

КОМПЬЮТЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-58-67
УДК 004.932.2

АЛГОРИТМ И МЕТОДИКА РАНЖИРОВАНИЯ ГРУППЫ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. В. Афонин, А. В. Савкина, В. В. Никулин

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация*

Предлагаются алгоритм и методика ранжирования группы растровых изображений по критерию их предполагаемого качества. Под ранжированием в статье понимается оценка выборки растровых изображений в порядке убывания их качества. При этом оценка качества изображений выполняется на основе ряда статистических показателей, таких как коэффициенты вариации, детерминации, показатель ранговой корреляции, а также ошибки: абсолютной максимальной, средней, средней квадратической. Различия между изображениями базируются на преобразовании полноцветного изображения RGB в цветовые пространства HSV, Lab, NTSC, XYZ, YCbCr, которые можно представить в виде одномерных матриц пикселей. В качестве эталона принимается не отдельно взятое изображение, а цветовая модель RGB. Относительно нее сравниваются предлагаемые статистические характеристики других цветовых моделей, при этом любой объект каждой цветовой модели сравнивается с базовой моделью – изображением RGB. На основе такого сравнения все изображения заданной группы анализируются независимо друг от друга. Оценка качества изображения выполняется в модуле, который может использоваться для циклической обработки нескольких изображений и представляется в числовой форме в виде вещественного числа. Один из блоков модуля выполняет расчеты статистических показателей между каждой цветовой моделью и базовой моделью RGB. После получения значений оценок качества они ранжируются по их значениям. В итоге может быть определено изображение с более высоким или низким качеством сцены. В качестве тестовых изображений были рассмотрены изображения с артефактами блокинга, зашумленные изображения типа соль и перец (salt & pepper), изображения с артефактами строб-эффектов.

Ключевые слова: цветовые пространства, цветовые модели, растровые изображения, коэффициенты вариации, детерминации, ранговой корреляции, максимальная, средняя, среднеквадратическая ошибки.

Для цитирования: *Афонин В. В., Савкина А. В., Никулин В. В.* Алгоритм и методика ранжирования группы растровых изображений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 4. С. 58–67. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-58-67.

Введение

Содержание и исследования, проведенные в работе, относятся к теории и практике цифровой обработки изображений, которую применяют в различных научных направлениях, включая работы учебного и научно-исследовательского характера [1–14]. Существуют различные подходы и алгоритмы оценки качества изображений, которые подразделяют на референсные и нереференсные. Оценке качества растровых изображений посвящено достаточно много научных работ [6–14], которые отличаются методами и алгоритмами, позволяющими давать заключение о качестве изображений на основе числовых показателей или метрик. В данной работе за основу принято сравнение различных цветовых моделей – RGB (Red, Green, Blue), HSV (Hue – цветовой тон, Saturation – насыщенность, Brightness – яркость), Lab (CIE L*a*b, Lightness – светлота в диапазоне от 0 до 100, координаты a , b означают позицию между зеленым-пурпурным и синим-желтым цве-

тами), NTSC (National Television System Committee – стандарт системы цветного телевидения, использовавшийся в США, Канаде, Мексике, Японии, Южной Корее, Тайване, на Филиппинах и в ряде стран Южной Америки), XYZ (CIE XYZ, X – мнимый красный цвет, Y – мнимый зеленый цвет, Z – мнимый синий цвет), YCbCr (Y – яркость/интенсивность, Cb – цветность синего, Cr – цветность красного). Возможность перехода от цветовой модели RGB к перечисленным может быть выполнена в ряде сред программирования. Данный подход в некоторой степени является продолжением исследований, представленных в [14].

Задачей данного исследования является ранжирование группы изображений с целью определения наиболее качественного среди них. При этом можно сказать, что оценка качества осуществляется условно эталонным способом, когда за эталон принимается не отдельно взятое изображение, а цветовая модель RGB. Относительно нее сравниваются предлагаемые статистические характеристики других цветовых моделей. Следует, конечно, отметить существующие референсные и нереференсные методы оценки качества изображений [9, 12, 14–23]. В то же время также следует отметить, что нет универсальных методов или алгоритмов, реализованных на компьютере в виде универсальной программы, в связи с чем авторы считают обоснованным выбор темы своей научной статьи, чтобы внести определенный вклад в решение задачи компьютерной оценки качества растровых изображений.

Материалы и методы

В проведенных исследованиях были использованы группы изображений, представленные на рис. 1–4 с учетом форматного размера расположения на странице.



img1.bmp



img89.bmp



img107.bmp



img138.bmp



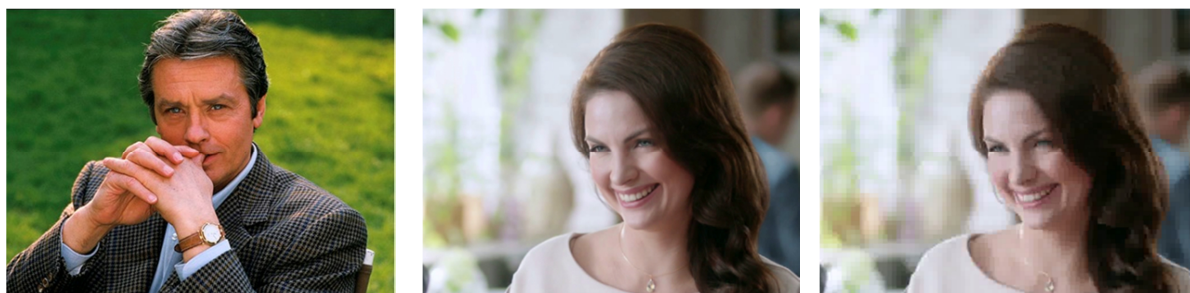
img154.bmp



img168.bmp

Рис. 1. Первая группа тестовых изображений

Как видно на рис. 1, в первой тестовой группе имеются очевидные искажения блокинга. Вторая тестовая группа изображений визуально не имеет очевидных искажений (рис. 2).



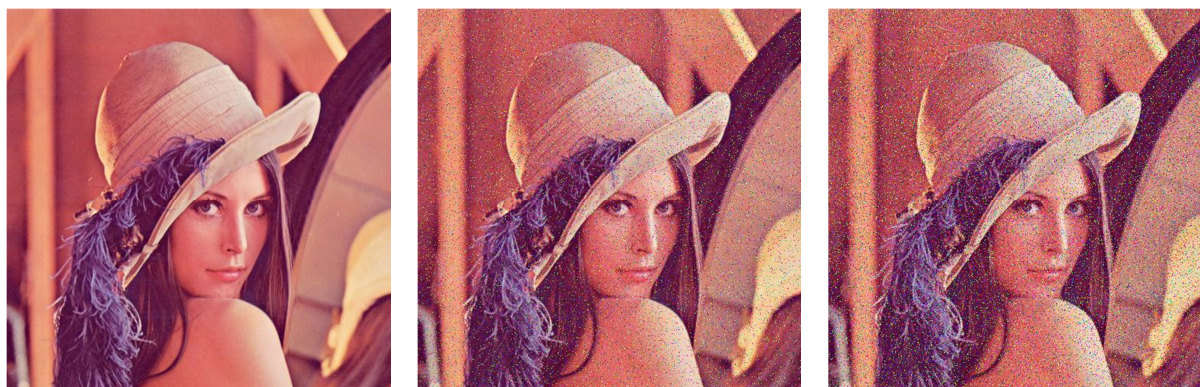
А. Делон.jpeg

Девушка 1.bmp

Девушка 2.bmp

Рис. 2. Вторая группа тестовых изображений

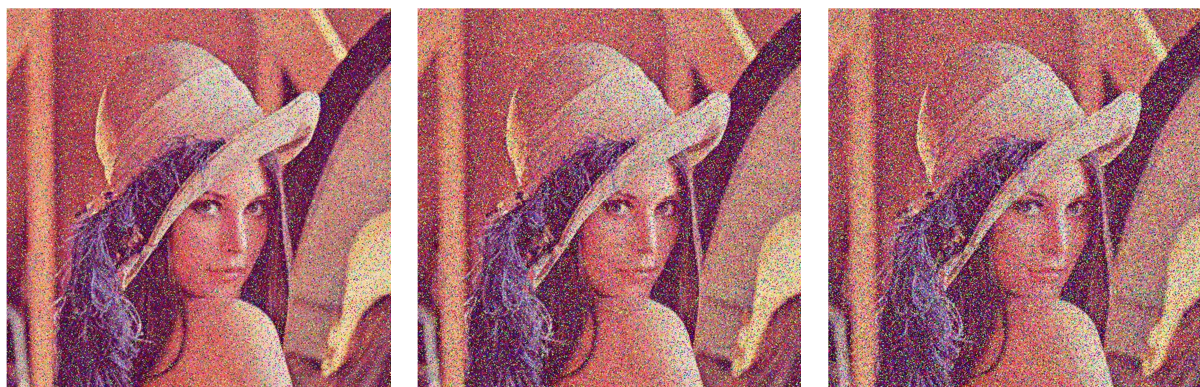
В третьей группе изображений (рис. 3) имеются искажения типа соли и перца (salt & pepper) с указанием доли внесенных искажений.



lena.jpeg

lena_0.05.jpeg

lena_0.1.jpeg



lena_0.15.jpeg

lena_0.2.jpeg

lena_0.25.jpeg

Рис. 3. Третья группа тестовых изображений

И в четвертой группе изображений (рис. 4) присутствуют артефакты строб-эффектов, описание которых можно найти в [12].



Рис. 4. Четвертая группа тестовых изображений

Начальный анализ каждой из групп изображений базируется на анализе каждого отдельного изображения. Этот анализ связан с загрузкой растрового изображения (Image), представлении его в цветовом пространстве RGB с последующим преобразованием и переходом к другим цветовым пространствам – HSV, Lab, XYZ, NTSC, YCbCr.

Схема преобразований цветовых пространств представлена на рис. 5.

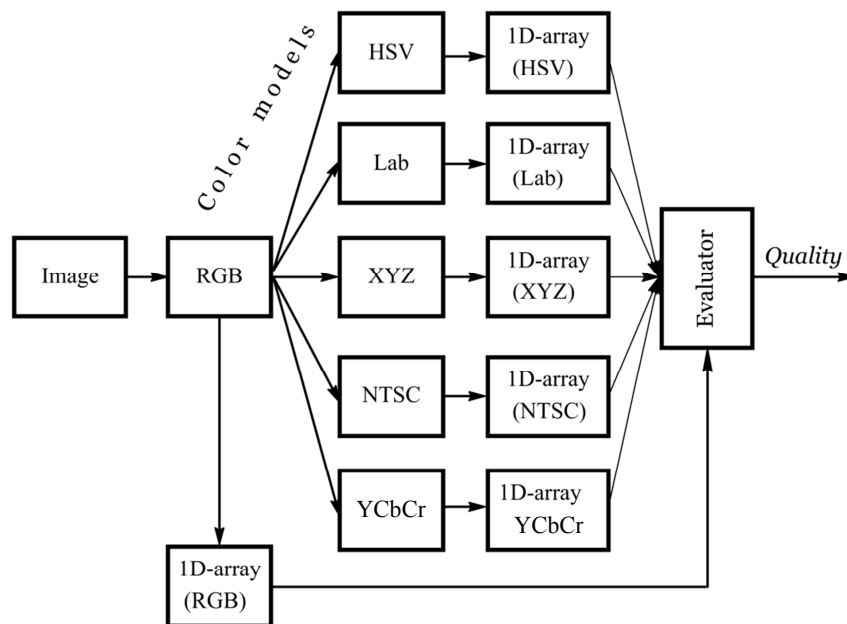


Рис. 5. Концептуальная схема преобразования цветовой модели RGB

На рис. 5 обозначение 1D-аrray есть результат преобразования трехмерного массива в одномерный массив пикселей в соответствии с рассматриваемыми цветовыми пространствами. Оценка качества загруженного изображения Image выполняется в блоке Evaluator, который определяет качество изображения *Quality* в числовой форме в виде вещественного числа. Схему рис. 5 можно рассматривать как модуль, который будет использоваться при циклической обработке группы изображений. В блоке Evaluator выполняются расчеты статистических показателей между каждой цветовой моделью и базовой моделью RGB. Это, в первую очередь, следующие показатели:

– максимальная ошибка *Emax*:

$$Emax = \max_{1 \leq k \leq n} \{|Y_{rk} - Y_{ck}|\}; \quad (1)$$

– средняя ошибка E_{aver} :

$$E_{aver} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Y_{rk} - Y_{ck}|; \quad (2)$$

– среднеквадратическая ошибка E_{ase} :

$$E_{ase} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Y_{rk} - Y_{ck}|^2}, \quad (3)$$

где Y_{rk} , Y_{ck} – одномерные массивы цветовой модели RGB и преобразованной цветовой модели (HSV, Lab, XYZ, NTSC, YCbCr); n – размер одномерных массивов, число пикселей исследуемого изображения.

Кроме ошибок (1)–(3) предлагается использовать коэффициент вариации C_v абсолютной разницы массивов Y_{rk} , Y_{ck} в соответствии с определением [24, 25] в виде отношения стандартного отклонения к среднему арифметическому пикселей разницы массивов, а также коэффициент детерминации R^2 .

Оценку связи Prs между Y_{rk} и Y_{ck} находим с помощью коэффициента ранговой корреляции Пирсона [24, 25]. Поскольку значения R^2 и Prs принадлежат отрезку $[-1; 1]$, то в расчетах выполнено приведение к отрезку $[0; 1]$ по формулам

$$R^2 = \frac{R^2 + 1}{2}; \quad Prs = \frac{Prs + 1}{2}. \quad (4)$$

В результате циклической обработки цветковых моделей значения статистических показателей сохранялись в контейнеры, например, с именами $V1$ (максимальные ошибки), $V2$ (средние ошибки), $V3$ (среднеквадратические ошибки), $V4$ (коэффициенты вариации), $V5$ (коэффициенты детерминации), $V6$ (коэффициенты ранговой корреляции). Для дальнейших расчетов принимались следующие значения каждого из контейнеров:

$$mV_i = \min_{\forall k} V_i,$$

где k – индексация размерности контейнеров V_i , $i = 1, 6$.

Итоговую величину оценки качества $Quality$ определяем по следующему выражению:

$$Quality = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 V_i + \frac{1}{V5 + eps} + V6, \quad (5)$$

где eps – малая положительная величина порядка 10^{-16} .

Расчетные формулы (4) и (5) получены в результате экспериментальных исследований и эвристических предположений.

Все приведенные формулы позволяют использовать их практически в любой системе программирования, где предусматривается чтение графических файлов распространенных форматов – .bmp, .png, .jpeg (.jpg), .jpf (Jpeg 2000), .tiff (.tif).

Очевидно, что усреднение величины $Quality$ (метрики качества) приводит к выравниванию получаемых значений, когда значения меняются без резких перепадов. Но это не является серьезным препятствием для современных вычислительных средств в процессе последующего ранжирования группы изображений, т. е. их сортировки по возрастанию значений $Quality$. При этом меньшие значения метрики изображения соответствуют его более качественному восприятию. Таким образом, нами был описан функционал блока Evaluator, представленного на рис. 5.

Результаты экспериментального исследования

В соответствии с описанным алгоритмом расчета метрик ($Quality$) изображений была разработана программа, в соответствии с которой здесь предлагаются результаты обработки тестовых изображений, представленных на рис. 1–4. Эти результаты сведены в табл. 1–4, где они проранжированы по величине $Quality$.

Таблица 1

Результаты оценки качества первой группы тестовых изображений

Имя графического файла	Размер изображения, W × H пикселей	Quality (оценка качества)
img168.bmp	480 × 720	2,537941665
img107.bmp	480 × 720	2,538593912
img89.bmp	480 × 720	2,539512781
img1.bmp	480 × 720	2,539996022
img154.bmp	480 × 720	2,557317004
img138.bmp	480 × 720	2,557495761

По данным табл. 1 наиболее качественное изображение относится к img168.bmp, менее качественное, соответственно, – img138.bmp. Для этой группы изображений, как видно из рис. 1, результат вполне соответствует визуальному восприятию.

Таблица 2

Результаты оценки качества второй группы тестовых изображений

Имя графического файла	Размер изображения, W × H пикселей	Quality (оценка качества)
A. Делон.jpeg	454 × 338	2,517179412
Девушка 1.bmp	444 × 338	2,559873106
Девушка 2.bmp	444 × 336	2,560627690

Несмотря на некоторые различия в размерах изображений, можно считать, что изображение A. Делон.jpeg является более качественным по сравнению с остальными изображениями второй группы. Визуально такое решение не совсем очевидно.

Таблица 3

Результаты оценки качества третьей группы тестовых изображений

Имя графического файла	Размер изображения, W × H пикселей	Quality (оценка качества)
lena.jpg	512 × 512	2,485204422
lena_0.05.jpg	512 × 512	2,489409720
lena_0.1.jpg	512 × 512	2,496873669
lena_0.15.jpg	512 × 512	2,502811663
lena_0.2.jpg	512 × 512	2,506858274
lena_0.25.jpg	512 × 512	2,512953788

Результаты из табл. 3, возможно, соответствуют визуальным восприятиям изображений, одно из которых (lena.jpg) является стандартным, а остальные с шумами типа salt & pepper. При этом величина, например 0,05, это 5 % от числа всех пикселей, подверженных шуму, величина 0,25 соответствует 25 %. Следует также отметить, что горизонтальное и вертикальное разрешение изображений из табл. 3 составляет 96 точек на дюйм.

Таблица 4

Результаты оценки качества четвертой группы тестовых изображений

Имя графического файла	Размер изображения, W × H пикселей	Quality (оценка качества)
Strobe_1.jpg	420 × 450	2.724683722
Strobe_3.jpg	450 × 300	2.741842024
Strobe_2.jpg	281 × 300	2.765243917
Strobe_4.jpg	300 × 217	2.814810280

Для четвертой группы достаточно сложно определить наиболее качественное изображение визуально, поэтому в этом случае актуальным способом определения следует признать компьютерную обработку подобных изображений.

Заключение

В статье рассмотрены методы и приемы оценки качества группы растровых изображений и показана их состоятельность на ряде примеров. Преимуществом разработанной методики

оценки качества изображений является ее надежная программная реализация. Предложенный подход в некоторых случаях может быть альтернативой существующим алгоритмам неререференсной оценки качества изображений [15–17] в плане оперативности программной реализации и доступности вычислительных операций. Тем не менее, авторы отдают себе отчет в том, что рассмотренный в определенной степени эвристический подход не может быть включен в ранг неререференсных методов оценки качества растровых изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Э. Э., Савкина А. В. Компьютерная графика: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. 88 с.
2. Дёмин А. Ю. Основы компьютерной графики: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. 191 с.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
4. Нуштаева А. В., Савкина А. В. Лабораторный практикум по компьютерной графике: учеб. пособие. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 132 с.
5. Никулин Е. А. Компьютерная графика. Модели и алгоритмы: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018. 708 с.
6. Матвеев Д. В., Седов А. Г. и др. Оценка качества цифровых изображений и видеоданных: учеб.-метод. пособие. Ярославль: Изд-во ЯрГУ, 2018. 76 с.
7. Ерофеев В. Т., Афонин В. В., Касимкина М. М. Влияние пластификаторов на изменение цветности ЛКМ под воздействием агрессивных сред // Лакокрасочные материалы и их применение. 2011. № 6. С. 38–41.
8. Черушова Н. В., Митина Е. А., Касимкина М. М., Афонин В. В., Ерофеев В. Т. Оценка изменения декоративных свойств лакокрасочных материалов под воздействием эксплуатационных факторов // Вестн. Мордов. ун-та. 2008. № 4. С. 124–127.
9. Зоткина М. М., Зоткин В. Б., Емельянов Д. В., Захарова Е. А., Черушова Н. В., Ерофеева И. В., Афонин В. В. Изменение декоративных свойств пигментированных цементных композитов в результате воздействия биологических агрессивных сред // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Саранск, 23–25 декабря 2015 г.). Отв. ред. В. Т. Ерофеев. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. С. 221–224.
10. Афонин В. В., Ерофеева И. В., Зоткина М. М., Емельянов Д. В., Подживотов Н. Ю. Эталонная оценка качества изображений композиционных материалов, подверженных воздействию положительных и отрицательных температур // Вестн. Моск. гос. строит. ун-та. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 83–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.83-93.
11. Бабкин П. С., Павлов Ю. Н. Анализ и сравнение объективных методов оценки качества изображений // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 9. С. 203–215.
12. Аль-Аскарри М. А., Федосин С. А. Неререференсная оценка строб-эффектов на растровых изображениях с двойной оптимизацией параметра алгоритма Кэнни // Естественные и технические науки. 2018. № 11 (125). С. 424–428.
13. Афонин В. В., Савкина А. В., Никулин В. В. Оценка устойчивости структурно-яркостных свойств при цифровой обработке изображений // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 2. С. 39–46. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-39-46.
14. Yeganeh H., Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images // IEEE Transactions on Image Processing. 2013. V. 22. Iss. 2. P. 657–667. DOI: 10.1109/tip.2012.2221725.
15. Mittal A., Soundararajan R., Bovik A. C. Making a Completely Blind Image Quality Analyzer // IEEE Signal Processing Letters. March 2013. V. 22. N. 3. P. 209–212.
16. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. No-reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain // IEEE Transactions on Image Processing. 2012. N. 21 (12). P. 4695–4708.
17. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. Referenceless image spatial quality evaluation engine // Proc. 45th Asilomar Conf. Signals Syst. Comput. Nov. 2011. P. 1–5.
18. Gu K., Zhou J., Zhai G., Lin W., Bovik A. C. No-reference quality assessment of screen content pictures // IEEE Transactions on Image Processing. August 2017. V. 26. N. 8. P. 4005–4017.
19. Pambrun J. F., Noumeir R. Limitations of the SSIM quality metric in the context of diagnostic imaging // Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing. 2015. P. 2960–2963.
20. Старовойтов В. В. Уточнение индекса SSIM структурного сходства изображений // Информатика. 2018. Т. 15. № 3. С. 41–55.
21. Ma J., Fan X., Yang S. X., Zhang X., Zhu X. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization Based Fusion for Underwater Image Enhancement. 2017. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/201703.0086/v1> (дата обращения: 12.04.2021).
22. Wang Z., Bovik A. C. Modern image quality assessment // Synthesis Lectures on Image, Video, and Multimedia Processing. 2006. V. 2. N. 1. P. 1–156.
23. Zhou W., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity // IEEE Transactions on Image Processing. April 2004. V. 13. Iss. 4. P. 600–612.

24. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
25. Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М. и др. Математическая статистика: учеб. для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. Вып. XVII. 424 с.

Статья поступила в редакцию 30.07.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Васильевич Афонин – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва; Россия, 430005, Саранск; vvafonin53@yandex.ru.

Анастасия Васильевна Савкина – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва; Россия, 430005, Саранск; av-savkina@yandex.ru.

Владимир Валерьевич Никулин – канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва; Россия, 430005, Саранск; nikulinvv@mail.ru.



ALGORITHM AND METHODS OF RANKING GROUP OF BITMAP IMAGES

V. V. Afonin, A. V. Savkina, V. V. Nikulin

*National Research Ogarev Mordovia State University,
Saransk, Republic of Mordovia, Russian Federation*

Abstract. The article presents an algorithm and a methodology of ranking a group of raster images by using the criterion of their expected quality. Ranking refers to the evaluation of a sample of bitmap images in a descending order of their quality, the image quality assessment being performed on the basis of a number of statistical parameters, such as coefficients of variation, determination, rank correlation index, as well as errors (absolute maximum error, average error, average quadratic error). The differences between the images are based on converting a full-color RGB image into HSV, Lab, NTSC, XYZ, YCbCr color models, which are represented as one-dimensional pixel matrices. The colour model RGB is taken as a reference. In relation to it, the proposed statistical characteristics of other color models are compared, any object of each color model being compared with the base model - an RGB image. Based on this comparison, all images of a given group are analyzed independently of each other. Image quality assessment is performed in a module that can be used to cycle through multiple images and is represented in numerical form as a real number. One of the module blocks calculates the statistical parameters between each color model and the base RGB model. After receiving the values of the quality scores they are ranked according to their values. As a result, an image with a higher or lower scene quality can be determined. Images with blocking artifacts, noisy images of the salt & pepper type, and images with strobe effects artifacts were considered as test images.

Key words: color spaces, colour models, bitmap images, coefficients of variation, determinations, rank correlation, maximum, average, mean-square errors.

For citation: Afonin V. V., Savkina A. V., Nikulin V. V. Algorithm and methods of ranking group of bitmap images. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2021;4:58-67. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-58-67.

REFERENCES

1. Aleksandrov E. E., Savkina A. V. *Komp'yuternaia grafika: uchebnoe posobie* [Computer graphics: tutorial]. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2005. 88 p.
2. Demin A. Iu. *Osnovy komp'yuternoï grafiki: uchebnoe posobie* [Fundamentals of computer graphics: tutorial]. Tomsk, Izd-vo Tom. politekhn. un-ta, 2011. 191 p.
3. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. University of Tennessee, 2008. 976 p. (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii. M.: Tekhnosfera, 2012. 1104 s.).
4. Nushtaeva A. V., Savkina A. V. *Laboratornyi praktikum po komp'yuternoï grafike: uchebnoe posobie* [Laboratory workshop on computer graphics: tutorial]. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2018. 132 p.
5. Nikulin E. A. *Komp'yuternaia grafika. Modeli i algoritmy: uchebnoe posobie* [Computer graphics. Models and algorithms: tutorial]. Saint-Peterburg, Lan' Publ., 2018. 708 p.
6. Matveev D. V., Sedov A. G. i dr. *Otsenka kachestva tsifrovyykh izobrazhenii i videodannykh: uchebno-metodicheskoe posobie* [Assessment of quality of digital images and video data: training manual]. Iaroslavl', Izd-vo IarGU, 2018. 76 p.
7. Erofeev V. T., Afonin V. V., Kasimkina M. M. Vliianie plastifikatorov na izmenenie tsvetnosti LKM pod vozdeistviem agressivnykh sred [Influence of plasticizers on changing color of paintwork materials impacted by aggressive media]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*, 2011, no. 6, pp. 38-41.
8. Cherushova N. V., Mitina E. A., Kasimkina M. M., Afonin V. V., Erofeev V. T. Otsenka izmeneniia dekorativnykh svoystv lakokrasochnykh materialov pod vozdeistviem ekspluatatsionnykh faktorov [Assessment of changes in decorative properties of paints and varnishes under influence of operational factors]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*, 2008, no. 4, pp. 124-127.
9. Zotkina M. M., Zotkin V. B., Emel'ianov D. V., Zakharova E. A., Cherushova N. V., Erofeeva I. V., Afonin V. V. Izmenenie dekorativnykh svoystv pigmentirovannykh tsementnykh kompozitov v rezul'tate vozdeistviia biologicheskikh agressivnykh sred [Changing decorative properties of pigmented cement composites under exposure of biological aggressive environments]. *Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva: materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Saransk, 23–25 dekabria 2015 g.)*. Otvetstvennyi redaktor V. T. Erofeev. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2015. Pp. 221-224.
10. Afonin V. V., Erofeeva I. V., Zotkina M. M., Emel'ianov D. V., Podzhivotov N. Iu. Etalonnaia otsenka kachestva izobrazhenii kompozitsionnykh materialov, podverzhennykh vozdeistviu polozhitel'nykh i otritsatel'nykh temperatur [Reference assessment of quality of images of composite materials exposed to plus and minus temperatures]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2019, vol. 14, iss. 1, pp. 83-93. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.83-93.
11. Babkin P. S., Pavlov Iu. N. Analiz i sravnenie ob'ektivnykh metodov otsenki kachestva izobrazhenii [Analysis and comparison of objective methods for assessing image quality]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Bauman*, 2014, no. 9, pp. 203-215.
12. Al'-Askari M. A., Fedosin S. A. Nerefereentsnaia otsenka strob-effektov na rastrovyykh izobrazheniiakh s dvoinoi optimizatsiei parametra algoritma Kenni [Non-referential estimation of strobe effects on raster images with double optimization of parameter of Canny algorithm]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 11 (125), pp. 424-428.
13. Afonin V. V., Savkina A. V., Nikulin V. V. Otsenka ustoichivosti strukturno-iarkostnykh svoystv pri tsifrovoi obrabotke izobrazhenii [Assessing stability of structural and brightness properties in digital image processing]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naiia tekhnika i informatika*, 2021, no. 2, pp. 39-46. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-2-39-46.
14. Yeganeh H., Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, vol. 22, iss. 2, pp. 657-667. DOI: 10.1109/tip.2012.2221725.
15. Mittal A., Soundararajan R., Bovik A. C. Making a Completely Blind Image Quality Analyzer. *IEEE Signal processing Letters*, March 2013, vol. 22, no. 3, pp. 209-212.
16. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. No-reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, no. 21 (12), pp. 4695-4708.
17. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. Referenceless image spatial quality evaluation engine. *Proc. 45th Asilomar Conf. Signals Syst. Comput.*, Nov. 2011, pp. 1-5.
18. Gu K., Zhou J., Zhai G., Lin W., Bovik A. C. No-reference quality assessment of screen content pictures. *IEEE Transactions on Image Processing*, August 2017, vol. 26, no. 8, pp. 4005-4017.
19. Pambrun J. F., Noumeir R. Limitations of the SSIM quality metric in the context of diagnostic imaging. *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing*, 2015, pp. 2960-2963.
20. Starovoitov V. V. Utochnenie indeksa SSIM strukturnogo skhodstva izobrazhenii [Refinement of SSIM index of image structural similarity]. *Informatika*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 41-55.
21. Ma J., Fan X., Yang S. X., Zhang X., Zhu X. *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization Based Fusion for Underwater Image Enhancement*. 2017. Available at: <https://www.preprints.org/manuscript/201703.0086/v1> (accessed: 12.04.2021).
22. Wang Z., Bovik A. C. Modern image quality assessment. *Synthesis Lectures on Image, Video, and Multimedia Processing*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 1-156.

23. Zhou W., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, April 2004, vol. 13, iss. 4, pp. 600-612.

24. Kobzar' A. I. *Prikladnaia matematicheskaia statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 816 p.

25. Goriainov V. B., Pavlov I. V., Tsvetkova G. M. i dr. *Matematicheskaja statistika: uchebnik dlja vuzov* [Mathematical statistics: textbook for universities]. Pod redaktsiei B. C. Zarubina, A. P. Krishchenko. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2008. Iss. XVII. 424 p.

The article submitted to the editors 30.07.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Afonin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Automated Systems of Data Processing and Control; National Research Ogarev Mordovia State University; Russia, 430005, Saransk; vvafoin53@yandex.ru.

Anastasia V. Savkina – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Automated Systems of Data Processing and Control; National Research Ogarev Mordovia State University; Russia, 430005, Saransk; av-savkina@yandex.ru.

Vladimir V. Nikulin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems; National Research Ogarev Mordovia State University; Russia, 430005, Saransk; nikulinvv@mail.ru.

