

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ КРИВИЗНЫ ДЛЯ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

П.В. Гуляев, Ю.К. Шелковников, А.В. Тюриков, С.Р. Кизнерцев

*Работа посвящена методам выделения особых точек изображения и определения взаимного сдвига двух перекрывающихся изображений. Описано применение статистических методов выделения особых точек изображения. Показано, что корреляционный метод выделения особых точек имеет определенные ограничения. Предложен метод выделения особых точек, основанный на детекторах кривизны поверхности. Приведены результаты испытаний данного метода, а также рекомендации по его применению.*

*Ключевые слова: сканирующий зондовый микроскоп, анализ изображений, локальная кривизна поверхности, детектор кривизны, сферический детектор.*

### ВВЕДЕНИЕ

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) по праву считается одним из наиболее удобных инструментов для исследования и определения размеров наночастиц [1, 2]. Однако одним из недостатков СЗМ является небольшое поле зрения. Для детального исследования участков поверхности, превышающих поле зрения микроскопа, формируется серия перекрывающихся изображений [1]. С целью формирования единой системы координат для таких изображений необходимо определять их величину смещения, которая зависит от ряда факторов (температурные дрейфы конструкции и частиц, гистерезис пьезокерамики, погрешности приводов позиционирования и датчиков перемещений), не контролируемых экспериментатором. Известные методы определения смещения изображений, используемые для их сшивки, требуют значительных вычислительных ресурсов [3]. Для вычисления смещения перекрывающихся изображений в СЗМ был разработан метод статистической дифференциации изображений [1], использующий для выделения особых точек коэффициент корреляции между участком анализируемого изображения и шаблоном изображением особой точки. Шаблон представляет собой массив величин, формирующих растровое изображение особой точки. В методе статистической дифференциации пары этих точек, принадлежащих разным изображениям, определяют взаимную ориентацию изображений. Пары описываются с помощью дескриптора, представляющего собой в простейшем случае координаты концов  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  и длину соединяющего их отрезка. Для каждой пары точек, образующих

отрезки равной длины, методами машинной графики определяются смещение и угол поворота. Полученные величины определяют координаты элемента гистограмм, который увеличивается на 1. Гистограмма смещения представляет собой двумерный массив, размерность которого равна удвоенному размеру изображений в пикселях, а гистограмма поворота – одномерный массив, индексы которого соответствуют углам поворота пар от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ . При большом количестве особых точек в гистограммах образуются отчетливо различимые максимумы, координаты которых определяют параметры смещения изображений.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

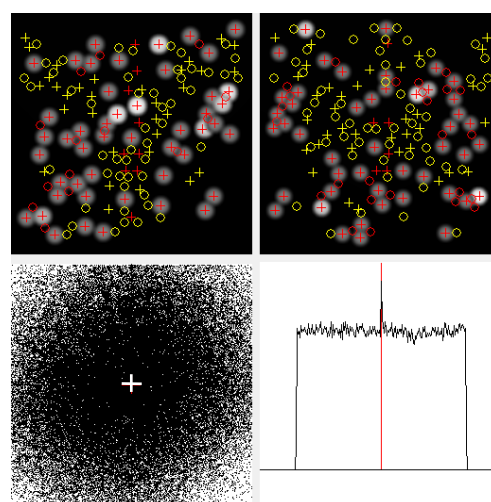


Рисунок 1 – Результаты координатной привязки изображений (диаметр шаблона 10 пикселей)

Как показала практика, корреляционный метод выделения особых точек плохо работает. **ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016**

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ КРИВИЗНЫ ДЛЯ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

тает при множественном наложении контуров частиц, при неточном выборе размеров шаблона, при малом перекрытии изображений, наличии искажений. На рисунке 1 представлен пример такого случая.

В качестве шаблона использовался круг с градиентной заливкой, изменяющей цвет заливки от черного к белому в радиальном направлении от периферии к центру (рисунок 2).

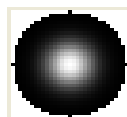


Рисунок 2 – Шаблон особой точки

В верхней части рисунка 1 расположены анализируемые изображения, на которых крестиками (положительный коэффициент корреляции) и кружками (отрицательный коэффициент корреляции) отмечены особые точки. Внизу располагаются:

- двумерная гистограмма смещения (x: -256..256, y: -256..256 пикселей), в которой точками отмечены локальные экстремумы гистограммы смещений, а крестиком – максимум, соответствующий искомому смещению;

- одномерная (от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ ) гистограмма угла поворота.

Из рисунка 1 следует, что при определении смещения вследствие неточного размера радиуса шаблона определилось множество элементов фона и возникла ошибка определения смещения. Очевидно, что большая избирательность к выделению частиц позволила бы исключить подобные случаи. Для организации такой избирательности был использован детектор частиц «Сфера», основанный на анализе кривизны поверхности [4, 5].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки изображения (рисунок 1) детектором кривизны «Сфера» вычислен средний радиус частиц 8.71. Установление диаметра шаблона в соответствии со средним радиусом частиц позволило исключить из анализа большую часть фоновых особых точек и точно определить смещение (рисунок 3).

Для вычисления радиуса частиц в детекторе «Сфера» вдоль поверхности  $Z(x, y)$  перемещается центр сферы небольшого радиуса  $r$  (рисунок 4).

Если обозначить объем части рельефа, заключенной внутри сферы, через  $V$  и аппроксимировать этот объем другой сферой с

радиусом  $R$  (рисунок 5), тогда кривизна поверхности (радиус частицы в точке  $A$ ) может быть оценена следующим выражением [5]:

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

где величина  $V$  определяется по приближенной формуле:

$$V = \iiint_V dv \approx \sum_{x_i, y_i \in P} \sum f(x_i, y_i).$$

В вычислениях, производимых в точке  $A$ , участвуют точки, принадлежащие кругу  $P$  с радиусом  $r$ :

$$d = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2} \leq r.$$

Изменяя  $d$  от 0 до  $r$ , в каждой такой точке вычисляются следующие величины:  $z_{sh} = \sqrt{r^2 - d^2}$ ;

$$z_d = Z(x_A, y_A) - z_{sh}; \quad z_u = Z(x_A, y_A) + z_{sh}.$$

Тогда для  $f(x_i, y_i)$  можно записать:

$$f(x_i, y_i) = \begin{cases} Z(x_i, y_i) - z_d, & z_d < Z(x_i, y_i) < z_u \\ 2z_{sh}, & Z(x_i, y_i) \geq z_u \\ 0, & Z(x_i, y_i) \leq z_d \end{cases}$$

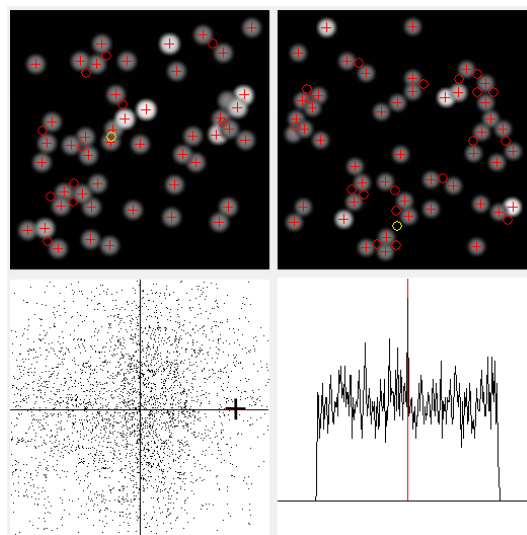


Рисунок 3 – Результаты координатной привязки изображений (диаметр шаблона 15 пикселей)

После обработки всего изображения формируется карта кривизны поверхности, локальные экстремумы которой соответствуют особым точкам изображений, связанных с частицами или элементами подложки (матрицы для наночастиц). В данном случае детектор кривизны позволяет выполнить сегментацию изображения, включить в анализ наибо-

лее очевидные элементы и исключить влияние фоновых помех на результат вычисления смещения. Детекторы при этом менее чувствительны к наложению контуров частиц (особых точек) [6].

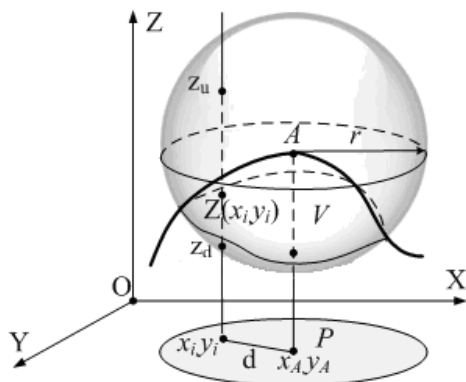


Рисунок 4 – Схема сферического детектора кривизны

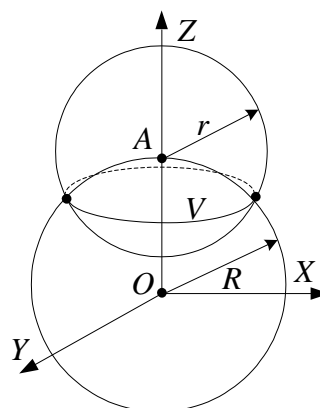


Рисунок 5 – Схема вычисления объема общей части двух сфер

Блок-схема алгоритма координатной привязки изображений  $Z_0$  и  $Z'$  с использованием детектора кривизны представлена на рисунке 6.

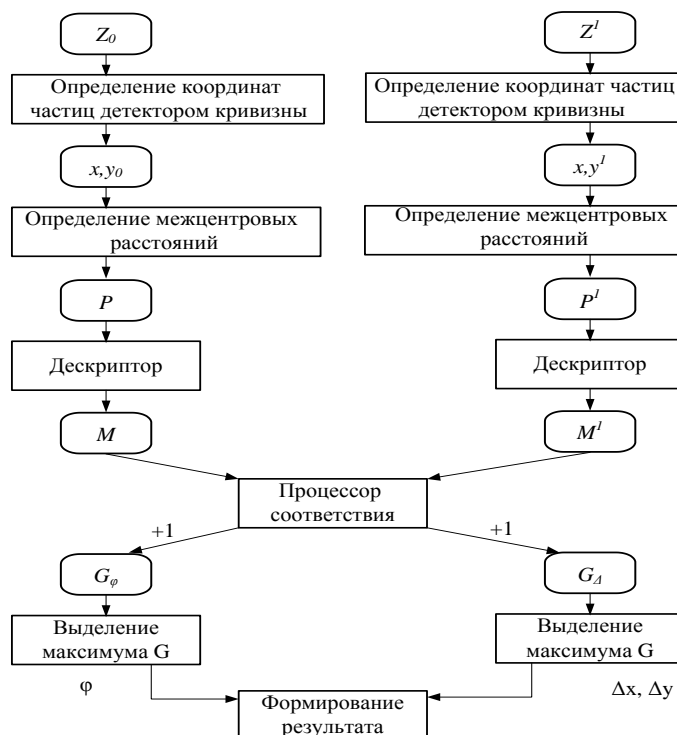


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма координатной привязки изображений с использованием детектора частиц

Каждое из изображений сначала обрабатывается детектором кривизны. Точки локальных экстремумов  $x, y$  кривизны формируют множества  $P$  и  $P'$  пар, которые после сортировки по длине образуют два массива  $M$  и  $M'$  дескрипторов. Индекс ячейки массива при этом соответствует длине отрезка в дескрипторе пары особых точек. На рисунке 7

показаны результаты работы алгоритма координатной привязки изображений с использованием детектора «Сфера».

Как видно, детектор выделил особые точки, соответствующие только частицам. При хорошем контрасте частиц и фона область перекрытия изображений может составлять всего 10–15%. Если общих частиц

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ КРИВИЗНЫ ДЛЯ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

незначительное число, можно увеличить чувствительность детектора для выделения особых точек на изображении подложки. В данном случае необходимо устанавливать коэффициент перекрытия на уровне 15–20 % (рисунок 8).

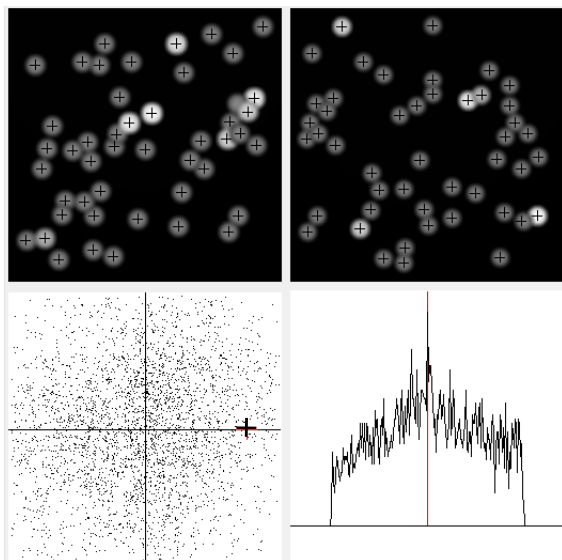


Рисунок 7 – Координатная привязка с применением детектора «Сфера»

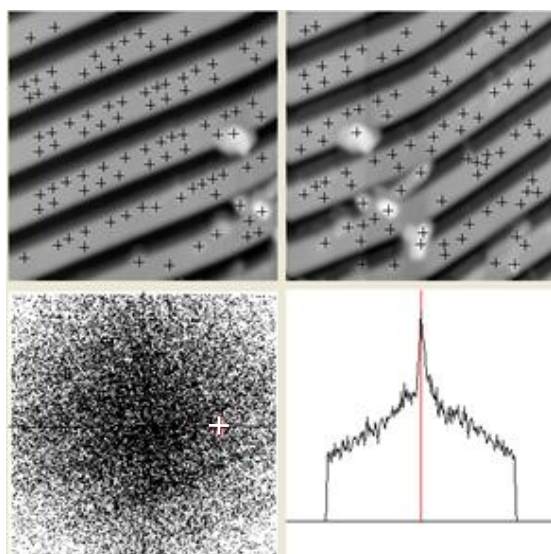


Рисунок 8 – Координатная привязка группы частиц

Таким образом, основным преимуществами применения детекторов кривизны являются:

- определение среднего размера неровностей для последующего уточнения размеров шаблона при корреляционном методе выделения особых точек;

- нечувствительность к изменениям функции яркости изображений, вызванным естественным различием рельефа двух совмещаемых изображений;

- чувствительность к элементам рельефа подложки, что может использоваться при малом количестве частиц в общей части изображений.

В заключение следует отметить, что еще большие перспективы для координатной привязки изображений несут в себе методы комплексирования результатов, полученных с помощью детекторов кривизны и корреляционного анализа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелковников, Ю. К. Построение изображений поверхности при многокадровом режиме сканирующего туннельного микроскопа / Ю. К. Шелковников, М. Р. Гафаров, П. В. Гуляев [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2008. – Т. 10, № 4. – С. 514–520.
2. Гафаров, М. Р. Контроль дисперсности наночастиц в СТМ-измерениях выделением структурных элементов их изображений / М. Р. Гафаров, Е. Ю. Шелковников, П. В. Гуляев [и др.] // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3. – С. 118–123.
3. Силантьев, Р. В. Сшивка цифровых перекрывающихся изображений без использования навигационной информации в задачах мониторинга / Р. В. Силантьев // Автоматика, электроника и средства связи: Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2012. – № 2(11). – С. 89–93.
4. Гуляев, П. В. Особенности применения детекторов кривизны поверхности для анализа размеров наночастиц / П. В. Гуляев, Е. Ю. Шелковников, А. В. Тюриков [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2013. – Т. 15, № 1. – С. 138–143.
5. Шелковников, Ю. К. Применение сферического детектора для анализа СТМ-изображений / Ю. К. Шелковников, П. В. Гуляев, А. В. Тюриков [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3. – С. 96–99.
6. Бардин, Б. В. Обнаружение локальных объектов на цифровых микроскопических изображениях / Б. В. Бардин, И. В. Чубинский-Надеждин // Научное приборостроение. – 2009. – Т. 19, № 4. – С. 96–102.

**Гуляев П.В.** – к.т.н., с.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: lucac@e-izhevsk.ru.

**Шелковников Ю.К.** – д.т.н., г.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: iit@udman.ru.

**Тюриков А.В.** – к.ф.-м.н., с.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: alex.tyurikov@mail.ru.

**Кизнерцев С.Р.** – к.т.н., с.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: iit@udman.ru.