

УДК 004.931.2

Сегментация изображений фрагментированных реперных меток с использованием комбинированных детекторов кривизны поверхности в зондовой микроскопии

П. В. Гуляев, Е. Ю. Шелковников

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

Аннотация. Статья относится к области микро и наноразметки образцов. Рассмотрена разметка в виде отдельных реперных отметок, которые применяются для маркировки изделия, обозначения исследуемой области и линий, соединяющих эту область с макроориентирами на поверхности. В качестве инструментов разметки рекомендованы кантилевер сканирующего зондового микроскопа или индентор нанотвердомера, отпечатки которых имеют схожую форму. Особенностью данной формы является фрагментированность, которая образуется вследствие вспучивания материала поверхности при воздействии кантилевера или индентора. Выполнен анализ конвенциональных методов обработки, потенциально пригодных для сегментации изображения и локализации реперных отметок. Показана необходимость специализированных методов локализации, решающих проблему фрагментации. В качестве такого метода предложено использовать комбинированный детектор кривизны поверхности. Кривизна поверхности в каждой точке растра изображения оценивалась с помощью радиуса соприкасающейся окружности или сферы, а координаты центров сегментации (особых точек) определялись максимумами кривизны. В работе предложен вариант комбинирования детекторов кривизны, заключающийся в том, что более универсальный сферический детектор определяет расширенный набор особых точек, а также параметры фильтрации и поиска, используемые затем более избирательным детектором. Критерием локализации реперной отметки является ее детектирование обоими детекторами и пониженный радиус кривизны поверхности. Для сокращения особых точек на изображении предложено использовать фильтрацию Гаусса с радиусом, предварительно определенным детектором кривизны. Показано, что после такой обработки дифференциация реперных отметок от других особых точек, определяемая по радиусу кривизны поверхности, существенно возрастает.

Ключевые слова: реперные отметки, сканирующий зондовый микроскоп, СЗМ-изображение, нанообъекты, наномаркировка, детектор кривизны.

✉ Павел Гуляев, e-mail: lucac@inbox.ru

Segmentation of Fragmented Reference Labels Images Using Combined Surface Curvature Detectors in Probe Microscopy

Pavel V. Gulyaev, Evgeny Yu. Shelkovnikov

Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

Summary. The article relates to the field of micro and nano marking of samples. The dotted marking in the form of separate reference labels is considered. Such marking can be used to mark the product, the area under study and the lines connecting this area with macro landmarks on the surface. The cantilever of a scanning probe microscope or the indenter of a nanohardometer, the prints of which have a similar shape, were recommended as marking tools. A feature of the shape is the fragmentation of the image of the imprint, which is formed due to the swelling of the material when exposed to a cantilever or indenter. The analysis of conventional processing methods, potentially suitable for image segmentation and localization of reference marks, is carried out. The necessity of specialized localization methods solving the fragmentation problem is shown. A method is proposed where a combined surface curvature detector is used. The curvature of the surface at each point of the image raster is estimated using the radius of the contiguous circle or sphere. The curvature maxima determine the coordinates of the image segments centers (key points). The proposed method of combining is as follows. A versatile detector defines an expanded set of image key points, filtering and search parameters which are later used by a selective detector. The criterion for the localization of a reference mark is its detection by both detectors and a reduced radius of the surface curvature. To reduce the amount of key points in the image, it is proposed to use Gaussian filtering with a radius previously determined by a curvature detector. It is shown that after such processing, the differentiation of reference marks from other key points, determined by the radius of the surface curvature, increases significantly.

Keywords: reference labels, scanning probe microscope, SPM image, nanoobjects, nanomarking, curvature detector.

✉ Pavel Gulyaev, e-mail: lucac@inbox.ru

ВВЕДЕНИЕ

При разнесенных по времени исследованиях поверхности в зондовой микроскопии появляется необходимость в средствах маркировки и автоматического распознавания изображения исследуемого участка. Таким средством являются реперные отметки, наносимые на поверхность посредством атомно-силовой нанолитографии. Каждая отметка представляет собой углубление-отпечаток, сформированный пирамидальным или коническим наконечником наноиндентора или кантилевера. При нанесении отметок на атомарно-гладкую подложку они значительно выделяются на фоне окружающего рельефа, поэтому сегментация таких изображений (локализация отметок) и последующее распознавание могут осуществляться традиционными методами обработки изображений (например, средствами открытой библиотеки OpenCV). Однако в ряде случаев выделение отметок может потребовать дополнительной обработки, которая обусловлена следующим. Во-первых, формирование отвалов вокруг углубления [1] разбивает изображение отметки на несколько фрагментов. Во-вторых, при развитом рельефе подложки на поверхности могут присутствовать элементы, сопоставимые по форме и размеру с реперной отметкой. В-третьих, реперные отметки могут иметь различные размеры и яркость из-за флуктуаций твердости поверхности, на которую они наносятся. Вследствие этого разработка специализированных методов сегментации изображений фрагментированных реперных отметок, позволяющих корректно распознавать (оценивать положение и размеры) эти отметки, является актуальной задачей. В частности сегментация по принципу "одна отметка – один сегмент" позволит распознавать отметки по количеству сегментов на изображении, по их площади или межцентровому расстоянию.

МЕТОДЫ СЕГМЕНТАЦИИ

Для поиска и определения размеров реперных отметок в программном обеспечении для зондовых микроскопов (ImageAnalysis фирмы NT-MDT, MountainsSPIP фирмы ImageMetrology) могут использоваться функции обнаружения и определения размеров частиц и пор. Недостатком этих функций является необходимость ручной регулировки параметров. Кроме того, эти функции основаны на конвенциональных инструментах бинаризации и сегментации изображения (методы Watershed [2], Otsu [3]), что снижает точность локализации изображений отметок, отличающихся фрагментацией и существенными изменениями яркости [4].

Существуют более продвинутые методы сегментации, например, параметрические [5, 6] (с оценкой параметров распределения каждого класса объектов на изображении), вариационные [7], нейросетевые [8], контурные. Все эти методы имеют ограничения в применении. Параметрические и вариационные методы сложны в реализации и требуют значительных вычислительных ресурсов. Нейросетевые методы требуют большого набора изображений для обучения, который в реальности может быть существенно ограничен. Контурный анализ наиболее эффективен при выделении обособленных объектов на плоской поверхности. В условиях фрагментированности изображения и развитого фонового рельефа использование контуров может привести к пересегментации (over-segmentation [3]) и некорректному отражению структуры поверхности.

Помимо инструментов сегментации (бинаризации) для поиска реперных отметок непосредственно на полутоновом изображении могут использоваться методы, связанные с выделением особых точек изображения, окрестности которых соответствуют некоторой структуре. К ним можно отнести корреляционные методы, бинарные дескрипторы-детекторы, методы поиска геометрических фигур (преобразование Хафа). Корреляционные методы [9] используют шаблоны реперных отметок, которые могут не совпадать с реальной (фрагментированной) формой реперных отметок. На рис. 1, а представлены результаты детектирования реперных отметок методом сравнения с шаблоном (использован обобщенный шаблон в виде круга с градиентной заливкой). Рис. 1, а показывает, что данный

метод может быть чувствителен к фоновым элементам изображения, что требует дополнительной фильтрации особых точек [9]. Бинарные детекторы-дескрипторы [10, 11] чувствительны к углам, пятнам и ребрам элементов изображения. Применение детекторов-дескрипторов допустимо, если уровень искажений формы отметки на изображении будет минимальным [12]. На рис. 1, *b* представлен результат выделения особых точек детектором-дескриптором ORB, который показывает, что недостатком детекторов-дескрипторов можно считать выделение избыточного количества особых точек непосредственно на изображении реперной отметки.

Методы, основанные на поиске геометрических фигур (окружностей, квадратов), менее чувствительны к низкоуровневым элементам изображения, однако они могут быть чувствительны к отдельным фрагментам отметки (рис. 1, *c*).

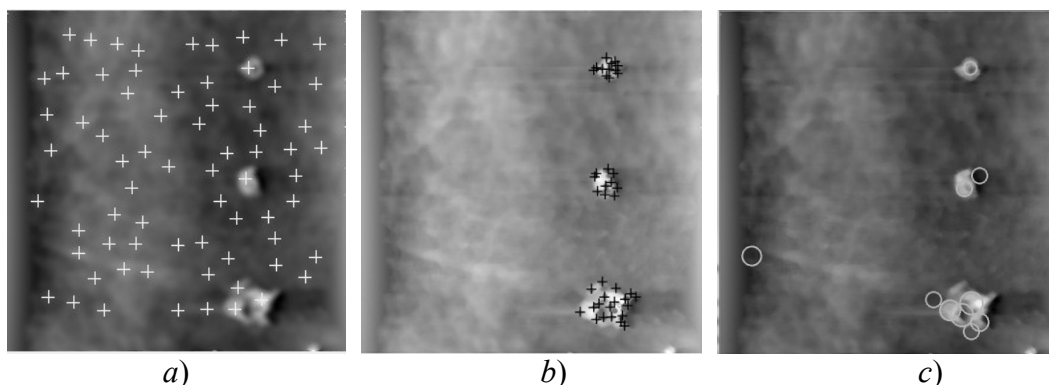


Рис. 1. Выделение особых точек изображения методом сравнения с шаблоном (*a*), детектором-дескриптором ORB (*b*), преобразованием Хафа (*c*)

Fig. 1. Images key points localization by the template matching (*a*), the ORB descriptor-detector (*b*), the Hough transform (*c*)

Таким образом, конвенциональные методы сегментации и распознавания, основанные на использовании функции яркости, малоэффективны на фрагментированных изображениях реперных отметок. Для детектирования реперных отметок, а также для определения их размеров могут использоваться методы, основанные на анализе кривизны поверхности или плоских кривых. В работе [13] показано, что разные типы детекторов кривизны отличаются избирательностью и помехоустойчивостью. Это свойство можно использовать для отделения фоновых объектов от реперных отметок. Рассмотрим применение для этих целей двух наиболее эффективных (по критериям точности и помехоустойчивости [13]) детекторов кривизны "Сфера" ("Sphere") и "Круг" ("Circle"). Детектор "Сфера" отличается более широким диапазоном чувствительности по сравнению с детектором "Круг". Детектор "Круг" в свою очередь более избирателен. Он регистрирует объекты с радиусом кривизны, имеющим лишь небольшие отклонения от радиуса детектирования. При поиске реперных отметок эти характеристики детекторов можно комбинировать для повышения точности распознавания. Один из вариантов комбинирования заключается в том, что более универсальный детектор "Сфера" определяет расширенный набор объектов и параметры поиска, используемые затем более избирательным детектором "Круг".

КОМБИНИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРОВ КРИВИЗНЫ

Принцип работы детекторов кривизны заключается в следующем. Кривизна поверхности в окрестности каждого пикселя (px) изображения оценивается с помощью радиуса соприкасающейся окружности (детектор "Круг") или сферы (детектор "Сфера"). Размер окрестности определяется с помощью параметра, называемого радиусом детектирования r_d . После обработки всего изображения производится поиск локальных максимумов кривизны, называемых далее особыми точками (ОТ). Затем особые точки проверяются на принадлежность к реперным отметкам. Проверка может осуществляться по

количеству N особых точек и радиусу кривизны R поверхности в этих точках. Критерием F наличия на изображении реперных отметок служит выражение:

$$F = ((N==N_{sp}) \& (R==R_{sp})), \quad (1)$$

где N_{sp} – ожидаемое число реперных отметок (определяется исходя из размера изображения и интервала отметок); R_{sp} – заданный радиус кривизны. Для повышения надежности из проверки на принадлежность следует исключить как можно больше особых точек, связанных с фоновыми элементами изображения.

Пример выделения особых точек детекторами "Круг" и "Сфера" представлен на рис. 2 (особые точки помечены крестиками), а координаты этих точек и радиус кривизны приведены в табл. 1.

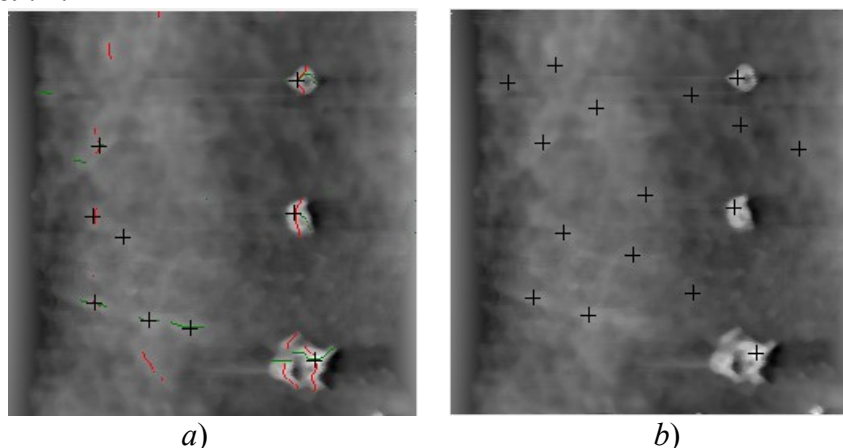


Рис. 2. Результаты выделения особых точек изображения детекторами "Круг" (a) и "Сфера" (b)

Fig. 2. The results of image key points localization by the detectors "Circle" (a) and "Sphere" (b)

Таблица 1. Координаты x, y , радиус кривизны R и тип особых точек

Table 1. X,Y coordinates and radius of curvature R and type of key points

" Circle "				" Sphere "			
x	y	R	Key points type	x	y	R	Key points type
181	43	21	r	66	35	30	b
57	84	26	b	181	43	13	r
179	126	21	r	36	46	52	b
53	128	29	b	152	54	28	b
72	141	28	b	92	62	19	b
54	182	26	b	183	73	34	b
88	193	25	b	58	84	16	b
114	198	31	b	220	88	35	b
192	218	21	r	123	117	23	b
-	-	-	-	179	125	13	r
-	-	-	-	71	141	19	b
-	-	-	-	115	155	27	b
-	-	-	-	153	179	48	b
-	-	-	-	52	182	17	b
-	-	-	-	87	193	15	b
-	-	-	-	193	217	13	r
Notes							
r– reference label							
b –background element							

Из табл. 1 и рис. 1 следует, что оба детектора локализовали реперные отметки наряду с элементами фонового рельефа. Анализ табл. 1 показывает, что на изображениях (рис. 2, a, b) имеется 7 общих особых точек (с близкими координатами), выделенных в табл. 1 жирным шрифтом. Три из них связаны с реперными отметками и имеют меньший радиус кривизны, что объясняется формированием отметок с помощью заостренного инструмента.

Таким образом, методом фильтрации особых точек, связанных с фоновым рельефом, может стать анализ распределения особых точек по радиусу кривизны R . На гистограмме распределения особых точек по радиусу кривизны поверхности (рис. 3, *a*) три особых точки, связанные с реперными отметками, формируют отдельную группу. Тем не менее, разница между радиусом кривизны поверхности в реперных отметках и ближайших по этому параметру фоновых элементах незначительна для их автоматического разделения.

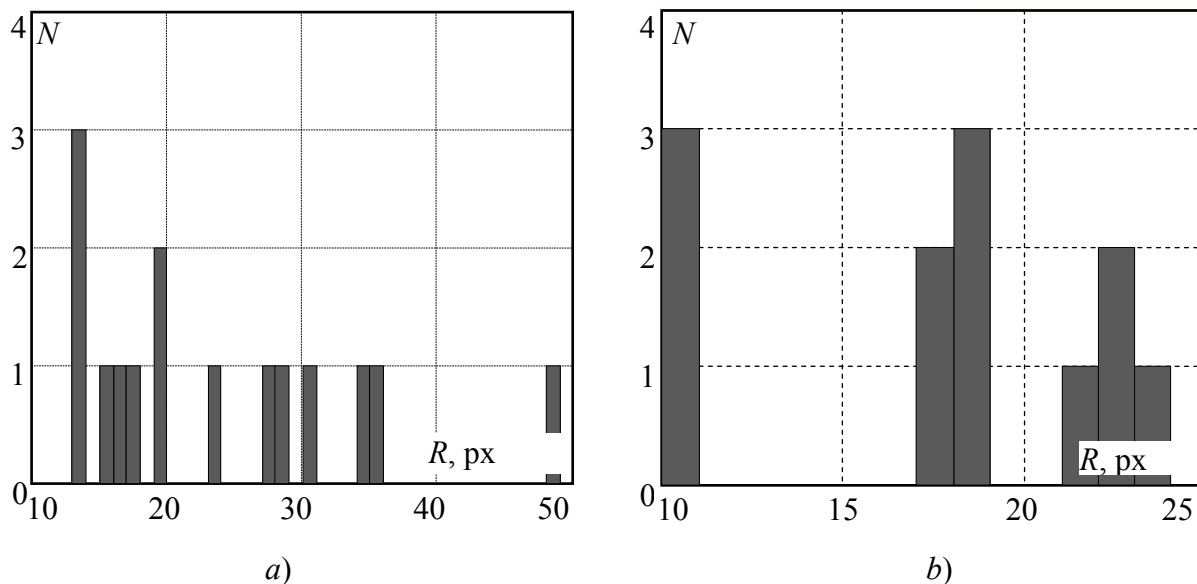


Рис. 3. Гистограмма распределения особых точек изображения поверхности по значению радиуса кривизны, полученных детектором "Сфера", для необработанного (*a*) и обработанного фильтром Гаусса изображений (*b*)

Fig. 3. Histogram of the key points distribution of the surface image by the value of the radius of curvature obtained by the "Sphere" detector for raw (*a*) and Gauss-filtered images (*b*)

Предположим, что отсутствие существенной дифференциации особых точек по степени кривизны обусловлено фрагментацией изображений реперных отметок, и оценим влияние сглаживания на радиус кривизны фоновых элементов и реперной отметки. В частности будем использовать фильтрацию Гаусса [14], ранее применяемую в работе [1] для обработки изображений реперных отметок. Алгоритм дифференциации особых точек можно записать следующим образом.

Шаг 1. Обработка изображения детекторами "Круг" и "Сфера" с радиусом детектирования $r_d = 15 \dots 20$ px.

Шаг 2. Пороговая фильтрация особых точек по функции яркости. Порог H – максимальное значение из множества локальных минимумов интенсивности в окрестности особой точки $H = \max\{Z_{mi}\}$, где Z_{mi} – минимальное значение яркости в радиусе R_i от i -й особой точки с координатами x_i, y_i .

Шаг 3. Построение гистограммы распределения детектированных объектов по радиусу кривизны. Определение мощности первого G_1 пика и расстояния d между первым и вторым G_2 пиком гистограммы $d[G_1, G_2]$, выраженного в интервалах гистограммы.

Шаг 4. Если $((G_1 = N_{sp}) \& d[G_1, G_2] > d_{th})$, то конец ("Отметки обнаружены"), иначе переход на шаг 5. Величина d_{th} представляет собой порог, назначаемый экспериментатором.

Шаг 5. Вычисление радиуса кривизны в особых точках R_{av} .

Шаг 6. Обработка изображения фильтром Гаусса с радиусом $r_g = R_{av}$.

Шаг 7. Обработка изображения детекторами кривизны с радиусом $r_d = R_{av}$.

Шаг 8. Если $((G_1 = N_{sp}) \& d[G_1, G_2] > d_{th})$, то конец ("Отметки обнаружены"), иначе конец ("Отметки не обнаружены").

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены результаты выделения особых точек детектором "Сфера" и окончательные результаты сегментации детектором "Круг", а в табл. 2 – координаты этих точек и значения радиуса кривизны. Результаты в табл. 2 получены с величиной $r_d = 25$ px, представляющей собой средний радиус кривизны в особых точках, детектированных на предыдущем этапе (табл. 1).

Таблица 2. Результаты (координаты x,y и радиус кривизны R) детектирования после фильтрации Гаусса

Table 2. Results (x,y coordinates and radius of curvature R) of detection after Gauss filtration

" Circle "				" Sphere "			
x	y	R	Key points type	x	y	R	Key points type
185	40	16	r	70	22	22	b
182	127	15	r	184	40	10	r
190	218	15	r	95	64	18	b
-	-	-	-	55	86	17	b
-	-	-	-	224	86	18	b
-	-	-	-	123	117	21	b
-	-	-	-	182	128	10	r
-	-	-	-	74	144	24	b
-	-	-	-	58	181	22	b
-	-	-	-	88	193	17	b
-	-	-	-	114	197	18	b
-	-	-	-	191	218	10	r
-	-	-	-	92	222	23	b

Notes
r – reference label
b – background element

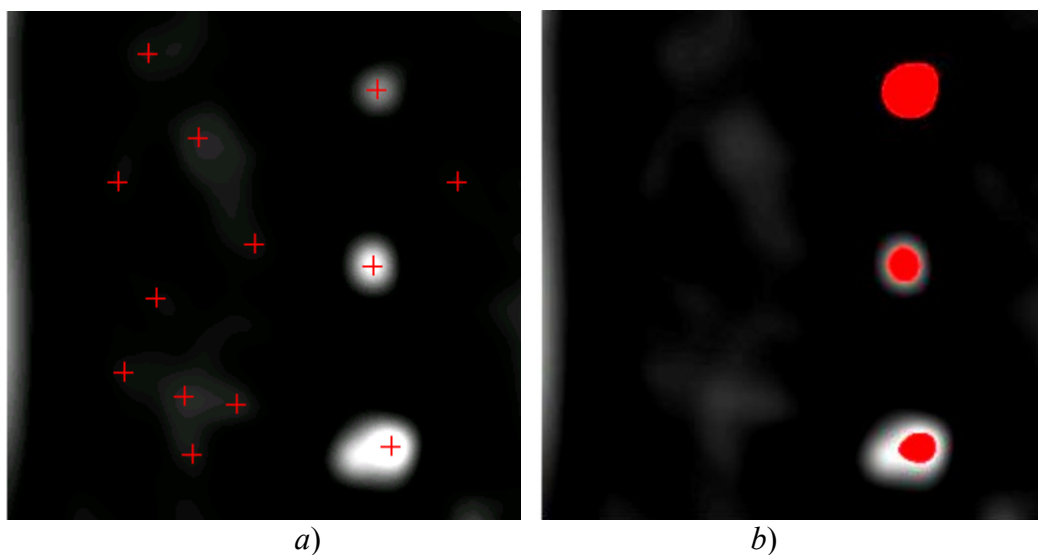


Рис. 4. Выделение особых точек детектором кривизны "Сфера" (a) и окончательные результаты сегментации детектором "Круг" (b)

Fig. 4. Selection of key points by curvature detector "Sphere" (a) and final results of segmentation by the detector "Circle" (b)

Гистограмма распределения детектированных объектов после фильтра Гаусса представлена на рис. 3, *b*. На гистограмме имеется обособленная (отстоящая не менее чем на два интервала гистограммы) группа особых точек с минимальным радиусом кривизны, присущим реперным отметкам. Количество элементов этой группы соответствует

ожидаемому (исходя из известных размера кадра и расстояния между реперными отметками) числу реперных отметок. В результате выполняется критерий распознавания (1), что подтверждает наличие на изображении реперных отметок. Последующая сегментация (рис. 4, *b*) выполняется следующим образом. Определяется финальный набор особых точек, в который входят точки, выделенные каждым детектором. Затем в окрестности каждой особой точки из финального набора ограничивается группа пикселей. Ограничение устанавливается в плоскости xu , исходя из радиуса кривизны поверхности в i -й особой точке R_i . Далее осуществляется анализ Z -координат пикселей из ограниченной группы. В сегмент изображения включаются только те пиксели, Z -координаты которых находятся в пределах сферы с радиусом R_i .

ВЫВОДЫ

Таким образом, применение детекторов кривизны позволяет сегментировать изображения фрагментированных реперных отметок на подложке с развитым рельефом, а также определять координаты центров отметок. В качестве центров сегментации выступают особые точки – экстремумы кривизны. Распознавание реперных отметок возможно на основе гистограммы распределения детектированных особых точек по величине кривизны. Учитывая, что радиус кривизны особых точек, связанных с реперными отметками существенно ниже, чем у фоновых элементов, такое распределение позволяет отличать различные типы особых точек. Критерием наличия на изображении реперных отметок служит обособленный пик гистограммы с мощностью, соответствующей ожидаемому числу отметок. При этом для повышения надежности дифференциации особых точек могут применяться различные типы детекторов, а изображение может быть предварительно сглажено, например, фильтром Гаусса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Ермолин К. С. Обработка и распознавание изображений реперных отметок для локализации зонда в сканирующем туннельном микроскопе // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 3. С. 437-445.
2. Beucher S., Lantuejoul C. Use of watersheds in contour detection. International Workshop on image processing : Real-time Edge and Motion detection/estimation. RENNES, France, 1979. 12 p. <http://cmm.enscm.fr/~beucher/publi/watershed.pdf> (дата обращения: 11.02.2021).
3. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
4. Гуляев П. В. Измерение длины объектов на изображениях сканирующего зондового микроскопа с помощью детекторов кривизны // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 21-26. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-21-26>
5. Navon E., Miller O., Averbuch A. Color image segmentation based on adaptive local thresholds // Image and Vision Computing, 2005, vol. 23, pp. 69-85. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.05.011>
6. Abdullah S. L., Hambali H. A., Jamil N. Segmentation of Natural Images Using an Improved Thresholding-Based Technique // Procedia Engineering, 2012, vol. 41, pp. 938-944. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.266>

REFERENCES

1. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Ermolin K. S. Obrabotka i raspoznavaniye izobrazheniy repornykh otmetok dlya lokalizatsii zonda v skaniruyushchem tunnel'nom mikroskope [Processing and recognition of reference mark images for locating the probe in a scanning tunneling microscope]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 3, pp. 437-445. (In Russian).
2. Beucher S., Lantuejoul C. *Use of watersheds in contour detection*. International Workshop on image processing : Real-time Edge and Motion detection/estimation. RENNES, France, 1979. 12 p. <http://cmm.enscm.fr/~beucher/publi/watershed.pdf> (accessed February 11, 2021).
3. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
4. Gulyaev P. V. Measurement of the length of objects on scanning probe microscope images using curvature detectors. *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 21-27. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01890-9>
5. Navon E., Miller O., Averbuch A. Color image segmentation based on adaptive local thresholds. *Image and Vision Computing*, 2005, vol. 23, pp. 69-85. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.05.011>
6. Abdullah S. L., Hambali H. A., Jamil N. Segmentation of Natural Images Using an Improved Thresholding-Based Technique. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 938-944. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.266>

7. Bui K., Fauman J., Kes D., Mandiola L. T., Ciomaga A., Salazar R., Bertozzi A. L., Gilles J., Goronzy D. P., Guttentag A. I., Weiss P. S. Segmentation of scanning tunneling microscopy images using variational methods and empirical wavelets // *Pattern Analysis and Applications*, 2020, vol. 23, pp. 625-651. <https://doi.org/10.1007/s10044-019-00824-0>
8. Ronneberger O., Fischer Ph., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // In: Navab N., Hornegger J., Wells W., Frangi A. (eds) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2015, vol. 9351, pp. 234-241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
9. Гуляев П. В. Применение реперных отметок для координатной привязки к поверхности в сканирующей зондовой микроскопии // *Компьютерная оптика*. 2020. Т. 44, № 3. С. 420-426. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-641>
10. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011, vol. 58, no. 11, pp. 2564-2571. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>
11. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: speeded up robust features // In: Leonardis A., Bischof H., Pinz A. (eds) *Computer Vision – ECCV 2006*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, vol. 3951, pp. 404-417. https://doi.org/10.1007/11744023_32
12. Краснобаев Е. А., Чистобаев Д. В., Малышев А. Л. Сравнение бинарных дескрипторов особых точек изображений в условиях искажений // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 3. С. 434-445. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>
13. Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Тюрников А. В. Особенности применения детекторов кривизны поверхности для анализа размеров наночастиц // *Химическая физика и мезоскопия*. 2013. Т. 15, № 1. С. 138-143.
14. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е. *Цифровая обработка изображений*. Изд. 3-е, испр. и доп. / Пер. с англ. Л.И. Рубанова, П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
7. Bui K., Fauman J., Kes D., Mandiola L. T., Ciomaga A., Salazar R., Bertozzi A. L., Gilles J., Goronzy D. P., Guttentag A. I., Weiss P. S. Segmentation of scanning tunneling microscopy images using variational methods and empirical wavelets. *Pattern Analysis and Applications*, 2020, vol. 23, pp. 625-651. <https://doi.org/10.1007/s10044-019-00824-0>
8. Ronneberger O., Fischer Ph., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: Navab N., Hornegger J., Wells W., Frangi A. (eds) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2015, vol. 9351, pp. 234-241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
9. Gulyaev P. V. Primeneniye reperykh otmetok dlya koordinatnoy privyazki k poverkhnosti v skaniryushchey zondovoy mikroskopii [The use of reference marks for precise tip positioning in scanning probe microscopy]. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2020, vol. 44, pp. 420-426. (In Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-641>
10. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011, vol. 58, no. 11, pp. 2564-2571. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>
11. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: speeded up robust features. In: Leonardis A., Bischof H., Pinz A. (eds) *Computer Vision – ECCV 2006*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, vol. 3951, pp. 404-417. https://doi.org/10.1007/11744023_32
12. Krasnabayeu E. A, Chistabayeu D. V, Malyshev A. L. Sravneniye binarnykh deskriptorov osobykh tochek izobrazheniy v usloviyakh iskazheniy [Comparison of binary feature points descriptors of images under distortion conditions]. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2019, vol. 43, no. 3, pp. 434-445. (In Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-3-434-445>
13. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V. Osobennosti primeneniya detektorov krivizny poverkhnosti dlya analiza razmerov nanochastits [Peculiarities of surface curvature detectors usage for nanoparticles size analysis]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2013, vol. 15, no. 1, pp. 138-143. (In Russian).
14. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital image processing*. Pearson Education, 2008. 954 p.

Поступила 10.01.2023; после доработки 06.02.2023; принята к опубликованию 15.02.2023
Received January 10, 2023; received in revised form February 6, 2023; accepted February 15, 2023

Информация об авторах

Гуляев Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: lucac@inbox.ru

Шелковников Евгений Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института механики УдмФИЦ УрО РАН

Information about the authors

Pavel V. Gulyaev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: lucac@inbox.ru

Evgeny Yu. Shelkovnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory Institute of Mechanics Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation