

Przetwarzanie obrazów

MARIUSZ SZWOCH

4. Przetwarzanie obrazów

- Cele przetwarzania obrazów
 - poprawienie jakości obrazu
 - usunięcie uszkodzeń
 - redukcja rozmiaru
 - artystyczne
 - fałszerstwa
 - wprowadzenie zabezpieczeń
 - kodowanie informacji

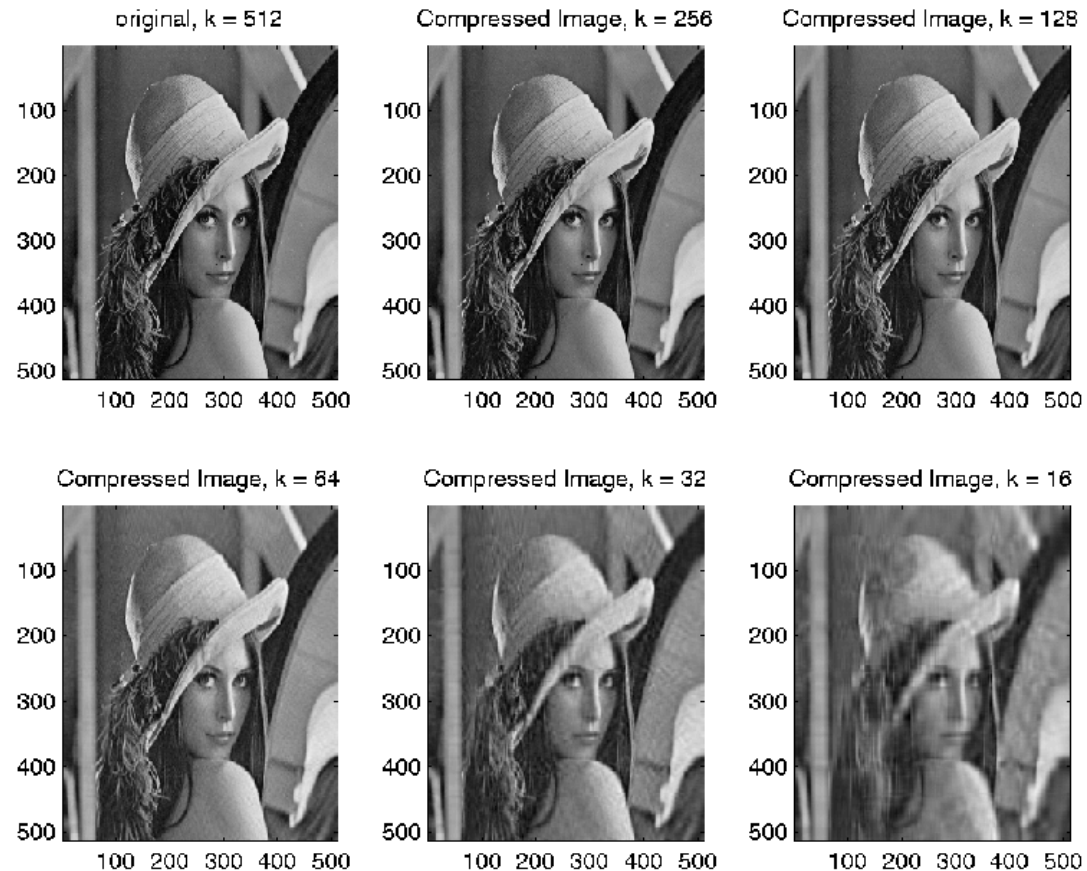
Poprawienie jakości obrazu

- Poprawienie cech obrazu
 - kontrast, dynamika, balans bieli, przebarwienie, nierównomierność oświetlenia
- Korekcja zniekształceń geometrycznych
 - dystorsje, skręcenia osi
- Zwiększenie ostrości, wygładzanie
- Usunięcie zakłóceń
 - szum, lokalne, globalne (okresowe, liniowe), mora



Redukcja rozmiaru obrazu

- Zmiana reprezentacji
- Zmniejszenie rozdzielczości
- Zmniejszenie głębi kolorów
- Kompresja
 - bezstratna
 - stratna
- Wektoryzacja
- Rozpoznanie



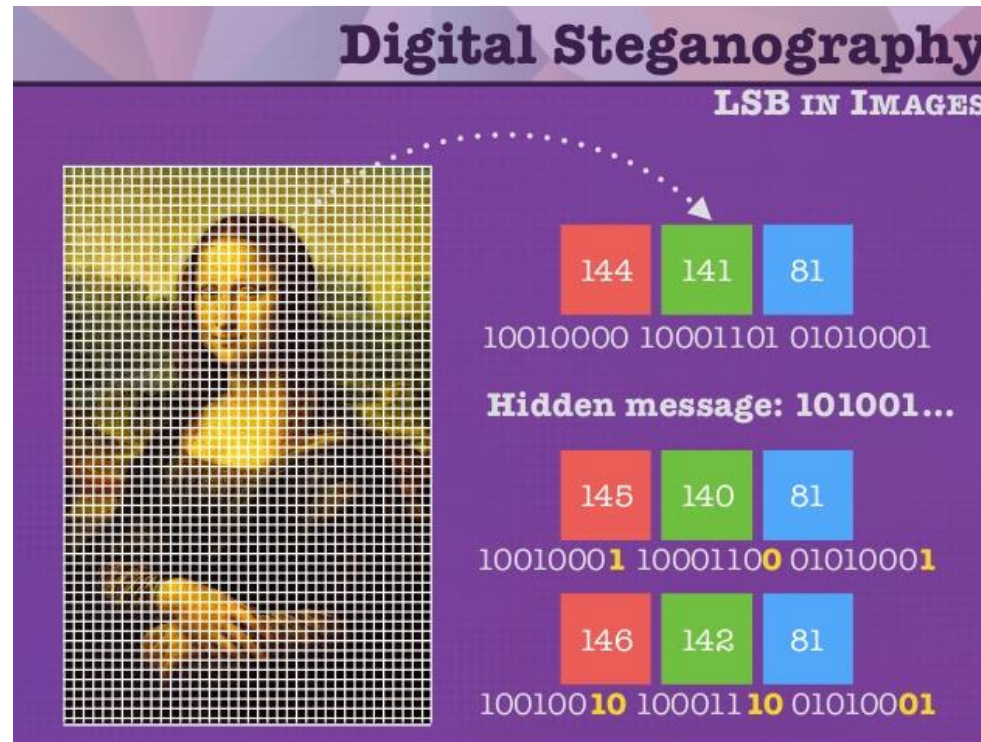
Artystyczne przetwarzanie obrazów

- Zniekształcenia geometryczne, filtry, style
- Zmiana cech obrazu
- Redukcja „czerwonych oczu”
- Zakłócenia
- Złożenie - *Collage*
- Retusz



Zabezpieczanie obrazów

- Znaki wodne
- Elementy o bardzo dużej rozdzielczości optycznej
- Sygnatura obrazu (zapis informacji na najmniej znaczących bitach wybranych pikseli)



Przyjęte oznaczenia

- $I=I_{we}, I'=I_{wy}$ - obraz wejściowy i wyjściowy
- $I(m,n)$ - kolor (jasność) obrazu I w punkcie $P(m,n)$
- $N(m,n)$ - sąsiedztwo punktu $P(m,n)$
- $J_{min}..J_{max}$ - zakres jasności obrazów (lub wybranego kanału); najczęściej $J_{min}=0, J_{max}=255$

Obrazy achromatyczne i kolorowe

- Definiowanie przekształceń dla obrazów achromatycznych!
- Rozszerzenie przekształceń na obrazy kolorowe:
 - oddzielne operacje dla poszczególnych kanałów RGB
 - operacje w trójwymiarowej przestrzeni RGB
- Funkcja obcinania (ang. *clipping*)

$$O(i) = \begin{cases} J_{\max} & i > J_{\max} \\ J_{\min} & i < J_{\min} \end{cases}$$

Rodzaje przekształceń obrazu

- **Punktowe** (bezkontekstowe)
- **Filtry** (kontekstowe)
- **Geometryczne**
- **Widmowe** - operacje w dziedzinie częstotliwości
- **Morfologiczne**

Histogram

- Histogram $H(K)$ - liczba pikseli w obrazie przyjmujących poszczególne wartości dowolnej cechy K obrazu:

$$H(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{Bool}(I(n, m) = k), \quad k = 0, 1, \dots, K_{\max}$$

- Przykładowe cechy
 - kolor, jasność
- Rodzaje histogramów
 - trójwymiarowy histogram kolorów $H(R, G, B)$
 - jednowymiarowy histogram kolorów $H(R), H(G), H(B)$
 - jednowymiarowy histogram jasności $H(L)$

Histogram (2)

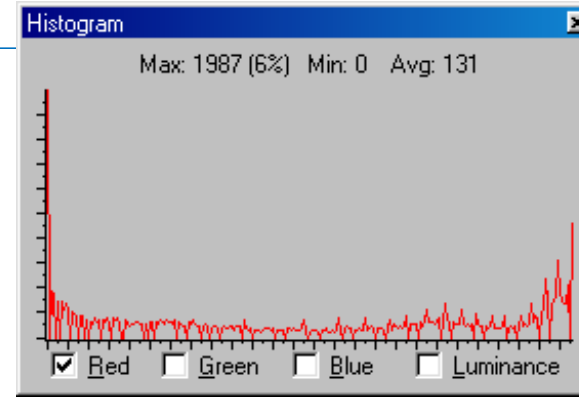
- Histogram po normalizacji - rozkład gęstości prawdopodobieństwa kolorów.
- W praktyce (pliki JPG), cechy R, G, B, L przyjmują wartości z zakresu $\langle 0; 255 \rangle$ - histogram posiada 256 elementów
- Histogram niesie informacje o:
 - liczbie kolorów w obrazie
 - kontraście obrazu
 - kolorach dominujących
 - „profilu” barwnym

Przykładowe histogramy

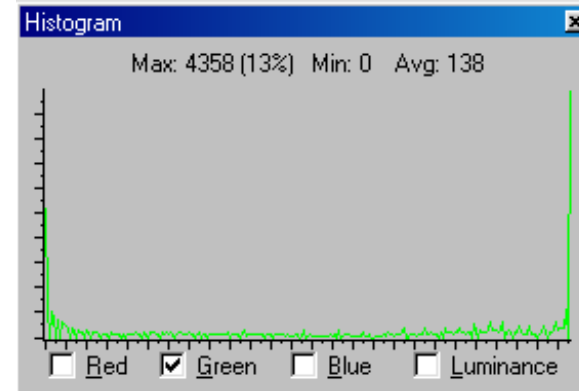


Histogramy:

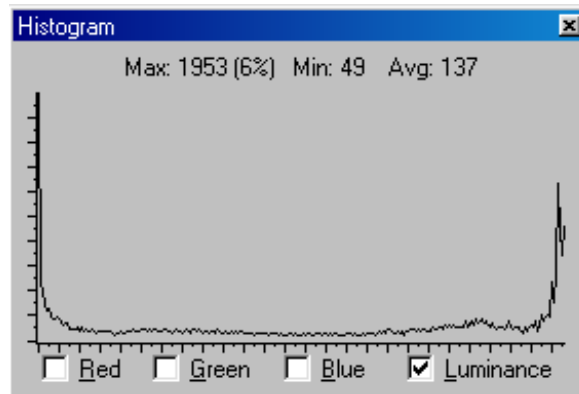
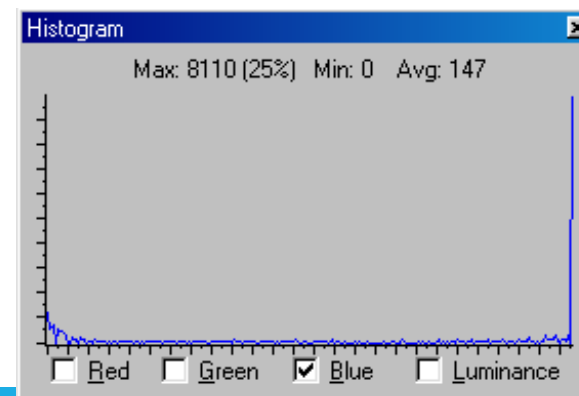
$H(R)$



$H(G)$



$H(B)$



Histogram jasności $H(L)$

Wykorzystanie histogramów

- Poprawa kontrastu obrazu - wyrównanie (spłaszczenie) histogramu
- Progowanie obrazów - wyznaczenie progów
- Porównywanie obrazów - wyznaczanie miar oraz cech
- Oszacowanie jakości obrazu na podstawie równomierności rozkładu kolorów

4.1. Przekształcenia punktowe

- Operacje na poszczególnych punktach obrazu nie uwzględniają w żaden sposób ich otoczenia
- Dla **każdego** punktu obrazu wykonywana jest **zawsze** ta sama operacja:
 $I'(m,n) = F(I(m,n))$
- Przekształcenia punktowe można wykonać ‘w miejscu’

Liniowe operacje arytmetyczne

- Zmiana jasności

$$I'(m,n) = C(I(m,n) + b), b \in \langle J_{min}; J_{max} \rangle$$

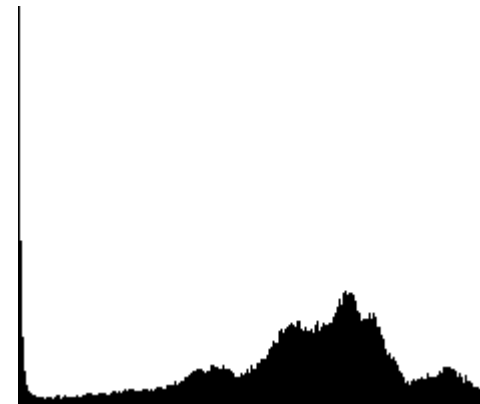
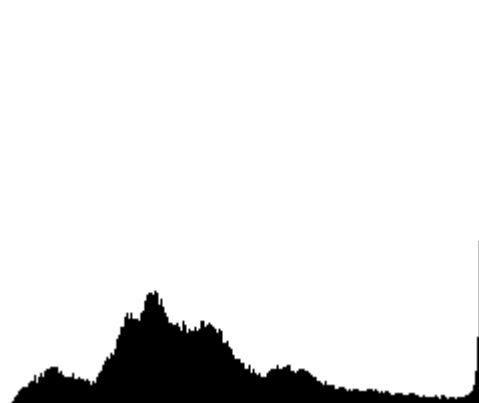
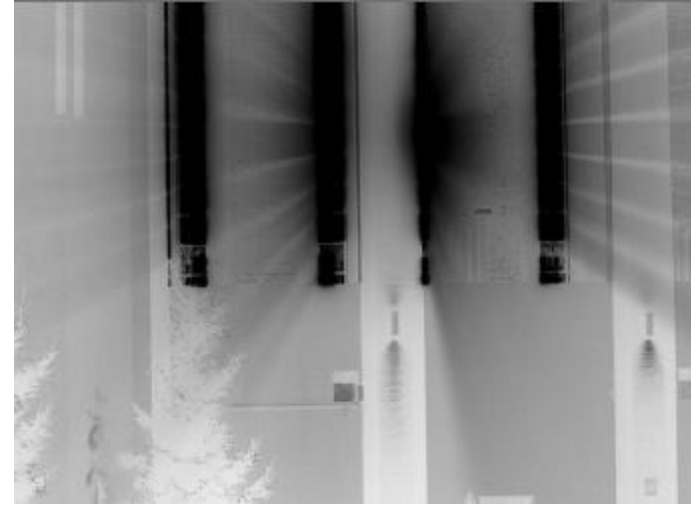
- Inwersja (negatyw)

- $I'(m,n) = J_{max} - I(m,n)$

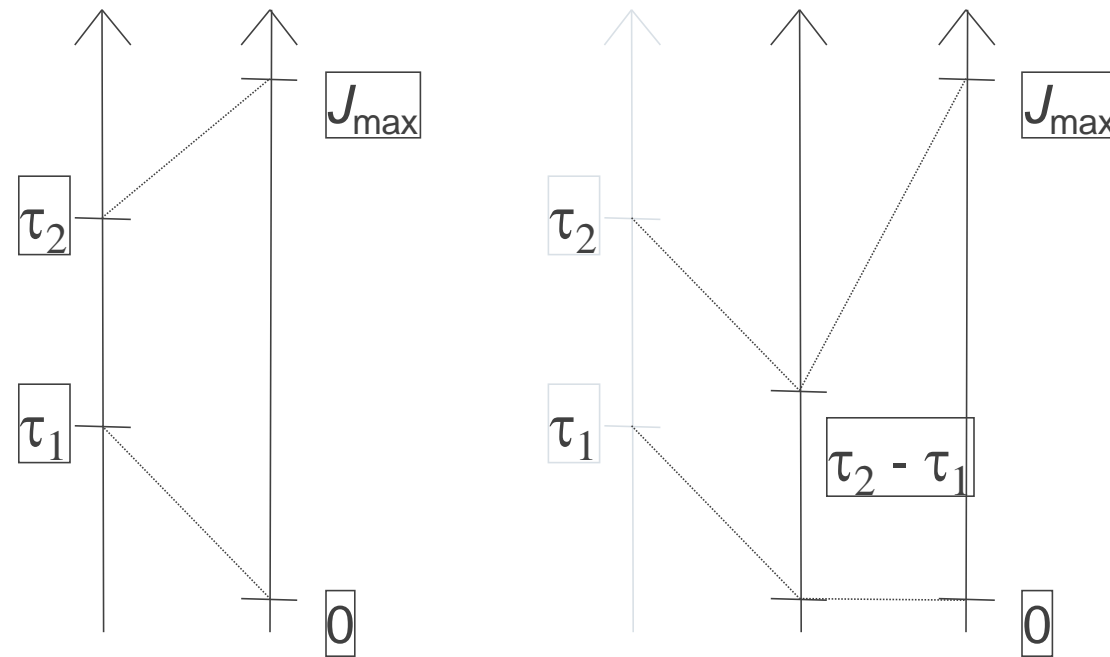
- Zmiana kontrastu

$$I'(m,n) = C(a * I(m,n) + b)$$

Negatyw obrazu

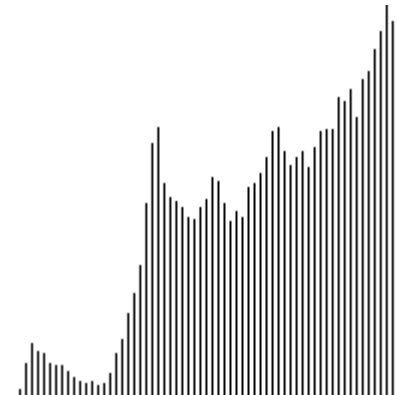


Wzmocnienie kontrastu



$$I'(m,n) = (I(m,n) - \tau_1) * J_{\max} / (\tau_2 - \tau_1)$$

Przykład wzmocnienia kontrastu



Funkcja transformacji jasności

- Funkcja transformacji jasności $F()$

$$I'(m,n) = F(I(m,n))$$



$$I'(m,n) = I(m,n)$$

$$I'(m,n) = J_{\max} - I(m,n)$$

$$I'(m,n) = C(a * I(m,n) + b)$$

Nieliniowe operacje arytmetyczne

- potęgowanie - zwiększenie kontrastu dla dużych jasności

$$I'(m,n) = J_{\max} * (I(m,n) / J_{\max})^{\gamma}, \gamma > 1$$

- pierwiastkowanie - zwiększenie kontrastu dla małych jasności

$$I'(m,n) = J_{\max} * (I(m,n) / J_{\max})^{\gamma}, 0 < \gamma < 1$$

korekcja gamma - niwelacja nieliniowej charakterystyki monitorów, w których jasność świecenia nie zależy liniowo od sygnału elektrycznego

- logarytmowanie - zwiększenie kontrastu dla bardzo małych jasności

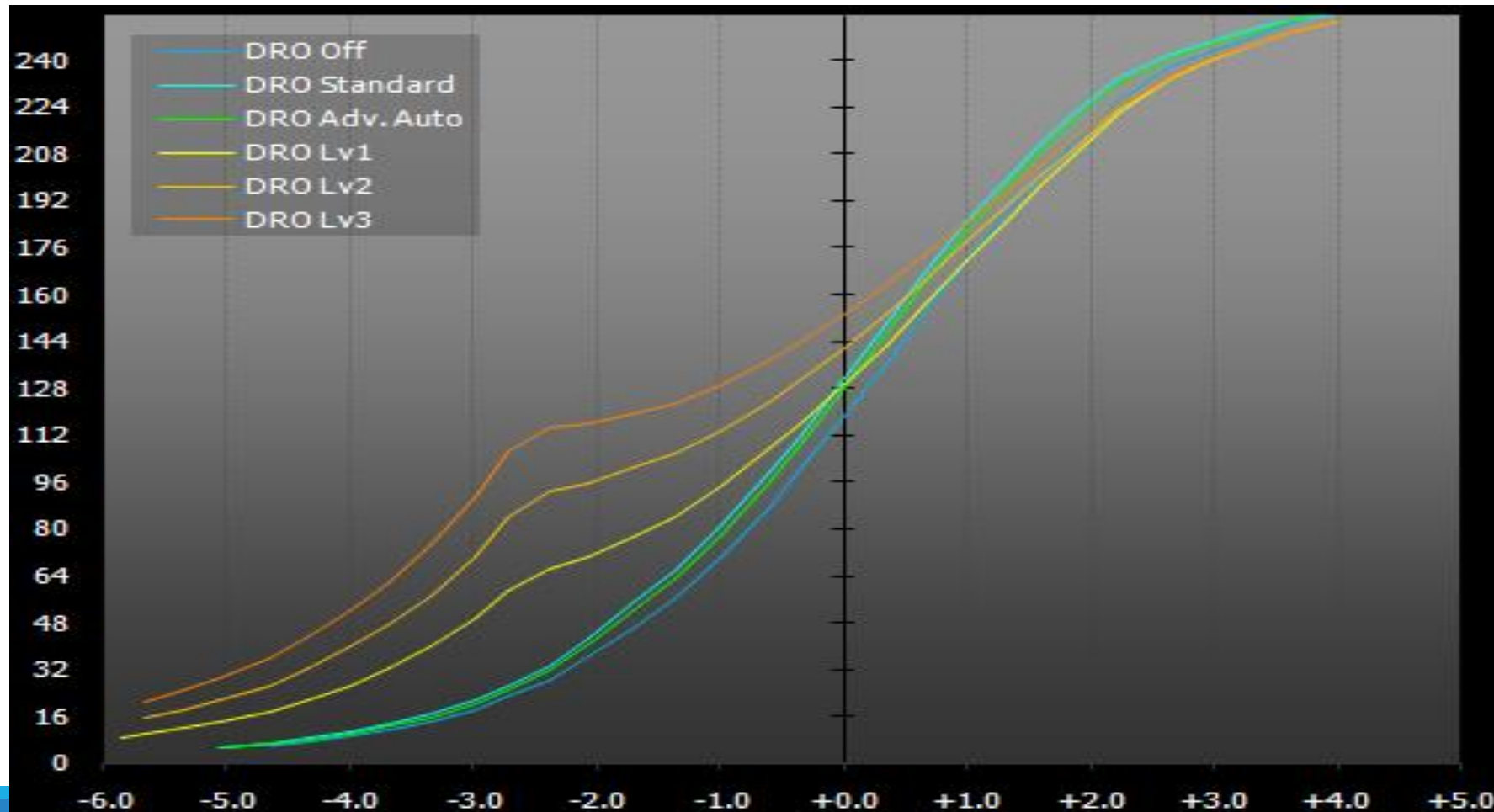
$$I'(m,n) = J_{\max} \cdot \log\left(1 + \frac{I(m,n)}{J_{\max}}\right)$$

Przykład transformacji logarytmicznej

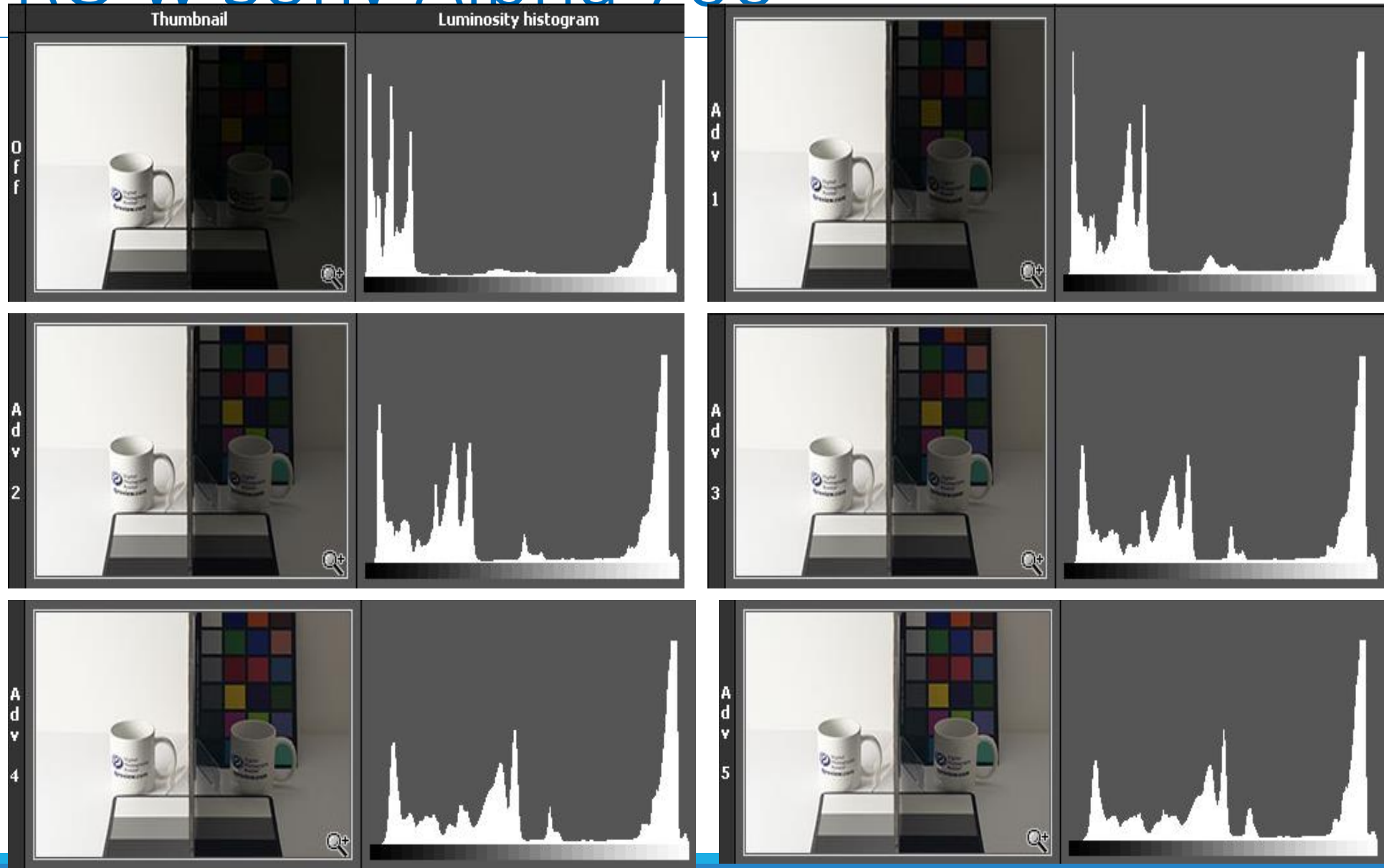


Optymalizacja zakresu dynamiki

- HDR (High Dynamic Resolution), DRO (Dynamic Range Optimization)



DRO w Sony Alpha 700



DRO w Sony Alpha 700



DRO Off



DRO Advanced Auto



DRO Advanced Lv5



DRO Off



DRO Advanced Auto



DRO Advanced Lv5

Progowanie globalne

- Progowanie z 1 progiem (binaryzacja)

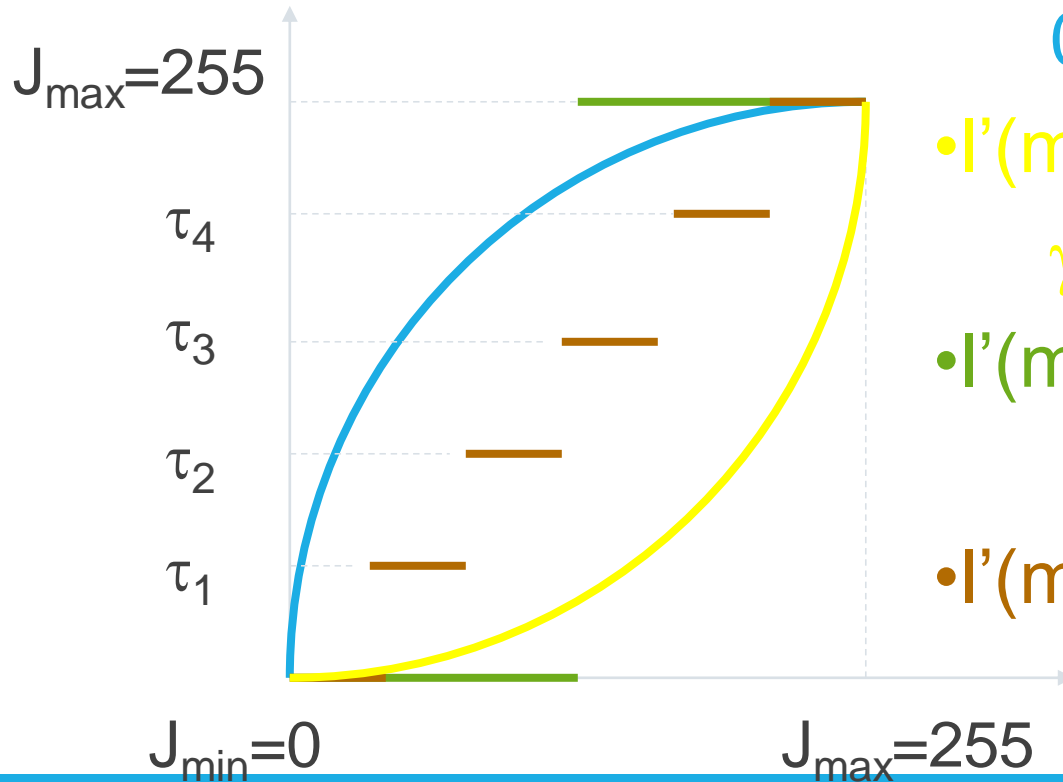
$$I'(m, n) = \begin{cases} J_{\max} & I(m, n) \geq \tau \\ J_{\min} & I(m, n) < \tau \end{cases}$$



- Redukcja liczby odcieni szarości
- $$I'(m, n) = \begin{cases} J_{\max} & I(m, n) \geq \tau_{n-1} \\ J_{n-1} & \tau_{n-2} \leq I(m, n) < \tau_{n-1} \\ \dots & \dots \\ J_2 & \tau_1 \leq I(m, n) < \tau_2 \\ J_{\min} & i < \tau_1 \end{cases}$$



Funkcja transformacji jasności



- $I'(m,n) = O(a * I(m,n) + b)$

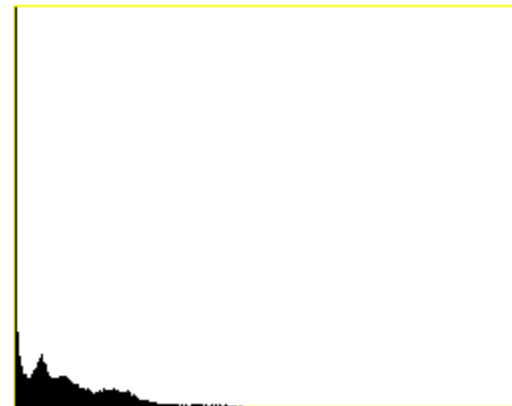
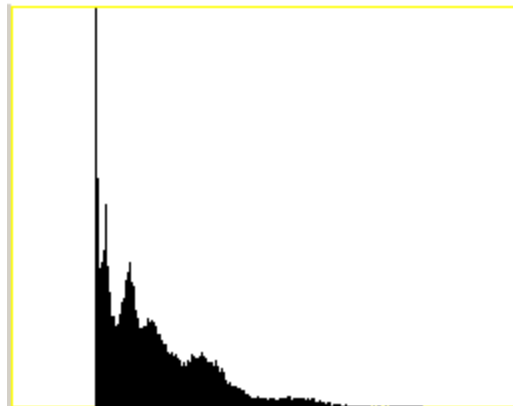
- $I'(m,n) = J_{\max} * (I(m,n) / J_{\max})^\gamma$
 $0 < \gamma < 1$

- $I'(m,n) = J_{\max} * (I(m,n) / J_{\max})^\gamma$
 $\gamma > 1$

- $I'(m,n) = \begin{cases} J_{\max} & i \geq \tau \\ J_{\min} & i < \tau \end{cases}$

- $I'(m,n) = \text{Prog}(I(m,n))$

Histogramy obrazów o zmienionej jasności



Wyrównanie histogramów (1)

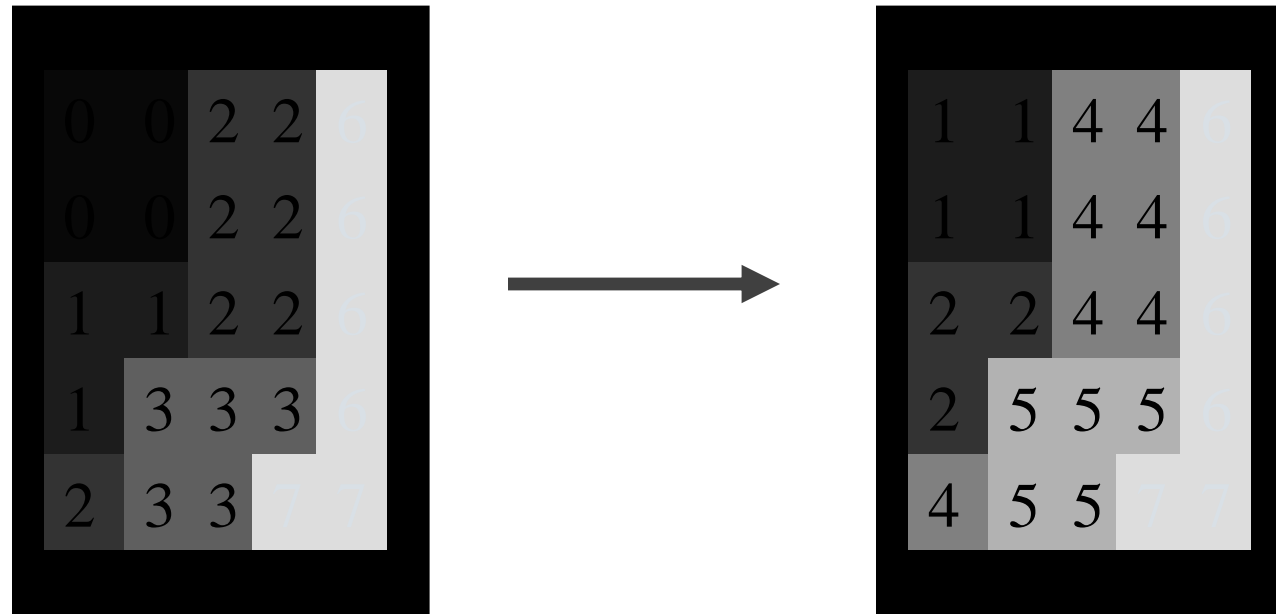
- Wyrównanie histogramu - wyrównanie liczby wystąpień koloru w obrazie
- Histogram skumulowany H_c :

$$H_c(K) = \sum_{k=0}^K H(k), \quad K = 0, 1, \dots, J_{\max}$$

- Dystrybuanta dyskretna

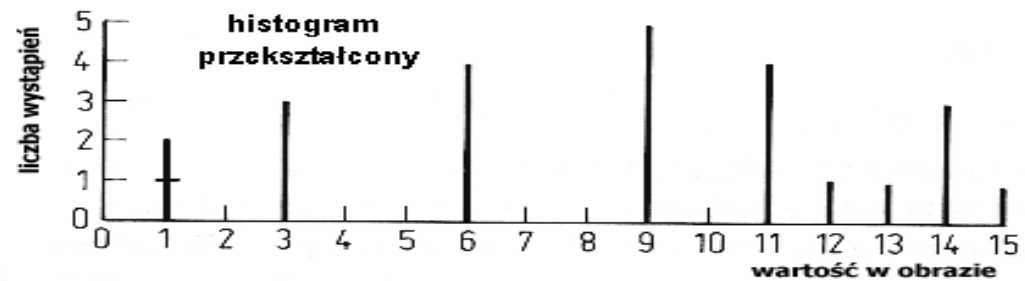
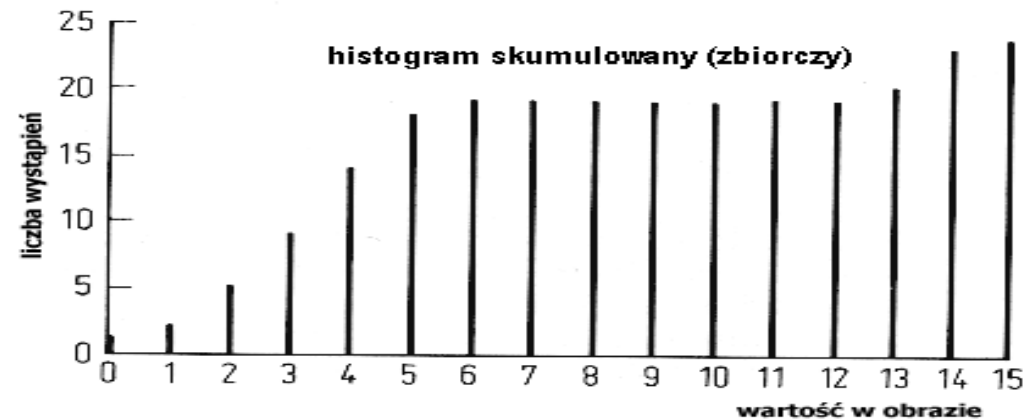
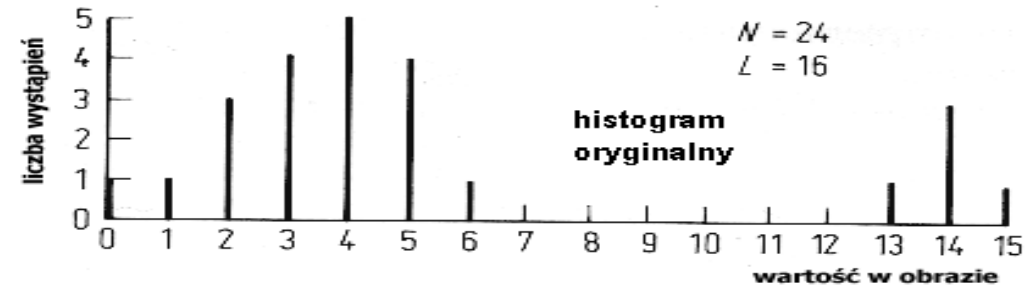
$$f(K) = \frac{J_{\max}}{N \cdot M} \cdot \sum_{k=0}^K H(k) = \frac{J_{\max}}{N \cdot M} \cdot H_c(K), \quad K = 0, 1, \dots, J_{\max}$$

Wyrównanie histogramów (2)



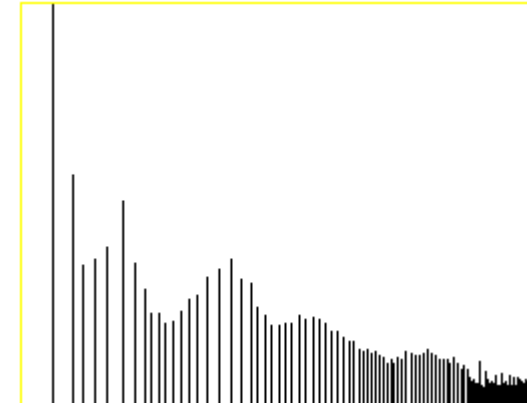
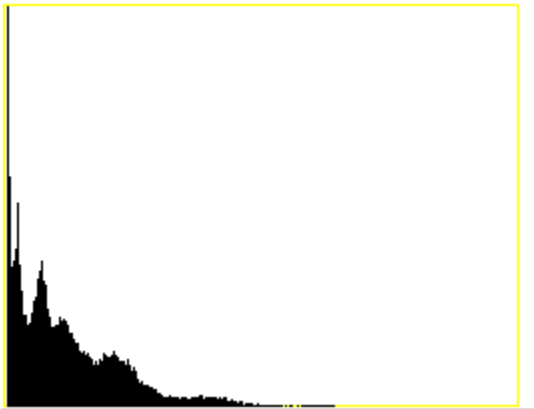
K	0	1	2	3	4	5	6	7
$H(K)$	4	3	7	5	0	0	4	2
$H_C(K)$	4	7	14	19	19	19	23	25
$f(K)$	1,12	1,96	3,92	5,32	5,32	5,32	6,44	7
$f_D(K)$	1	2	4	5	5	5	6	7

Wyrównanie histogramów (3)

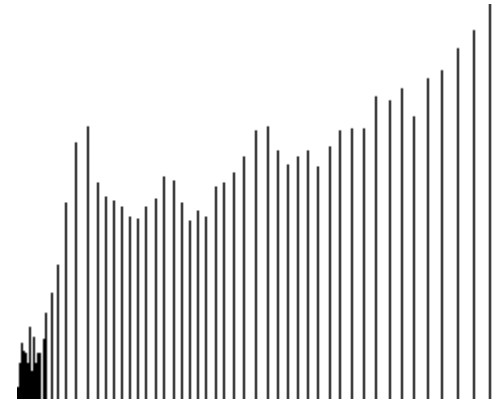


$$\frac{L-1}{N} = \frac{15}{24} = 0.625$$

Przykład wyrównanie histogramów



Przykład wyrównanie histogramów



4.2. Filtry cyfrowe

- Operacje na poszczególnych punktach obrazu uwzględniają ich najbliższe otoczenie
 - Dla każdego¹⁾ punktu obrazu wykonywana jest zawsze ta sama operacja:
 $I'(m,n) = F(N(m,n))$
 - Filtracji nie można wykonać ‘w miejscu’
- ¹⁾ wyjątkiem są punkty brzegowe obrazu, dla których operacja nie jest przeprowadzana lub sąsiedztwo jest sztucznie uzupełniane o brakujące punkty

Zastosowania filtrów

- Tłumienie szumów
- Wzmacnianie elementów obrazu zgodnych ze wzorcem
- Usuwanie wad z obrazu
- Poprawa jakości obrazu (ostrości, kontrastu, itp.)
- Rekonstrukcja obrazu

Rodzaje filtrów

○ Liniowe

- addytywność $\varphi(f+g) = \varphi(f) + \varphi(g)$
- jednorodność $\varphi(\lambda \bullet f) = \lambda \bullet \varphi(f), \lambda \in \mathbb{R}^+$
- konwolucja dyskretna

- łączność
$$I'(m,n) = (\omega \cdot I)(m,n) = \sum_{i,j \in N} I(m-i, n-j) \cdot \omega(i,j)$$

 $(f \times g) \times h = f \times (g \times h) = f \times g \times h$
- rozdzielność - dwuwymiarowe operacje mogą być zastąpione jednowymiarowymi

○ Nieliniowe

Przykłady filtrów

- Liniowe
 - dolnoprzepustowe
 - górnoprzepustowe
 - Laplasjany
- Nieliniowe
 - medianowe
 - logiczne
 - morfologiczne
 - adaptacyjne
 - łączone

Filtry z kwadratowym oknem sąsiedztwa

$$I'(m, n) = \sum_{i=N_{\min}}^{N_{\max}} \sum_{j=N_{\min}}^{N_{\max}} I(m-i, n-j) \cdot \omega(i, j)$$

- Sąsiedztwo 3 x 3: $N_{\min} = -1$, $N_{\max} = 1$

$$\begin{aligned} I'(m, n) = & I(m-1, n-1) \cdot \omega(-1, -1) + I(m, n-1) \cdot \omega(0, -1) + I(m+1, n-1) \cdot \omega(1, -1) + \\ & I(m-1, n) \cdot \omega(-1, 0) + I(m, n) \cdot \omega(0, 0) + I(m+1, n) \cdot \omega(1, 0) + \\ & I(m-1, n+1) \cdot \omega(-1, 1) + I(m, n+1) \cdot \omega(0, 1) + I(m+1, n+1) \cdot \omega(1, 1) \end{aligned}$$

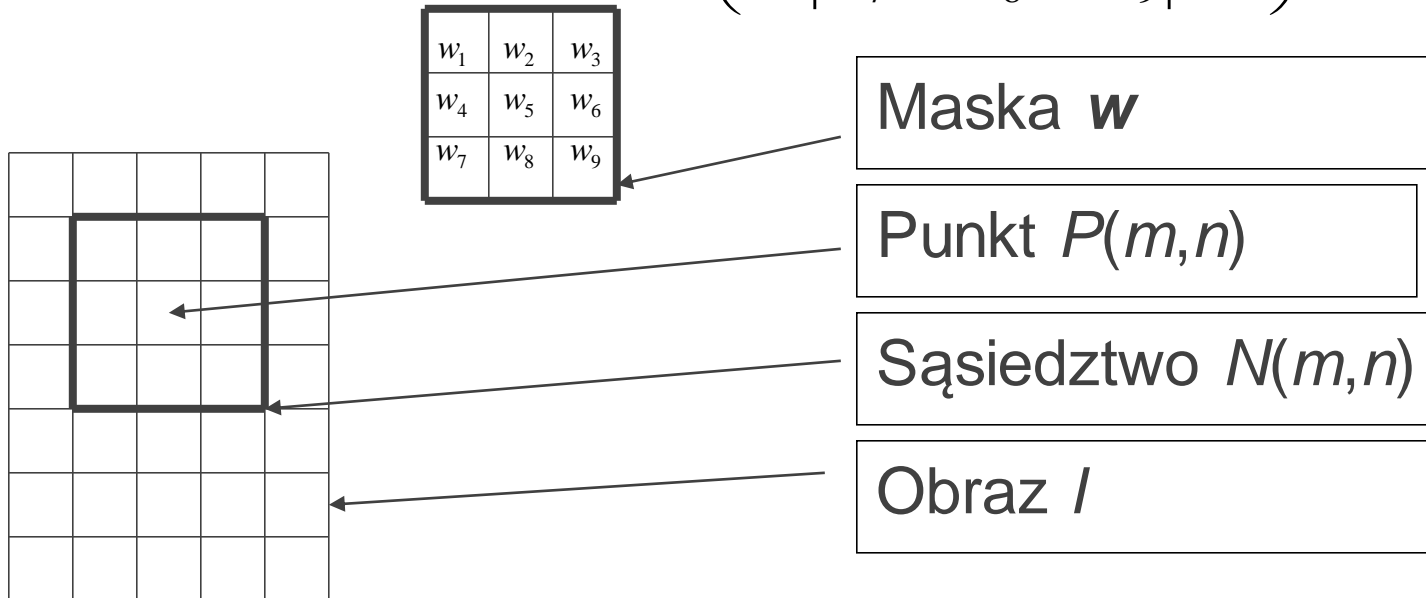
Maska 3 x 3

$$\omega = \begin{vmatrix} \omega_{-1,-1} & \omega_{0,-1} & \omega_{1,-1} \\ \omega_{-1,0} & \omega_{0,0} & \omega_{1,0} \\ \omega_{-1,1} & \omega_{0,1} & \omega_{1,1} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{vmatrix} = w$$

Filtry liniowe z użyciem maski

- Sąsiedztwo 3x3

$$I'(m,n) = N(m,n) \circ \left(a \cdot \begin{vmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{vmatrix} + b \right)$$



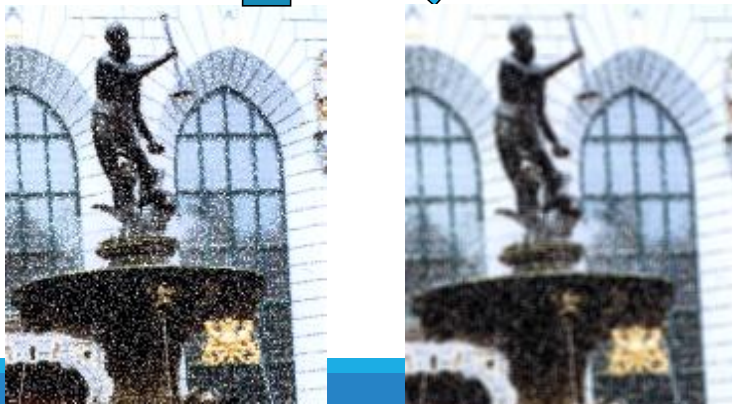
Filtry dolnoprzepustowe

○ Tłumienie szybkozmiennych składowych obrazu:

- usuwanie szumu i zakłóceń
- rozmywanie i wygładzanie

$$f_d = \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

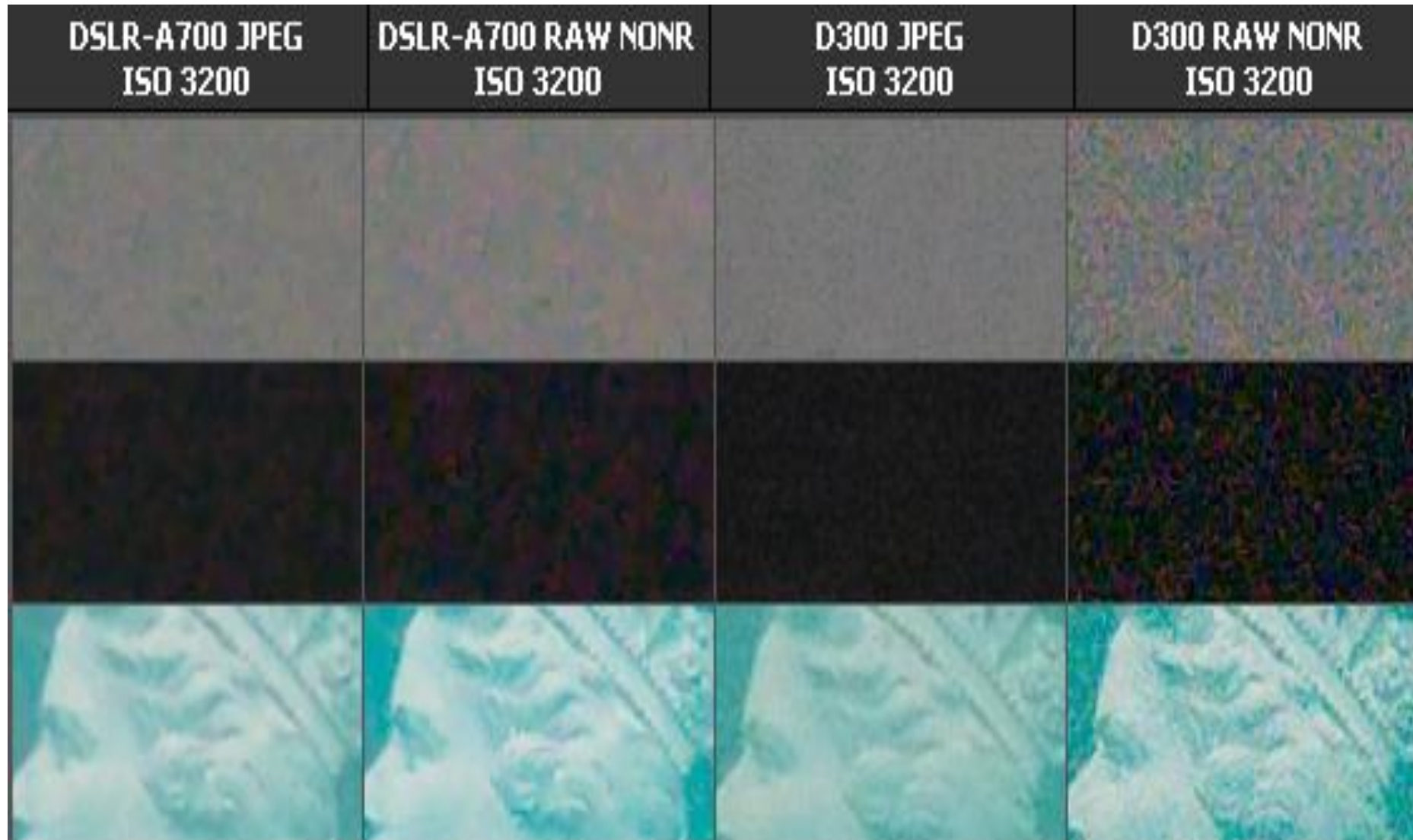
$$f_d = \frac{1}{8} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad f_d = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$



255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	227	198	170	170
255	255	0	0	0	255	198	142	85	85
255	255	0	0	0	255	170	85	0	0
255	255	0	0	0	255	170	85	0	0

255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	227	227	227	255
255	255	0	255	255	255	227	227	227	255
255	255	255	255	255	255	227	227	227	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Redukcja szumów – Sony Alpha 700 i Nikon D300



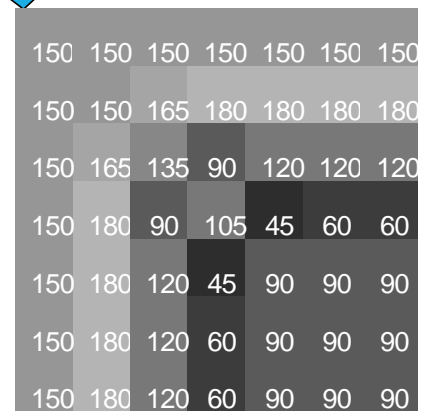
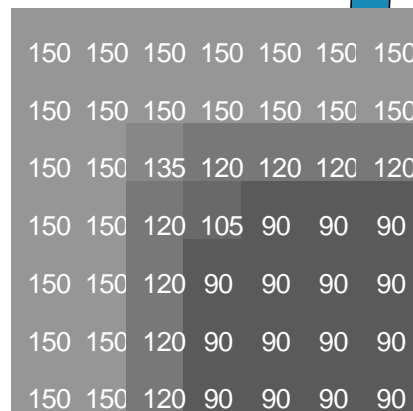
Filtry górnoprzepustowe

- Tłumienie wolnozmiennych składowych obrazu
 - wyostrzanie
 - wykrywanie krawędzi

$$f_g = 1 \cdot \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

$$f_g = 1 \cdot \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$f_g = 1 \cdot \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 5 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$$



Wykrywanie krawędzi

- Gradient funkcji jasności

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

- Dyskretna postać różnicowa

- $G_x = I(m+1, n) - I(m, n)$
- $G_y = I(m, n+1) - I(m, n)$

- Gradient może przyjąć wartość ujemną

- przeskalowanie wartości gradientu
- wartość absolutna gradientu

Operatory Roberta (krawędzie)

- Okno 2x2
- Wysoka czułość na szumy
- Niewielkie wartości gradientu dla krawędzi
- Kierunki

poziomy pionowy

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Operatory Prewitta i Sobela (krawędzie)

Przykładowe
operatory Sobela

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

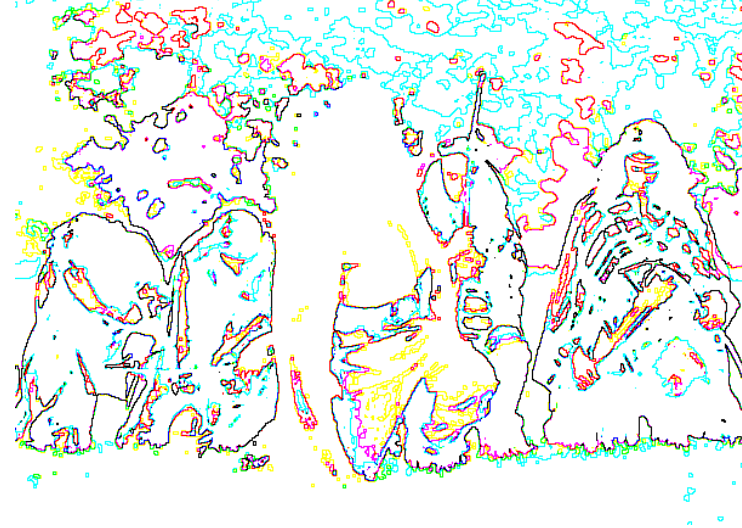


Przykładowe
operatory Prewitta

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Przykłady znajdowania krawędzi



Operator Laplace'a

- Wyostrozanie obrazu wzmacnienie krawędzi

$$L[f(x, y)] = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}$$

- Przykładowa maska

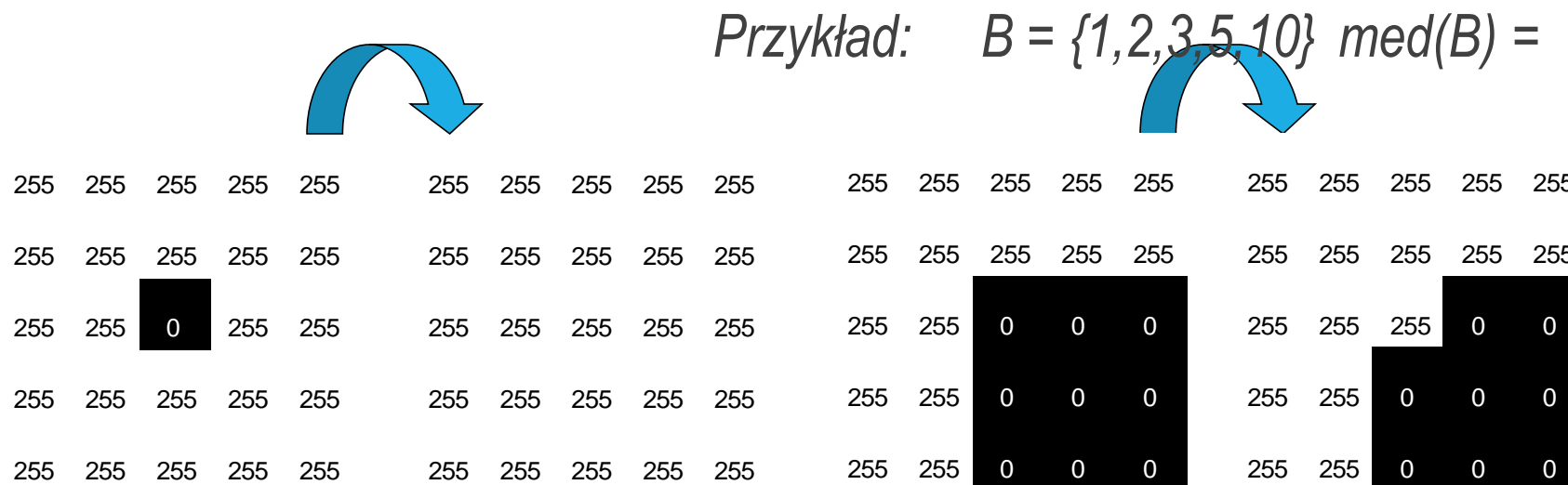
$$G_L \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$



Filtr medianowy

$$I'(m,n) = \text{med}(N(m,n))$$

- **med** - mediana zbioru / wartość środkowa
 - wyznaczenie - wybieramy wartość ze środka posortowanego rosnąco ciągu wartości jasności pikseli,
 - mediana zawsze należy do zbioru, nie wprowadza do obrazu nowych wartości



4.3. Wykrywanie cech obrazu

- **Wykrywanie cech** (ang. *feature detection*) – niskopoziomowa operacja, której celem jest wykrycie charakterystycznych elementów obrazu
- Wymagane właściwości
 - powtarzalność
 - odporność na transformacje afiniczne i perspektywiczne
 - odporność na zmianę barw
 - suboptymalna gęstość



Rodzaje cech obrazu

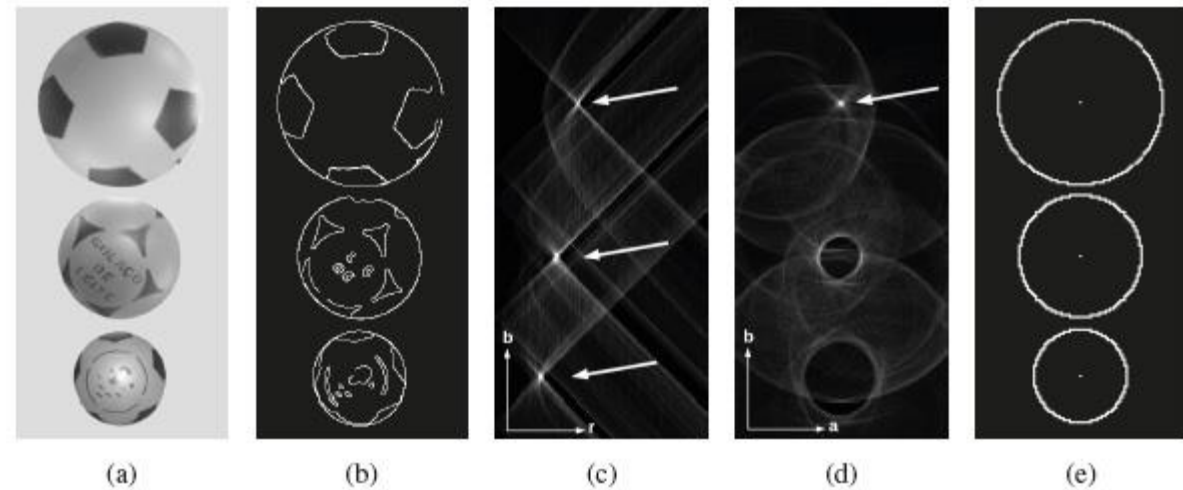
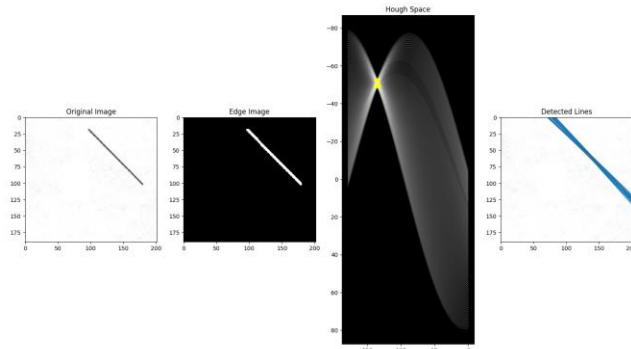
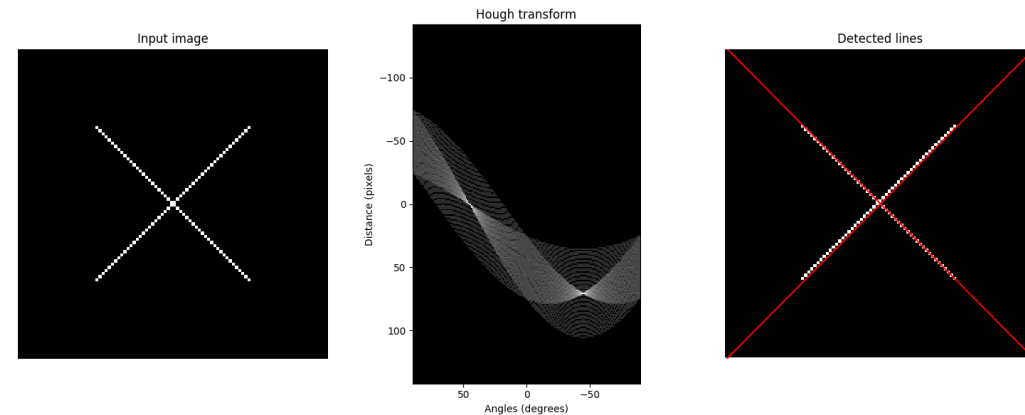
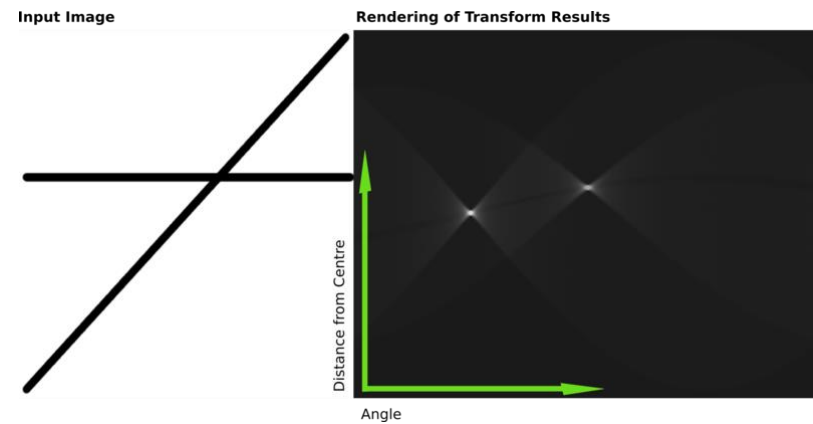
- Punkty charakterystyczne (ang. *landmark*)
 - narożniki, punkty przecięcia, środki figur, ..
- Krawędzie (ang. *edge*) – granice obszarów o dużych wartościach gradientu
- Obszary (ang. *blob*, *region-of-interest ROI*) – segmenty obrazu o zbliżonej charakterystyce (kolor, tekstura, ..), często wraz z punktami charakterystycznymi (np. środek)
- Ekstrema – grzbiety (ang. *ridges*), doliny (ang. *valleys*) i siodła (ang. *saddle*) – rodzaje segmentów, w których pewna funkcja przyjmuje lokalne ekstremum lub ma punkt przegięcia

Popularne detektory

- Wykrywanie punktów charakterystycznych
 - *Harris & Stephens, Shi–Tomasi, FAST (Features from Accelerated Segment Test), LoG (Laplacian of Gaussian), DoG (Difference of Gaussians), DoH (Determinant of Hessian)*
- Wykrywanie krawędzi
 - *Canny, Sobel, Harris & Stephens, Shi–Tomasi*
- Wykrywanie ROI
 - *FAST, LoG, DoH, MSER (Maximally Stable Extremal Regions), PCBR (principal curvature-based region detector), grey-level blobs*
- Wykrywanie kształtów - *Hough transform*

Hough Transform

- Wykrywanie linii, okręgów, ..



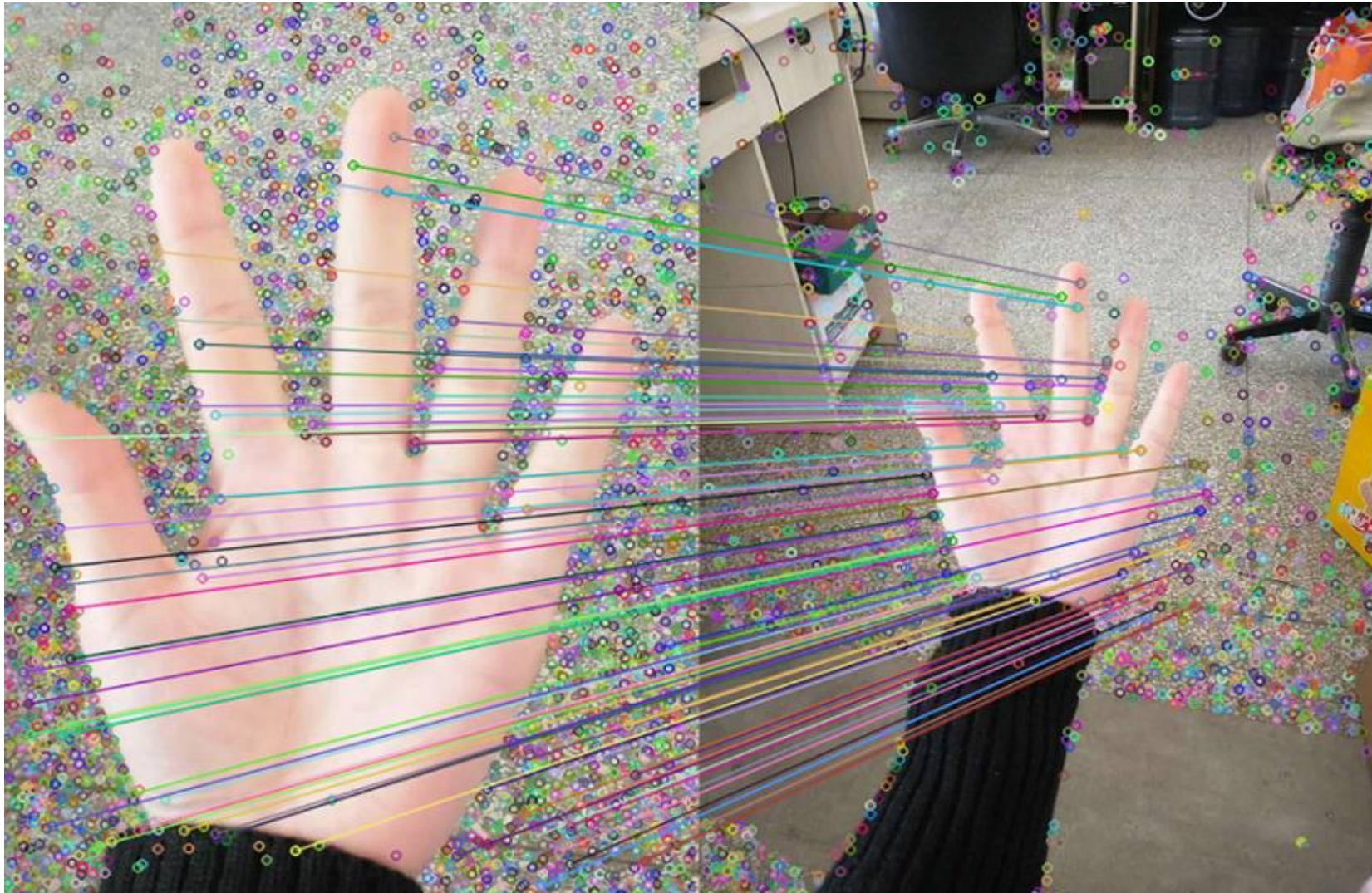
Lokalne deskryptory cech

- Unikalny i niezmienniczy opis punktów lub obszarów w oparciu o ich przekształcone lokalne cechy
- Popularne deskryptory
 - *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) – 1999, podstawa/inspiracja wielu innych deskryptorów
 - *Speeded Up Robust Features* (SURF) – opatentowany 2006
 - *Gradient Location and Orientation Histogram* (GLOH)
 - *Histogram of Oriented Gradients* (HOG)
 - *Local Energy based Shape Histogram* (LESH)

Zastosowania

- Popularne zastosowania
 - rozpoznawanie i porównywanie obiektów (*object recognition & matching*)
 - nawigacja robotów i pojazdów autonomicznych (ang. *robotic mapping and navigation*)
 - sklejanie obrazów (ang. *image stitching*)
 - modelowanie i skanowanie 3D (ang. *3D modeling*)
 - rozpoznawanie gestów (ang. *gesture recognition*)
 - śledzenie obiektów (ang. *video tracking*)

Rozpoznawanie obiektów w obrazie



4.4. Przekształcenia geometryczne

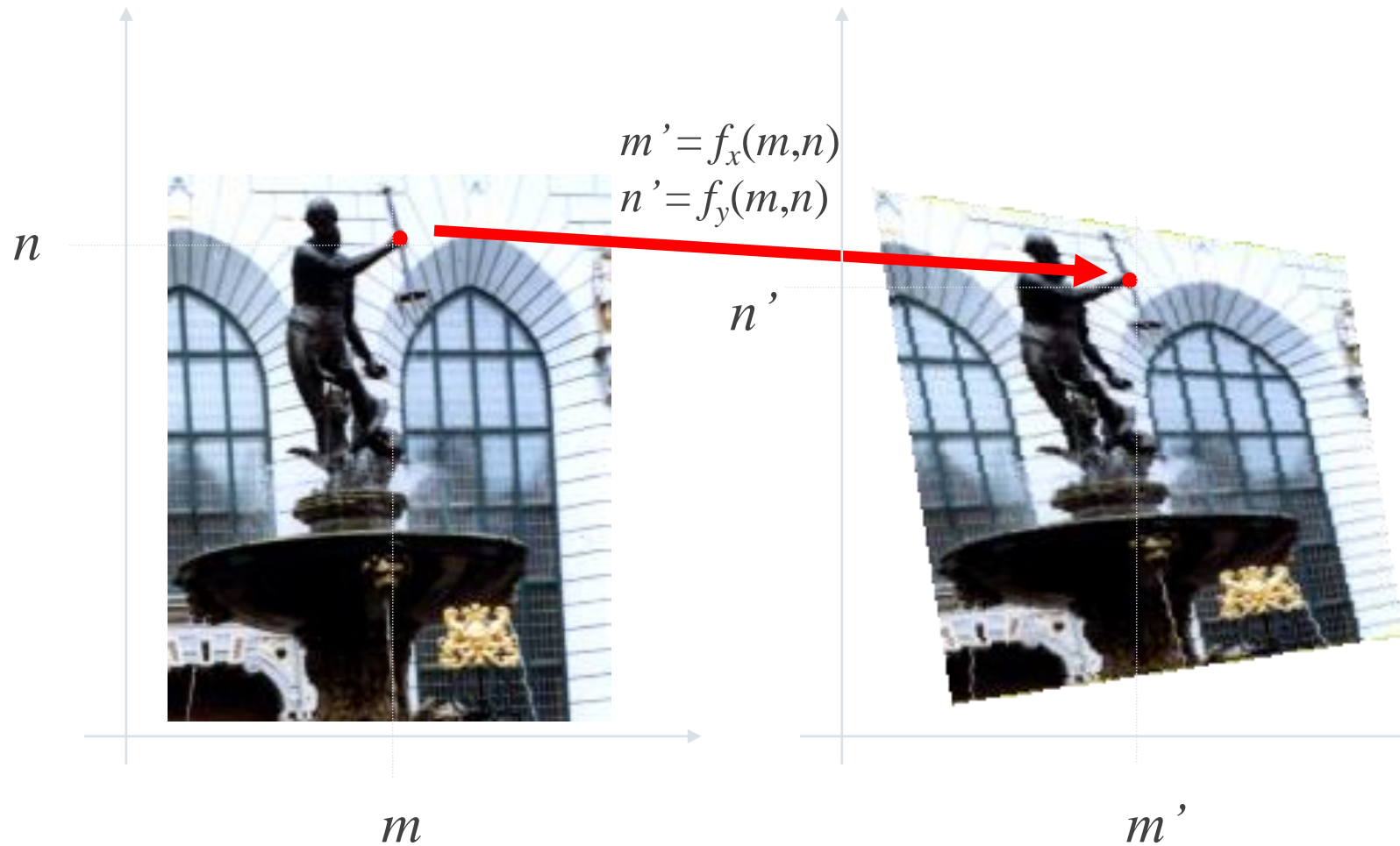
- Zmiana położenia pikseli w obrazie wg funkcji transformacji $F = [f_x, f_y]$

$$I'(m', n') = I(m, n), \quad m' = f_x(m), \quad n' = f_y(n)$$

- Przekształcenie odwrotne $F' = [f'_x, f'_y]$

$$m = f'_x(m'), \quad n = f'_y(n')$$

Operacje geometryczne

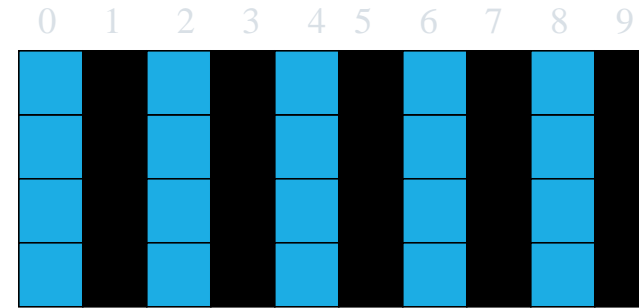
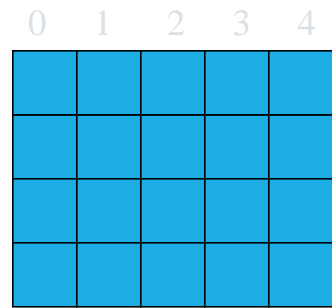


Funkcje odwrotne

- Poszerzanie obrazu

$$m' = 2 * m$$

$$n' = n$$



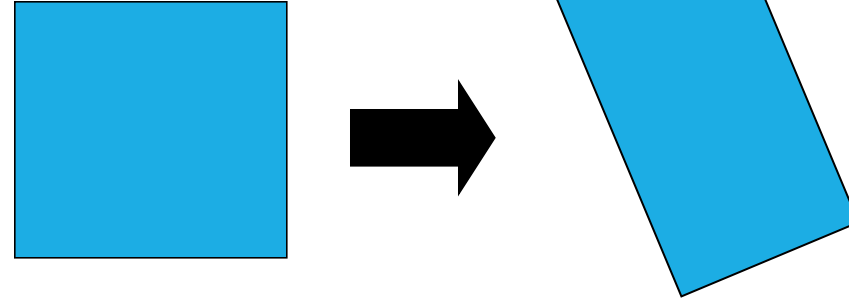
- Funkcje odwrotne
 $m = m' / 2$ $n = n'$
- Stosowanie interpolacji

Klasy operacji geometrycznych

- Liniowe

$$x' = a x + b y + c$$

$$y' = d x + e y + f$$

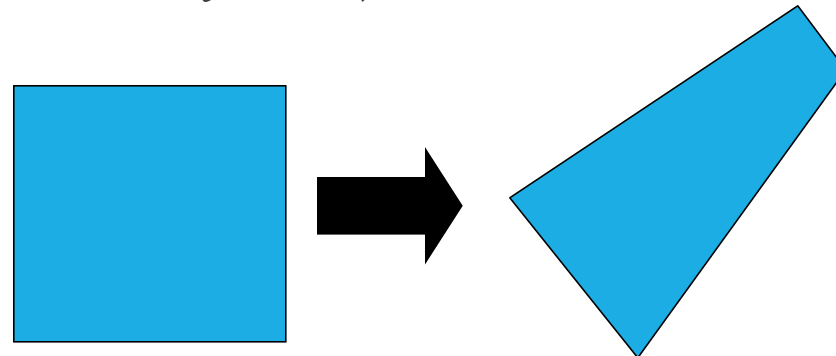


- Rzutowanie

$$x' = (a x + b y + c) / (g x + h y + l)$$

$$y' = (d x + e y + f) / (g x + h y + l)$$

- Inne



Zniekształcenia perspektywiczne płaszczyzny

- Homografia planarna H – transformacja pomiędzy płaską powierzchnią π i jej obrazem w rzucie perspektywnym π' (np. na zdjęciu)

$$s \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

, gdzie $P(x, y) \in \pi$, $P'(x, y) \in \pi'$, s – współczynnik skali

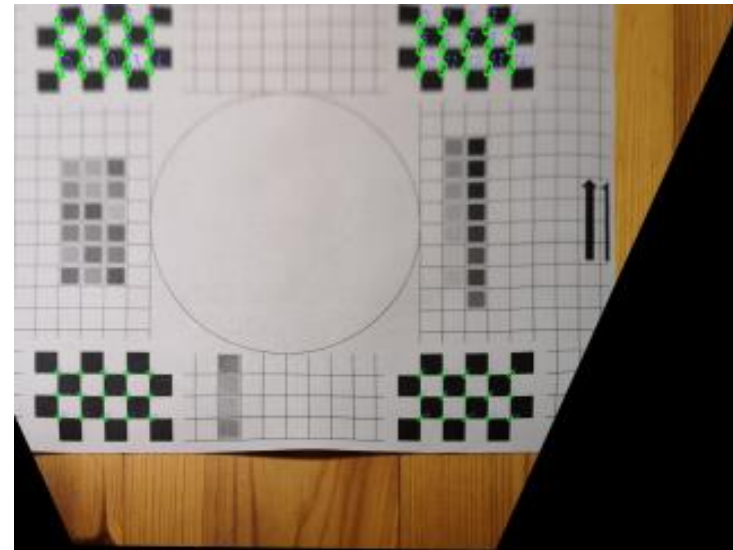
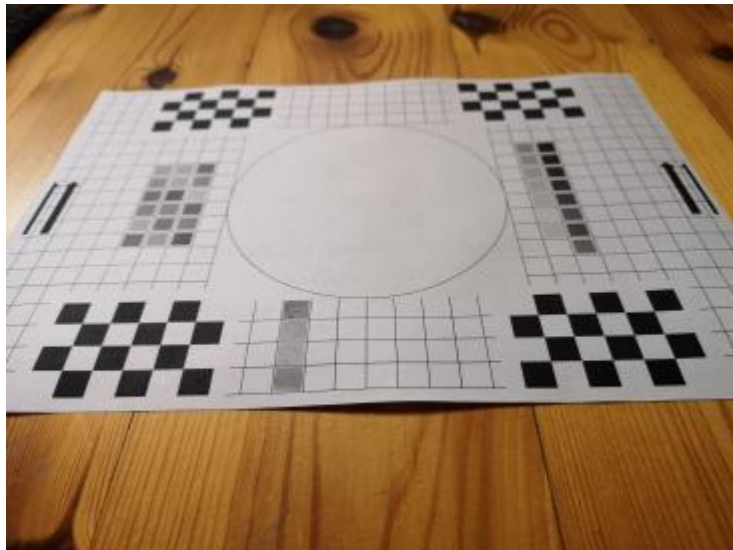
- Ograniczenie 9 elementów macierzy do 8 stopni swobody DOF (ang. *degrees of freedom*), wymaga ustalenia wartości jednego elementu, np. $h_{33} = 1$ lub normalizacji elementów macierzy

$$\sum_{i=1, j=1}^3 (h_{ij})^2 = 1$$

- Wyznaczanie homografii
 - na podstawie minimum 4 punktów

Usunięcie zniekształcenia perspektywicznego

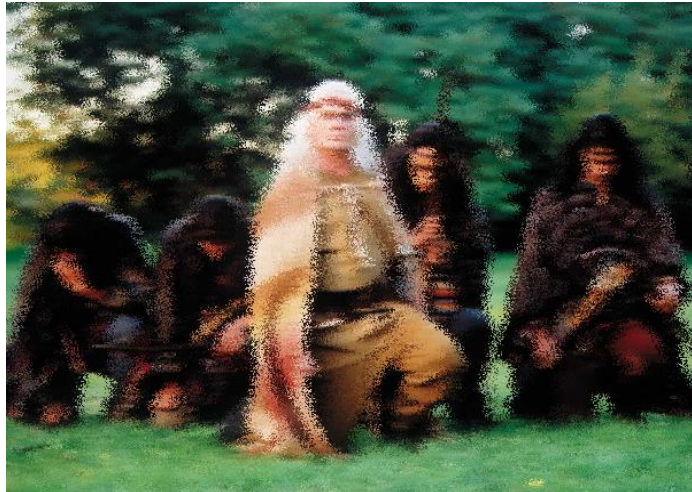
- Biblioteka OpenCV
 - detekcja koplanarnych punktów charakterystycznych o znanych współrzędnych
 - szachownice - `findChessboardCorners()`, `cornerSubPix()`
 - znaczniki QR (np. Aruco) - `aruco::estimatePoseBoard()`
 - inne – `cornerHarris()`, ..
 - Wyznaczenie homografii H – `findHomography()`
 - Zastosowanie transformacji odwrotnej dla całego obrazu – `warpPerspective()`



Przykłady rozmywanie obrazu



Przykłady przekształceń geometrycznych

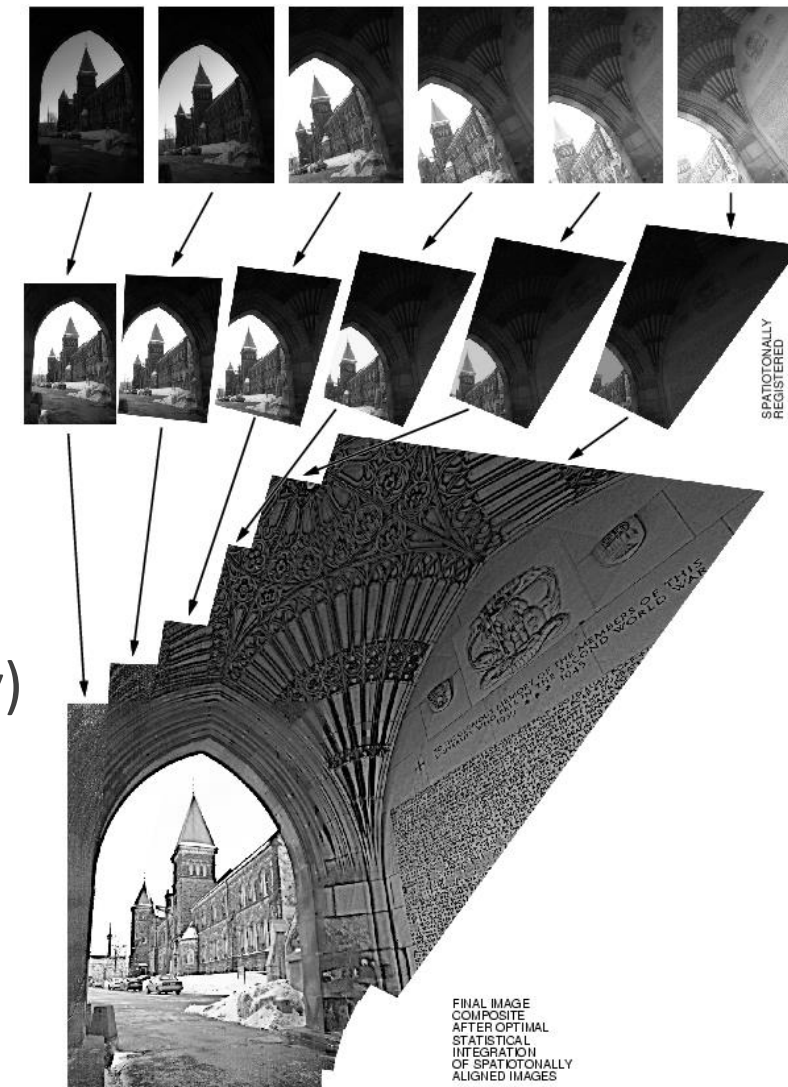


Przykłady operacji geometrycznych



4.4. Zastosowania przetwarzania obrazów

- Aparaty cyfrowe
 - usunięcie efektu czerwonych oczu
 - odszumianie
 - stabilizacja optyczna
 - panoramy
 - rozmyte tło i bokeh
 - podwyższenie dynamiki zdjęć (HDR)
 - szybkie nagrania slow-motion
- Fotografia obliczeniowa (ang. *computation photography*)
 - wykorzystanie algorytmów przetwarzania obrazów do poprawy możliwości aparatów cyfrowych



Panorama

- „sklejanie” w czasie rzeczywistym
- szerokie ujęcia standardowym obiektywem



Rozmycie tła

- Tryb portretowy



Stabilizacja elektroniczna

○ zoom x5



Stabilizacja elektroniczna

○ czas 1/16 s

