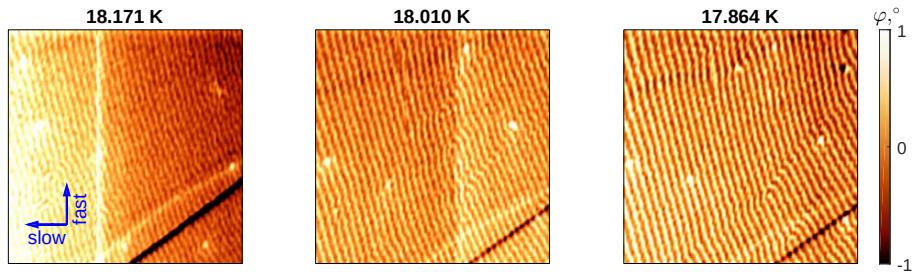


Скелетонизация двумерных изображений и анализ данных, получаемых методами сканирующей зондовой микроскопии

Алексей Юрьевич Аладышкин



Мотивация: сканирующая зондовая микроскопия и анализ данных



Stolyarov *et al.* still unpublished

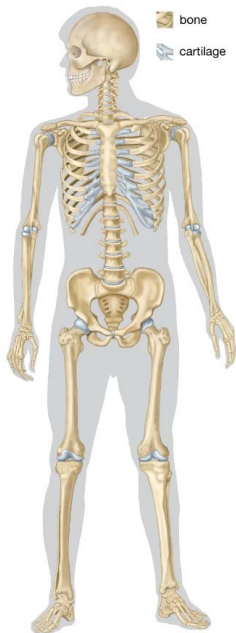
Как правило, AFM-MFM-STM-STS изображения имеют:

- неустраняемый дрейф области сканирования;
- шумы и нестабильности; вариации интенсивности из-за наклона.

Эти обстоятельства препятствуют прямому сравнению двух bitmap-изображений.

Определение: Скелет (skeleton) полутонового изображения есть комбинация одно-пиксельных линий, которые воспроизводят топологию и характерные особенности исходного изображения.

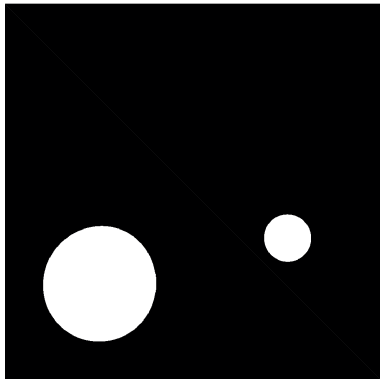
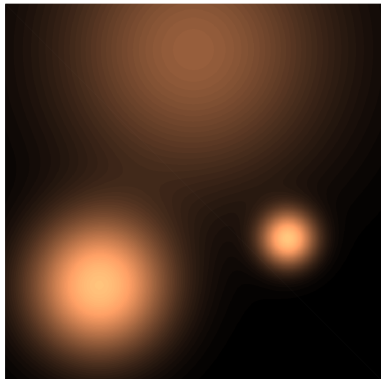
Скелетонизация как путь отбрасывания несущественного



Перевод полутонового изображения в двоичный формат

Простой алгоритм бинаризации изображения:

```
if halftone_image(n) >= threshold      In brief: image_bw = z > threshold  
    binary_image(n) = 1  
else  
    binary_image(n) = 0  
end
```



Эрозия

Эрозия - это процедура утончения линий на бинаризованном изображении без нарушения связности.

Format of the command in Matlab:

$Image_new = bwmorph(Image, 'thin', n)$ or $Image_new = bwmorph(Image, 'thin', inf)$,

where the command of deletion of pixels of the binary image is executed n times or until the stabilization of the image (inf) without breaking connectivity.

model image with stripes

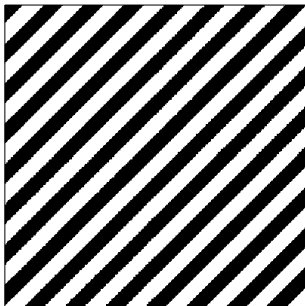
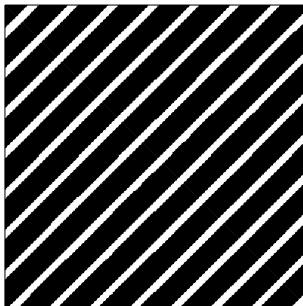
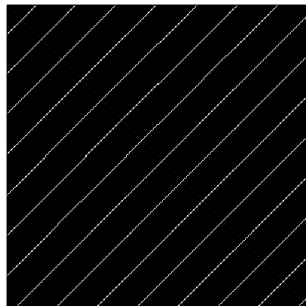


image with thinner stripes



skeleton



Gonzalez, Woods and Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2nd ed. (2010)

Дилатация

Дилатация – это процесс замены каждого пикселя исходного изображения определенным «узором»:

$$pattern = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{or} \quad pattern = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Format of the command in Matlab: `Image_new = imdilate(Image, pattern)`

model image five bright dots

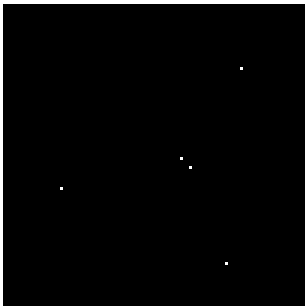


image with five crosses

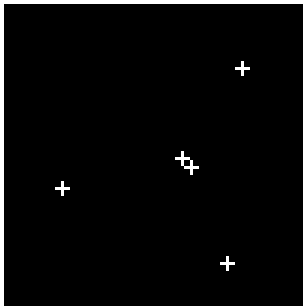
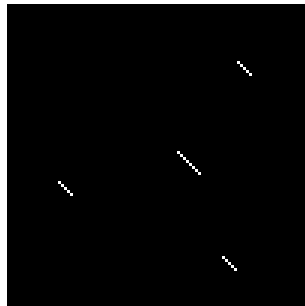


image with four lines



Gonzalez, Woods and Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2nd ed. (2010)

Замыкание разорванных линий: дилатация + эрозия

original bitmap image

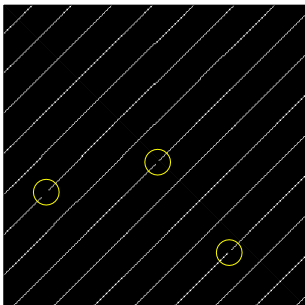
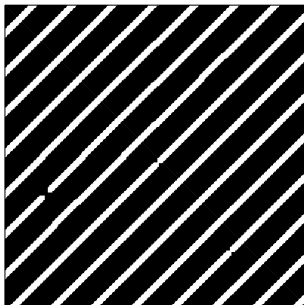
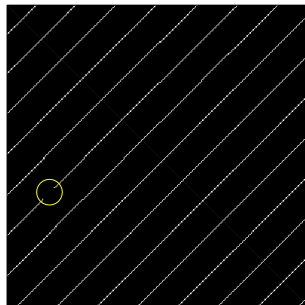


image after dilatation



dilated image after erosion



Особые точки изображения – минуции (лат. *minutiae*)

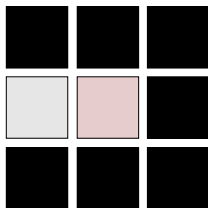
One can consider 3×3 block around an arbitrary bright pixel.

If the central bright point has only one bright neighbor, then it is the **end** point.

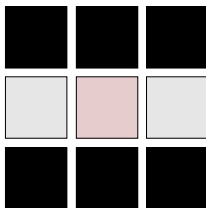
If the central bright point has two bright neighbors, then it is the trivial **inner** point.

If the central bright point has more than two bright neighbors, it is the **branching** point.

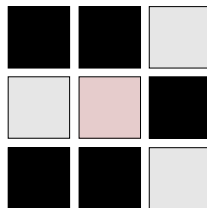
End point



Inner point



Branching point

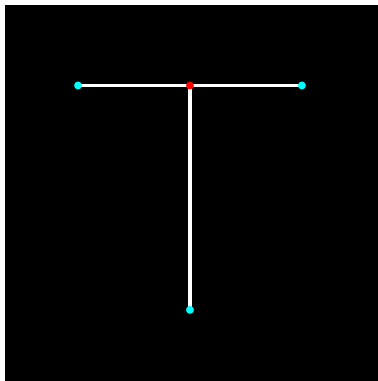


Автоматическое обнаружение особых точек

`skeleton = bwmorph(image, 'skel', inf)`

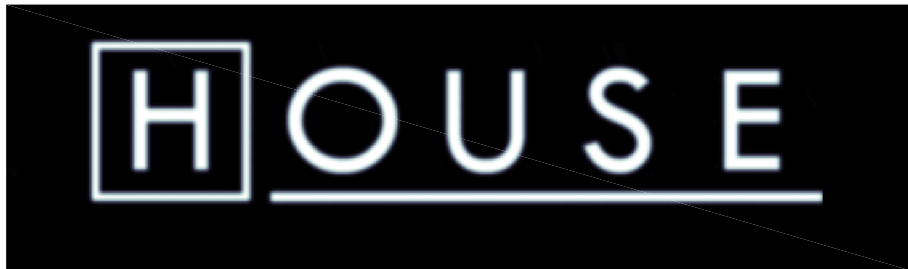
End points: `bwmorph(skeleton, 'endpoints')` (one neighbour point, ●)

Branching points: `bwmorph(skeleton, 'branchpoints')` (three neighbour points, ●)

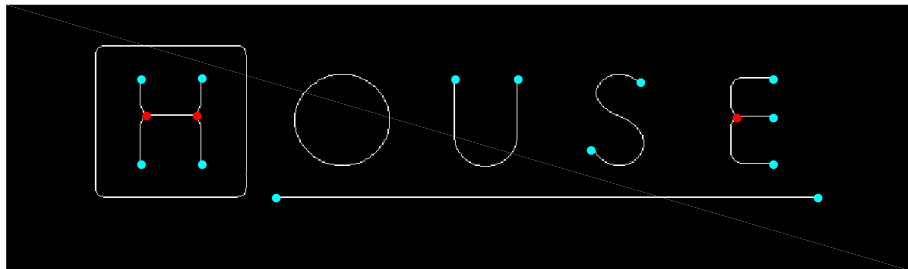


Gonzalez, Woods and Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2nd ed. (2010)

Original image from Internet:



Skeleton and peculiar points:

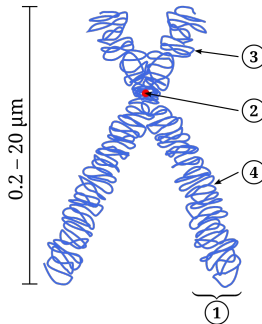
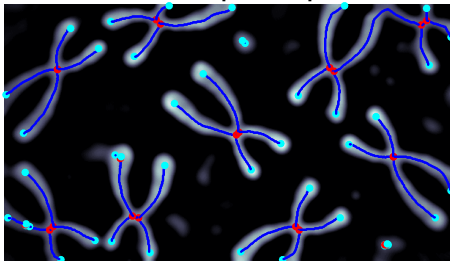


Пример: оптическая микроскопия и хромосомы

Original halftone image



Skeleton and peculiar points

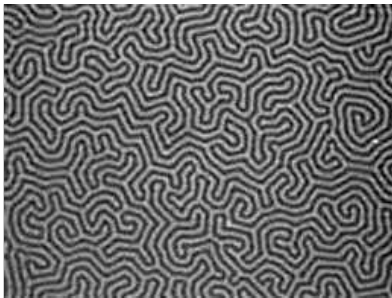


1. Chromatid
2. Centromere
3. Short arm
4. Long arm

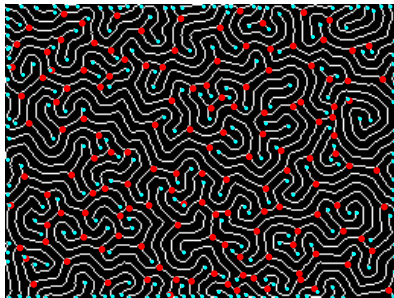
<https://www.istockphoto.com/ru/фотографии/chromosome>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromosome>

Пример: магнитооптика и доменные структуры

Aligned halftone image



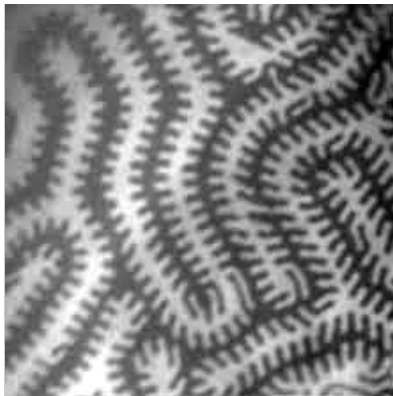
Skeleton of image and peculiar points



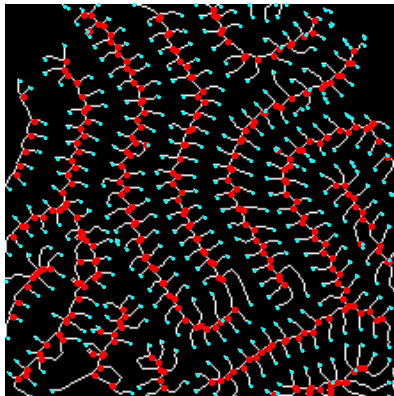
Wang, Shang, Wu, Yang and Ji, *Evolution of Magnetic Domain Structure in a YIG Thin Film* // Chinese Physics Letters, vol. 33, 047502 (2016)

Пример: магнитооптика и доменные структуры

Halftone image from Internet

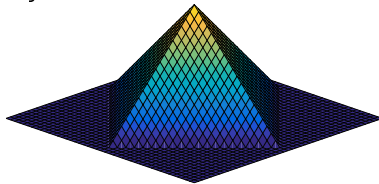


Skeleton of image and peculiar points

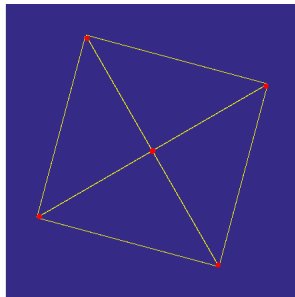
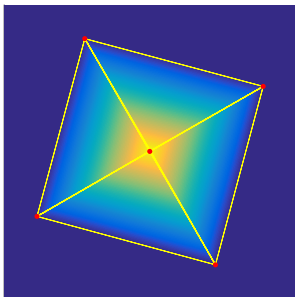


Обнаружение границ атомарно-гладких террас

Example: pyramid with $\{111\}$ faces



Processing: calculation of the Laplacian $\rightarrow$ binarization $\rightarrow$ detection of branching points



Important to note that second-order partial derivatives are maximal at the edges of flat terraces

Обнаружение границ атомарно-гладких террас и центров винтовых дислокаций

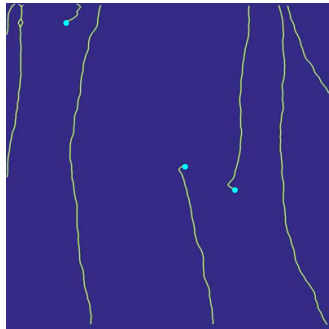
Processing: compensation of global tilt → calculation of the Laplacian → median filtering (optional) → dilatation → erosion → detection of the end points

topography of Pb(111)/Si(111) 7×7 film



image size $174 \times 174 \text{ nm}^2$

Skeleton and end points



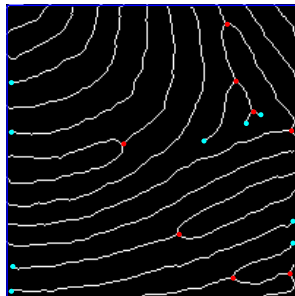
Aladyshkin et al., *Observation of hidden parts of dislocation loops in thin Pb films by means of scanning tunneling spectroscopy* // Journal of Physical Chemistry C, vol. 125, 26814-26822 (2021)

Анализ отпечатков пальцев

Typical image from Internet



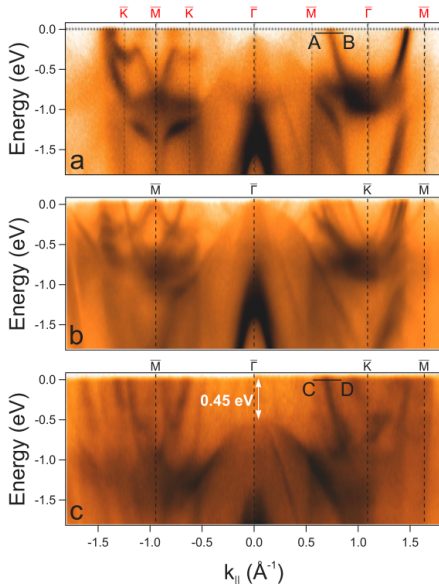
Skeleton and peculiar points



Принципы дактилоскопического анализа (согласно Википедии):

1. Улучшение качества исходного полутонового изображения отпечатка.
2. Вычисление поля ориентации папиллярных линий отпечатка.
3. Бинаризация изображения отпечатка пороговой обработкой.
4. Утончение линий изображения отпечатка до тех пор, пока линии не будут шириной один пиксель.
5. Выделение минуций (локальных особенностей) типа «окончание» и «ветвление».
6. Корреляционный анализ минуций данного отпечатка и минуций отпечатков базы данных (для опознания достаточно 65% совпадения).

Анализ результатов электронной спектроскопии



Tupchaya, Bondarenko, Yakovlev *et al.*, 2D system incorporating perforated Mg sheet sandwiched between Pb layer and Si(111). Appl. Surf. Sci., vol. 589, 152951 (2022)

Заключение

- Построение скелетов является эффективным методом анализа двумерных изображений, в частности, результатов сканирующей зондовой микроскопии (STM, AFM, MFM, etc).
- Для построения скелетов изображений можно использовать или готовые функции и пакеты (Matlab, Python), или написать собственные сценарии обработки.
- Для монокристаллов $\text{EuFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ изучены особенности движения топологических (Y-образных) дефектов.
- Обнаружено немонотонное изменение линейной скорости вблизи критической температуры магнитного фазового перехода ($T \simeq 18 \text{ K}$).