https://doi.org/10.15350/17270529.2022.1.10

УДК 621.385.833

Поиск и распознавание исследуемого участка в зондовой микроскопии с использованием маркировки, наносимой силовой литографией или наноиндентированием

П. В. Гуляев, Е. Ю. Шелковников

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

Аннотация. В статье описаны процессы поиска и распознавания маркированной зоны в сканирующей зондовой микроскопии. В качестве маркировки рассмотрены реперные отметки, наносимые с помощью наноиндентора или кантилевера зондового микроскопа. Приведены типовые изображения реперных отметок. Рассмотрены возможности свободно распространяемого программного обеспечения для выделения и распознавания реперных отметок на разных типах изображений. Показано, что для выделения отметок подходят некоторые методы бинаризации и кросс-корреляционный метод сравнения с шаблоном. Установлено, что данные методы эффективны при условии разработки алгоритмов фильтрации особых точек, в качестве которых предложено использовать локальные экстремумы корреляционной функции. Представлен алгоритм такой фильтрации на основе варьирования пороговых значений коэффициента корреляции и размера окрестности особой точки. Для распознавания реперных отметок предложен метод структурного анализа, основанный на определении расстояний между особыми точками изображения. Приведены результаты распознавания на различных типах изображений.

Ключевые слова: зондовая микроскопия, реперные отметки, особые точки, сравнение с шаблоном, фильтрация, сегментация.

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

Search and Recognition of the Studied Area in Probe Microscopy Using Markings Applied by Power Lithography or Nanoindentation

Pavel V. Gulyaev, Evgeny Yu. Shelkovnikov

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

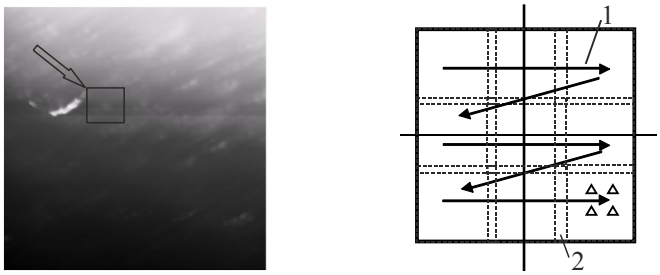
Summary. The article describes the processes of marked zone searching and recognition in scanning probe microscopy. The initial positioning of the probe with the help of an optical microscope and the subsequent marked zone searching by a series of overlapping scans are considered. The set of imprints (reference labels) applied with the help of a nanoindenter or a microscope cantilever is considered as marking. The imprints were applied at the corner points of the studied area. Typical images of imprints are given. It has been established that the main elements that make it difficult to recognize images of imprints are the presence of pile-ups and similar elements of the background relief. The analysis of the possibilities of conventional processing methods for highlighting image key points associated with reference labels is carried out. It is shown that the effectiveness of conventional methods can vary depending on the type of an image and the presence of noise. Based on the preliminary studies, it is proposed to use a template matching method for searching for image key points, as well as a structural analysis of the selected key points for determining their relation with marking imprints. It is established that the template matching method will be effective if key points are subjected to filtration. It is proposed to use local extremes of the cross-correlation function as image key points. An algorithm for such filtration is presented based on varying threshold values of the correlation coefficient and the size of the neighborhood of a key point. For the recognition of marking imprints, a structural analysis method based on the determination of distances between special points of the image is proposed. The results of recognition for various types of images are presented. The operability of the proposed algorithms in the presence of destabilizing factors is confirmed.

Keywords: probe microscopy, reference labels, key points, template matching, filtration, segmentation.

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

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании одних и тех же участков поверхности в различные промежутки времени в зондовой микроскопии появляется необходимость в средствах автоматизированного позиционирования зонда в заданную область. Современные сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) имеют вспомогательную оптическую систему видеонаблюдения высокого разрешения и моторизированную платформу образца. С помощью системы видеонаблюдения осуществляется предварительный выбор исследуемого участка, а приводы платформы позиционируют зонд к выбранному участку. Однако разрешение оптического микроскопа является недостаточным для позиционирования зонда в область с разрешением менее 1 мкм. В этом случае поиск заданной области после предварительного позиционирования (рис. 1, *a*) осуществляется по СЗМ-изображениям. Для этого поле зрения смещается «змейкой» с небольшим перекрытием (рис. 1, *b*), детально исследуя окрестности точки, в которую было осуществлено начальное позиционирование зонда.

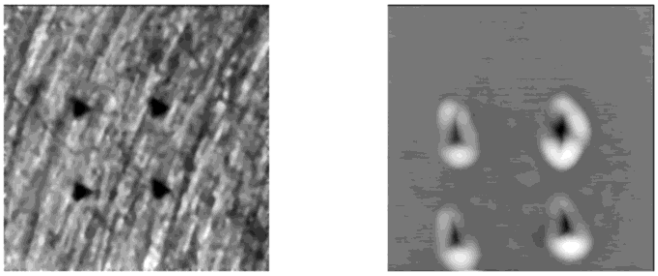


a) *b*)

Рис. 1. Поиск реперных отметок с помощью оптического и зондового микроскопов:
***a*) – указание начальной точки поиска; *b*) – поиск реперных отметок перекрывающимися сканами**
(1 – направление смещения поля сканирования; 2 – зоны перекрытия)

Fig. 1. Search for reference labels using optical and probe microscopes:
a) – indication of the starting point of the search; b) – search for reference marks with overlapping scans
(1 – direction of displacement of the scanning field; 2 – overlap zones)

Для автоматизации поиска маркированной зоны необходимы средства маркировки и методы ее распознавания. Одним из таких средств являются граничные реперные отметки, наносимые на поверхность посредством наноиндентирования [1, 2] или атомно-силовой нанолитографии [3]. Отметки располагают в вершинах (или по периметру) квадрата, ограничивающего исследуемую область. В отличие от изображений отметок, приведенных в работе [1], изображения отметок, полученные при высоком разрешении (рис. 2), могут иметь достаточно высокую детализацию. Основными дестабилизирующими факторами, препятствующими выделению и распознаванию отметок, являются фоновый рельеф подложки и «отвалы» [4 – 6], образующиеся при формировании отметок. Рассмотрим возможности существующих методов поиска и распознавания реперных отметок в условиях действия данных факторов.



a) *b*)

Рис. 2. Изображения реперных отметок:
***a*) – изображение с развитым фоновым рельефом; *b*) – изображение с ровным рельефом**

Fig. 2. Images of reference labels: a) – an image with a developed background relief; b) – an image with a smooth relief

АНАЛИЗ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

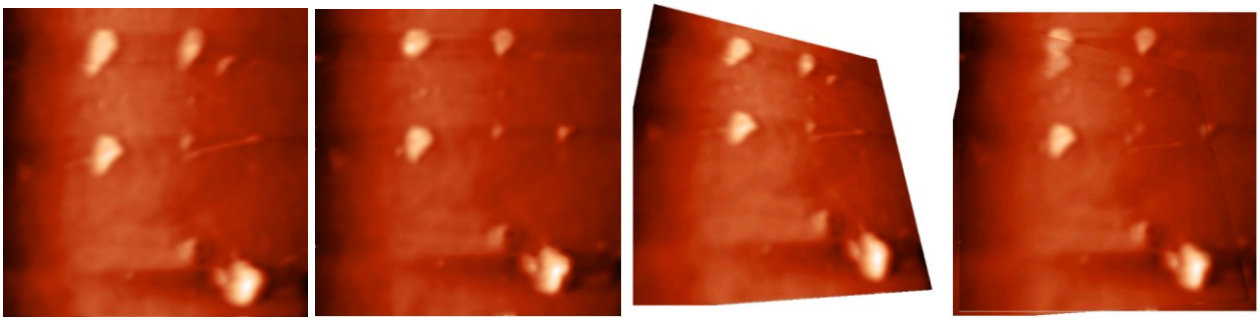
Для распознавания сложных изображений реперных отметок могут применяться нейросети, структурный анализ, а также методы сопоставления изображений с использованием корреляционного анализа или детекторов-дескрипторов особых точек. Применение нейросетей ограничено тем, что доступное количество обучающих изображений может быть ограниченным, а обучение нейросети затруднено. Структурный анализ и метод сопоставления тесно связаны с сегментацией изображений и выделением на них особых точек. Структурный анализ применительно к реперным отметкам может заключаться в проверке на принадлежность особых точек к определенному паттерну-рисунку, а метод сопоставления может заключаться в сравнении дескрипторов особых точек текущего и эталонного изображений реперных отметок. При этом, чем избирательнее (в отношении реперных отметок) методы выделения особых точек, тем точнее результаты структурного анализа.

В программном обеспечении, широко используемом в зондовой микроскопии (например, Gwyddion, ImageJ, Moutains SPIP), имеются инструменты выделения пор и частиц, основанные на сегментации (бинаризации с пороговой фильтрацией), контурном анализе, поиске объектов, принадлежащих определенному классу. Основная часть этих инструментов реализована в библиотеке OpenCV, что делает актуальным рассмотрение их возможностей по распознаванию реперных отметок.

Например, для сегментации изображения реперных отметок (рис. 2, *a*) подходит метод минимума [7]. В тоже время на другом изображении (рис. 2, *b*) приемлемый результат дал метод Intermodes [8]. Из этого следует, что для выделения реперных отметок может потребоваться последовательный перебор методов и параметров сегментации. Без этого автоматическая сегментация (бинаризация) изображений может привести к удалению реперных отметок, существенному искажению формы их границ, недостаточному отсеву фоновых элементов. Это вызовет усложнение дальнейшего анализа (дифференциацию) оставшихся областей по сравнению с полутоновым изображением, несущим больше информации о поверхности. Поэтому более предпочтительными являются инструменты обработки полутоновых изображений, доработанные для повышения избирательности в отношении отметок. К подобным инструментам можно отнести детекторы-дескрипторы особых точек изображения, метод сравнения с шаблоном, метод поиска объектов определенной формы (например, алгоритм Хафа), метод Фурье-Меллина.

Детекторы-дескрипторы [9] чувствительны к низкоуровневым элементам – углам, ребрам, наличие которых характерно для изображений реперных отметок. Наиболее совершенные детекторы-дескрипторы инвариантны к изменению масштаба, повороту и могут использоваться для прямого распознавания группы отметок посредством сопоставления с изображением этой группы, полученным ранее. Такое применение ограничивается чувствительностью к характерным для СЗМ шумам, наличие которых может исказить форму отметок, положение особых точек и их дескрипторы. Помимо прямого сопоставления детекторы могут использоваться для локализации особых точек с целью последующего распознавания паттерна их расположения структурными методами. Однако, если изображение реперных отметок детализировано, то появляются особые точки, связанные с фоновым рельефом. Более того, каждая реперная отметка может иметь несколько особых точек.

Множество особых точек затрудняет установление соответствия между изображениями, особенно при наличии шумов, искажений. Например, на рис. 3 представлено наложение двух изображений с использованием дескриптора SIFT, гомографии и метода RANSAC [10]. Рис. 3 показал, что точного совмещения добиться не удалось, и обобщенное изображение содержит дублированные элементы, затрудняющие распознавание.

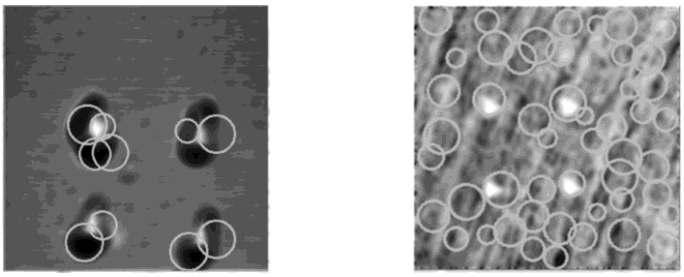


a) *b*) *c*) *d*)

Рис. 3. Пример сопоставления изображений с использованием детектора Sift и метода Ransac: *a*), *b*) – исходные изображения; *c*) – исходное изображение, трансформированное по результатам сопоставления; *d*) – результат наложения изображений

Fig. 3. An example of image matching using the Sift detector and the Ransac method: a), b) – the output images; c) – the original image transformed by the results of the comparison; d) – the result of the image overlay

Схожая ситуация возникает при выделении реперных отметок с помощью высокоуровневых методов поиска объектов определенной формы. Среди таких методов распространен алгоритм Хафа [11]. Результат применения данного алгоритма (рис. 4) показывает, что для того, чтобы на каждой реперной отметке присутствовала хотя бы одна особая точка (центр окружности), общее количество особых точек должно значительно превышать количество реперных отметок. Кроме того, даже соседние реперные отметки могут иметь различную форму, например, треугольную или ромбовидную. Из этого вытекает необходимость перебора различных типов искомых объектов и выбора наиболее вероятного конечного результата из множества вариантов.



a) *b*)

Рис. 4. Выделение реперных отметок алгоритмом Хафа на изображениях с ровным (*a*) и развитым (*b*) фоном

Fig. 4. Selection of reference marks by the Hough algorithm on images with a smooth (a) and developed (b) background

Из вышесказанного следует, что высокоуровневые и низкоуровневые методы выделения особых точек имеют схожие недостатки – избыточное количество особых точек и отсутствие очевидной логики их отбора. Поэтому для распознавания реперных отметок необходимо использовать алгоритмы с большими возможностями интерпретации и фильтрации результатов. При этом целесообразно обеспечить инвариантность к сдвигам, изменениям масштаба и угла поворота, возможность работы на полутоновых и бинарных изображениях.

Инвариантность к преобразованиям сдвига и поворота при сопоставлении изображений дает метод Фурье-Меллина. Однако он может быть неэффективен при различиях изображений по яркости и контрасту [12] или при изменениях масштаба [13]. Большими возможностями обладает метод сравнения с шаблоном [1, 14, 15], который можно адаптировать к конкретной задаче за счет формы и размера шаблона. В частности на изображениях (рис. 3) были испытаны кросс-корреляционные методы cv.tm.ccorr.normed

(абсолютный) и cv.tm.ccoeff.normed (относительный) из библиотеки OpenCV. В качестве шаблона использовался круг с градиентной заливкой (рис. 5). Форма шаблона в виде круга обеспечивает инвариантность к повороту, а градиентная заливка – инвариантность к масштабу. В частности реперные отметки на изображениях (рис. 2) детектировались при размерах шаблона от 4×4 до 50×50 пикселей. В целом методы cv.tm.ccorr.normed и cv.tm.ccoeff.normed показали пригодность для выделения реперных отметок. Тем не менее, стандартные реализации упомянутых методов требуют доработки фильтрации избыточного числа особых точек (локальных экстремумов *h*).

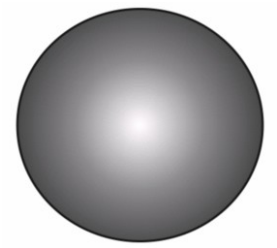


Рис. 5. Шаблон с градиентной заливкой

Fig. 5. Template with gradient fill

В работе [1] приведен пример использования метода сравнения с шаблоном для распознавания реперных отметок. Однако метод применялся в условиях ряда ограничений.

Во-первых, поле зрения микроскопа было большим (60×60 мкм), а детализация изображения отметок была невысокой, что упростило их выделение и распознавание.

Во-вторых, для оценки упорядоченности выделенных отметок использовались уравнение линейной регрессии и коэффициент Пирсона, ориентированные на линейно расположенные реперные отметки.

Для компенсации этих ограничений предложенный в работе [1] метод будет усовершенствован за счет более эффективной фильтрации особых точек и анализа их структуры.

ПОИСК ОСОБЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЯ

В методе сравнения с шаблоном вычисляется коэффициент корреляции $h_{k,m}$ (метод cv.tm.ccorr.normed) между окрестностью каждой точки (k,m) растра изображения и шаблоном *H* изображения реперной отметки (рис. 7) [1]:

$$h_{k,m} = \frac{\sum_{i,j}(Z_{ij}^{km} - \overline{Z})(H_{ij} - \overline{H})}{\sqrt{\sum_{i,j}(Z_{ij}^{km} - \overline{Z})^2 \sum_{i,j}(H_{ij} - \overline{H})^2}}, \quad (1)$$

где $\overline{H}, \overline{Z}$ – математическое ожидание шаблона *H* и средняя яркость выборки Z^{km} соответственно. Величина $h_{k,m}$ записывается в ячейку *k,m* массива *h*. В результате обработки всего изображения получается массив *h* с размерностью соответствующей размерности изображения. Массив *h* используется для поиска особых точек изображения, которые затем анализируются на принадлежность к реперным отметкам. При этом особой точкой будет считаться точка изображения, которой соответствует максимум массива *h*, расположенный в центре локальной окрестности *n*×*n* пикселей. Такой подход позволяет выделять количество особых точек, значительно превышающее число реперных отметок.

ФИЛЬТРАЦИЯ ОСОБЫХ ТОЧЕК

В стандартных реализациях метода сравнения с шаблоном (например, cv.tm.ccorr cv.tm.ccoeff из библиотеки OpenCV) фильтрация особых точек осуществляется на определенном уровне коэффициента корреляции. В настоящей работе для выделения наиболее отличимых (обособленных) особых точек предлагается использовать выражение:

$$(h_{max} - h_{min}) > (K \cdot t_1), \qquad (2)$$

где h_{max} – максимальное значение коэффициента корреляции в пределах окрестности; h_{min} – минимальное значение; t_1 – коэффициент, регулирующий степень фильтрации (целое положительное число от 0 до 10); K – постоянное число (0.1 для результатов, приведенных ниже). Выражение (2) учитывает не только положительные значения коэффициента корреляции, но и отрицательные, возникающие на месте "отвалов" вокруг реперной отметки (рис. 6), что повышает избирательность к реперным отметкам.

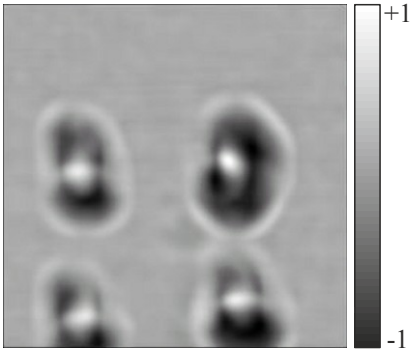


Рис. 6. Распределение функции *h* для изображения, представленного рис. 3, *b*

Fig. 6. Distribution of the *h* function for the image shown in fig. 3, b

Кроме параметра t_1 на количество выделяемых особых точек оказывает влияние размер $n \times n$ локальной окрестности (окна поиска локальных экстремумов), увеличение которого позволяет локализовывать более крупные элементы изображения. Таким образом, параметры t_1 и n позволяют отбирать наиболее обособленные и доминирующие особые точки.

В случае детализированного изображения отметки фильтрация по одному из параметров t_1 или n не обеспечивает достаточного отсева фоновых особых точек и сохранения особых точек, привязанных к реперным отметкам. В связи с этим в настоящей работе рассмотрим фильтрацию особых точек с использование одновременно двух параметров – t_1 и n. На каждой итерации алгоритма фильтрации величины t_1 и n поочередно изменяются (t_1 увеличивается, n уменьшается) до тех пор, пока количество особых точек N_{kp} не приблизится к целевому значению N_{thr}. Это приводит к выделению наиболее обособленных особых точек. Если количество особых точек с $h_{k,m} > 0$ после очередной итерации снижается ниже N_{thr}, то возвращается предыдущее значение допуска и уменьшается размер окна поиска. В результате количество анализируемых особых точек восстанавливается. Одновременное изменение двух параметров позволяет избежать зацикливания алгоритма около значений t_1 и n, приведших к снижению N_{kp} ниже N_{thr}. При этом учитываются особые точки только с положительным коэффициентом корреляции. Если после нескольких циклов изменения t_1 и n не удается достичь необходимого числа особых точек, то осуществляет постобработка расширенного ($N_{kp} > N_{thr}$) набора особых точек. Постобработка – структурный анализ пар особых точек, заключающий в сравнении

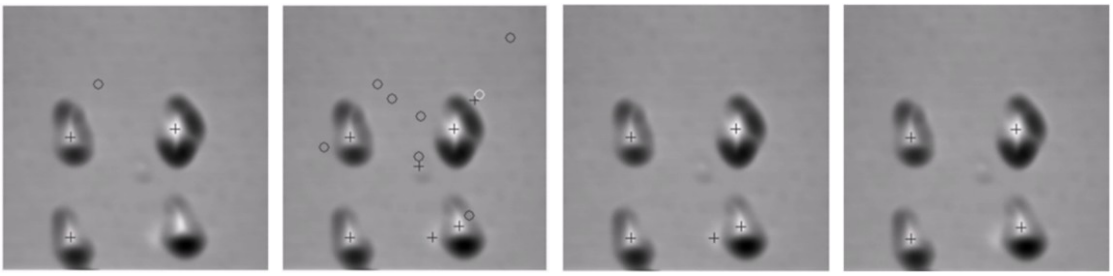
длины соединяющего их отрезка с межреперным интервалом d_0 и измерении угла взаимного поворота φ. Особенностью реперных отметок является наличие отрезков длиной d_0 (стороны квадрата) и $d_0\sqrt{2}$ (диагонали квадрата).

В таблице и на рис. 7 приведены результаты работы алгоритма на примере изображения четырех реперных отметок, нанесенных на относительно ровной подложке (полиэтилен). В таблице помимо общего числа особых точек N_{kp} приведено количество особых точек N_{kp}+ с положительным коэффициентом корреляции $h_{k,m}$. На рис. 7 особые точки с положительным коэффициентом корреляции отмечены крестиками, с отрицательным коэффициентом корреляции – кружками. Анализ показал, что в особых точках, связанных с реперными отметками, коэффициент $h_{k,m}$, имеет положительное значение, поэтому знак величины $h_{k,m}$ может использоваться как дополнительный фильтр для отсева фоновых особых точек. Например, на итерации 4, после фильтрации фоновой особой точки с $h_{k,m} < 0$, величина N_{kp}+ снижается ниже $N_{thr} = 4$. Это приводит к ослаблению допуска t_1, уменьшению величины n и числа особых точек на последующей итерации. Аналогичная ситуация возникает на итерациях 7, 9, 12.

Таблица – Изменение размера окна и допуска при последовательной обработке изображения

Table – Changing the window size and tolerance during sequential image processing

Итерация Iteration	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Размер окна $n\times n$ Window size $n\times n$	24	24	22	22	20	20	20	18	18	16	16	16	14	14
Допуск t_1 Tolerance t_1	1	2	2	3	2	3	4	3	4	3	4	5	4	5
N_{kp}	19	13	11	4	15	7	5	5	5	6	5	3	5	4
N_{kp}+	8	5	5	3	7	5	3	5	3	5	5	3	5	4



a) *b*) *c*) *d*)

Рис. 7. Результаты выделения особых точек для 4 (*a*), 5 (*b*), 13 (*c*), 14 (*d*) итераций соответственно (o – особые точки с $h_{k,m} < 0$; + – особые точки с $h_{k,m} > 0$)

Fig. 7. The results of the allocation of singular points for 4 (a), 5 (b), 13 (c), 14 (d) iterations, respectively (o – singular points with $h_{k,m} < 0$; + – singular points with $h_{k,m} > 0$)

РАСПОЗНАВАНИЕ РЕПЕРНЫХ ОТМЕТОК

В ряде случаев алгоритму фильтрации не удается установить заданное число особых точек $N = N_{thr}$. Это может произойти на сложных изображениях с развитым рельефом или на изображениях, на которых реперные отметки отсутствуют. Окончательное решение о наличии реперных отметок осуществляется на этапе постобработки. Например, для изображения, представленного на рис. 2, *a*, величины n и t_1 в процессе работы алгоритма изменились с 24 и 1 до 12 и 4 соответственно. Дальнейшая фильтрация особых точек привела

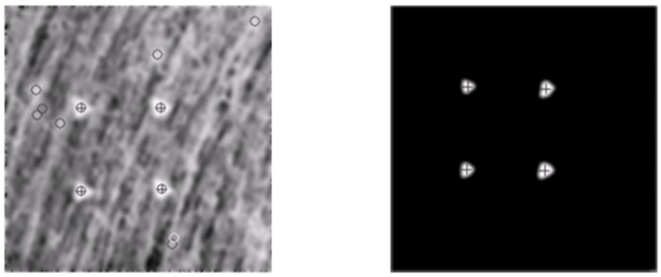
к тому, что их количество уменьшилось ниже N_{thr}. Постобработка проходила после ослабления допуска t_1 на расширенном наборе особых точек.

Постобработка заключатся в следующем. Определяются координаты x, y особых точек и составляются пары. Для каждой пары ($x_i, y_i; x_{i-1}, y_{i-1}$) определяется длина соединяющего их отрезка d_i:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}\ . \qquad (2)$$

Для пар точек определенной длины вычисляются углы взаимного поворота. Если на изображении имеются пары особых точек, длина которых составляет d_0 или $d_0\sqrt{2}$, а углы поворота составляют ~0º или ~90º, то считается, что распознаны реперные отметки. В противном случае принимается решение об отсутствии реперных отметок и смещении поля зрения микроскопа.

Наложение ограничений на длину анализируемых пар позволило детектировать реперные отметки на изображении рис. 8, *a* (отмечены крестиками), в условиях, когда сокращение числа особых точек до величины N_{thr} стало невозможно. На бинарном изображении (рис. 8, *b*) сравнение с шаблоном позволило выделить все четыре реперных отметки, фильтрации особых точек не потребовалось.



a) *b*)

Рис. 8. Результат выделения особых точек на изображении с развитым фоном в полутоновом (*a*) и бинарном (*b*) форматах

Fig. 8. The result of highlighting special points on an image with a developed background in halftone (a) and binary (b) formats

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы. Для локализации и распознавания реперных отметок могут применяться методы обработки изображений – сегментация, бинаризация, сравнение с шаблоном, доступные в свободно распространяемой библиотеке OpenCV. Однако эти методы требуют повышения эффективности. В частности в зависимости от типа изображений они могут неудовлетворительно сегментировать изображение и выделять на нем избыточное или недостаточное количество особых точек. Это приводит к необходимости доработки стандартных подходов к их выделению и фильтрации. С этой целью было предложено использовать метод сравнения с шаблоном и шаблон в виде круга с градиентной заливкой. Предложенный метод показал работоспособность на полутоновых и бинарных изображениях, а шаблон обеспечил инвариантность метода к масштабу и углам поворота реперных отметок. Для сокращения избыточности особых точек разработан алгоритм фильтрации особых точек не только по уровню коэффициента корреляции, но и по размеру локальной окрестности, в которой точка считается особой. Это в совокупности с априорной информацией об интервале и углах нанесения реперных отметок обеспечивает их распознавание даже на сложных изображениях с развитым фоновым рельефом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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

2. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials Research, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20. https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3

3. Xie X. N., Chung H. J., Sow C. H., Wee A. T. Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography // Materials Science and Engineering: R: Reports, 2006, vol. 54, iss. (1-2), pp. 1-48. https://doi.org/10.1016/j.mser.2006.10.001

4. Kucharski S. T., Jarząbek D. Depth Dependence of nanoindentation pile-up patterns in copper single crystals // Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, vol. 45(11), pp. 4997-5008. https://doi.org/10.1007/s11661-014-2437-4

5. Daphalapurkar N. P., Wang F., Fu B., Lu H., Komanduri R. Determination of mechanical properties of sand grains by nanoindentation // Experimental Mechanics, 2011, vol. 51(5), pp. 719-728. https://doi.org/10.1007/s11340-010-9373-z

6. Tranchida D., Piccarolo S., Loos J., Alexeev A. Mechanical Characterization of Polymers on a nanometer scale through nanoindentation. A Study on pile-up and viscoelasticity // Macromolecules, 2007, vol. 40(4), pp. 1259-1267. https://doi.org/10.1021/ma062140k

7. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing. Third Edition. Pearson Education International, 2008. 976 p.

8. Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // Journal of Electronic Imaging, 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 146-168. http://dx.doi.org/10.1117/1.1631315

9. 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

10. Moisan L. Moulon P., Monasse P. Automatic Homographic Registration of a Pair of Images, with A Contrario Elimination of Outliers // Image Processing On Line, 2012. vol. 2, pp. 56-73. https://doi.org/10.5201/ipol.2012.mmm-oh

11. Duda R. Hart P. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Communication of the ACM, 1972, vol. 15, iss. 1, pp. 11-15. https://doi.org/10.1145/361237.361242

REFERENCES

1. Gulyaev P. V. Primeneniye repernykh otmetok dlya koordinatnoy privyazki k poverkhnosti v skaniruyushchey 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

2. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20. https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3

3. Xie X. N., Chung H. J., Sow C. H., Wee A. T. Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2006, vol. 54, iss. (1-2), pp. 1-48. https://doi.org/10.1016/j.mser.2006.10.001

4. Kucharski ST, Jarza D. Depth Dependence of Nanoindentation Pile-Up Patterns in Copper Single Crystals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45, no. 11, pp. 4997-5008. https://doi.org/10.1007/s11661-014-2437-4

5. Daphalapurkar N. P., Wang F., Fu B., Lu H., Komanduri R. Determination of mechanical properties of sand grains by nanoindentation. *Experimental Mechanics*, 2011, vol. 51(5), pp. 719-728. https://doi.org/10.1007/s11340-010-9373-z

6. Tranchida D., Piccarolo S., Loos J., Alexeev A. Mechanical Characterization of Polymers on a nanometer scale through nanoindentation. A Study on pile-up and viscoelasticity. *Macromolecules*, 2007, vol. 40(4), pp. 1259-1267. https://doi.org/10.1021/ma062140k

7. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital image processing*. Third Edition. Pearson Education International, 2008. 976 p.

8. Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 146-168. http://dx.doi.org/10.1117/1.1631315

9. Krasnabayeu Y.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

10. Moisan L. Moulon P., Monasse P. Automatic Homographic Registration of a Pair of Images, with A Contrario Elimination of Outliers. *Image Processing On Line*, 2012. vol. 2, pp. 56-73. https://doi.org/10.5201/ipol.2012.mmm-oh

11. Duda R. Hart P. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communication of the ACM*, 1972, vol. 15, iss. 1, pp. 11-15. https://doi.org/10.1145/361237.361242

12. Бессмельцев В. П., Булушев Е. Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 2. С. 343-350. https://doi.org/10.18287/0134-2452-2014-38-2-343-350

13. Глумов Н. И., Кузнецов А. В. Обнаружение дубликатов на изображениях // Компьютерная оптика, 2011. Т. 35, № 4. С. 508-512.

14. Peng H., Fulmi L., Zheru C. Document image recognition based on template matching of component block projections // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, vol. 25, iss. 9, pp. 1188-1192. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2003.1227996

15. Dufour R. M., Miller E. L., Galatsanos N. P. Template matching based object recognition with unknown geometric parameters // IEEE Transactions on Image Processing, 2002, vol. 11, iss. 12, pp. 1385-1396. https://doi.org/10.1109/TIP.2002.806245

12. Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D. Bystryy algoritm sovmeshcheniya izobrazheniy dlya kontrolya kachestva lazernoy mikroobrabotki [Fast image registration algorithm for automated inspection of laser micromachining]. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2014, vol. 38, no. 2, pp. 343-350. (In Russian). https://doi.org/10.18287/0134-2452-2014-38-2-343-350

13. Glumov N. I., Kuznetsov A. V. Obnaruzheniye dublikatov na izobrazheniyakh [Copy-move image forensics detection]. *Kompyuternaya optika* [Computer Optics], 2011, vol. 35, no. 4, pp. 508-512. (In Russian).

14. Peng H., Fulmi L., Zheru C. Document image recognition based on template matching of component block projections. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, vol. 25, iss. 9, pp. 1188-1192. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2003.1227996

15. Dufour R. M., Miller E. L., Galatsanos N. P. Template matching based object recognition with unknown geometric parameters. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, vol. 11, iss. 12, pp. 1385-1396. https://doi.org/10.1109/TIP.2002.806245

Поступила 16.03.2022; после доработки 25.03.2022; принята к опубликованию 31.03.2022
Received 16 March 2022; received in revised form 25 March 2022; accepted 31 March 2022

Информация об авторах

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

Шелковников Евгений Юрьевич, *доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация*

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, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation*