерполяції, їх кількість постійно збільшується. Розглянемо три стандартні алгоритми повороту зображення, які ми будемо використовувати для оцінки критеріїв ефективності інтерполяції.

3.1. Інтерполяція за найближчим сусідом. При інтерполяції методом найближчого сусіда, нові координати пікселя округлюються до найближчого цілого числа:

$$x' = [x\cos\theta - y\sin\theta], \quad y' = [x\sin\theta + y\cos\theta]$$

Цей простий, легкий у реалізації, алгоритм, але він часто приводить до появи на зображенні небажаних артефактів, зокрема значного спотворення прямолінійних контурів.

3.2. Білінійна інтерполяція. Білінійна інтерполяція є узагальненням звичайної лінійної інтерполяції на випадок функції двох змінних. При білінійній інтерполяції, невідоме значення яскравості $f(x, y)$ пікселя з координатами (x, y) визначається відомою яскравістю 4-х найближчих пікселів $(x_1, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_1), (x_2, y_2)$ за наступною формулою:

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

де невідомі a_0, a_1, a_2, a_3 визначаються з системи рівнянь:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_1 & y_2 & x_1y_2 \\ 1 & x_2 & y_1 & x_2y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f((x_1, y_1)) \\ f((x_1, y_2)) \\ f((x_2, y_1)) \\ f((x_2, y_2)) \end{bmatrix}.$$

Як правило, якість лінійної інтерполяції краща ніж інтерполяції методом найближчого сусіда.

3.3. Інтерполяція Ланцоша. Цей метод визначається згорткою зображення $f(x, y)$ з таким ядром:

$$W_{Ln}(x, y) = w_{Ln}(x)w_{Ln}(y),$$

де

$$w_{Ln}(x) = \begin{cases} 1, & \text{для } |x| = 0, \\ \frac{n}{\pi^2 x^2} \sin\left(\pi \frac{x}{n}\right) \sin(\pi x), & \text{для } 0 < |x| < n, \\ 0, & \text{для } |x| \geq n. \end{cases}$$

Нове значення пікселя у збільшеного зображення $\tilde{f}(x, y)$ в результаті такої згортки має вигляд:

$$\tilde{f}(x, y) = \sum_{v=y-n+1}^{y+n} \left[\sum_{u=x-n+1}^{x+n} f(u, v) W_{Ln}(x-u, y-v) \right],$$

для цілих x, y .

Інтерполяція Ланцоша вважається одним з найкращих методів інтерполяції, особливо тоді, коли розміри інтерпольованого зображення змінюються. Поворот зображення визначається матрицею повороту, та вектором зміщення, при необхідності. Після виконання повороту, відбувається інтерполяція тих пікселів які не потрапили, або потрапили неповністю у нове положення растрової сітки.

4. Чисельні експерименти. Розглянуті три алгоритми повороту реалізовані в бібліотеці OpenCV (Open Source Computer Vision Library). В OpenCV матриця повороту визначається функцією `getRotationMatrix2D` параметрами якої є центр повороту, кут повороту і коефіцієнт розтягу. Сам поворот зображення здійснюється функцією `warpAffine` параметрами якої є зображення, матриця повороту, коефіцієнт збільшення і метод інтерполяції. Для повороту зображень ми будемо використовувати три різні алгоритми – метод найближчого сусіда, лінійну інтерполяції та інтерполяцію Лакоша. В OpenCV ці алгоритми викликаються такими параметрами інтерполяції: `cv2.INTER_NEAREST`, `cv2.INTER_LINEAR` і `cv2.INTER_LANCZOS4`. Для інтерполяції Лакоша використовувалося 8×8 -ядро. Зауважимо, що коефіцієнт стиснення має бути рівний 1, оскільки інваріанти Φ_i є стійкими лише до повороту і не стійкі до масштабування.

Всі числові експерименти проводилися з зображенням `Camerman`, див. рис. 2, яке є стандартним зображенням в теорії цифрової обробки зображень.



Рис. 2. Тестове зображення `Camerman`

Ми розглянули зображення `Camerman`, розміру 68×100 , а потім обертали це зображення, з використанням інтерполяції за найближчим сусідом, від 0 до 360 градусів, з кроком 36 градусів. Всі 10 тестових зображень розміщені на рис. 3:

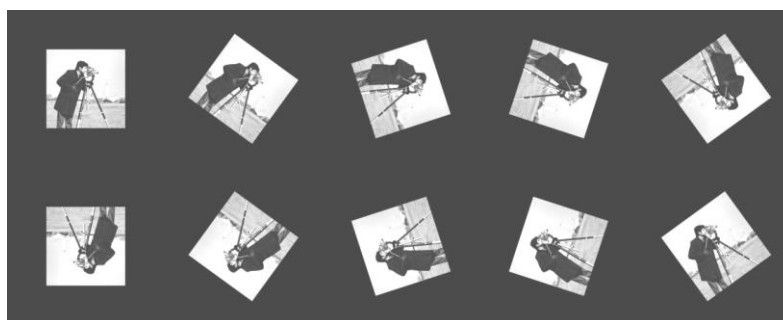


Рис. 3. Зображення, повернуті на 36°

Нам потрібно перевірити, чи обертальні моменти, як запропонований інструмент виявлення спотворень, правильно відреагують на спотворення, які відбулися при інтерполяції. Результати обчислення обертальних інваріантів малого порядку на кожному з тестових зображень показані в таблиці 1. У першому рядку таблиці розміщені кути повороту зображення Cameraman, а кожен наступний рядок рядок таблиці є значенням відповідного модифікованого обертового моменту на одному із 10 зображень. Як видно з таблиці, значення обертових моментів коливаються навколо значення моментів на початковому, неповернутому зображенні. Причина такої поведінки зрозуміла – при повороті дискретної растрової решітки, нові місцеположення пікселів не співпадають з старим растром і тому відбувається інтерполяція при якій значення пікселів відрізняються від значень пікселів початкового зображення, на що зразу реагує обертовий момент. Максимальне співпадіння растрових решіток відбувається у випадках коли кут повороту кратний 180°. Тепер дослідимо лінійну інтерполяцію та інтерполяцію Ланцоша. Візуальний аналіз показує, що якість лінійної інтерполяції не відрізняється за інтерполяцію методом найближчого сусіда. Також таблиці результати обчислень поворотних моментів ідентичні до таблиці 1, тому ми їх не наводимо.

Таблиця 1.

Обертальні моменти зображення повернутого за алгоритмом найближчого сусіда

Кут	0°	36°	72°	108°	144°	180°	216°	252°	288°	324°
$\tilde{\phi}_0$	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723	7,0723
$\tilde{\phi}_1$	19,394	19,416	19,431	19,434	19,424	19,405	19,382	19,365	19,362	19,373
$\tilde{\phi}_2$	12,359	12,38	12,393	12,396	12,387	12,369	12,349	12,333	12,33	12,34
$\tilde{\phi}_3$	23,295	23,338	23,38	23,382	23,344	23,305	23,302	23,316	23,312	23,292
$\tilde{\phi}_4$	105,36	105,5	105,59	105,62	105,56	105,44	105,28	105,16	105,13	105,22
$\tilde{\phi}_5$	40,783	40,858	40,908	40,922	40,896	40,831	40,743	40,671	40,655	40,703

На рис. 4 графічно представлена поведінка модифікованих поворотних інваріантів. Для кращого розуміння поведінки інваріантів ми обчислили оборотні інваріанти на 360 зображеннях отриманих з оригінального зображення послідовними поворотами на 1°. Для уніфікації значення всіх інваріантів кожного повернутого зображення було нормалізоване діленням на значення.

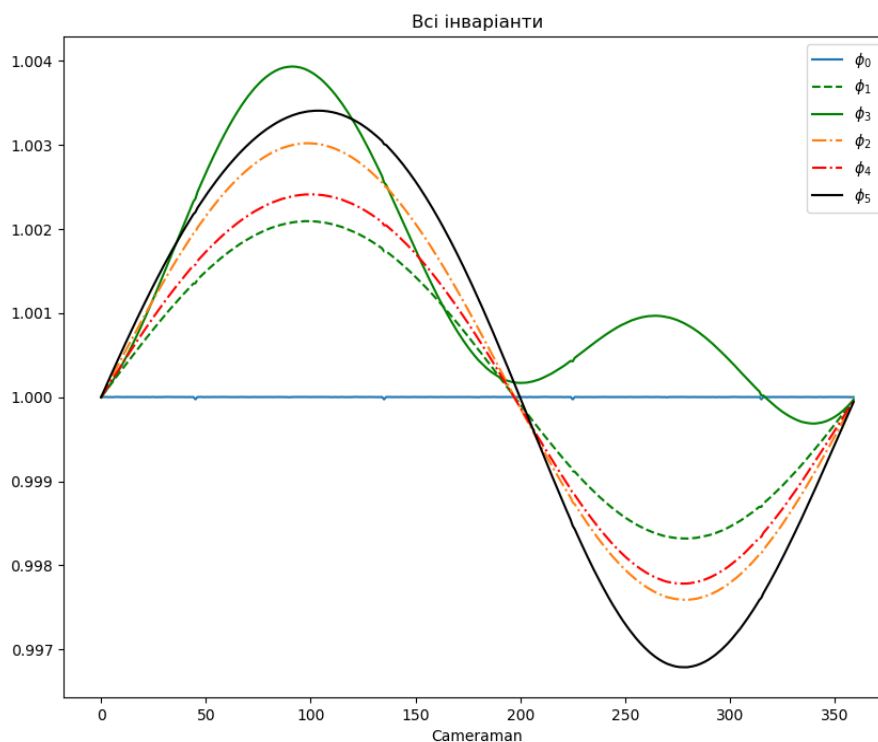


Рис. 4. Спільний графік всіх інваріантів

Отже, можна зробити такі висновки:

- 1) візуальна якість повороту зображення при трьох різних методах інтерполяції однакова;
- 2) всі обертові моменти приймають однакові значення на зображеннях інтерпольованих різними методами;

- 3) всі обертові моменти чутливі до зменшення якості повороту при різних кутах;
- 4) як і впливає з алгоритмів інтерполяції, всі поворотні інваріанти фіксують ідентичність зображення і повернутого зображення на кути кратні 180° ;
- 5) деякі методи фіксують схожість зображень при повороті на кути кратні 90° .

Для кращого розуміння поведінки інваріантів ми обчислили поворотні інваріанти на 360 зображеннях отриманих з оригінального зображення послідовними поворотами на 1° . Для уніфікації значення всіх інваріантів кожного повернутого зображення було нормалізоване діленням на фіксоване значення.

4.1. Порівняння з іншими метриками. Використаємо інші популярні метрики, які базуються на співставленні з еталоном (reference metrics), для порівняння якості зображень, зокрема MSE – середньо квадратичне відхилення, PSNR – пікове співвідношення сигналу до шуму, SSIM – індекс структурної схожості, MSSIM – модифікований індекс структурної схожості, індекс варіації інформації VIPF. Всі індекси обчислювалися для 360 зображень утворених поворотом з кроком 1° . Інтерполяція відбувалася методом найближчого сусіда.

Як видно з рис. 5, індекси PSNR та MSE прогнозовано однаково реагують на спотворення зображення при різних кутах повороту. З графіків видно, що індекси MSE та PSNR ніяк не реагують на спотворення зображення, тому вони не можуть застосовуватися для оцінки якості інтерполяції зображень.

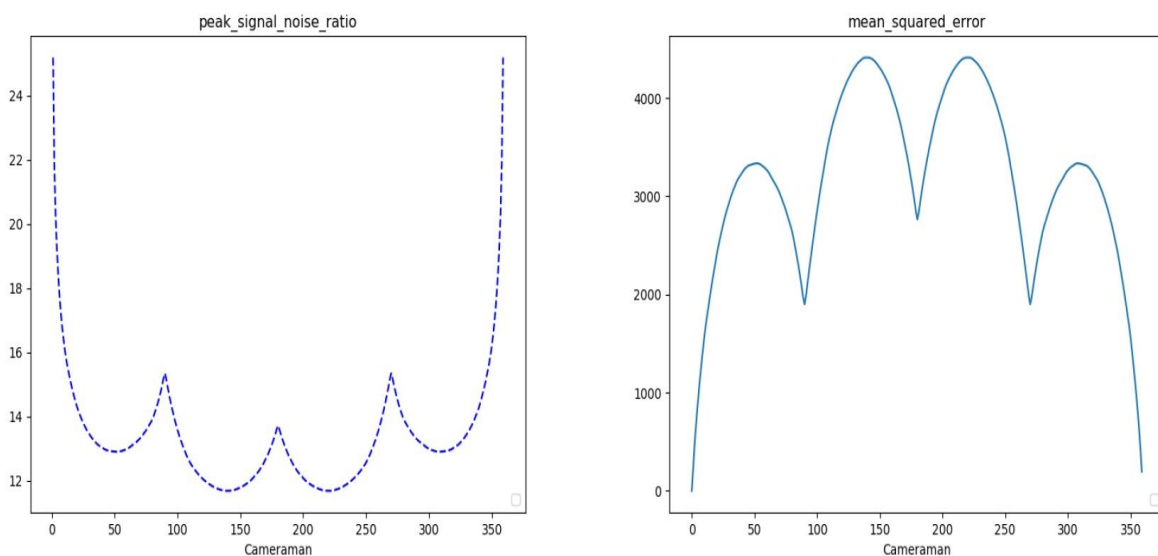


Рис. 5. Графік індексів PSNR та MSE

Як видно з рис. 6, індекси SSIM та MSSIM прогнозовано однаково реагують на спотворення зображення при різних кутах повороту.

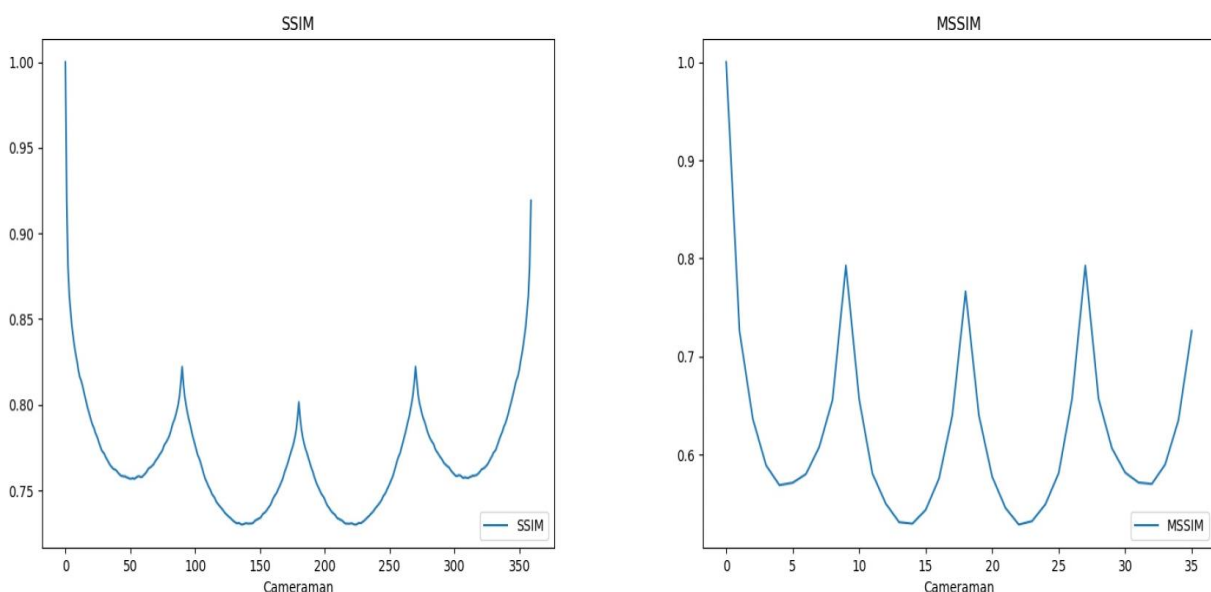


Рис. 6. Графіки індексів SSIM та MSSIM

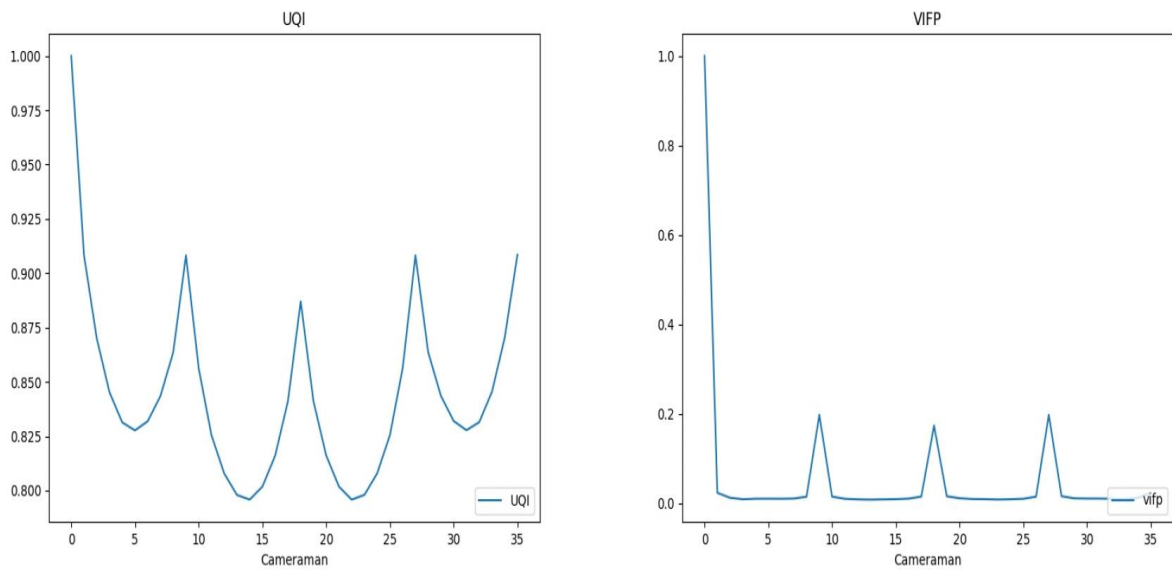


Рис. 7. Графіки індексів UQI та VIFP

Як видно з рис. 7, індекс UQI добре реагує на спотворення а індекс VIFP погано реагує на спотворення зображення при різних кутах повороту. Також розглянемо дві метрики які базуються на ротаційних інваріантах:

$$DistAbs(f, f') = \sum_{i=0}^S |\varphi_i(f) - \varphi_i(f')|,$$

$$DistSQRT(f, f') = \sqrt{\sum_{i=0}^S (\varphi_i(f) - \varphi_i(f'))^2}.$$

На рис. 18 показано відстані між оригінальним зображенням Cameraman та його поворотами від 0° до 360°, виконаними з кроком 1°.

Як видно, обидві метрики ведуть себе однаково і чітко реагують на спотворення якості оберненого зображення.

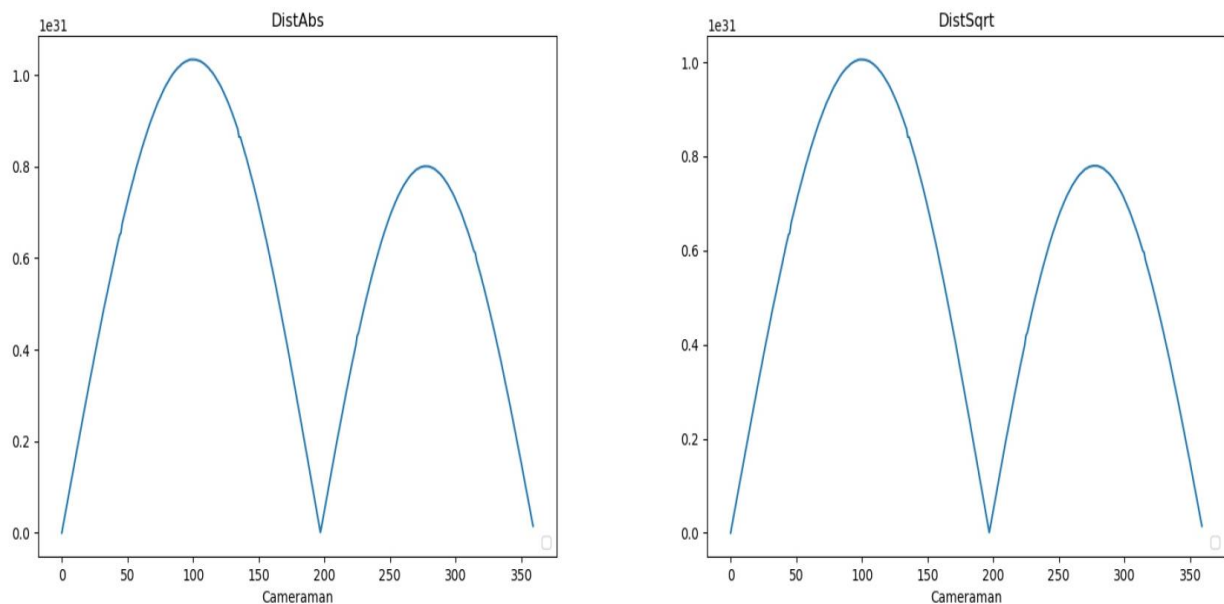


Рис. 8. Графік метрик DistAbs та DistDqrt для $S = 6$.

Висновки. Вимірювання якості візуального зображення має принципове значення для обробки зображень та відео. Метою дослідження якості (QA) є розробка алгоритмів, які можуть автоматично оцінювати якість зображень чи відеозаписів перцептивно. Алгоритми QA зображення інтерпретують якість зображення як вірність або схожість із «еталонним» або «ідеальним» зображенням у певному перцептивному просторі. У статті розглядаються поворотні моменти зображення, доводяться що вони інваріантні відносно повороту і пропонуються для оцінки якості повернутих зображень. Результати експериментальних

обчислень на конкретному зображенні показали що нормалізовані моментні інваріанти монотонно реагують на деградацію зображення і можуть застосовуватися поряд з відомими індексами якості зображень такими як SSIM, MSSIM, QUI та ін.

Література

1. Pedersen M., Hardeberg J., Full-Reference Image Quality Metrics: Classification and Evaluation, Computer Graphics and Vision, Vol. 7, No. 1, 2011, 1–80.
2. Samajdar, T., Quraishi, M. I. Analysis and Evaluation of Image Quality Metrics. Information Systems Design and Intelligent Applications, 2015, 369–378.
3. Danielsson, P.-E., Hammerin, M. High-accuracy rotation of images. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 54(4), 1992). 340–344.
4. Lehmann T., Gonner C., Spitzer K, Survey: Interpolation Methods in Medical Image Processing, IEEE Transactions On Medical Imaging, Vol. 18, No. 11, November 1999, 1049-1075.
5. Kipli, K, Zamhari, N., Muhammad, M. S., Sh.Masniah Wan Masra, Lee C., Lias, K. Full reference image quality metrics and their performance. 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications.
6. Di Bella, E. V. R., Barclay, A. B., Eisner, R. L., Schafer, R. W. A comparison of rotation-based methods for iterative reconstruction algorithms. IEEE Transactions on Nuclear Science, 43(6), 1996, 3370–3376.
7. Asano T., Bitou S., Motoki M., Usui N. In-Place Algorithm for Image Rotation. In: Tokuyama T. (eds) Algorithms and Computation. ISAAC 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4835. Springer, Berlin, Heidelberg
8. Reich, M., Yang, M. Y., Heipke, C. Global robust image rotation from combined weighted averaging. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 127, 2017, 89–101
9. Yan, F., Chen, K., Venegas-Andraca, S. E., Zhao, J. Quantum image rotation by an arbitrary angle. Quantum Information Processing, 2017, 16(11).
10. Elisa Dicke, Andreas Wachter and Werner Nahm, Estimation of the interpolation error of a three-step rotation algorithm using recorded images with rotated test pattern as ground truth. Current Directions in Biomedical Engineering 2017; 3(2): 555–558
11. Mohebbian, M. R., Rasti, J. Head and camera rotation invariant eye tracking algorithm based on segmented group method of data handling. Machine Vision and Applications, 2020,31(7-8).
12. Hu M. K.: Visual pattern recognition by moment invariants. IRE Trans. Inform. Theory, 8(2), 1962, 179–187
13. Bedratyuk, L. 2D Geometric Moment Invariants from the Point of View of the Classical Invariant Theory. J Math Imaging Vis 62, 2020,1062–1075
14. Amanatiadis A., Ioannis I., A survey on evaluation methods for image interpolation, Meas. Sci. Technol. 20, 2009,104015

Надійшла / Paper received: 19.09.2020

Надрукована / Paper Printed : 02.12.2020