

КОРЕЛЯЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІСТОГРАМ КОЛЬОРУ ПРИ ЗНИЖЕННІ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. В роботі досліджено можливість використання гістограм кольору, сформованих у колірних моделях HS^* для ідентифікації зображень при накладанні на них спотворень різної природи. Розглянуто спотворення, які можуть виникати в реальних умовах при отриманні зображень, зокрема, поворот, накладання шуму, розмиття і оптична дисторсія. Порівняння гістограм кольору оригінальних та спотворених зображень здійснювалося за допомогою обчислення коефіцієнту їх взаємної кореляції. Виявлено, що в межах того самого зображення кореляція є досить високою, надивлячись на накладені спотворення, що дозволяє допустити застосовність даного підходу для задач розпізнавання образів.

Ключові слова: спотворені зображення, гістограма кольору, колірний простір HS^* , коефіцієнт кореляції, *OpenCV*.

Постановка проблеми. У задачах розпізнавання образів ідентифікація об'єктів на зображеннях здійснюється з використанням ознак різної природи. Сюди входять текстура і колір, виділення контурів, статистичні та семантичні описи тощо [1–3]. Серед методів отримання атрибутів об'єктів поширеним є аналіз гістограм їх інтенсивності. Хоча у цифровій обробці зображень традиційно використовується трьохканальне кольорове представлення RGB , аналіз колірних властивостей доцільно здійснювати в системах HS^* (HSL , HSV та HSI), оскільки вони найкраще відображають спектральне подання кольору [4]. Спільною рисою цих систем є спосіб визначення кольорової координати H (*Hue*), яка в усіх трьох системах є кутовою координатою у циліндричній системі координат. Насиченість S (*Saturation*) задається радіальною відстанню, а зміна яскравості I (*Intensity*), V (*Value*) або L (*Lightness*) визначається висотою. Спосіб обчислення величин S , I , V та L у кожній системі є різним. Таким чином в усіх системах HS^* *Hue* має зміст спектрального складу кольору і може бути використана у ролі спектрального ідентифікатора зображення чи його частини.

Мета дослідження. У роботі досліджувалась можливість використання гістограм кольору, сформованих у колірних просторах HS^* для ідентифікації (порівняння) зображень з накладеними на них спотвореннями.

Об'єкти і методика досліджень. Для досліджень було обрано набір зображень (*dataset*) CQ100: A High-Quality Image Dataset for Color Quantization Research [5]. Даний набір, в першу чергу, служить для вирішення завдань, пов'язаних з квантуванням ко-

люру [6], однак, може бути використаний в інших задачах обробки зображень, таких як фільтрація, сегментація тощо. Базовий (не квантизований) набір містить 100 зображень розміром 768×512 пікселів в *RGB* представлені, з глибиною кольору 24 біти (8 біт на кожен з каналів кольору). Зображення надаються у форматі *png*, який використовує алгоритми стискування без втрат даних.

Проведено дослідження впливу на колірні характеристики зображень різних спотворень, які можуть виникнути при фото/відео зйомці. Зокрема, розглядалися: поворот, дисторсія, розмиття і накладання шумів.

Для цього обчислювалися гистограми кольорової складової (*Hue*) зображень у кольоровому просторі *HSV* для оригінального і спотвореного зображення і здійснювалося їх порівняння шляхом обчислення коефіцієнту кореляції *R* за Пірсоном [7]:

$$R(H_1, H_2) = \frac{\sum_i (H_1(i) - \bar{H}_1)(H_2(i) - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_i (H_1(i) - \bar{H}_1)^2 (H_2(i) - \bar{H}_2)^2}}, \quad (1)$$

де $H_1(i)$, $H_2(i)$ – значення функції розподілу на *i*-му відліку гистограми, \bar{H}_1 , \bar{H}_2 – середнє значення для 1-ої та 2-ої гистограм. Значення коефіцієнту кореляції змінюється у межах від мінус до плюс одиниці, що відповідає мінімальній і максимальній кореляції, відповідно. При відсутності кореляції $R = 0$.

При багатьох типах спотворень, зокрема, у нашому випадку при повороті та дисторсії, відбувається зміна геометрії об'єкту. Спотворені зображення займають тільки частину площі основного зображення і, очевидно, для порівняння потрібно розглядати лише цю ділянку.

В бібліотеці *OpenCV* є засоби для виділення *області інтересів* (англ. *ROI – Region Of Interest*) [8], однак вони передбачають прямокутну форму цієї області. Для виділення на спотворених зображеннях *ROI* не прямокутної форми ми розробили наступний підхід. На оригінальне зображення накладалася маска, отримана з *ROI* спотвореного зображення. Маска отримувалася таким чином: спотворене зображення розмивалося (фільтрувалося методом усереднення), конвертувалося з кольорового представлення *RGB* у представлення *відтінки сірого* (*GreyScale*), після чого бінаризувалося. Попереднє розмиття здійснювалося для ліквідації чорних ділянок всередині маски, які виникали на місці областей чорного кольору *ROI* зображення. Експериментальним шляхом було встановлено, що чорні ділянки всередині маски зникають, коли значення розміру ядра фільтрації досягає 17 пікселів. Оскільки внаслідок фільтрації відбувається також незначне розмиття контурів зображення, отримана вищезгаданим методом маска накладалася як на оригінальне, так і на спотворене зображення (з якого вона була отримана) – для повного співпадіння *ROI*. Накладання маски здійснювалося побітовою кон'юнкцією зображення і маски.

Процедура порівняння гистограм є практично однаковою для всіх типів спотворень і складається з наступних кроків:

1. Завантаження оригінального зображення в трьохканальному кольоровому представленні.
2. Створення спотвореного зображення. При цьому оригінальне зображення зберігається.
3. Обрахунок маски за спотвореним зображенням. Накладання маски на оригінальне і спотворене зображення.
4. Конвертація замаскованих оригінального та спотвореного зображення з кольорового представлення *BGR* у представлення *HSV*.
5. Розрахунок гістограм замаскованих оригінального та спотвореного зображення (гістограма розраховувалась тільки для каналу кольору (*Hue*)).
6. Порівняння гістограм оригінального та спотвореного зображення за допомогою обчислення коефіцієнту їх взаємної кореляції.

Результати досліджень.

Дослідження зміни коефіцієнту кореляції при повороті зображення. На рисунку 1 наведено середнє значення та медіана коефіцієнту кореляції для 100 зображень набору даних CQ100 при їхній ротації. Вони відображають загальну тенденцію зміни коефіцієнту кореляції залежно від кута повороту, який змінювався від 0 до 360 градусів з кроком 10 градусів проти годинникової стрілки.

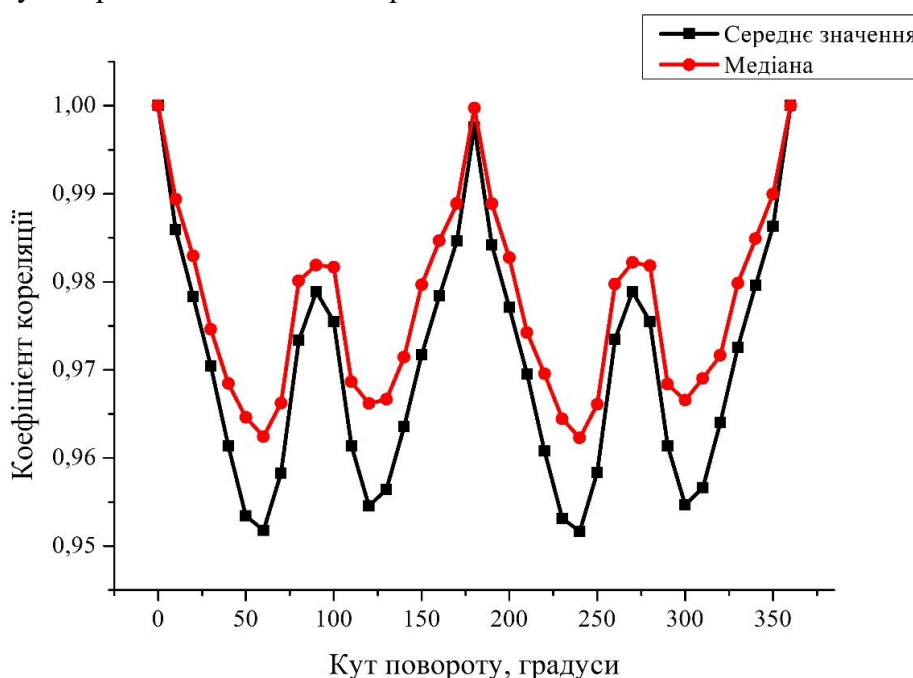


Рисунок 1 – Середнє значення та медіана залежностей коефіцієнту кореляції від кута повороту зображення для набору даних CQ100

З рисунку видно, і це зрозуміло з властивостей симетрії, що хід кривих від 0 до 180 градусів і від 180 до 360 градусів є абсолютно ідентичним.

Від 0 до 60 градусів коефіцієнт кореляції спадає, досягаючи першого, глибшого мінімуму, далі зростає, досягаючи локального максимуму при куті повороту 90 градусів, знов спадає, досягаючи другого мінімуму при 120 градусах повороту і зростає до

значення одиниці (повна кореляція) при куті 180 градусів (перевернуте зображення). Отриманий хід кривих і значення кутів, при яких досягаються максимуму і мінімуми також легко пояснити з міркувань симетрії.

Слід зауважити, що хід кривих середнього значення і медіани коефіцієнту кореляції є характерним для усіх досліджуваних зразків і, загалом, коефіцієнт кореляції змінюється не дуже сильно при повороті зображення. Найменше значення коефіцієнту кореляції 0,753 виявлено для зображення *easter_eggs.png* [5].

Незначне відхилення значення коефіцієнту кореляції від одиниці для більшості тестових зразків може свідчити про можливість застосування методики порівняння зображень на основі обрахунку коефіцієнту їх кореляції [9] при трансформації повороту.

Дослідження зміни коефіцієнту кореляції при зашумленні зображення. Проведено дослідження залежності коефіцієнту кореляції оригінальних та зашумлених зображень для набору даних CQ100. Для дослідження було обрано гаусівський шум [10], оскільки поява такого типу шуму найчастіше трапляється при отриманні зображень.

На рисунку 2 наведено зміну середнього значення та медіани коефіцієнту кореляції для 100 зображень набору даних CQ100 в залежності від ступеня зашумленості. Ступінь зашумленості змінювався від 0,0 до 1,0 з кроком 0,1. При цьому значення параметрів нормального розподілу: математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення залишалися постійними і становили 0,0 та 1,0, відповідно.

Для більшості зразків коефіцієнт кореляції зменшується дуже повільно аж до значення ступеня зашумленості 0,9, після чого спостерігається більш інтенсивний спад. Загалом, (рисунком 2) спостерігається незначна зміна коефіцієнту кореляції при накладанні гаусівського шуму на досліджувані об'єкти, хоча існують окремі винятки. Наприклад, для зображення *mandarin_ducks.png* [5] мінімальне значення коефіцієнту кореляції при повному зашумленні становить 0,619.

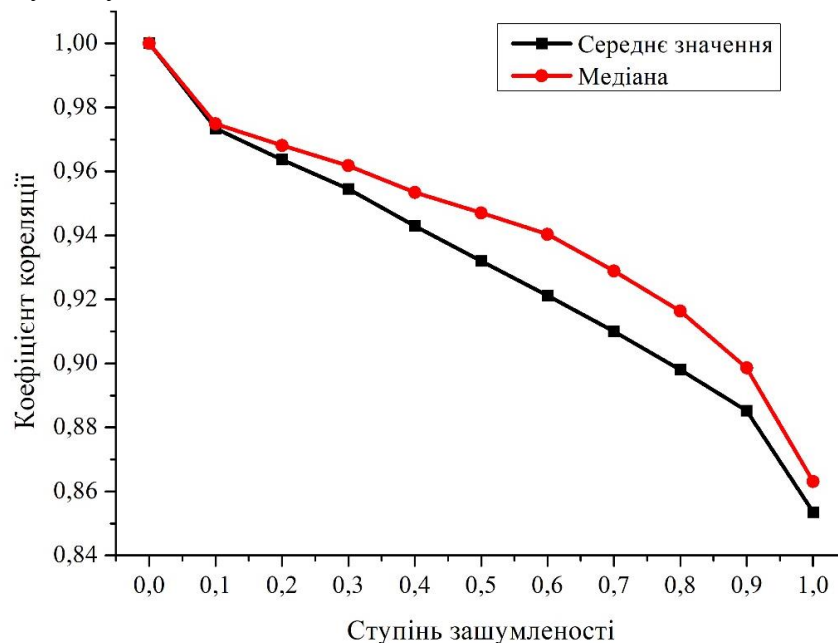


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту кореляції від ступеня зашумленості зображення гаусівським шумом: середнє значення та медіана для набору даних CQ100

Дослідження зміни коефіцієнту кореляції при розмитті зображення. Досліджено зміну коефіцієнту кореляції оригінальних та розмитих гаусівським фільтром зображень залежно від розміру ядра. Розмір ядра змінювався від 1 до 55 з кроком 2 (цей параметр повинен приймати невід'ємні непарні значення). Медіана та середнє значення цих залежностей для набору CQ100 наведені на рисунку 3. При цьому середньоквадратичне відхилення нормального розподілу обчислювалося автоматично на основі розміру ядра за методикою [11].

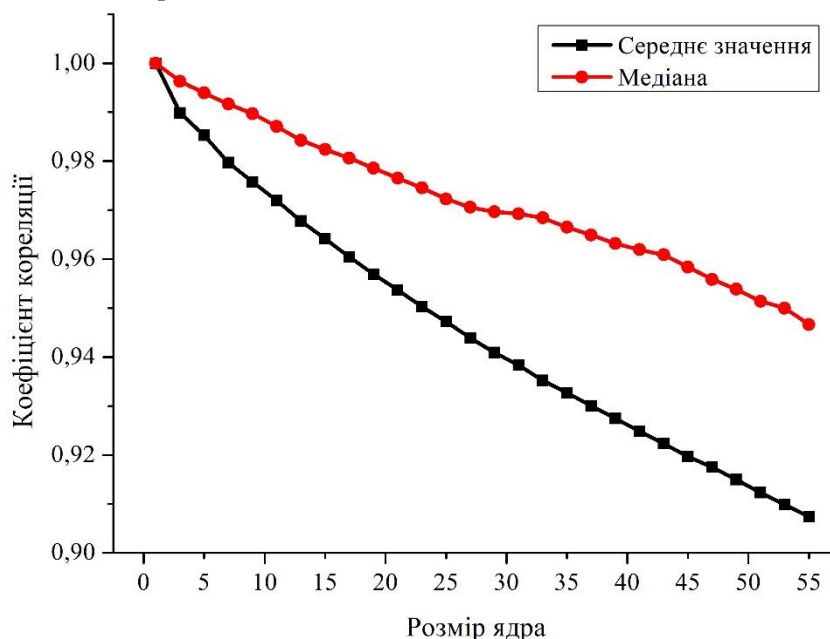


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту кореляції від величина ядра гаусівського фільтра при розмитті зображень: середнє значення та медіана для набору даних CQ100

Отримані результати свідчать, що зміна розміру ядра гаусівського фільтра не сильно впливає на зміну коефіцієнту кореляції, для багатьох зразків його спадання досягає значення 0,8...0,9, в той же час як зміна розміру ядра є суттєвою. Найменше значення коефіцієнту кореляції спостерігалось для зображення *medicine_packets.png* [5] і становило 0,501 при розмірі ядра 55.

Дослідження зміни коефіцієнту кореляції при дисторсії зображення. Дисторсією називають вид аберації оптичних систем, при якій коефіцієнт лінійного збільшення змінюється при віддаленні об'єктів, що відображаються від оптичної осі. У випадку, коли лінійне збільшення зростає при віддаленні елементів зображення від оптичної осі виникає дисторсія типу „подушка”, якщо ж лінійне збільшення зменшується – виникає дисторсія типу „бочка” [12]. Якщо положення точки задано радіус вектором \vec{r} , то у випадку дисторсії третього порядку радіус вектор зображення цієї точки \vec{R} визначається співвідношенням:

$$\vec{R} = b_0 \vec{r} + F_3 r^2 \vec{r}, \quad (2)$$

де b_0 – коефіцієнт лінійного збільшення, r – довжина вектора \vec{r} , F_3 – коефіцієнт дисторсії третього порядку (дисторсії вищих порядків не розглядалися). Коли коефіцієнт F_3 має той самий знак, що й коефіцієнт b_0 , виникає дисторсія типу „подушка”, в протилежному випадку – типу „бочка”.

Досліджено залежність коефіцієнту кореляції оригінальних зображень з набору даних CQ100 та їх дисторсій типу „бочка” та „подушка” від величини коефіцієнту F_3 зі співвідношення (2). На рисунку 4 наведено відповідні залежності середнього значення та медіани при дисторсії типу „бочка” (в цьому випадку коефіцієнти F_3 є додатними). На рисунку 5 подано аналогічні залежності для дисторсії типу „подушка” (в цьому випадку коефіцієнти F_3 є від’ємними). Значення коефіцієнту F_3 змінювалося від 0,0 до $\pm 10,0$ з кроком $\pm 0,5$.

З рисунків 4 і 5 видно, що коефіцієнт кореляції зменшується при зростанні модуля параметра F_3 . Для дисторсії типу „бочка” зменшення є плавним: спочатку більш різким до значень F_3 в околі 1,0...1,5 з подальшим виходом на майже горизонтальну ділянку. Для дисторсії типу „подушка” спочатку спостерігається різке падіння коефіцієнту кореляції з чітко вираженим мінімумом в околі $F_3 = -1,0$ з подальшим ростом і виходом на майже горизонтальну ділянку. Очевидно, що найбільших змін коефіцієнт кореляції зазнає в околі значень модуля параметру F_3 0,0...2,0.

Мінімальне значення коефіцієнту кореляції 0,302 при дисторсії типу „бочка” спостерігалось для зображення *birthday_balloons.png* (при $F_3 = 10$) і 0,144 при дисторсії типу „подушка” для зображення *veggie_pizza.png* [5] (при $F_3 = -0,5$).

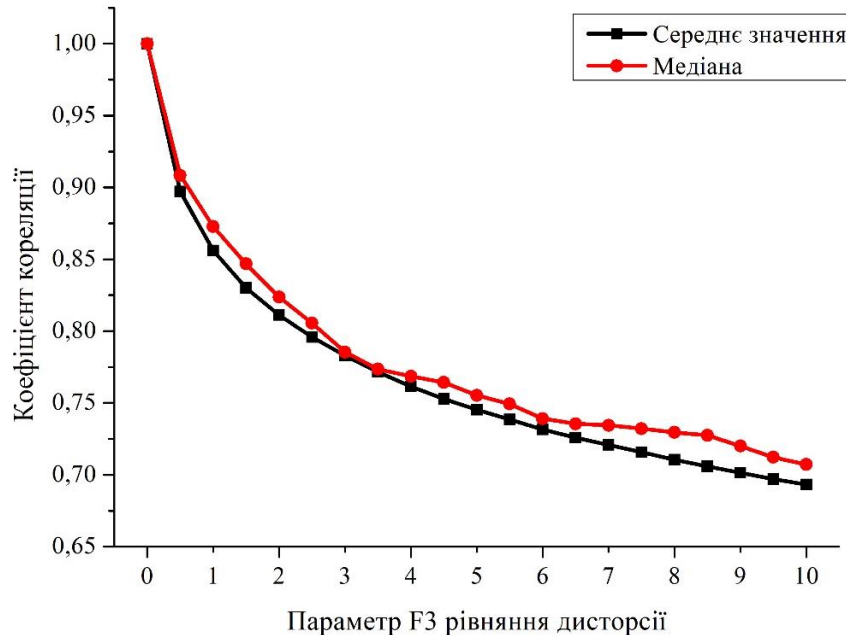


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнту кореляції від значення параметру F_3 для дисторсії типу „бочка”: середнє значення та медіана для набору даних CQ100

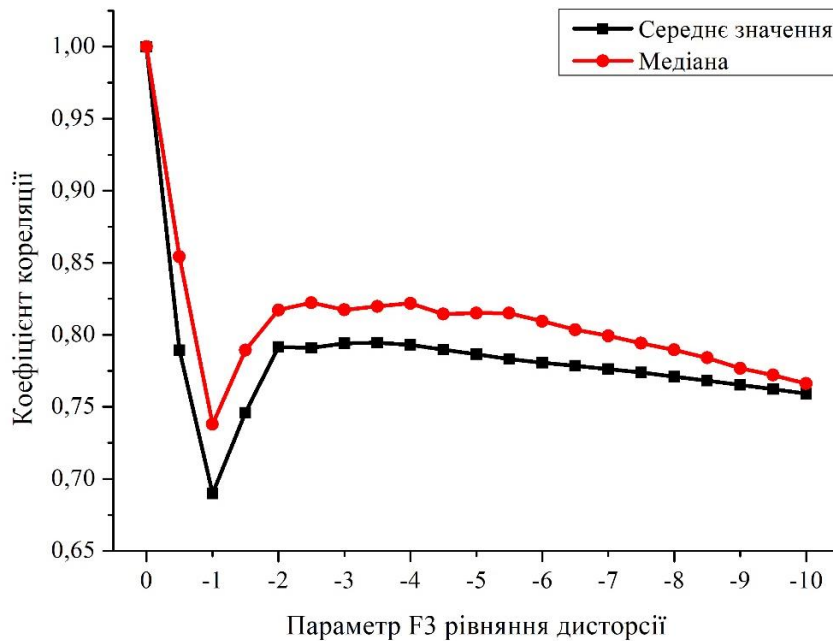


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту кореляції від значення параметру F_3 для дисторсії типу „подушка”: середнє значення та медіана для повного набору даних CQ100

Висновки. Результати проведених досліджень дозволяють припустити допустимість використання гістограм кольору для ідентифікації зображень чи їх фрагментів навіть при досить високих ступенях їх спотворення завадами різної природи, які є типовими за реальних умов реєстрації зображень.

Також можна стверджувати про можливість використання коефіцієнту кореляції, як параметру для порівняння гістограм, не дивлячись на відносну простоту його обчислення. Такий підхід дозволить створювати більш швидкодіючі системи розпізнавання образів, порівняно з системами, заснованими на складніших методах порівняння.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Burger W., Burge M.J. Principles of Digital image processing: Core Algorithms // Springer. – 2009. – 344 P.
2. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing // [4th ed.] – Pearson Education Ltd. – 2017. – 1192 P.
3. Duda R.O., Hart P.E., Stock D.G. Pattern Classification // [2nd ed.] – Wiley. – 2000. – 688 P.
4. Agoston M.K. Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms // [5th ed.] – Springer. – 2005. – 928 P.
5. Celebi M.E., Pérez-Delgado M.-L. CQ100: A High-Quality Image Dataset for Color Quantization Research // Mendeley Data, V2. – 2022. DOI: 10.17632/vw5ys9hfxw.2
6. Celebi M.E. Forty years of color quantization: a modern, algorithmic survey // Artif. Intell. Rev. – 2023. – Vol. 56. – pp. 13953–14034. DOI: 10.1007/s10462-023-10406-6.
7. Bland M. An Introduction to Medical Statistics // [4th ed.] – Oxford University Press. – 2015. – 446 P.

8. OpenCV Documentation. Basic Operations on Images. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d3/df2/tutorial_py_basic_ops.html (дата звернення/Accessed: 15.08.2024).
9. Furgala Yu., Velhosh A., Velhosh S., Rusyn B. Using Color Histograms for Shrunk Images Comparison // 2021 IEEE XIIth International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT). – 2021. – pp. 130-133. DOI: 10.1109/ELIT53502.2021.9501117
10. Miller S., Childers D. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications // [2nd ed.] – Academic Press. – 2012. – 522 P.
11. OpenCV Documentation. Smoothing Images. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d13/tutorial_py_filtering.html (дата звернення/Accessed: 15.08.2024).
- Kingslake R., Johnson R.B. Lens Design Fundamentals // [2nd ed.] – Academic Press. – 2009. – 576 P.

Received 11.09.2024.
Accepted 15.09.2024.

Correlation Properties of Color Histograms in the Case of Image Quality Decreasing

In image recognition tasks, objects are identified by examining various features such as texture, color, contour detection, and statistical or semantic descriptions. One widely used approach for extracting image attributes is the analysis of intensity histograms. While the traditional RGB color model is commonly used in digital image processing, it is often more effective to analyze color properties in HS systems (such as HSL, HSV, and HSI) since these systems more closely resemble the spectral representation of color. A key characteristic shared by these three systems is the use of the H (Hue) coordinate, which is represented as an angular value within a cylindrical coordinate system. The paper investigates the possibility of using color histograms generated in HS* spaces for identifying images that have undergone various types of distortions. The CQ100: A High-Quality Image Dataset for Color Quantization Research was chosen for the research. The non-quantized section of the CQ100 dataset consists of 100 RGB images in PNG format, each with a resolution of 768×512 pixels and a color depth of 24 bits. The study examines how different distortions, which can occur during real-time photo and video capture, affect the color properties of images. Specifically, the research focuses on distortions caused by rotation, noise, blurring, and optical aberration. Histograms were compared using the Pearson cross-correlation coefficient, and the findings reveal that the correlation remains high for the same image despite the applied distortions. Conversely, the correlation coefficient between different images is low for most of the studied objects. These results suggest that color histograms could be effectively used for image identification tasks, even when images are significantly distorted, as is common in image registration processes. The applicability of correlation detection as a method for histograms comparison is considered regardless of the relative simplicity of its calculation. This approach could contribute to the development of faster image recognition systems.*

Key words: distortion of images, color histogram, HS color spaces, Pearson correlation, OpenCV.*

Вельгош Андрій Сергійович – аспірант кафедри оптоелектроніки та інформаційних технологій факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка.

Фургала Юрій Михайлович – к.ф.м.н., доцент, декан факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, доцент кафедри оптоелектроніки та інформаційних технологій факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, ORCID: 0000-0001-7316-7424.

Velhosh Andriy – Postgraduate Student of the Department of Optoelectronics and Information Technologies, Faculty of Electronics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv.

Furgala Yuriy – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor, Dean of Faculty of Electronics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv, Associate Professor of the Department of Optoelectronics and Information Technologies, Faculty of Electronics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv, ORCID: 0000-0001-7316-7424.