

Методы улучшения контраста изображений

А.Г. Трофимов
к.т.н., доцент, НИЯУ МИФИ

lab@neuroinfo.ru
<http://datalearning.ru>

Курс "Анализ изображений"

Апрель 2021

Содержание

- Цели улучшения контраста
- Линейное масштабирование яркости
- Гамма-коррекция
- Выравнивание гистограмм
- Адаптивное выравнивание гистограмм и CLAHE
- Histogram matching

Цели улучшения изображений

Digital image processing continuum

Low Level Process	Mid Level Process	High Level Process
Input: Image Output: Image	Input: Image Output: Attributes	Input: Attributes Output: Understanding
Examples: Noise removal, image sharpening	Examples: Object recognition, segmentation	Examples: Scene understanding, autonomous navigation

Улучшение изображений – основной этап низкоуровневой обработки

Цели улучшения изображений:

- Повышение восприимчивости изображения человеком
- Предварительная обработка изображения для дальнейшего анализа

Bora D. Importance of Image Enhancement Techniques in Color Image Segmentation: A Comprehensive and Comparative Study // arXiv preprint arXiv:1708.05081 (2017).

Задачи улучшения изображений

Задачи улучшения изображений:

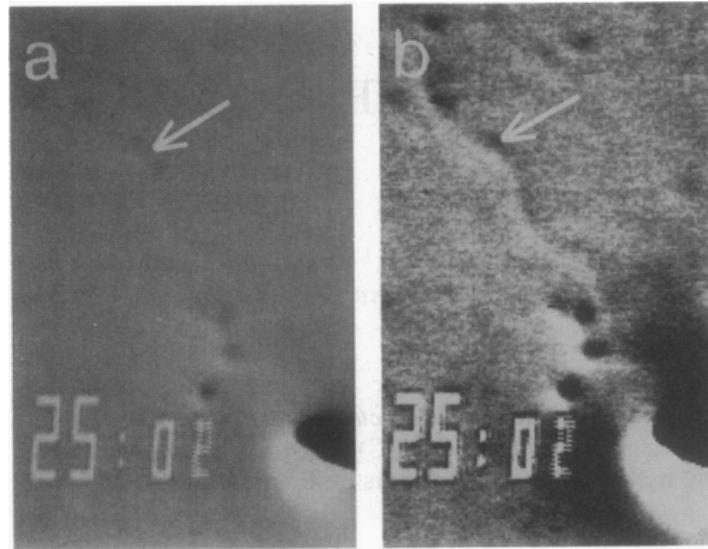
- Уменьшение шума
- Устранение артефактов
- Увеличение контрастности как всего изображения, так и интересующих объектов

Хорошая практика: получение нескольких изображений в результате применения различных методов улучшения, каждое из которых подчеркивает какую-то свою особенность

При неправильном использовании методов улучшения на изображении могут появиться **артефакты**, требуется осторожность в погоне за максимальным качеством

Улучшение контраста. Иллюстрация 1

Изображения жгутика кишечной палочки (*E. coli*)



Увеличение контрастности позволяет более четко увидеть различие между нормальной и патологической тканями или фоном, особенно при высоком уровне шума

Улучшение контраста. Иллюстрация 2



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Улучшение контраста. Иллюстрация 3



Улучшение контраста. Иллюстрация 4



Image before processing



Image after processing



Image before processing



Image after processing

Масштабирование яркости

Методы улучшения контраста, как правило, связаны
количественными мерами контраста

Глобальный контраст:

$$C_g = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}}$$

$[a_{\min}, a_{\max}]$ – динамический диапазон изображения

$[P_{\min}, P_{\max}]$ – максимально возможный диапазон яркостей

Простейший способ увеличения глобального контраста –
масштабирование яркости (*contrast stretching*):

$$\tilde{a}(m, n) = g(a(m, n)), \quad \forall m, n$$

$$g(a) = \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}(P_{\max} - P_{\min}) + P_{\min}$$

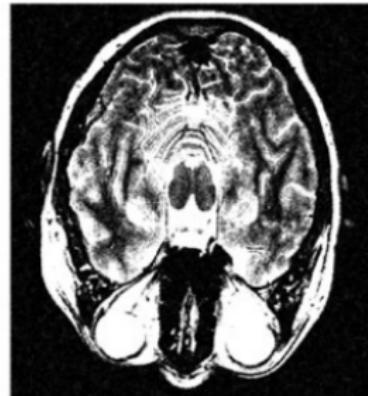
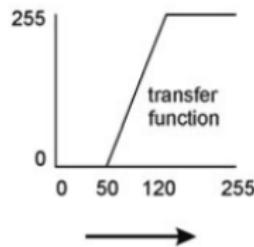
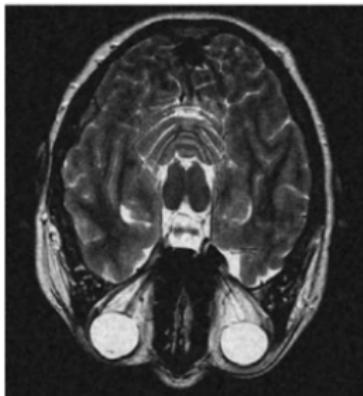
Функция $g(a)$ называется **передаточной функцией (transfer function)** преобразования

Контрастирование в яркостном окне

Отображение части динамического диапазона

$[w_{\min}, w_{\max}] \in [a_{\min}, a_{\max}]$ на максимально возможный диапазон яркостей $[0, P - 1]$:

$$g(a) = \begin{cases} 0, & a < w_{\min} \\ \frac{a-w_{\min}}{w_{\max}-w_{\min}}(P-1), & w_{\min} \leq a \leq w_{\max} \\ P-1, & a > w_{\max} \end{cases}$$

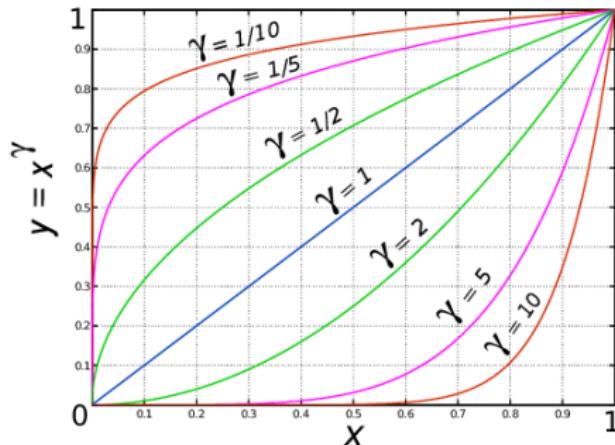


Нелинейное масштабирование яркости

Нелинейное отображение динамического диапазона на максимально возможный диапазон яркостей

$$g(a) = \left(\frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \right)^{\gamma} (P - 1)$$

называется гамма-коррекцией изображения,
 γ – корректирующий фактор (gamma correction factor)



Гамма-коррекция изображения. Иллюстрация

- $\gamma = 1 \Rightarrow$ линейное масштабирование яркости
- $\gamma < 1 \Rightarrow$ увеличение яркости (**gamma compression**)
- $\gamma > 1 \Rightarrow$ уменьшение яркости (**gamma expansion**)



В некоторых библиотеках корректирующий фактор равен $1/\gamma$

Выравнивание гистограммы

Гистограмма яркости $h(p)$, $p = \overline{0, P - 1}$, характеризует распределение пикселей изображения по значениям яркости:

$$h(p) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [a(m, n) = p]$$

Нормализованная гистограмма яркости:

$$h_{norm}(p) = \frac{1}{\sum_{q=0}^{P-1} h(q)} h(p) = \frac{h(p)}{MN}$$

$h_{norm}(p)$ – оценка вероятности того, что яркость случайно выбранного пикселя будет равна значению p , $p = \overline{0, P - 1}$

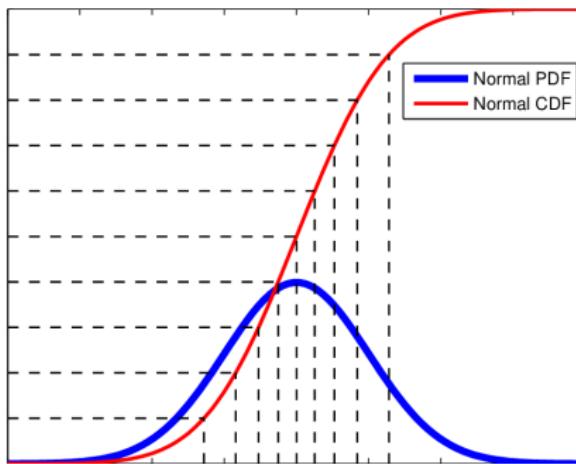
Преобразование яркостей изображения, обеспечивающее **равномерность** их распределения, называется **выравниванием гистограммы**

Выравнивание распределений

Чему равна передаточная функция при выравнивании гистограммы?

Из теории вероятностей:

$$X \sim F_X(x), \quad Y = F_X(X) \quad \Rightarrow \quad Y \sim R(0, 1)$$



Передаточная функция выравнивания гистограммы

Оценка функции распределения яркостей изображения –
эмпирическая функция распределения:

$$H(p) = \sum_{q=0}^p h_{norm}(q) = \frac{1}{MN} \sum_{q=0}^p h(q)$$

$$0 \leq H(0) \leq \dots \leq H(P - 1) = 1$$

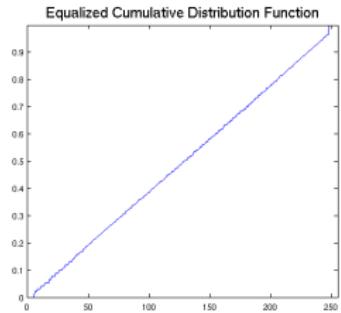
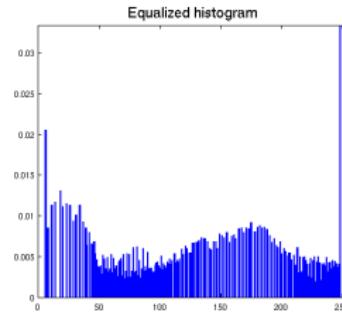
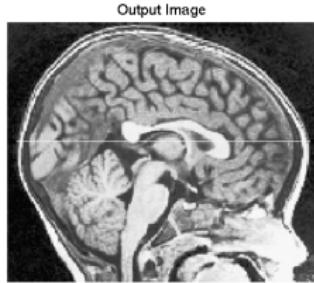
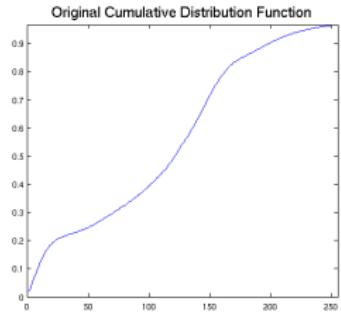
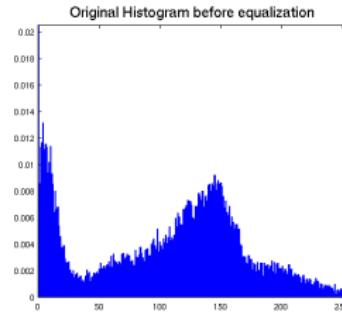
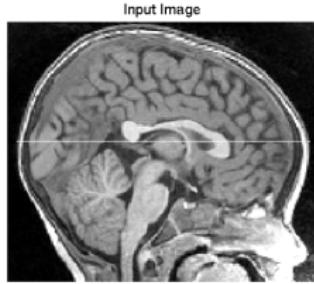
Передаточная функция при выравнивании гистограммы:

$$g(a) = (P_{\max} - P_{\min})H(a) + P_{\min}$$

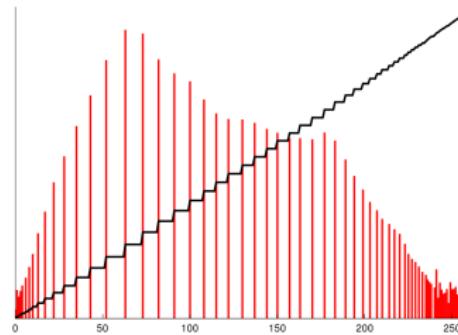
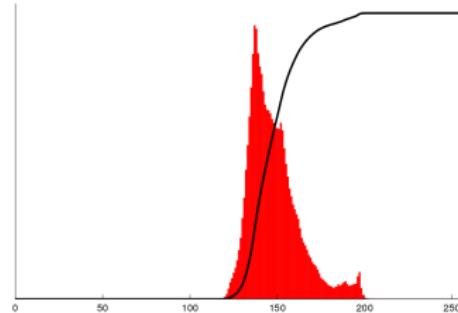
Выравнивание гистограммы – **нелинейное отображение**
динамического диапазона на максимально возможный
диапазон яркостей

Узкие интервалы яркости с большим числом пикселей будут
растягиваться, а широкие с малым числом пикселей –
сжиматься

Выравнивание гистограмм. Иллюстрация 1



Выравнивание гистограмм. Иллюстрация 2

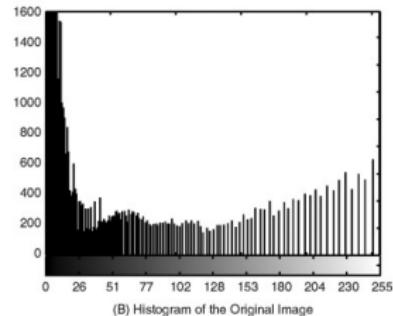


Выравнивание гистограмм. Иллюстрация 3

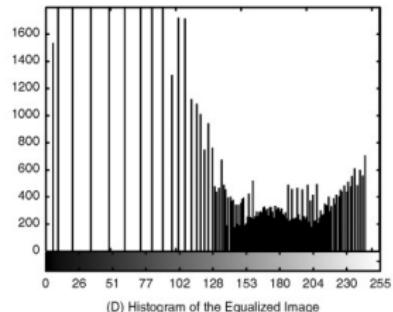
Если $h_{norm}(p) > \frac{MN}{P}$, то все они отобразятся в новую яркость, что может приводить к нарушению равномерности



(A) Original Image



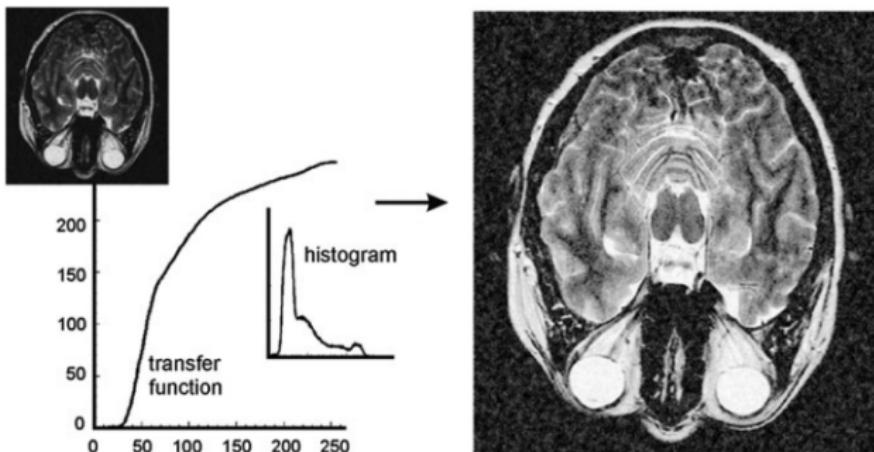
(C) Image with Equalized Histogram



Артефакт выравнивания гистограммы

При выравнивании гистограммы предполагается, что **яркости всех пикселей одинаково важны** и не учитывает никакой информации об объектах на изображении

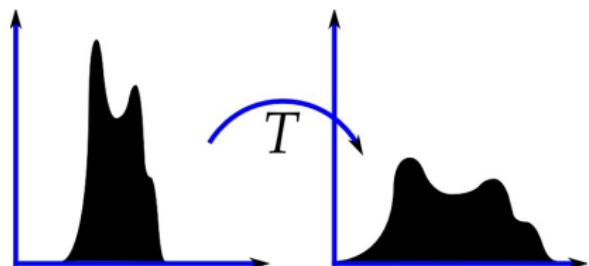
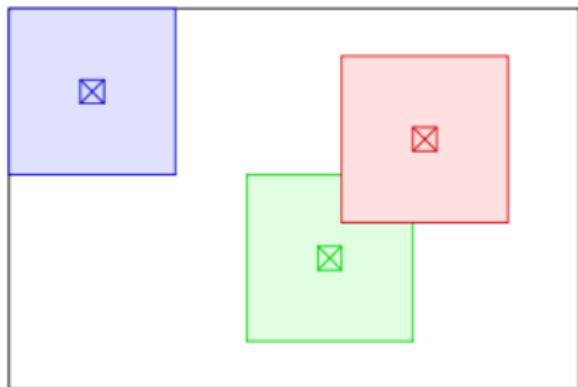
Недостаток: большая и темная фоновая область может оказаться **излишне контрастированной** за счет уменьшения контраста объекта на переднем плане



Локальные гистограммы

Идея: выравнивать локальные гистограммы яркости

Локальные гистограммы вычисляются на основе распределения яркостей в некоторой окрестности пикселя



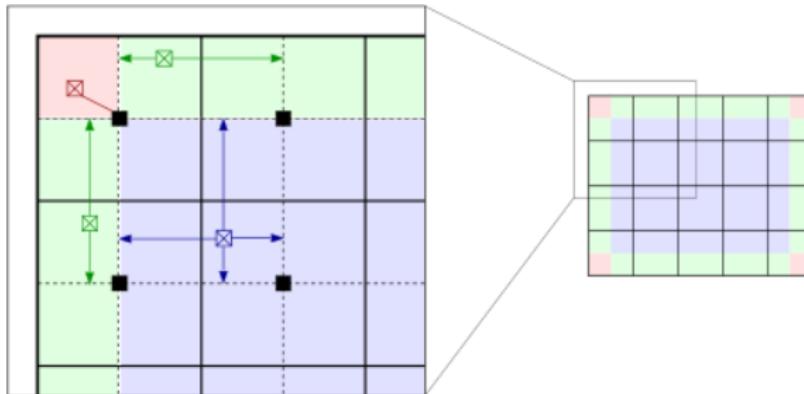
Центральному пикслю окна присваивается яркость, выровненная по локальной гистограмме (local histogram equalization, LHE)

Черепичное разбиение изображения

Недостаток LHE: вычисление локальных гистограмм в каждом пикселе слишком затратно

Идея: рассчитывать локальные гистограммы **только в узловых пикселях**

Исходное изображение разбивается на фрагменты, называемые **черепицей (tiles)**, узловые пиксели – центры черепичных фрагментов



Адаптивное выравнивание гистограмм (AHE)

Алгоритм АНЕ (Adaptive histogram equalization):

Шаг 1. Разбиение изображения на черепичные фрагменты

Шаг 2. Расчет локальной гистограммы в каждом черепичном фрагменте

Шаг 3. Выравнивание яркостей в каждом фрагменте

Шаг 4. **Билинейная интерполяция** яркостей (для устранения “швов” на границах фрагментов)

Замечания:

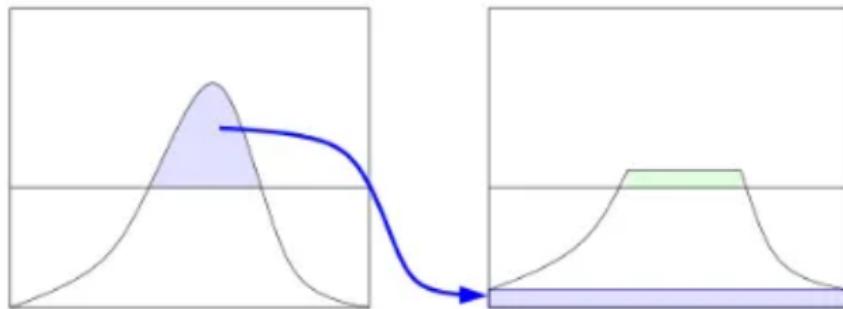
- Термины LHE и АНЕ часто взаимозаменяемы
- Устранение “швов” может проводиться более сложным образом
- Адаптивное выравнивание **не обеспечивает монотонность преобразования яркости**, т.е.

$$a(i, j) < a(m, n) \not\Rightarrow \tilde{a}(i, j) < \tilde{a}(m, n)$$

Недостаток адаптивного выравнивания

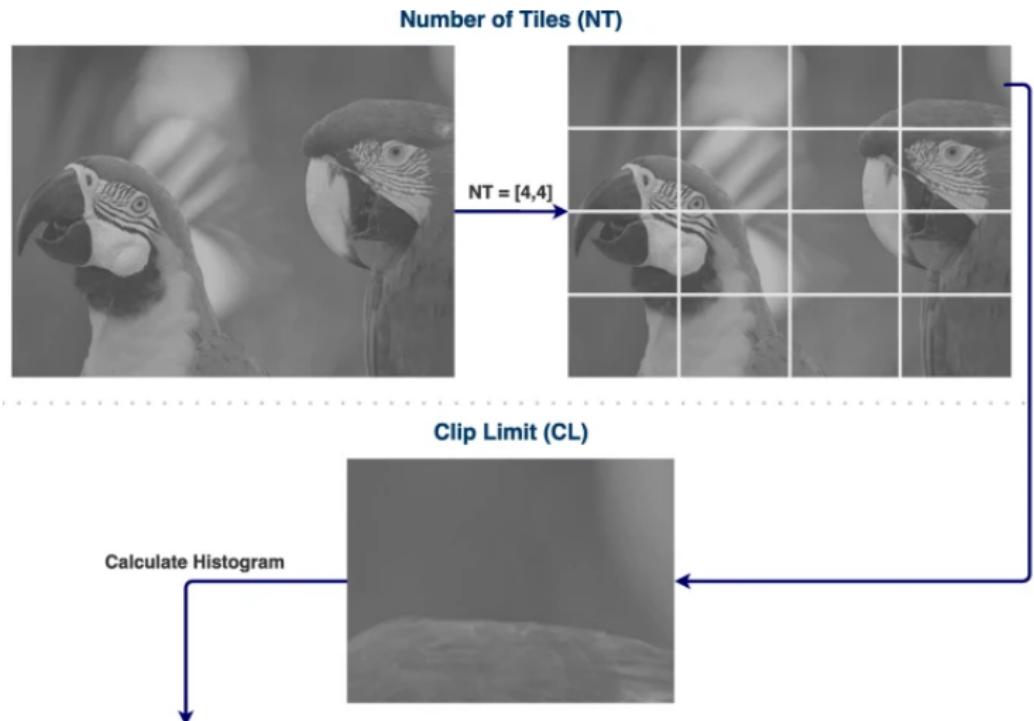
Недостаток АНЕ: чрезмерное усиление шума в низкоконтрастных областях за счет чрезмерного растяжения узкого динамического диапазона

Решение: ограничить усиление контраста в низкоконтрастных областях ([Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE](#))

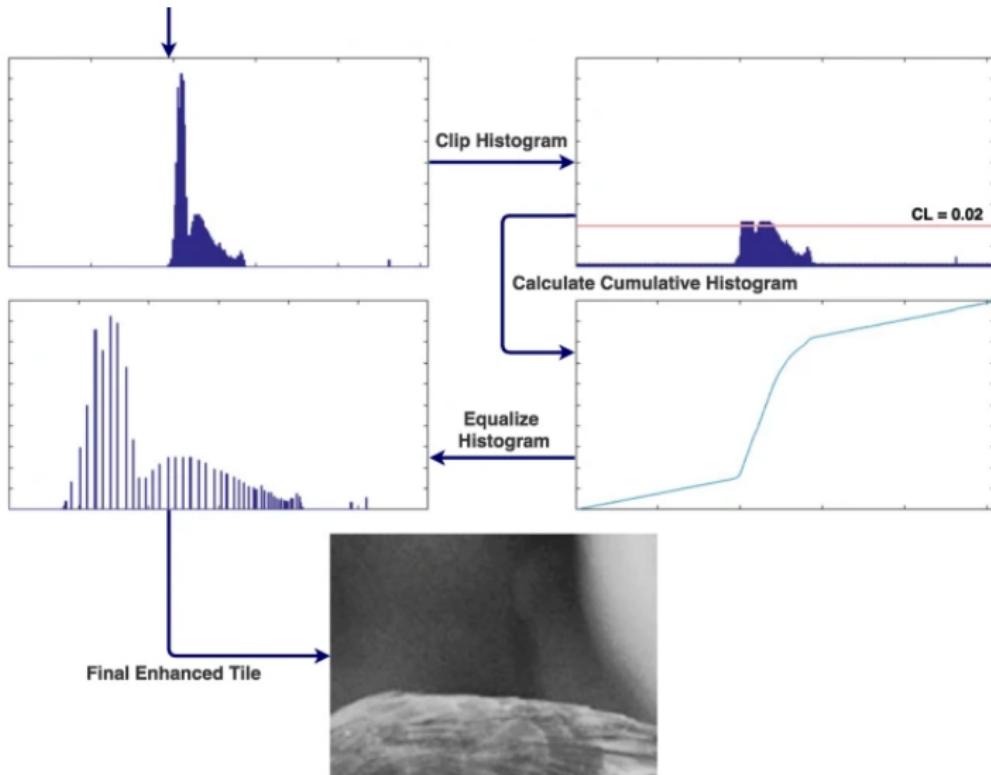


Перед выравниванием локальные гистограммы **отсекаются** на некотором уровне

Алгоритм CLAHE

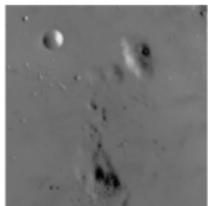


Алгоритм CLAHE



CLAHE. Иллюстрация 1

Low contrast image



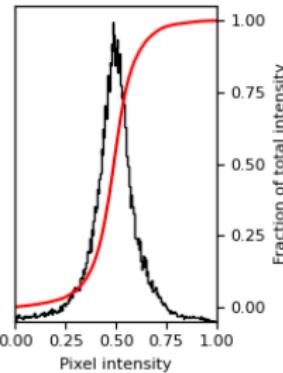
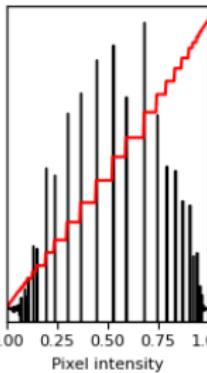
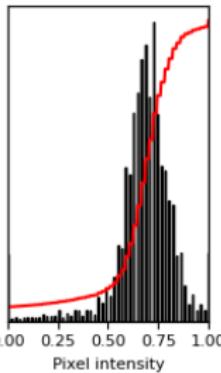
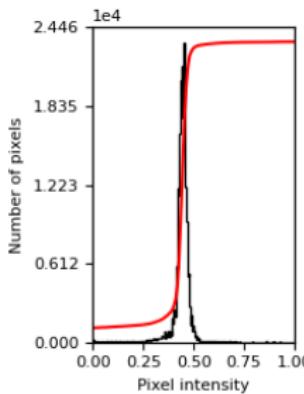
Contrast stretching



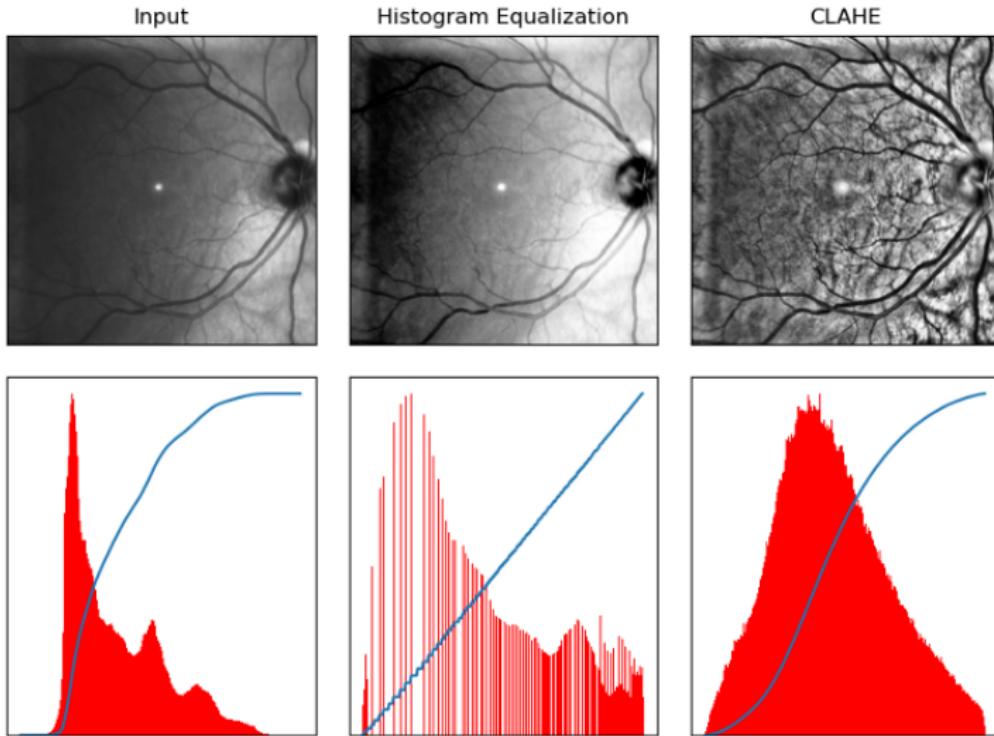
Histogram equalization



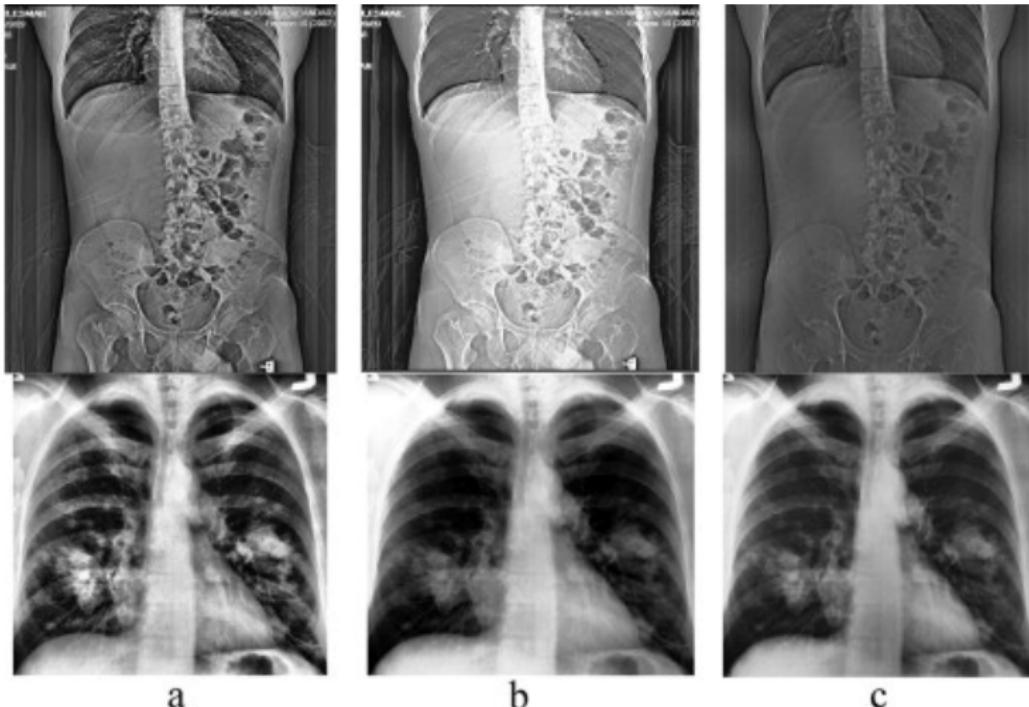
Adaptive equalization



CLAHE. Иллюстрация 2

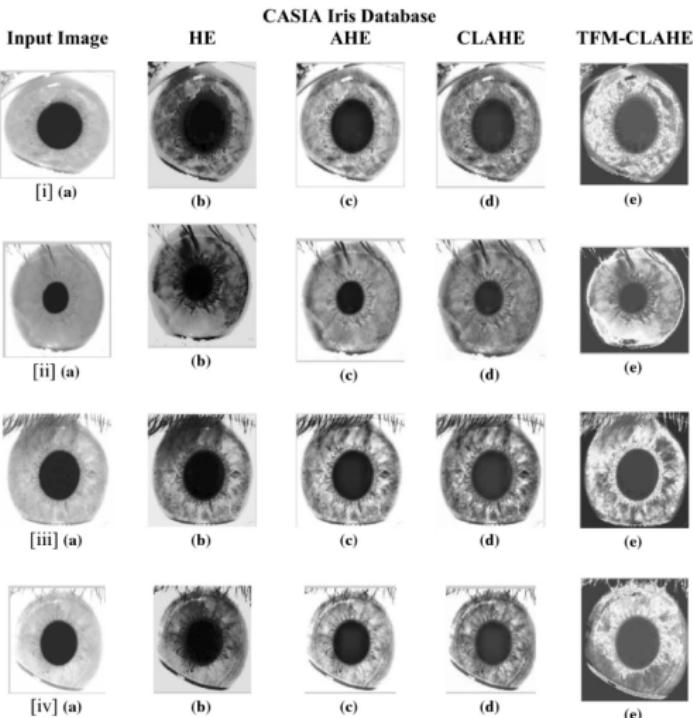


CLAHE. Иллюстрация 3



a) CLAHE, b) HE, c) гамма-коррекция

CLAHE. Иллюстрация 4



Vidya B., Chandra E. Triangular Fuzzy Membership-Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (TFM-CLAHE) for Enhancement of Multimodal Biometric Images // Wireless Personal Communications, 2019, 106(2), pp.651-680.

Параметры алгоритма CLAHE

Параметры алгоритма CLAHE:

- Число черепичных фрагментов (number of tiles)

Определяет размеры областей, в которых считаются локальные гистограммы

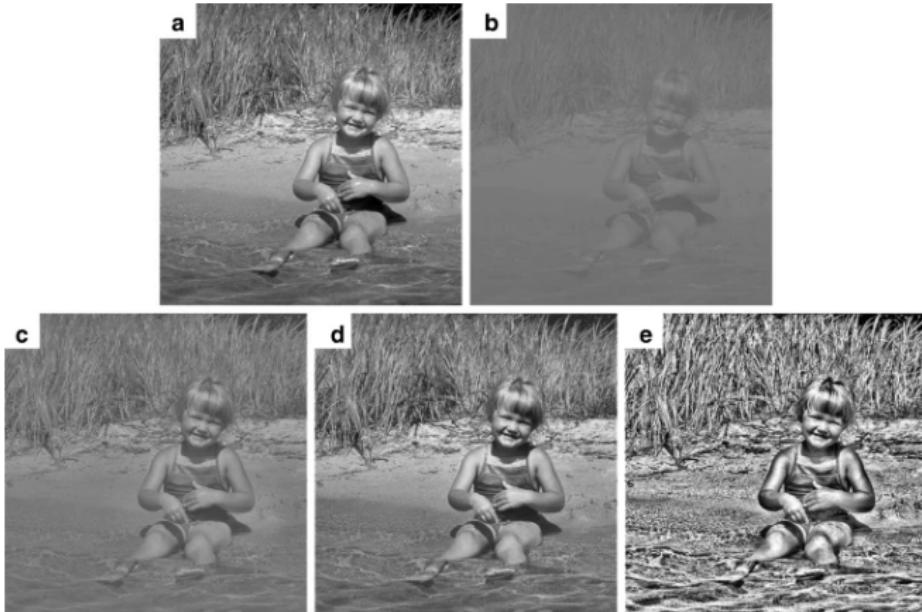
- Уровень отсечения гистограммы (clip limit)

Управляет усилением шума

Выбор параметров существенно влияет на качество результирующего изображения. Могут быть использованы специальные методы для расчета оптимальных значений параметров*

*Campos G., Mastelini S., Aguiar G., et al. Machine learning hyperparameter selection for contrast limited adaptive histogram Equalization // EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019, 1, p.59.

CLAHE. Влияние параметров



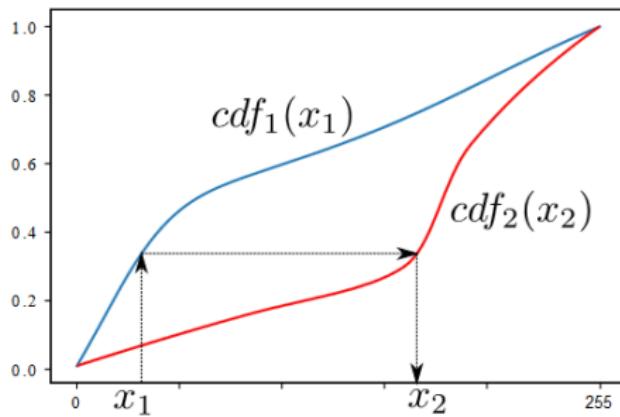
- a) исходное изображение, b) низкоконтрастное изображение,
- c) $CL=0.01$, $NT=[8,8]$, d) $CL=0.025$, $NT=[4,4]$,
- e) $CL=0.468$, $NT=[16,16]$

Выравнивание по заданному распределению

Яркости могут быть выровнены не только по равномерному, но и **по любому другому заданному распределению**. В том числе, по эмпирическому распределению яркостей другого изображения ([histogram matching](#))

Из теории вероятностей:

$$Y \sim R(0, 1), \quad Z = F_Z^{-1}(Y) \quad \Rightarrow \quad Z \sim F_Z(z)$$

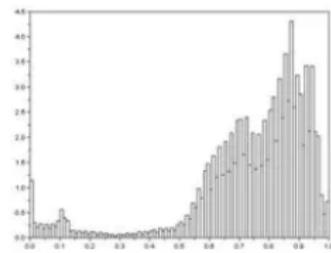


Выравнивание по заданному распределению. Иллюстрация

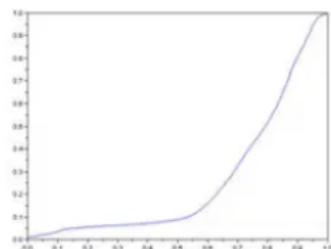
Пример выравнивания по логарифмическому распределению



Grayscale of selected



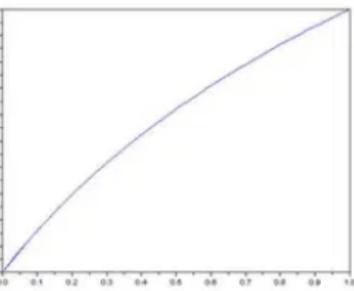
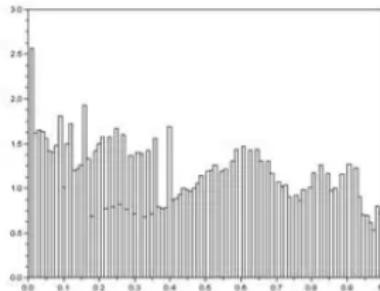
Histogram of figure



CDF of figure



Modified image using logarithmic CDF



Histogram and (b) CDF of modified image

Histogram matching. Иллюстрация 1

Изображение, по гистограмме которого проводится выравнивание, называется **референсным изображением**

В качестве референсного изображения выбирается, как правило, схожее изображение, но с отличным (желаемым) распределением яркостей



Histogram matching. Иллюстрация 2

Input image



Histogram matching. Иллюстрация 2

Reference image

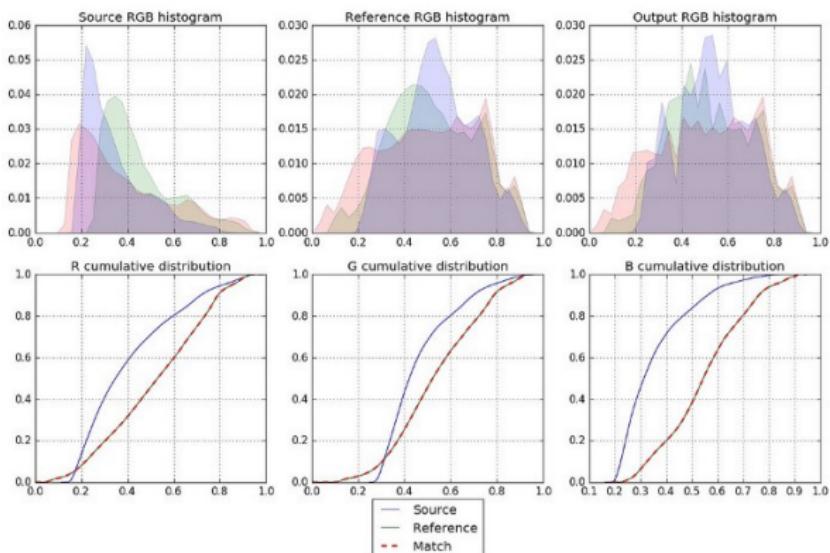


Histogram matching. Иллюстрация 2

Output image



Histogram matching. Иллюстрация 2



Histogram matching. Иллюстрация 3

Source Image



Reference Image



Output Image



Mask



Output Image (Masked)



Summary

- Цели улучшения контраста
- Глобальное масштабирование яркости
- Масштабирование яркости в окне
- Гамма-коррекция изображения
- Выравнивание гистограммы яркости (HE)
- Адаптивное выравнивание гистограмм (AHE)
- Адаптивное выравнивание с ограничением контраста (CLAHE)
- Выравнивание гистограммы по заданному распределению
- *Histogram matching*