

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ И СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕПЕРНЫХ ОТМЕТОК НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ В ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

ГУЛЯЕВ П. В., ШЕЛКОВНИКОВ Е. Ю., ТЮРИКОВ А. В., КИРИЛЛОВ А. И.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,  
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

---

**АННОТАЦИЯ.** Статья посвящена автоматическому распознаванию упорядоченных реперных отметок на изображениях сканирующего зондового микроскопа. Рассмотрено применение для этой цели структурного анализа – метода детектора частиц по кривизне поверхности и корреляционного анализа – метода сравнения с шаблоном. Показано, что комплексирование результатов этих методов позволяет сократить число анализируемых при распознавании точек изображения за счет исключения точек, не связанных с реперными отметками. Предложено для анализа упорядоченности анализируемых точек использовать сочетания их пар заданной длины, а также величину взаимного сдвига этих пар. В качестве количественной меры оценки упорядоченности использован коэффициент Пирсона, вычисленный на статистике величин взаимного сдвига пар.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сканирующий туннельный микроскоп, распознавание, реперные отметки, сравнение с шаблоном, детектор кривизны.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг исследуемых объектов методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) зачастую связан с решением следующих задач:

- автоматический поиск объектов на поверхности образца и на изображении, определение их размеров;
- позиционирование образца в поле зрения микроскопа в процессе поиска объектов;
- привязка объектов и зонда микроскопа к единой системе координат.

Одним из инструментов решения этих задач являются реперные отметки, наносимые на поверхность образца и используемые в качестве ориентиров при позиционировании образца. Реперные отметки могут наноситься через равные расстояния вдоль линии. Также возможно ограничение реперными отметками исследуемой области по ее периметру. Если отметки и обозначенная ими область различимы в оптический и зондовый микроскопы, то мониторинг исследуемых объектов значительно упрощается. Размер отметок в этом случае должен составлять единицы микрометров. Для нанесения таких отметок можно применять нанотвердомеры, например, Nanotest 600.

Обнаруживать отметки более целесообразно при разрешении 10 – 40 пикселей на отметку, что исключает избыточную детализацию [1 – 3] и обеспечивает инвариантность идентификации относительно поворота. Надежность обнаружения и распознавания реперных отметок во многом зависит от возможности их выделения на фоне окружающего рельефа поверхности. Например, на изображении наряду с искомыми элементами могут присутствовать схожие по внешнему виду элементы рельефа поверхности образца. Поэтому при распознавании реперных отметок целесообразно использовать априорную информацию об их размере и интервале  $L$  нанесения. Наличие такой информации позволяет заранее подбирать наиболее подходящие режим зондового микроскопа (поле зрения, разрешение, размер изображения) и методы распознавания.

При простом, лишенном деталей, изображении реперной отметки имеется несколько вариантов ее распознавания:

- структурные методы, основанные на анализе кривизны [4 – 7], морфологических преобразованиях [8 – 10], контурном анализе [11, 12], кластеризации [13], сегментации [14];
- корреляционные методы анализа [15, 16], например, композитные фильтры [17] или сопоставление с эталоном [18].

При выборе конкретного метода распознавания следует учитывать:

- вычислительную сложность алгоритмов и мощность управляющей части микроскопа;
- возможность получения в процессе распознавания количественной информации о координате и размере объекта.

В настоящей статье рассмотрим применение метода сравнения с шаблоном на основе нормированной взаимной корреляционной функции [15, 19] и сферического детектора частиц (детектора кривизны поверхности) [20]. Комплексирование этих методов имеет целью повышение вероятности распознавания реперных отметок за счет использования преимуществ каждого из методов.

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Метод сравнения с шаблоном заключается в вычислении нормированной корреляционной функции  $h_{k,m}$  [19] между выборкой изображения  $Z^{km}$  в каждой точке  $k, m$  изображения и шаблоном  $H$  (рис. 1) с последующим поиском локальных (в окне размером  $P \times P$ ) максимумов коэффициента корреляции. Локальные максимумы считаются особыми точками и анализируются на принадлежность к реперным отметкам.

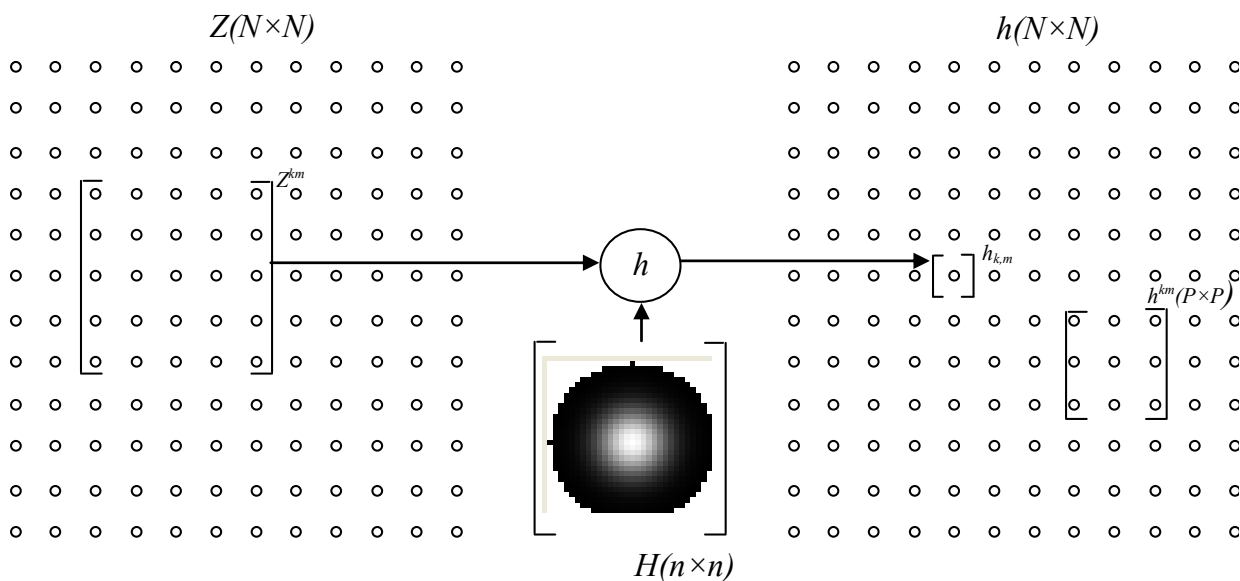


Рис. 1. Схема корреляционного анализа изображения с применением шаблона

Исследования [19] показали работоспособность метода сравнения с шаблоном при распознавании реперных отметок, нанесенных через равные интервалы.

К достоинствам метода можно отнести:

- простоту реализации;
- учет формы (очертаний) реперной отметки.

К недостаткам метода сравнения с шаблоном можно отнести следующее:

- количество выделенных особых точек может быть очень велико;
- отсутствие связи с функцией яркости, которое проявляется в том, что особые точки не всегда связаны с отчетливо выделяющимися объектами, а коэффициенты корреляции выступающих и фоновых элементов могут быть одинаковы.

## СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

В детекторе кривизны поверхности (частиц) вдоль поверхности  $Z(x, y)$  перемещается центр детектирующей сферы небольшого радиуса  $r$  (рис. 2). Часть рельефа поверхности, ограниченного данной сферой, описывается с помощью прилегающей сферы с радиусом  $R$ , который служит мерой кривизны поверхности. Величина  $R$  определяется по формуле:

$$R = \frac{3\pi r^4}{4(3V - 2\pi r^3)}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем рельефа, заключенной внутри детектирующей сферы.

Величина  $V$  определяется численно по координатам проекции сферы детектора на плоскость  $XY$  и соответствующим координатам  $Z(x, y)$ :

$$V_{\Sigma} = \iiint_V dv \approx \sum_{x_i, y_i \in P} \sum f(x_i, y_i), \quad (2)$$

где подынтегральная функция выглядит следующим образом

$$f(x_i, y_i) = \begin{cases} Z(x_i, y_i) - z_d, & z_d < Z(x_i, y_i) < z_u \\ 2\sqrt{r^2 - d^2}, & Z(x_i, y_i) \geq z_u \\ 0, & Z(x_i, y_i) \leq z_d \end{cases} \quad (3)$$

Локальные максимумы кривизны по аналогии с корреляционным анализом принято считать особыми точками, анализируемыми на принадлежность к реперным отметкам.

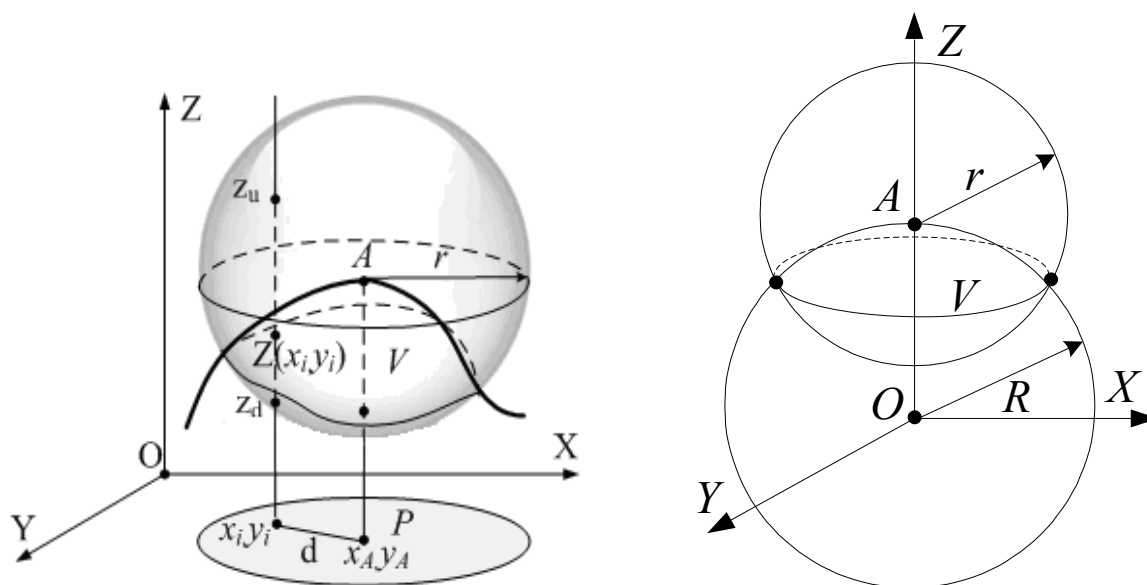


Рис. 2. Схема вычисления кривизны поверхности с помощью сферического детектора

Детектор частиц обладает следующими достоинствами:

- наличие связи с функцией яркости, которая гарантирует выделение наиболее выступающих или углубленных объектов;
- возможность учета степени кривизны по соотношению величины  $V$  и объема детектирующей сферы (подходит под пирамидальный профиль острия индентора);
- наличие количественных оценок кривизны и радиуса объекта.

Недостатками детекторов кривизны являются:

- чувствительность к фоновым элементам изображения и, как следствие, выделение множества особых точек;
- использование численной оценки объема  $V$ , точность которой снижается при уменьшении объема, а также может зависеть от конкретной реализации процедуры.

## ФИЛЬТРАЦИЯ ОСОБЫХ ТОЧЕК

Общим недостатком рассмотренных методов при распознавании реперных отметок можно считать выделение значительного числа особых точек, что требует их предварительного отбора. Пороговая фильтрация по коэффициенту корреляции и по кривизне (выпуклости), применяемые соответственно в методе сравнения с шаблоном и в детекторе кривизны, не всегда позволяют полностью отсеять особые точки, не связанные с реперными отметками. Это обусловлено следующим:

- отметки, нанесенные индентором, могут значительно отличаться по глубине и яркости;
- фильтрация по коэффициенту корреляции может быть затруднена из-за небольшого диапазона разброса этих коэффициентов, что не позволит отсеять большую часть отметок.

Комплексирование корреляционного и структурного методов анализа заключается в выборе особых точек, наиболее соответствующих реперным отметкам по форме (очертаниям) и профилю, что соответствует дополнительной фильтрации особых точек. Для комплексирования первым осуществляется структурный анализ, который позволяет оценить средний радиус  $\bar{R}$  обнаруженных объектов. Полученная величина используется в корреляционном анализе для определения размера шаблона  $n \times n$ .

Пример инвертированного изображения ( $256 \times 256$  пикселей,  $60 \times 60$  мкм) реперных отметок и результаты выделения особых точек разными методами приведены на рис. 3, 4 и в таблице. После обработки изображения детектором получена величина  $\bar{R} = 6$  и установлены параметры корреляционного анализа:  $n = 12$ ,  $P = 6$ . Для отсева избыточного числа особых точек использована пороговая фильтрация по коэффициенту корреляции для корреляционного анализа и яркости для детектора кривизны.

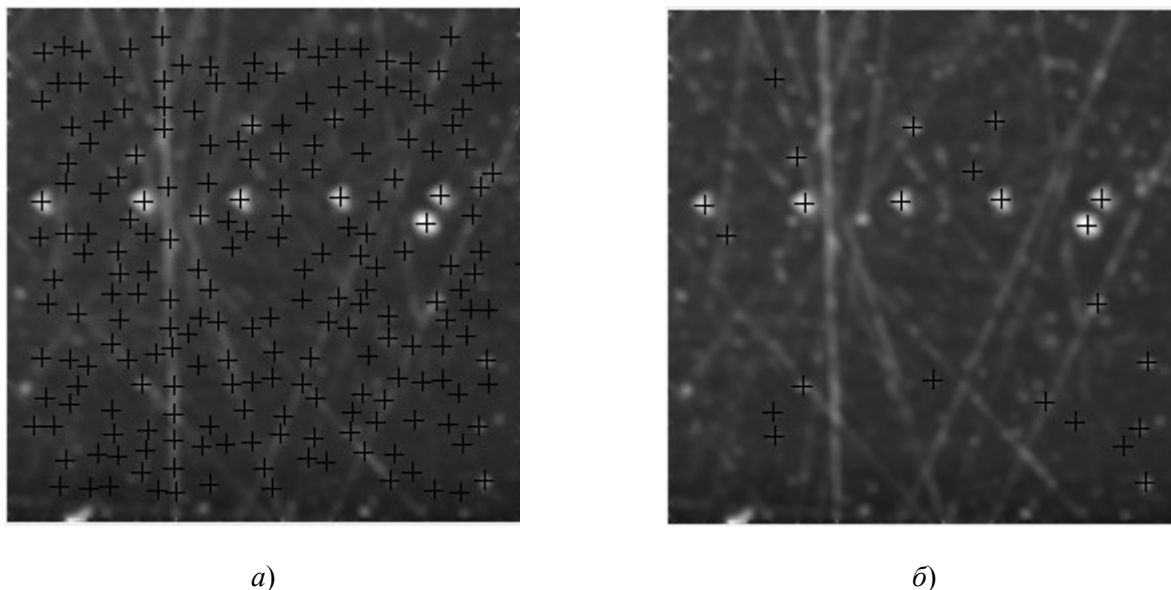
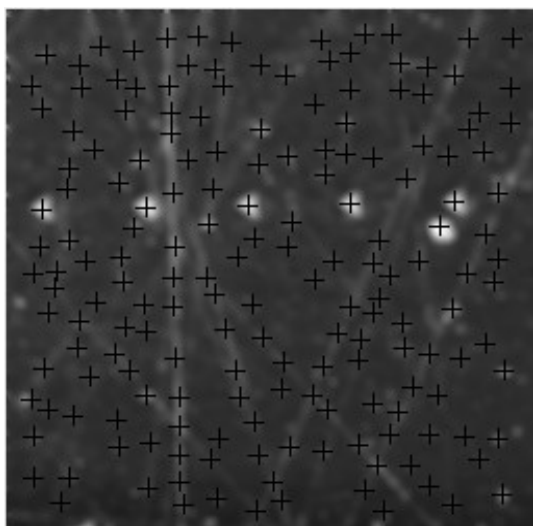
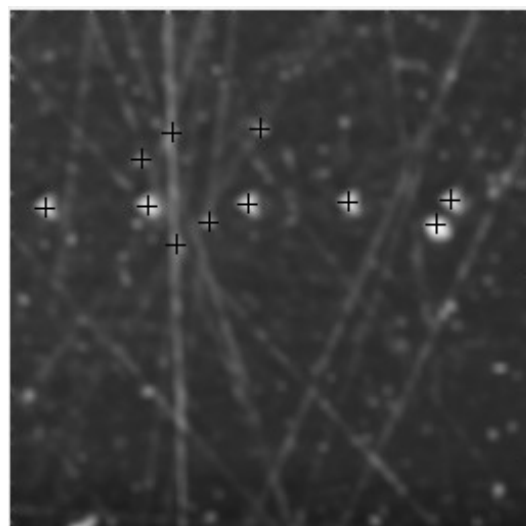


Рис. 3. Результаты выделения и фильтрации особых точек, полученных методом сравнения с шаблоном:  
а) – исходное количество точек 223; б) – количество особых точек 23



a)



б)

**Рис. 4. Результаты выделения и фильтрации особых точек, полученных с помощью детектора кривизны:**  
**a) – исходное количество точек 177; б) – количество особых точек 11**

**Таблица**

**Координаты особых точек**

№	Детектор кривизны		Метод сравнения с шаблоном	
1	165	94	166	94
2	215	93	216	94
3	116	95	116	95
4	67	96	68	96
5	17	97	18	97
6	208	105	209	107
7	97	104	53	34
8	81	115	163	55
9	122	58	122	58
10	79	60	64	73
11	64	73	152	80
12	-	-	29	112
13	-	-	214	146
14	-	-	239	175
15	-	-	132	184
16	-	-	67	187
17	-	-	188	195
18	-	-	52	200
19	-	-	203	205
20	-	-	235	208
21	-	-	53	212
22	-	-	227	217
23	-	-	238	235

Критерием степени фильтрации может выступать разность между известным заранее количеством реперных отметок, которые могут уместиться в кадре микроскопа, и количеством особых точек. Однако по указанным выше причинам на данном этапе не следует стремиться к максимальному отсеву избыточных особых точек. В частности на рис. 3 показано сокращение количества особых точек при увеличении порога коэффициента корреляции с 0 до 50 % от полного диапазона, а на рис. 4 – сокращение количества особых точек при увеличении порога яркости с 0 до 99,6 % от полного диапазона.

Как следует из таблицы и рис. 3, 4, ни один из методов по отдельности даже после фильтрации не дал однозначного выделения особых точек, связанных только с реперными отметками. Для дальнейшего сокращения анализируемых точек выделим среди них те, которые наиболее соответствуют реперным отметкам по форме и профилю. Для этого найдем пересечение множеств точек, полученных разными методами. В результате операции пересечения было выделено шесть общих особых точек (первые 6 строк в таблице), пять из которых связаны с реперными отметками. При этом общими считались точки, координаты которых отличаются не более чем на  $\bar{R}$ .

### АНАЛИЗ ОСОБЫХ ТОЧЕК

Для определения принадлежности общих особых точек к реперным отметкам из них формируются пары с длиной  $L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ , соответствующей расстоянию между отметками. Для определения взаимного сдвига и поворота разных пар  $(x_1, y_1; x_2, y_2)$   $(x'_1, y'_1; x'_2, y'_2)$  их концы связывают уравнениями параллельного переноса:

$$\begin{cases} x'_1 = bx_1 - ay_1 + c \\ y'_1 = ax_1 + by_1 + d \\ x'_2 = bx_2 - ay_2 + c \\ y'_2 = ax_2 + by_2 + d \end{cases} \quad (4)$$

где  $a = \sin \varphi$ ;  $b = \cos \varphi$ ;  $c, d$  – параметры параллельного переноса;  $\varphi$  – угол поворота (рис. 5).

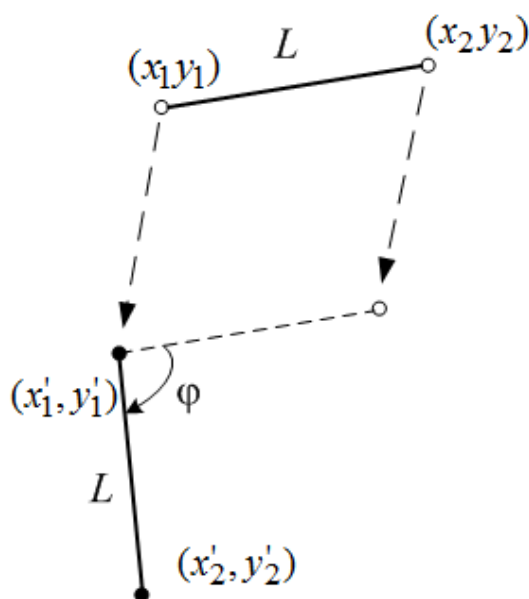


Рис. 5. Схема вычисления длины и угла взаимного поворота пар особых точек

Угол поворота  $\varphi$  пар определяется из следующих выражений:

$$a = \frac{(x_1 - x_2)(y'_1 - y'_2) - (y_1 - y_2)(x'_1 - x'_2)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{(x_1 - x_2)(x'_1 - x'_2) - (y_1 - y_2)(y'_1 - y'_2)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{a}{b}. \quad (6)$$

После определения величины  $\varphi$  конец пары  $(x'_1, y'_1; x'_2, y'_2)$  поворачивается вокруг начала на угол  $\varphi$ :

$$\begin{cases} x''_1 = b(x'_1 - x'_2) + a(y'_1 - y'_2) + x'_2 \\ y''_1 = -a(x'_1 - x'_2) + b(y'_1 - y'_2) + y'_2 \end{cases} \quad (7)$$

Затем вычисляются параметры параллельного переноса  $(c, d)$ :

$$c = x_1 - x''_1,$$

$$d = y_1 - y''_1.$$

Параметры  $(c, d)$  для особых точек, связанных с реперными отметками, вследствие их упорядоченности будут лежать на одной прямой. Для статистической оценки упорядоченности всех пар из набора параметров  $c, d$  методом наименьших квадратов строится уравнение линейной регрессии  $D(c)$ . Затем по всем значениям  $c$  вычисляется коэффициент корреляции Пирсона между соответствующими значениями  $d$  и  $D(c)$ :

$$r_P = \frac{\operatorname{cov}(d, R)}{\sigma_d \sigma_R} = \frac{\sum_{c=c_1}^{c_m} [(d_c - \bar{d}) \cdot (D(c) - \bar{D})]}{\sqrt{\sum_{c=c_1}^{c_m} [(d_c - \bar{d})^2 \cdot (D(c) - \bar{D})^2]}}, \quad (8)$$

где  $d$  – смещение пар;  $R$  – смещение пары по уравнению регрессии;  $\operatorname{cov}(d, R)$  – ковариация;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выделение, фильтрация, комплексирование особых точек (таблица) с последующим вычислением коэффициента Пирсона для пар показало следующее. Величина  $r_P$  для особых точек, вычисленных детектором кривизны, составила 0.005, а для особых точек, вычисленных методом сравнения с шаблоном, составила 0.0235. Для общих особых точек, выделенных двумя методами одновременно, коэффициент  $r_P$  составил 0.78. Как видно, увеличение пространственной упорядоченности анализируемых особых точек сопровождается повышением коэффициента Пирсона, который выступает количественным критерием наличия в кадре реперных отметок.

Таким образом, полученные в представленной работе результаты свидетельствуют о том, что комплексирование различных методов анализа изображений результатов позволяет более избирательно выделять особые точки, связанные с реперными отметками. Дальнейшее использование пар особых точек дает возможность использовать априорные данные о межцентровом интервале реперных отметок и дополнительно отфильтровать не связанные с реперами точки. При малом числе точек использование их сочетаний позволяет увеличить объем анализируемых данных при оценке упорядоченности расположения точек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kucharski S. T., Jarzabek D. Depth Dependence of Nanoindentation Pile-Up Patterns in Copper Single Crystals // *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45(11), pp. 4997-5008.
2. 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.
3. 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.
4. Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. Особенности применения детекторов кривизны поверхности для анализа размеров наночастиц // *Химическая физика и мезоскопия*. 2013. Т. 15, № 1. С. 138-143.
5. Шелковников Ю. К., Гуляев П. В., Тюриков А. В., Кизнерцев С. Р., Кириллов А. И. Применение сферического детектора для анализа СТМ-изображений // *Ползуновский вестник*. 2012. № 3-2. С. 96-99.
6. Ramer U. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves // *Computer Graphics and Image Processing*, 1972, vol. 1(3), pp. 244-256.
7. Liu H. C., Srinath M. D. Partial shape classification using contour matching in distance transformation // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, vol. 12(11), pp. 1072-1079.
8. Kimori Y., Baba N., Morone N. Extended morphological processing: a practical method for automatic spot detection of biological markers from microscopic images // *BMC Bioinformatics*, 2010, vol. 373, pp. 1-13.
9. Elbehiery H., Hefnawy A., Elewa M. Surface Defects Detection for Ceramic Tiles Using Image Processing and Morphological Techniques // *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2007, vol. 1(5), pp. 1488-1492.
10. Фурман Я. А., Кревецкий А. В., Передреев А. К. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2003. 592 с.
11. Canny J. F. Finding edges and lines in images: Master's thesis. MIT, Cambridge, 1983, pp. 50-67.
12. Warnekar C. S., Krishna G. A heuristic clustering algorithm using union of overlapping pattern-cells // *Pattern Recognition*, 2000, vol. 11(2), pp. 85-93.
13. Omachi S., Omachi M. Fast template matching with polynomials // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, vol. 16(8), pp. 2139-2149.
14. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Springer, LNCS, 2015, vol. 9351, pp. 234-241.
15. Цветков О. В., Тананыкина Л. В. Метод предварительного кодирования изображений в корреляционно-экстремальных системах // *Компьютерная оптика*. 2015. Т. 39, № 5. С. 738-743.
16. Zitova B., Flusser J. Image registration methods: a survey // *Image and Vision Computing*, 2003, vol. 21(11), pp. 977-1000.
17. Kerekes R. A., Vijaya Kumar B. V. K. Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study // *Optical Engineering*, 2008, vol. 47(6), 067202.
18. 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(12), pp. 1385-1396.
19. 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.
20. Гуляев П. В., Шелковников Ю. К., Тюриков А. В., Егоров С. Ф. Повышение точности координатной привязки изображений нанообъектов дескрипторами размеров и углов поворота особых точек // *Химическая физика и мезоскопия*. 2018. Т. 20, № 2. С. 317-322.



---

## Complexing of Correlation and Structural Methods for Recognizing Reference Marks on Probe Microscopes Images

Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Kirillov A. I.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

**SUMMARY.** The article is devoted to the recognition of ordered reference marks on a scanning probe microscope images. Reference marks, applied at regular intervals to the surface by the nanoindenter, are used as a tool for coordinate binding the probe of the scanning probe microscope to the investigated surface. The two methods of reference mark recognition are considered. The first method is a particle detector. Particle detector is based on the surface curvature estimation. It pertains to structural analysis methods. The usage of a particle detector is caused by its sensitivity to the reference marks profile, which is important for highlighting the marks against the background of the surrounding surface. This allows to take into account the technological features of the reference mark: height, cross-section size and relation of these features with the height, cross-section size of the surrounding elements. The particle detector calculate the curvature at each point of the surface by approximating the neighborhood of this point with a sphere of a certain radius. This radius is a measure of surface curvature. The second method, pertaining to correlation analysis, is template matching. The usage of the template matching based on its sensitivity to the outline of the reference mark, which is important for recognizing the marks image at low resolution. This allows to recognize the surface areas that are similar to the template, regardless of their location and surroundings. The template matching method is based on the correlation analysis of every image points neighborhood using the template of the reference mark, followed by the search the images special points sited on the local maxima of the correlation coefficient. It is shown that complexing the results of two recognition methods reduces the number of analyzed image points by excluding the points that are not associated with reference points. When analyzed the order of special points, it is proposed to form a set of pairs of special points of a certain length, and calculate the value of the shift and rotation angle of different pairs. The Pearson coefficient, calculated on the statistics of the shift values, is used as a quantitative estimation points regularity. The application of the principle of complexing different recognition methods is considered on a reference marks typical image. Presented results confirm the efficiency of the complexing the methods of correlation and structural recognition.

**KEYWORDS:** scanning tunneling microscope, recognition, reference mark, template matching, curvature detector.

### REFERENCES

1. Kucharski S. T., Jarzabek 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>
2. 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>
3. 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>
4. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Osipov N. I., Kiznertsev S. R. Osobennosti primeneniya detektorov krivizny poverkhnosti dlya analiza razmerov nanochastits [Features of applying the surface curvature detectors for analysis of the size of nanoparticles]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2013, vol. 15, no. 1, pp. 138-143.
5. Shelkovnikov Yu. K., Gulyaev P. V., Tyurikov A. V., Kiznertsev S. R., Kirillov A. I. Primenenie sfericheskogo detektora dlya analiza STM-izobrazheniy [Use of the spherical detector for the STM-images analysis]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2012, no. 3-2, pp. 96-99.

6. Ramer U. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Computer Graphics and Image Processing*, 1972, vol. 1(3), pp. 244-256. [https://doi.org/10.1016/S0146-664X\(72\)80017-0](https://doi.org/10.1016/S0146-664X(72)80017-0)
7. Liu H. C., Srinath M. D. Partial shape classification using contour matching in distance transformation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, vol. 12(11), pp. 1072-1079. <https://doi.org/10.1109/34.61706>
8. Kimori Y., Baba N., Morone N. Extended morphological processing: a practical method for automatic spot detection of biological markers from microscopic images. *BMC Bioinformatics*, 2010, vol. 373, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-11-373>
9. Elbehieri H., Hefnawy A., Elewa M. Surface Defects Detection for Ceramic Tiles Using Image Processing and Morphological Techniques. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2007, vol. 1(5), pp. 1488-1492. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1084534>
10. Furman Ya. A., Krevetskiy A. V., Peredreev A. K. *Vvedenie v konturnyy analiz; prilozheniya k obrabotke izobrazheniy i signalov* [Introduction to contour analysis; image and signal processing applications]. 2-e izd., ispr. Moscow: Fizmatlit Publ., 2003. 592 p.
11. Canny J. F. *Finding edges and lines in images*: Master's thesis. MIT, Cambridge, 1983, pp. 50-67. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/6939>
12. Warnekar C. S., Krishna G. A heuristic clustering algorithm using union of overlapping pattern-cells. *Pattern Recognition*, 2000, vol. 11(2), pp. 85-93. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(79\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0031-3203(79)90054-2)
13. Omachi S., Omachi M. Fast template matching with polynomials. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, vol. 16(8), pp. 2139-2149. <https://doi.org/10.1109/TIP.2007.901243>
14. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Springer, LNCS, 2015, vol. 9351, pp. 234-241. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28)
15. Tsvetkov O. V., Tananykina L. V. Metod predvaritel'nogo kodirovaniya izobrazheniy v korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistemakh [A preprocessing method for correlation-extremal systems]. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2015, vol. 39, no. 5, pp. 738-743. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-5-738-743>
16. Zitova B., Flusser J. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 2003, vol. 21(11), pp. 977-1000. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)
17. Kerekes R. A., Vijaya Kumar B. V. K. Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study. *Optical Engineering*, 2008, vol. 47(6), 067202. <https://doi.org/10.1117/1.2943217>
18. 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(12), pp. 1385-1396. <https://doi.org/10.1109/tip.2002.806245>
19. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Ermolin K. S. Obrabotka i raspoznavanie izobrazheniy repornykh otmetok dlya lokalizatsii zonda v skaniruyushchem tunnel'nom mikroskope. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 3, pp. 437-445.
20. Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Egorov S. F. Povyslenie tochnosti koordinatnoy privyazki izobrazheniy nanoob"ektov deskriptorami razmerov i uglov povorota osobykh toчек. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 2, pp. 317-322.

---

Гуляев Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [lucac@e-izhevsk.ru](mailto:lucac@e-izhevsk.ru)

Шелковников Евгений Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института механики УдмФИЦ УрО РАН, профессор кафедры «Вычислительная техника» ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова, e-mail: [evshelk@mail.ru](mailto:evshelk@mail.ru)

Тюриков Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [alex.tyurikov@mail.ru](mailto:alex.tyurikov@mail.ru)

Кириллов Андрей Игоревич, младший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [pattl7@mail.ru](mailto:pattl7@mail.ru)