

ГОЛУБ Ю.И., СТАРОВОЙТОВ В.В.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗЛОМОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Государственное научное учреждение "Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси"
г. Минск, Республика Беларусь

Рассматривается задача вычисления количественной оценки качества цифровых изображений изломов металлических объектов, зарегистрированных фотоаппаратом и цифровым микроскопом. Оценка качества выполняется в отсутствие эталонных изображений. В статье представлен подход, в основе которого лежит вычисление локальных оценок с последующим анализом их распределения. Исследованы разные варианты оценочных функций для резкости, яркости и контраста, описанные в отечественной и зарубежной литературе. Отобраны те из них, распределение которых унимодально. Показано, что среднее локальных оценок является приемлемой обобщающей характеристикой качества изображения, если они имеют нормальное (гауссово) распределение. В этом случае среднее является одним из его параметров. В ином случае более точными количественными характеристиками качества изображения могут служить параметры распределения Вейбулла. Предложенный подход позволяет более объективно делить множество изображений анализируемых объектов на две группы – имеющие удовлетворительное или неудовлетворительное качество для выполнения экспертных исследований по изображениям.

Ключевые слова: цифровое изображение, количественная оценка качества изображения, излом металла, распределение Вейбулла, нормальное распределение

Введение

С развитием информационных технологий и увеличением количества цифровых изображений растет потребность в их хранении, передаче и обработке. Исследователи активно работают над разработкой функций, которые могут количественно оценить качество цифрового изображения (*image quality assessment, IQA*) в различных условиях.

Актуальность автоматической оценки качества цифровых изображений обусловлена следующими причинами: необходимость высокого уровня точности и хорошей детализации на цифровых изображениях в таких областях деятельности человека, как медицинская диагностика, контроль качества на производстве, проведение научных экспериментов, оптимизация сельскохозяйственных процессов и т. д.; высокий темп роста количества цифровых изображений, которые ежедневно регистрируются; визуальный анализ больших баз цифровых изображений трудоемкий и дорогостоящий процесс; сокращение объемов занимаемой памяти для хранения данных и времени, затрачиваемое человеком-экспертом на визуальную оценку.

Как показывают эксперименты, для разных искажений, баз данных и классов изображений необходимо подбирать свои функции оценки качества или индивидуально настраивать существующие функции [1–4]. Один из вариантов оценки качества изображений выполняется с использованием эталона (сравнительные оценки, *full-reference measures, FR*), т. е. на входе принимаются эталонное и обработан-

ное (искаженное) изображения, на выходе выдается либо скалярное значение, обозначающее общее визуальное качество, либо пространственная карта, обозначающую локальное качество каждой области изображения [1], [5]. Сравнительные оценки (*FR*) целесообразно использовать при решении следующих задач: передача изображений, сжатие изображений, т. е. когда есть исходный образец, с которым можно сравнивать преобразованный вариант изображения. На практике чаще всего эталон отсутствует, поэтому используются безэталонные подходы для оценивания изображения (абсолютные, *no-reference measures, NR*) [1–3, 6].

В рамках нашего исследования выполнялась оценка изображений изломов металлических объектов, т. е. разбиение множества изображений на два класса – удовлетворительное и неудовлетворительное качество. Изображения, относящиеся ко второму классу, не сохраняются в базе данных, что экономит место в хранилище и время, затрачиваемое экспертом на свою работу. Изображения удовлетворительного качества подлежат анализу и последующему вычислению различных характеристик изломов для проведения экспертизы. На рисунке 1 представлены изображения двух классов качества. Их визуальный анализ показывает, что на изображениях неудовлетворительного качества металлические объекты слишком размыты, либо темные, либо имеется переосвет.

В последнее время растет количество научных статей и исследований, в которых для оценки качества цифровых изображений предлагается ис-

пользовать методы машинного обучения (МО), где для обучения модели используются размеченные данные – цифровые изображения разного качества и их субъективные оценки экспертов. Однако этот процесс трудоемкий и длительный из-за того, что требуется большая база изображений с соответствующими визуальными оценками. В рамках данного исследования и решаемой прикладной задачи не было возможности использовать размеченный набор изображений изломов металлических объектов в достаточном количестве для обучения того или иного метода МО.

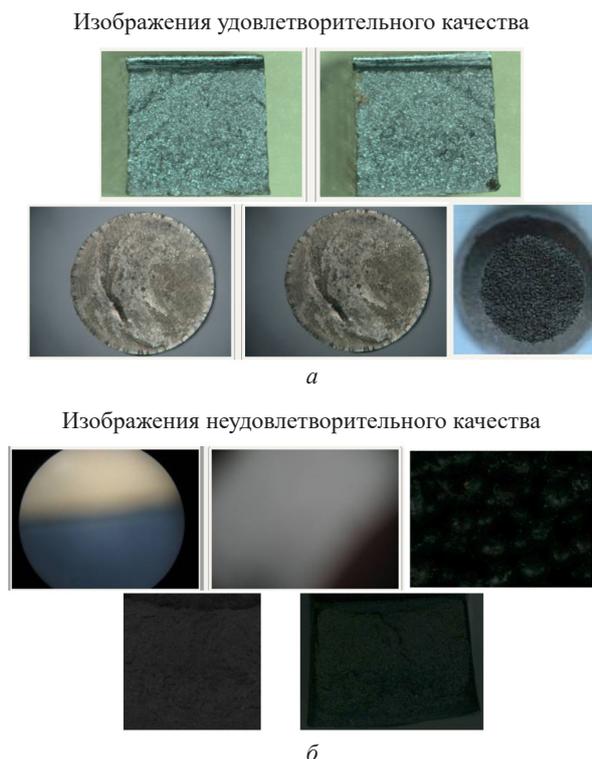


Рисунок 1. Примеры изображений изломов металлических объектов, предъявляемых для анализа при регистрации в базе данных

Постановка задачи: разработать метод автоматического определения качества цифрового изображения для оперативного исключения неудовлетворительных снимков на этапе их регистрации в базе данных. Изображения изломов металлических объектов фиксируются фотоаппаратом или цифровым микроскопом. К изображениям неудовлетворительного качества относятся очень темные, светлые и размытые.

Результаты экспериментальных исследований

Регистрируемые изображения являются цветными, представленными в модели RGB и в формате jpg. Они имеют размеры 3072×2304, либо 2560×1920 пикселей. В соответствии с решаемой задачей вы-

полнялась безэталонная оценка качества. При таком подходе изображения не сравниваются друг с другом, а оцениваются без эталона по мере их загрузки в базу данных.

Для оценки качества используются полутоновые изображения, поэтому для преобразования цветных изображений была использована стандартная функция Матлаба `rgb2gray`. Данный подход показал лучшие результаты по сравнению с поканальной обработкой изображений, т. к. позволяет сохранить больше деталей изображения и более точно передать его цветовую гамму.

Для экспериментов было отобрано 105 изображений, которые были разделены на две группы. Первая группа состоит из двадцати одного снимка неудовлетворительного качества (пример на рисунке 1б). Вторая группа – это снимки удовлетворительного качества, т. е. изломы на снимках хорошо видны, нет искажений контраста и резкости (пример на рисунке 1а). Далее изображения были сгруппированы так, чтобы на графиках значения количественных оценок качества для плохих снимков располагались вначале горизонтальной оси (т. е. номера у изображений с 1 по 21), а за ними следовали значения для снимков удовлетворительного качества (номера изображений с 22 по 105).

На первом этапе экспериментов была исследована применимость стандартных функций безэталонной оценки качества изображений, представленных в программной среде Матлаб – BRISQUE, NIQE и PIQE. Эти функции используются, когда нет эталонных изображений и выполняется оценка единственного снимка. Однако в данном случае для изображений изломов металлических объектов эти функции показали плохие результаты. На рисунке 2 представлены графики трех количественных оценок качества, где по вертикальной оси – значения количественной оценки, по горизонтальной оси – номера изображений изломов. Для отображения графиков оценочных функций, их значения нормализованы в диапазон [0; 1] следующим образом:

$$y = (x - \min(x)) / (\max(x) - \min(x)), \quad (1)$$

где x – исходное множество данных, y – преобразованное множество данных, \min и \max – минимальное и максимальное значения.

Анализ графиков на рисунке 2 показал, что значения оценочных функций BRISQUE, NIQE и PIQE не соответствуют визуальному анализу и определить порог для разделения изображений на два класса качества не представляется возможным. Поэтому их использовать не оправданно для решения данной прикладной задачи. Более тонкая настройка моделей для оценок BRISQUE и NIQE требует большую базу изображений изломов металлов и их визуальные оценки в диапазоне [0; 100].



Рисунок 2. Графики оценочных функций *BRISQE*, *NIQE* и *PIQE* для 105 изображений изломов металлических объектов

Далее было выполнено исследование следующих безэталонных оценочных функций качества: Conc, Conl, Cont, Curv Gllv, Grae, Begh, Bish, Bren, Ebcm, Fft, Fish, Fus, Glvm, Gord, Helm, Kadn, Kurt, Lapd, Lapl, Lapm, Loen, Locc, Mlv, Shar, Spar, Stdk,

Svdb, Teng, Vola, Wavs. Эти функции подробно описаны в источниках литературы и используются для оценки контраста, яркости и резкости изображения без использования эталона [1–4, 7]. Данная статья является продолжением исследований, представленных в [1].

Большинство безэталонных оценочных функций качества вычисляет среднее арифметическое значение локальных оценок, полученных в окрестности каждого пикселя анализируемого изображения или в блоках заданного размера. На рисунке 3 представлены гистограммы локальных значений для нескольких оценочных функций, которые были вычислены для одного и того же изображения излома. Как видно, все они имеют разную форму (унимодальную со сдвигом к вертикальной оси или мультимодальную), которая визуальнo не соответствует графику нормального распределения данных. Кроме того, было проведено восемь тестов на нормальность данных, которые подробно описаны в разделе 3.6 [1]. Результаты также показывают не соответствие локальных оценок качества, используемых в экспериментах, нормальному распределению. Таким образом, вычислять в качестве глобальной оценки среднее значение, может быть, некорректно.

Ранее авторами [1, раздел 3.5] был представлен новый подход к оценке качества единственного изображения, т. е. без сравнения с эталонным, на базе параметров распределения Вейбулла. В данной статье представлен пример использования, описанного подхода, для решения практической задачи по оценке качества цифровых изображений изломов металлических объектов на этапе их регистрации в базе данных с целью дальнейшего использования в экспертизе.

Количественные оценки качества должны быстро вычисляться, т. к. для анализа загружаются цветные изображения изломов металлических объектов большого размера. Ускорить вычисления можно за счет уменьшения изображений, однако в таком случае теряется точность оценки качества. Некоторые оценочные функции качества долго вычисляются (от 3 до 50 сек для одного изображения), что недопустимо для процедуры регистрации изображения в базе. Такие оценки были исключены и не использовались: Bren, Ebcm, Fft, Fish, Gord, Spar, Svdb.

В соответствии с подходом описанным в [1], предлагается выбор оценки качества изображений проводить в несколько этапов в виде дерева решений. На первом этапе необходимо отобрать оценки, которые для каждого изображения определенного класса (например, изображения изломов металлов, медицинские или космические снимки) имеют унимодальное распределение локальных значений, вычисленных в заданных окрестностях или областях для одного изображения.

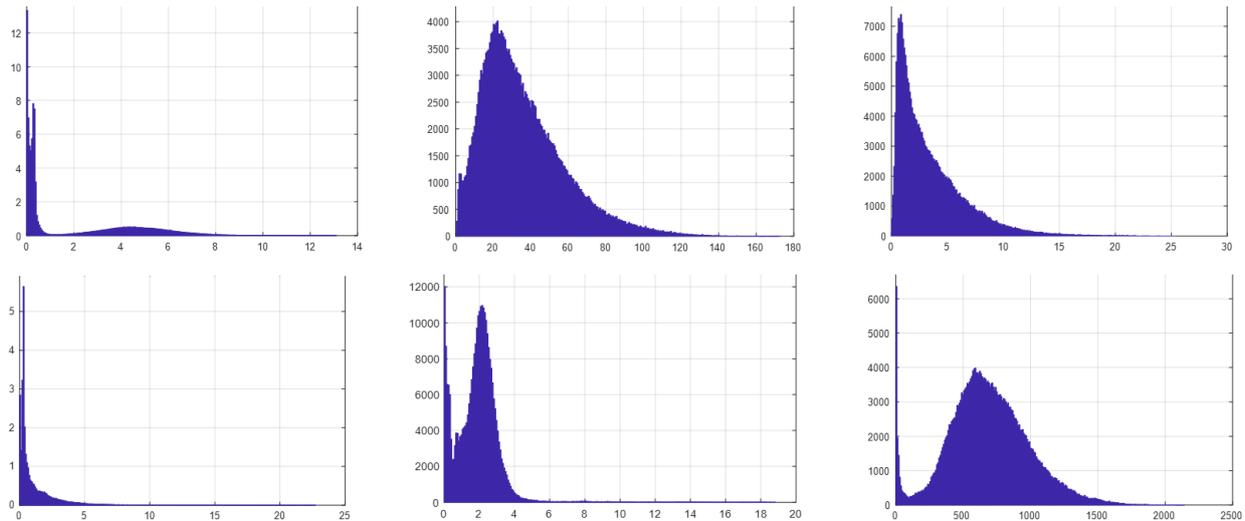


Рисунок 3. Гистограммы локальных значений разных оценочных функций качества для одного изображения излома

Далее необходимо оценить коэффициент асимметрии (*skewness*), который характеризует геометрическую форму распределения локальных оценок:

$$A_s = \mu_3 / \sigma^3, \quad (2)$$

где μ_3 – центральный момент третьего порядка и σ – среднеквадратическое отклонение.

При левостороннем распределении гистограммы коэффициент асимметрии принимает значения меньше 0, т. е. распределение считается асимметричным и имеет «хвост» в левой части

распределения. При правостороннем распределении A_s принимает значения больше 0. К тому же, чем больше его значение по модулю, тем сильнее наклон, а чем меньше A_s , тем ближе распределение к нормальному. Гистограммы локальных значений оценок качества должны быть унимодальны, т. к. при нескольких вершинах коэффициент асимметрии плохо ее характеризует. На рисунке 4 представлены такие примеры – мультимодальное распределение имеет значение коэффициента асимметрии близкое к 0.

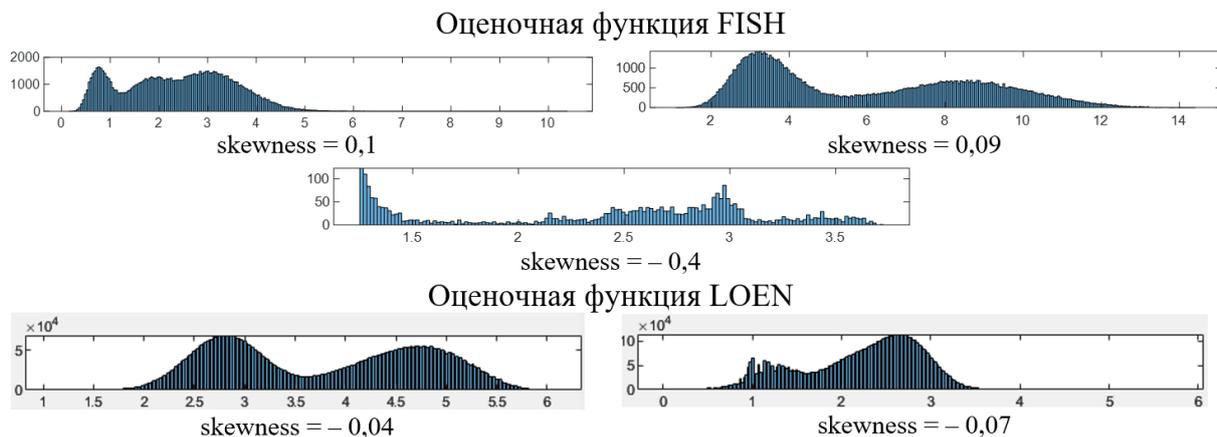


Рисунок 4. Гистограммы распределения локальных значений оценок FISH и LOEN (коэффициент асимметрии близок к 0, однако имеет мультимодальное распределение)

Для обобщения локальных значений оценок качества в виде глобальной оценки стоит использовать параметры распределения Вейбулла, если значения A_s принадлежат диапазону [1; 50]. Если значение A_s для гистограммы локальных оценок находится в диапазоне [0; 1), то для глобальной оценки целесообразно использовать среднее арифметическое

(mean), т. е. первый параметр нормального распределения. Если форма гистограммы локальных оценок мультимодальна, то целесообразно использовать другую функцию для оценки качества изображения. Такой подход будет корректным математически, т. к. если локальные значения имеют на гистограмме их распределения два и более пиков, то аппроксимация

любым унимодальным распределением даст ошибки. Для вычисления асимметрии использовалась стандартная функция Матлаба *skewness*.

В качестве глобальной оценки предлагается использовать параметры распределения Вейбулла, т. к. экспериментальный анализ показал, что оно обладает более гибкой формой функции плотности вероятности, чем нормальное [2]. Распределение Вейбулла также используется в самых разных прикладных областях, например, для контроля качества в медицинских исследованиях и проектировании, при прогнозировании срока службы приборов, анализе и т. д.

Существует два варианта описания распределения Вейбулла: трехпараметрический (используются параметры масштаб (*scale*), форма (*form*) и порог T) и двухпараметрический, в котором $T = 0$. В рамках данного исследования используется двухпараметрическое распределение, которое описывается двумя параметрами: *scale* α и *form* β . Распределение Вейбулла определяется выражением:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-(x/\alpha)^\beta}, \quad (3)$$

где $x > 0$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$.

Для анализа количества вершин распределения локальных значений оценок качества был разработан следующий алгоритм:

- а) построить гистограмму данных;
- б) выполнить ее сглаживание три-пять раз в скользящем окне размером 5–8 % от числа интервалов (бинов) гистограммы;

в) найти и проанализировать локальные максимумы сглаженной гистограммы. Близко расположенные вершины или неглубокие впадины (минимумы) между ними можно не учитывать либо можно выполнить дополнительное сглаживание;

г) если имеется один максимум, то распределение данных унимодально, иначе – мультимодально.

Результаты применения алгоритма представлены на рисунке 5. Исходные гистограммы имеют множество несущественных локальных максимумов, но далее большинство из них сглаживается. На рисунке 5а и 5б показано, что данные имеют унимодальное распределение (очевидно не гауссово), на рисунке 5в – бимодальное.

На рисунке 6 представлены графики для четырех оценочных функций, полученных для 105 цифровых изображений изломов металлических объектов (первое двадцать одно изображение имеет визуально неудовлетворительное качество, остальные – удовлетворительное). Оценочные функции Begh, Grae, Lamp, Shar лучше остальных соответствовали субъективным оценкам изображений. Параметры распределения Вейбулла предпочтительнее использовать для обобщения локальных значений оценочных функций., т. к. это дает возможность изображения разделить на два класса качества по выбранному порогу. Например, порог для функции Grae и параметра *scale* можно установить равным 0,4. Тогда как использование параметра *mean* (среднее) не позволяет разделить анализируемые изображения на два класса в соответствии с визуальной оценкой.

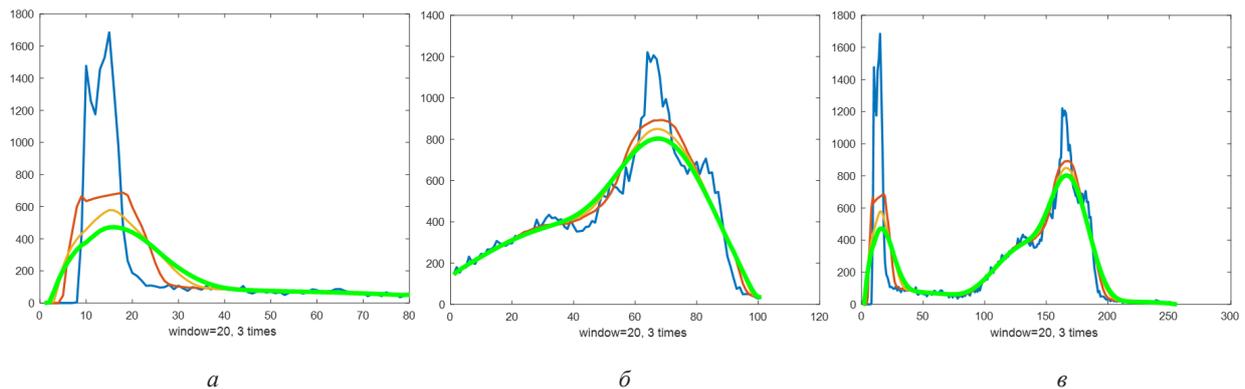


Рисунок 5. Исходные гистограммы распределений трех наборов данных (голубым цветом), гистограммы после трех операций сглаживания скользящим окном шириной в 20 единиц (зеленым)

На рисунке 7 представлены графики для количественной оценки качества Евст. В данном случае гистограммы локальных значений для всех анализируемых изображений имеют унимодальное распределение, однако

коэффициент асимметрии принимает значения в диапазоне [127, 2200]. Такую оценочную функцию не стоит использовать для решения поставленной задачи, т. к. она не позволяет изображения разделить на два класса.

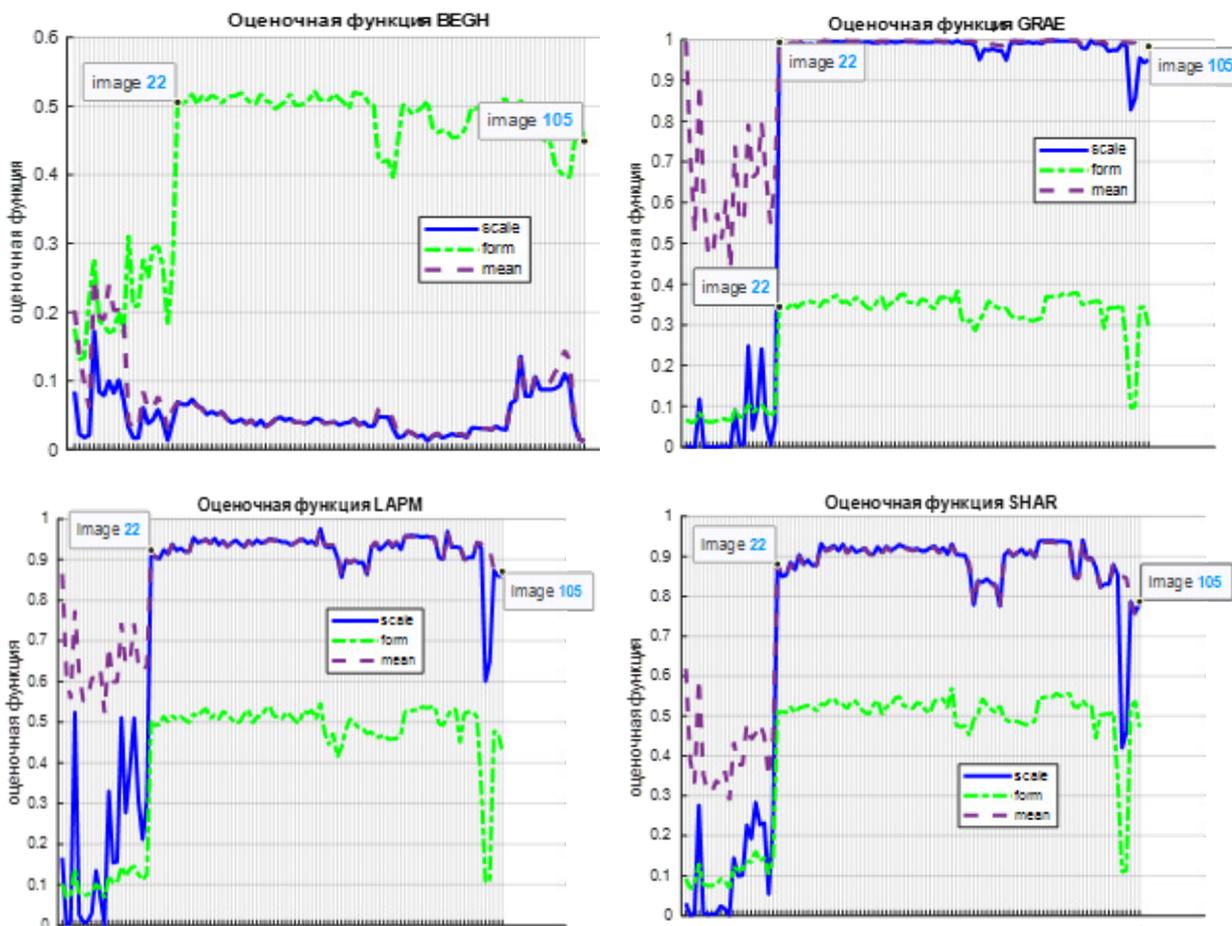


Рисунок 6. Графики количественных оценок качества Begh, Grae, Lamp, Shar для 105 изображений изломов металлических объектов

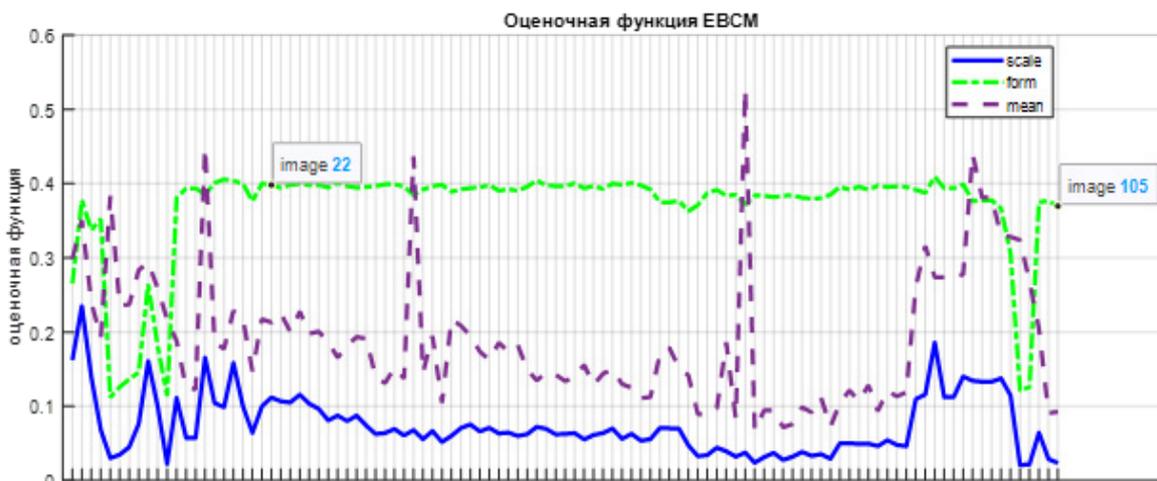


Рисунок 7. Графики глобальных оценок, вычисленных на основе локальных значений оценочной функции EBCM, которые не согласуются с визуальной оценкой

Заключение

Непрерывное развитие технологий требует более точных и эффективных методов оценки регистрируемых снимков. Как было показано в работе, подход на основе параметров распределения Вейбулла, предлагает новые возможности для автома-

тической оценки качества изображений и позволяет точнее аппроксимировать множество локальных значений. Экспериментальные исследования показали, что следующие комбинации количественных оценок качества и параметров распределения Вейбулла показали лучшие результаты для анализа изображений изломов металлических объектов на этапе

регистрации их в базе данных: form для Begh, scale для Grae, scale для Lapm, scale для Shar. Предлагается использовать указанные параметры распределений, вычисленные для локальных значений указанных оценочных функций, т. к. они лучше других позволяют разделить изображения на два класса – удовлетворительное и неудовлетворительное качество. Исключение из базы данных изображений неудовлетворительного качества позволяет сократить объ-

ем хранилища и экономить время специалистов, занимающихся последующим анализом. Разработка алгоритмов, способных автоматически определять качество изображений, позволяет улучшить производительность систем машинного обучения и компьютерного зрения. Это актуально в областях, где требуется обработка больших объемов данных, таких как медицинская диагностика, научные исследования и промышленность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голуб, Ю.И., Старовойтов В.В.** Оценка качества цифровых изображений. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2023. – 252 с.
2. **Kocić, J.** Image quality parameters: A short review and applicability analysis / J. Kocić, I. Popadić, B. Livada // Proceedings of the 7th Intern. Scientific Conf. on Defensive Technologies, Belgrade. – Belgrade, 2016. – P. 391-397.
3. **Xu, S.** No-reference/blind image quality assessment: a survey / S. Xu, S. Jiang, W. Min // IETE Technical Review. – 2017. – Vol. 34. – № 3. – P. 223-245.
4. **Dumic, E.** IQM2 – New image quality measure based on steerable pyramid wavelet transform and structural similarity index / E. Dumic, S. Grgic, M. Grgic // Signal, Image and Video Processing. – 2014. – V. 8. – № 6. – P. 1159–1168.
5. Terminals and subjective and objective assessment methods. Mean opinion score interpretation and reporting: ITU-T Rec. P.800.2 Series P. – 2016. – 18 p.
6. Methodologies for the subjective assessment of the quality of television images: ITU-R Rec. BT.500-15. – 2023. – 112 p.
7. **Pertuz, S.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus / S. Pertuz, D. Puig, M.A. Garcia // Pattern Recognition. – 2013. – Vol. 46. – № 5. – P. 1415–1432.

REFERENCES

1. **Golub, Y.I., Starovoitov, V.V.** Digital image quality assessment. – Minsk : UIIP NAN Belarus, 2023. – 252 p.
2. **Kocić, J.** Image quality parameters: A short review and applicability analysis / J. Kocić, I. Popadić, B. Livada // Proceedings of the 7th Intern. Scientific Conf. on Defensive Technologies, Belgrade. – Belgrade, 2016. – Pp. 391-397.
3. **Xu, S.** No-reference/blind image quality assessment: a survey / S. Xu, S. Jiang, W. Min // IETE Technical Review. – 2017. – Vol. 34. – № 3. – Pp. 223-245.
4. **Dumic, E.** IQM2 – New image quality measure based on steerable pyramid wavelet transform and structural similarity index / E. Dumic, S. Grgic, M. Grgic // Signal, Image and Video Processing. – 2014. – V. 8. – № 6. – Pp. 1159-1168.
5. Terminals and subjective and objective assessment methods. Mean opinion score interpretation and reporting: ITU-T Rec. P.800.2 Series P. – 2016. – 18 p.
6. Methodologies for the subjective assessment of the quality of television images : ITU-R Rec. BT.500-15. – 2023. – 112 p.
7. **Pertuz, S.** Analysis of focus measure operators for shape-from-focus / S. Pertuz, D. Puig, M.A. Garcia // Pattern Recognition. – 2013. – Vol. 46. – № 5. – Pp. 1415-1432.

GOLUB Y.I., STAROVOITOV V.V.

IMAGE QUALITY ASSESSMENT OF FRACTURES OF METALLIC OBJECTS

*United institute of informatics problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

The problem of calculating a quantitative quality assessment of digital images of metal object fractures recorded by a camera or a digital microscope is considered. Quality assessment is performed when the reference images are absent. The paper presents an approach based on calculation of local estimates followed by analysis of their distribution. Several variants for calculation of local estimates have been studied. Those whose distribution is unimodal were selected. It is shown that the average of local estimates is an acceptable general characteristic of image quality if they have a normal (Gaussian) distribution. In this case, the average is one of its parameters. Otherwise, the parameters of the Weibull distribution can serve as more accurate quantitative characteristics of image quality in general. The proposed approach divides more objectively the set of the analyzed images into two groups - those with satisfactory or unsatisfactory quality for performing expert studies using images. Examples of the quality assessment of different object images recorded at different resolutions are presented.

Keywords: digital image, quantitative assessment of image quality, metal fracture, Weibull distribution, normal distribution



Голуб Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Yuliya I. Golub, PhD, Associate Professor, Senior Research Fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus.



Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. Лауреат Государственной премии Республики Беларусь (2003г). Сфера научных интересов: обработка и анализ цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Опубликовал более 150 научных работ.

Starovoitov Valery, Doctor of Sciences and professor of computer science. He is a Principal research fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus). Award: the State Prize of the Republic of Belarus in science. Research interests of professor Starovoitov are processing and analysis of digital images obtained in different parts of the electromagnetic spectrum. He has published over 150 papers.

E-mail: valerys@newman.bas-net.by