

УДК 62-408.8 : 681.142

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОБРАЗ РАСТРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

© 2022 С.Р. Абульханов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 15.04.2022

В статье предлагается метод параметризации изображения шероховатой поверхности с помощью его информационного образа, который формировался на основе решения задачи ортогональной упаковки квадратов в квадрат. Было установлено, что информационный образ позволяет отслеживать любые изменения яркости пикселей на изображении контролируемой шероховатой поверхности. Метод позволяет визуально фиксировать утрату или изменения яркости группы пикселей изображения шероховатой поверхности. При этом группа пикселей может составлять менее 0,2 % анализируемого изображения. Для формирования информационного образа монохромного изображения использовалась его нормированная гистограмма. Каждое значение гистограммы рассматривались, как площадь квадратов, которые размещены ортогонально и без пересечений в квадрате площадью 2. Такая упаковка квадратов в квадрат рассматривалась, как информационный образ изображения. Для численного анализа информационного образа использовался параметр, который позволял отслеживать любые изменения количества и яркости пикселей изображения шероховатой поверхности.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, растровое изображение, информационный образ, упаковка квадратов в квадрат.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-97-104

ВВЕДЕНИЕ

Шероховатость поверхности является одним из основных параметров качества поверхности, определяющим многие эксплуатационные свойства деталей машин, работающих в различных условиях [1, 2]. Технологическая практика и результаты научных исследований позволили установить связь между параметрами шероховатости, регламентируемыми нормативными документами, и такими свойствами поверхности, как износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление усталостному разрушению и др.

Существующие параметры шероховатости, определяемые, например, стандартами, могут неоднозначно характеризовать контролируемую поверхность [3, 4]. По этой причине возможность однозначной численной оценки шероховатости по профилограмме поверхности вызывает затруднения [5, 6].

Известны работы [7–9], где значения профилограммы шероховатой поверхности рассматриваются как числовые ряды. Такие ряды анализируются с помощью методов спектральной корреляции. Недостатком этих методов является сложность установления взаимосвязей между полученными результатами и существующей Абульханов Станислав Рафаэлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: abulkhanov.sr@ssau.ru

практикой использования стандартных параметров шероховатости.

В ряде работ авторы определяли корреляцию фрагментов профилограммы [10] или фрагментов шероховатой поверхности [11] с помощью их масштабирования. Недостатками фрактальных методов для инженерного применения являются следующие факторы: сложно установить связь между фрактальной размерностью анализируемого множества и стандартными параметрами шероховатой поверхности; фрактальные размеры для самоаффинных фракталов не могут быть однозначно определены [12].

Статистические методы не позволяют выявлять наиболее уникальные характеристики фрагментов профилограммы, а также не позволяют оценить устойчивость определенных свойств контролируемой поверхности. Репрезентативная выборка для надежного расчета, например, коэффициента Херста должна содержать несколько тысяч измерений [13, 14].

Профилограмма шероховатости соответствует ограниченной базовой длине контролируемой поверхности (0,08–8 мм ГОСТ 25142–82 (СТ СЭВ 1156–78)). По этой причине параметры шероховатости, регламентируемые нормативными документами, характеризуют незначительную часть контролируемой поверхности. Это обстоятельство снижает достоверность прогнозирования эксплуатационных свойств детали по нормативным параметрам шероховатости.

Авторы [15, 16] отмечают, что разрабатываемые новые параметры шероховатости должны соответствовать стандартным параметрам шероховатости. Это означает, что параметры трехмерных микронеровностей шероховатой поверхности должны иметь сечения, профили которых соответствуют профилограммам.

Я предлагаю преобразовывать изображение шероховатой поверхности в информационный образ, с помощью которого вычисляется численный параметр, характеризующий структуру микронеровностей контролируемой поверхности.

Целью данной работы является создание визуальных и численных инструментов для анализа шероховатой поверхности путем преобразования ее изображения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Человеческое зрение воспринимает яркость света нелинейно и имеет ограниченную реакцию при очень высоких или очень низких интенсивностях наблюдаемого светового потока. Кроме того, человеческий глаз может одновременно плохо воспринимать мелкие детали изображения и изображение в целом [17]. По этим причинам человек не может уследить за малейшими изменениями изображения шероховатой поверхности.

С целью устранения влияния физиологических особенностей восприятия человеком двухмерных изображений предлагается использовать информационный образ. Для анализа растрового изображения шероховатой поверхности использовалось его преобразование, которое осуществлялось с помощью гистограммы. В дальнейшем будем рассматривать черно-бе-

лое изображение шероховатой поверхности (рис. 1) после её полирования.

Гистограмма была нормирована, для чего каждое значение гистограммы, соответствующее количеству пикселей определенной яркости, было отнесено к общему количеству пикселей изображения. Каждое значение нормированной гистограммы рассматривалось, как площадь квадрата. Количество таких квадратов всегда конечно, так как любая палитра компьютерной графики содержит конечное число цветов. В соответствии с работой [18] конечная последовательность квадратов, суммарная площадь которых равна единице, может быть размещена без перекрытия внутри квадрата 2. Я предлагаю такое расположение квадратов, каждая площадь которых соответствует нормированному количеству пикселей с определенной яркостью, рассматривать, как информационный образ изображения шероховатой поверхности.

Я считаю, что предлагаемый информационный образ не зависит от динамического диапазона используемой монохромной цветовой палитры компьютерной графики. Я полагаю, что эта информационная модель может быть использована для изучения изменений шероховатой поверхности во времени (при условии, что изображения одного и того же фрагмента поверхности, полученные через разные промежутки времени, будут иметь одинаковые размеры и будут выполнены в неизменных условиях).

На мой взгляд, среди параметров профиля, регламентируемых ГОСТ 2789–73, относительная длина эталонного профиля (tp) может рассматриваться как аналог информационного образа. В соответствии с международным стандартом ISO 1302-2001 *Indication of Surface Texture*

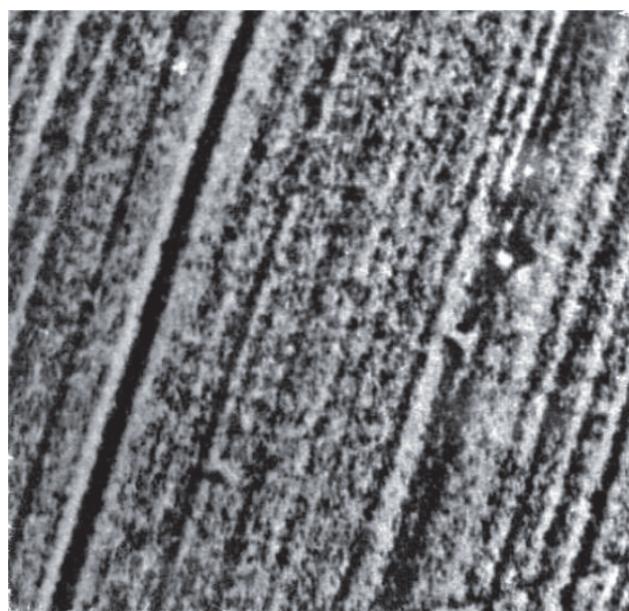


Рис. 1. Полированная поверхность образца из титана ($\times 100$)

параметр профиля $Rmr(c)$ также может рассматриваться, как аналог предлагаемого информационного образа.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использовали образец титанового сплава ВТ9 ($Ti - 6,8 Al - 3,2 Mo - 2,0 Zr - 0,3 Si$), поверхность которого была обработана полированием (рис.1). Изображение шероховатой поверхности имело размер 515×529 пикселей и было получено с помощью электронного микроскопа Кванта 200.

Человеческий глаз может воспринимать разные цвета в результате сложения трех основных цветов, каждый из которых имеет различную интенсивность [19]. По этой причине я выбрал цветовую палитру RGB , в которой разные цвета формируются аналогичным образом. Я построил гистограмму изображения, показанную на рис. 1, с помощью программной среды $Matlab$. Для уве-

«горизонтальным» прямоугольником (рис. 3).

2. На шаге k ищется среди вертикальных прямоугольников такие, у которых имеет место минимальное различие между стороной квадрата S_k и горизонтальной стороной вертикальных прямоугольников. Также ищется среди горизонтальных прямоугольников такие, у которых имеет место минимальное различие между стороной квадрата S_k и вертикальной стороной вертикальных прямоугольников. Далее определяется из выбранных горизонтальных и вертикальных прямоугольников такой, у которого минимальное отличие одной из сторон от стороны квадрата S_k .

3. Квадрат S_k устанавливается в выбранный прямоугольник в нижний левый угол. Если выбран прямоугольник вертикальной, верхняя сторона квадрата продолжается до пересечения с левой стороной выбранного вертикального прямоугольника. Если выбранный прямоугольник горизонтальный, правая сторона квадрата S_k продолжается вверх до пересечения с горизон-

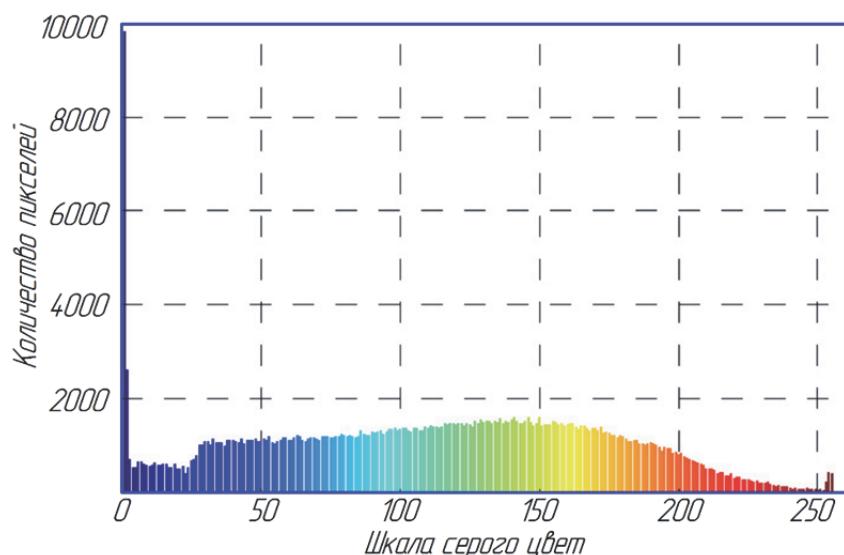


Рис. 2. Ненормированная гистограмма изображения шероховатой поверхности в цветовой палитре RGB

личения цветового контраста каждому значению серой шкалы на гистограмме черно-белого изображения я поставил в соответствие то же значение индекса цвета палитры RGB (рис. 2).

Квадраты, полученные из гистограммы, были расположены в квадрате площадью 2 в соответствии с алгоритмом [20 стр. 515] следующим образом:

1. Квадрат S_1 , соответствующий первому элементу гистограммы, устанавливается слева в нижний угол квадрата площадью 2 (далее квадрат S_0). Оставшаяся часть квадрата S_0 делится на два прямоугольника. Прямоугольник, высота которого больше длины, называется «вертикальным» прямоугольником. Прямоугольник, высота которого меньше его длины, называется

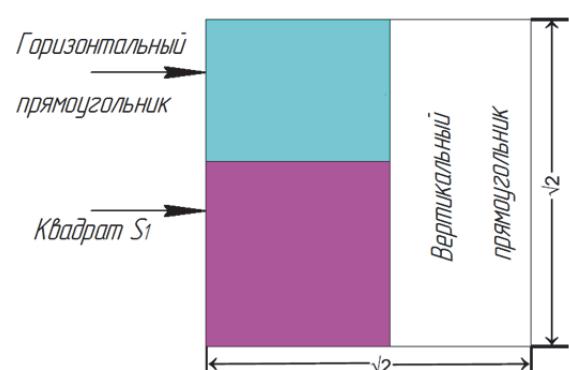


Рис. 3. Размещений в квадрате площадью 2 первого квадрата S_1 , соответствующего первому элементу гистограммы

тальной стороной выбранного горизонтального прямоугольника. В обоих случаях формируются новые горизонтальные и (или) вертикальные прямоугольники.

4. Выполнение алгоритма возвращается к пункту 2 до тех пор, пока все квадраты S_i не будут упакованы в квадрате S_o .

На рис. 4 показано расположение квадратов, которые были рассчитаны в соответствии с гистограммой, показанной на рис. 2 раздела 2. Такой тип взаимного расположения квадратов впоследствии будет называться упаковкой.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения чувствительности предлагаемого метода к изменениям на изображении шероховатой поверхности были построены информационные образы для изображения на рис. 1 без первой и без последней строк, а также без первого и без последнего столбцов (рис. 5). На рис. 5 видно, что информационный образ хорошо чувствует потерю одной строки или одного столбца на изображении рис. 1. Утрата одной строки (длина строки 529 пикселов) соответствует потери 0,192 % всего изображения, утрата одного столбца (515 пикселов) – потери 0,194 % изображения шероховатой поверхности. Считаю необходимым отметить, что на рис. 5 показана также чувствительность информационного образа к размерам изображения контролируемой поверхности.

На рис. 6 показаны гистограммы удаленных строк и столбцов, а также процентное значение удаленных пикселей определенной градации шкалы серого цвета. Из рис. 6 видно, что предлагаемый метод чувствителен к набору (разнобразию) малых вариаций количества пикселей определенной градации серого цвета.

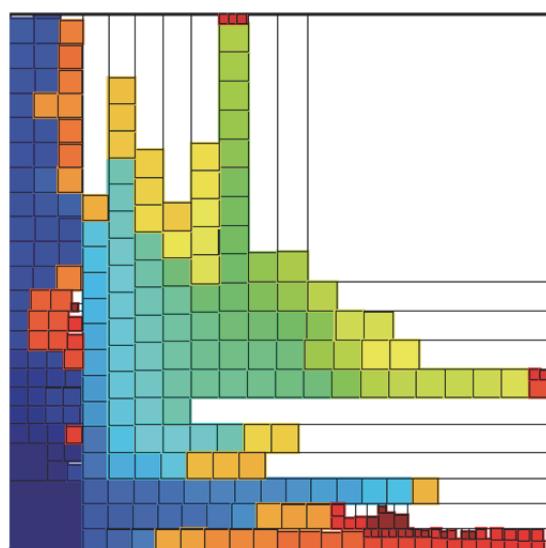


Рис. 4. Упаковка в квадрат площадью 2 конечной последовательности квадратов, соответствующих нормированной гистограмме, показанной на рис. 2 раздела 2

На рис. 6 показано, что для изображения на рис. 1 потеря одной строки или одного столбца может привести к изменению количества пикселей, соответствующих определенной градации серого цвета, в диапазоне от 1 до 13 пикселя. На рис. 6 также показано, что потерянные пиксели определенной градации серого цвета, составляют долю от 0,1 до 15,3 % от общего числа пикселей аналогичной градации серого цвета на изображении рис. 1.

4. ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРА УПАКОВКИ ГИСТОГРАММЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Применяемый метод упаковки квадратов, площадь которых соответствует количеству пикселей определенной шкалы серого цвета, формирует горизонтальные и вертикальные прямоугольники в границах квадрата 2 (рис. 7).

Я считаю, что отношение общего количества вертикальных и горизонтальных прямоугольников может служить числовой характеристикой информационного образа изображения шероховатости на рис. 1. В таблице 1 приведены значения предлагаемого параметра для упаковок на рис. 4 и рис. 5 a, b, c, d.

Таблица 1 показывает, что значение параметра изменяется в диапазоне 429-513 %, когда количество пикселей в изображении изменяется в диапазоне 0,192-0,194 %.

5. ВЫВОДЫ

Я считаю, что проведенное исследование предлагаемого способа построения информационного образа шероховатой поверхности позволило определить следующее: информационный рисунок визуально отображает изменения изображения шероховатости в диапазоне не

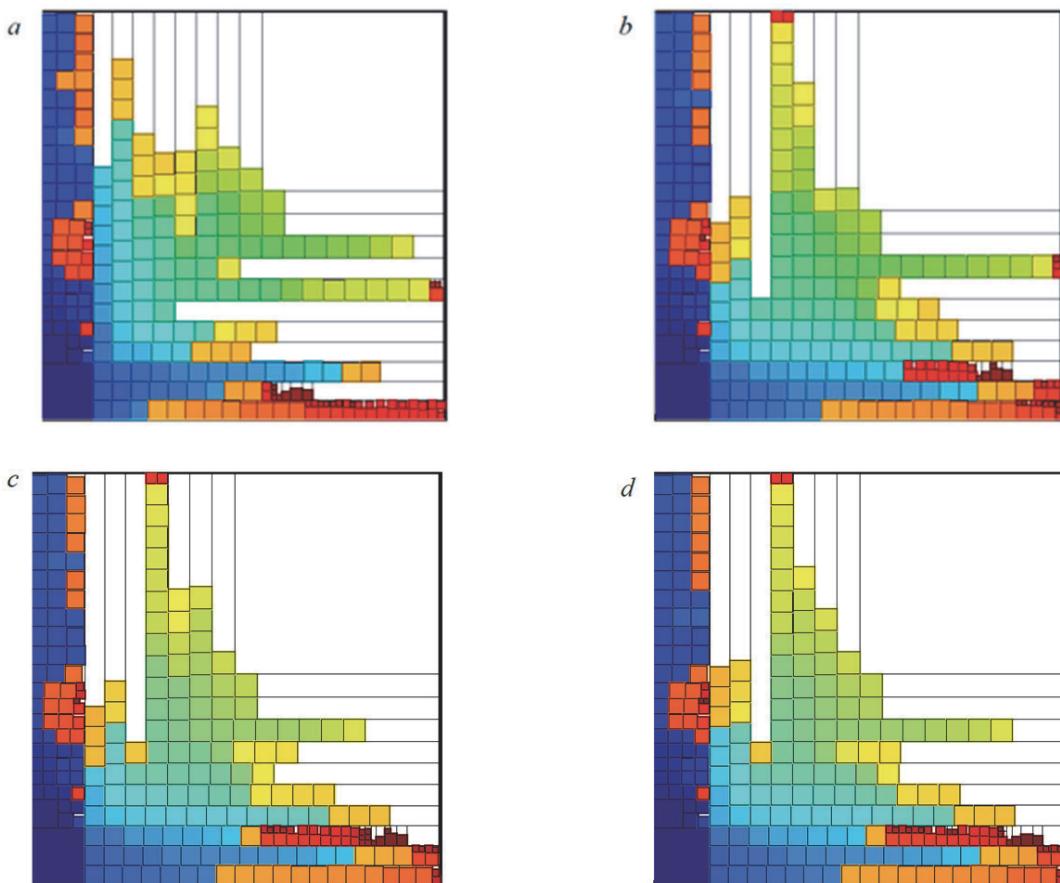


Рис. 5. Информационные схемы отображения шероховатой поверхности с различными потерями:
а – нет первой строки; б – нет последней строки; в – нет левого столбца; г – нет правого столбца

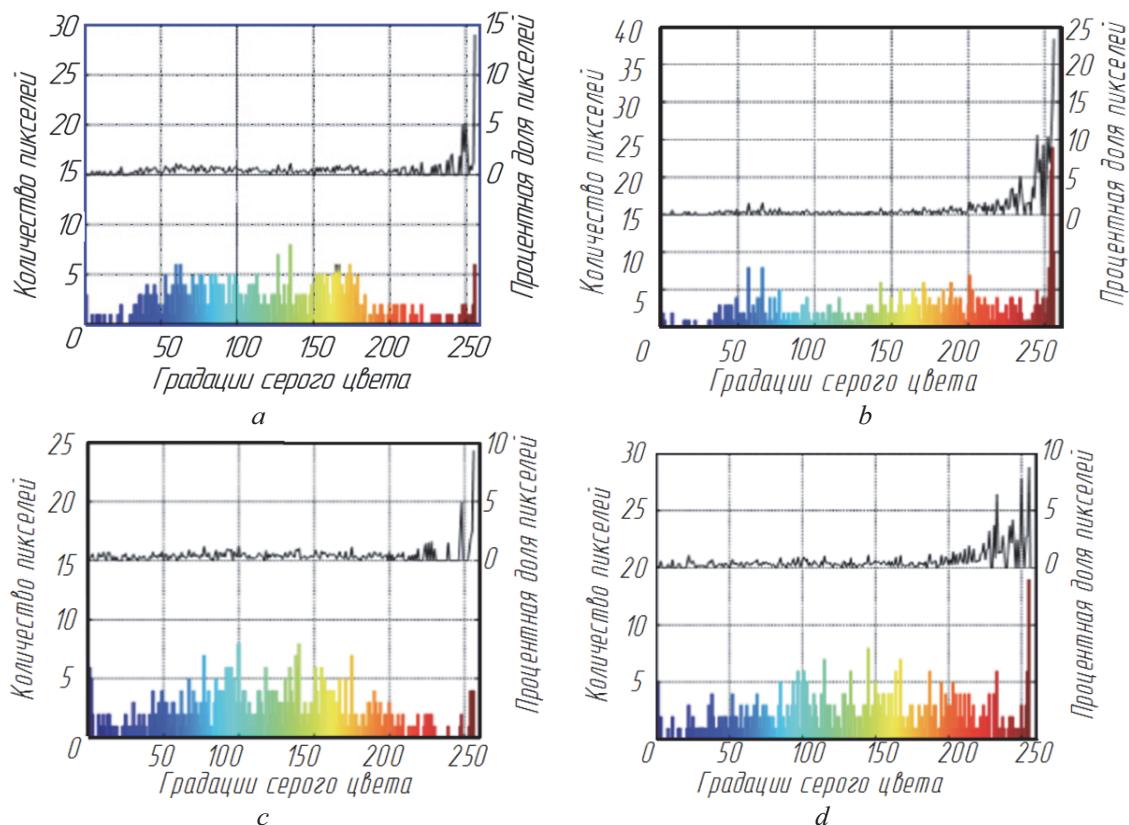


Рис. 6. Гистограммы потерянных строк и столбцов и процентное значение удаленных пикселей с некоторыми шагами шкалы серого:
а – первая строка и б – последняя строка; в – правый столбец и г – левый столбец

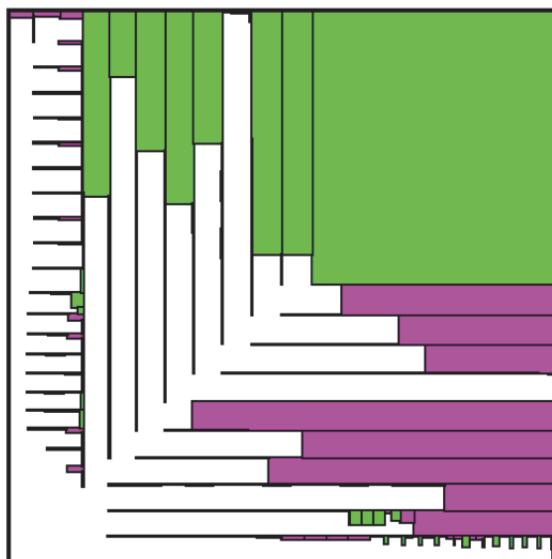


Рис. 7. Горизонтальный и вертикальный прямоугольники упаковки гистограммы изображения шероховатости на рис. 1

Таблица 1. Значения параметров для упаковок

	Информационные образы				
	Рис. 4	Рис. 5a	Рис. 5b	Рис. 5c	Рис. 5d
Параметр	$\frac{0,324}{0,658} = 0,4729$	$\frac{0,7641}{0,2648} = 2,8985$	$\frac{0,7271}{20,2914} = 2,495$	$\frac{0,7488}{0,2894} = 2,5874$	$\frac{0,7463}{0,2799} = 2,6663$

менее 0,192 % от общего числа пикселей изображения; изменение количества пикселей шероховатости пикселей от 0,1 до 15,3% в группах пикселей изображения с некоторым значением яркости шкалы серого приводит к изменению значения параметра в пределах от 429 до 513% (в этом случае количество удаленных пикселей составляет не менее 0,192% от общего количества пикселей изображения); информационный образ может отслеживать динамику небольших изменений (по крайней мере, не менее 0,192%) количества пикселей в изображение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vázquez R., Torre D. The Effect of Surface Roughness on Efficiency of Low Pressure Turbines ASME / R. Vázquez, D. Torre / J. Turbomach. – 2013. – Vol. 6 A. – P. V06AT36A007-16.
2. Yashchuk V.V. Specification of x-ray mirrors in terms of system performance: new twist to an old plot / V.V. Yashchuk, L.V. Samoylova, I.V. Kozhevnikov // Opt. Eng. – 2015. – Vol. 54, Iss. 2. – P. 025108.
3. Whitehouse D.J. Handbook of Surface and Nanometrology / D.J. Whitehouse. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2011. – 955 p.
4. Whitehouse D.J. Surfaces and their Measurement / D.J. Whitehouse. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2002. – 395 p.
5. Табенкин, А.Н. Шероховатость, волнистость, про-
- филь. Международный опыт / А.Н. Табенкин, С.В. Тарасов, С.Н. Степанов. – Санкт-Петербург: Политехнический институт, 2007. – 136 с.
6. DeGarmo E.P., Black J.T., Kohser R.A. Materials and Process in Manufacturing / E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser. – New York, Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 355 p.
7. Gong Y. Surface Roughness Measurements Using Power Spectrum Density Analysis with Enhanced Spatial Correlation Length / Y. Gong, T. Scott, S.T. Misture, P. Gao, N.P. Mellott // J. Phys. Chem. C. – 2016. – Vol. 120, Iss. 39 – P. 22358 – 64.
8. Salazar F., Barrientos A. Surface Roughness Measurement on a Wing Aircraft by Speckle Correlation / F. Salazar, A. Barrientos / Sensors. – 2013. – Vol. 13. – P. 11772-81.
9. Yoshitomi K. Surface roughness determination using spectral correlations of scattered intensities and an artificial neural network technique / K. Yoshitomi, A. Ishimaru, J.-N.V. Hwang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1993. – Vol. 41, Iss. 4. – P. 498-502.
10. Zhou Y. The Three-Point Sinuosity Method for Calculating the Fractal Dimension of Machined Surface Profile / Y. Zhou, Y. Li, H. Zhu, X. Zuo, J. Yang // Fractals. – 2015. – Vol. 20, Iss. 2. – P. 1550016-26.
11. Ichida Y. Fractal Analysis of Micro Self-Sharpening Phenomenon in Grinding with Cubic Boron Nitride (cBN) / Wheels Scanning Electron Microscopy. – Rijeka : INTECH, 2012. – P. 393-410.
12. Outer A.D. Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surfaces / A.D. Outer, J.F.

- Kaashoek, H.R.G.K. Hack // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1995. – Vol. 32, Iss. 1. – P. 3-9.
13. Entropy and Co-entropy of Partitions and Coverings with Applications to Roughness Theory // Granular Computing: At the Junction of Rough Sets and Fuzzy Sets. Studies in Fuzziness and Soft Computing / G. Cattaneo, D. Ciucci, D. Bianucci. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – Vol. 224. – P. 55-77.
 14. Pascoal R., Monteiro A.M. Market Efficiency, Roughness and Long Memory in PSI20 Index Returns: Wavelet and Entropy Analysis / R. Pascoal, A.M. Monteiro // Entropy. – 2014. – Vol. 16, Iss. 5. – P. 2768-2788.
 15. Leach R.K., Giusca C.L. Determination of the metrological characteristics of optical surface topography measuring instruments / R.K. Leach, C.L. Giusca // Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 8430. – P. 8430Q-7.
16. Leach R.K. Fundamental Principles of Engineering Nanometrology / R.K. Leach. – Norwich, NY: William Andrew Publ./American Elsevier, 2014 – 384 p.
 17. Neri P. Nonlinear characterization of a simple process in human vision / P. Neri // Journal of Vision. – 2009. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 1-29.
 18. Яглом, Ю.А. Как разрезать квадрат / Ю.А. Яглом. – Москва: Наука, 1968. – 112 c.
 19. Solomon S.G., Lennie P. 2007 The machinery of colour vision / S.G. Solomon, P. Lennie // Nature Reviews Neuroscience. – 2007. – Vol. 8. – P. 276-286.
 20. Korte B., Vygen J. Combinatorial Optimization / B. Korte, J. Vygen. – Berlin, Heidelberg: Springer Sciens, 2008 – 720 p.

INFORMATION IMAGE OF A BITMAP IMAGE OF A ROUGH SURFACE

© 2022 S.R. Abulkhanov

Samara National Research University, Samara, Russia

The article proposes a method for parametrizing an image of a rough surface using its information image, which was formed on the basis of solving the problem of orthogonal packing of squares into a square. I found that the information image allows you to track any changes in the brightness of pixels in the image of a controlled rough surface. The method allows you to visually fix the loss or change in the brightness of a group of pixels in the image of a rough surface. In this case, a group of pixels can be less than 0.2% of the analyzed image. To form an information image of a monochrome image, its normalized histogram was used. Each value of the histogram was considered as the area of squares, which are placed orthogonally and without intersections in a square with an area of 2. Such packing of squares into a square was considered as an information image of the image. For the numerical analysis of the information image, a parameter was used that made it possible to track any changes in the number and brightness of pixels in the image of a rough surface.

Keywords: rough surface, bitmap image, information image, packing squares into a square

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-97-104

REFERENCES

1. Vázquez R., Torre D. The Effect of Surface Roughness on Efficiency of Low Pressure Turbines ASME / R. Vázquez, D. Torre / J. Turbomach. – 2013. – Vol. 6 A. – P. V06AT36A007-16.
2. Yashchuk V.V. Specification of x-ray mirrors in terms of system performance: new twist to an old plot / V.V. Yashchuk, L.V. Samoylova, I.V. Kozhevnikov // Opt. Eng. – 2015. – Vol. 54, Iss. 2. – P. 025108.
3. Whitehouse D.J. Handbook of Surface and Nanometrology / D.J. Whitehouse. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2011. – 955 p.
4. Whitehouse D.J. Surfaces and their Measurement / D.J. Whitehouse. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2002. – 395 p.
5. Tabenkin, A.N. Sherohovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyj opyt / A.N. Tabenkin, S.V. Tarasov, S.N. Stepanov. – Sankt-Peterburg: Politekhnicheskij institut, 2007. – 136 s.
6. DeGarmo E.P., Black J.T., Kohser R.A. Materials and Process in Manufacturing / E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser. – New York, Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 355 p.
7. Gong Y. Surface Roughness Measurements Using Power Spectrum Density Analysis with Enhanced Spatial Correlation Length / Y. Gong, T. Scott, S.T. Misture, P. Gao, N.P. Mellott // J. Phys. Chem. C. – 2016. – Vol. 120, Iss. 39 – P. 22358 – 64.
8. Salazar F., Barrientos A. Surface Roughness Measurement on a Wing Aircraft by Speckle Correlation / F. Salazar, A. Barrientos / Sensors. – 2013. – Vol. 13. – P. 11772-81.
9. Yoshitomi K. Surface roughness determination using spectral correlations of scattered intensities and an artificial neural network technique / K. Yoshitomi, A. Ishimaru, J.-N.V. Hwang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1993. – Vol. 41, Iss. 4. – P. 498-502.
10. Zhou Y. The Three-Point Sinuosity Method for Calculating the Fractal Dimension of Machined Surface Profile / Y. Zhou, Y. Li, H. Zhu, X. Zuo, J. Yang // Fractals. – 2015. – Vol. 20, Iss. 2. – P. 1550016-26.
11. Ichida Y. Fractal Analysis of Micro Self-Sharpening Phenomenon in Grinding with Cubic Boron Nitride (cBN) / Wheels Scanning Electron Microscopy. – Rijeka : INTECH, 2012. – P. 393-410.
12. Outer A.D. Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surfaces / A.D. Outer, J.F. Kaashoek, H.R.G.K. Hack // International Journal of

- Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1995. – Vol. 32, Iss. 1. – P. 3-9.
13. Entropy and Co-entropy of Partitions and Coverings with Applications to Roughness Theory // Granular Computing: At the Junction of Rough Sets and Fuzzy Sets. Studies in Fuzziness and Soft Computing / G. Cattaneo, D. Ciucci, D. Bianucci. - Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. – Vol. 224. – P. 55-77.
14. *Pascoal R., Monteiro A.M.* Market Efficiency, Roughness and Long Memory in PSI20 Index Returns: Wavelet and Entropy Analysis / R. Pascoal, A.M. Monteiro // Entropy. – 2014. – Vol. 16, Iss. 5. – P. 2768-2788.
15. *Leach R.K., Giusca C.L.* Determination of the metrological characteristics of optical surface topography measuring instruments / R.K. Leach, C.L. Giusca // Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 8430. – P. 8430Q-7.
16. *Leach R.K.* Fundamental Principles of Engineering Nanometrology / R.K. Leach. – Norwich, NY: William Andrew Publ./American Elsevir, 2014 – 384 p.
17. *Neri P.* Nonlinear characterization of a simple process in human vision / P. Neri // Journal of Vision. – 2009. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 1-29.
18. *Yaglom, Yu.A.* Kak razrezat' kvadrat / Yu.A. Yaglom. – Moskva: Nauka, 1968. – 112 s.
19. *Solomon S.G., Lennie P.* 2007 The machinery of colour vision / S.G. Solomon, P. Lennie // Nature Reviews Neuroscience. – 2007. – Vol. 8. – P. 276-286.
20. *Korte B., Vygen J.* Combinatorial Optimization / B. Korte, J. Vygen. – Berlin, Heideberg: Springer Sciens, 2008 – 720 p.