

Pojęcie obrazu i jego akwizycja

WYKŁAD 1

Dla studiów niestacjonarnych 2021/2022
Semestr letni

Dr hab. Anna Korzyńska, prof. IBIB PAN

Co to jest obraz?

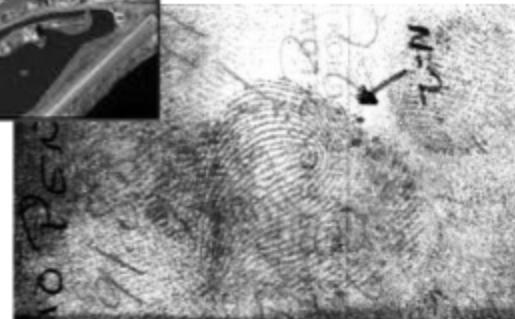
Obraz to wynik obserwacji świata przedstawiony na ograniczonej płaszczyźnie

(najczęściej prostokątnej)



CEL
tworzenia
obrazu

Artystyczny i użytkowy
(informacyjny), pamiątkowy



Poznawczy i użytkowy
(klasyfikacyjny), archiwizujący

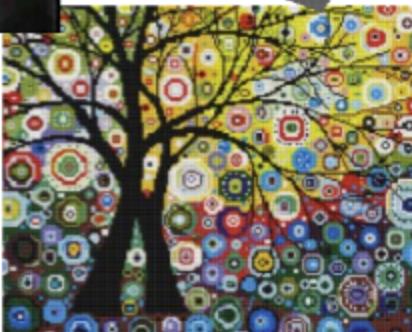
Obraz to ...

Dwuwymiarowa funkcja mówiąca o wartości pewnej mierzalnej wielkości $f(x, y)$, (najczęściej wartość to określa intensywność światła/luminancję lub intensywność kolorów podstawowych) w miejscu o współrzędnych x, y na ograniczonej, dwuwymiarowej, powierzchni.



Obraz niesie informację o odwzorowywanej rzeczywistości lub o wizji autora, umieszczoną na ograniczonej, dwuwymiarowej przestrzeni (2D)

Obraz analogowy – przestrzeń jest spójna;
obraz cyfrowy – przestrzeń jest dyskretna



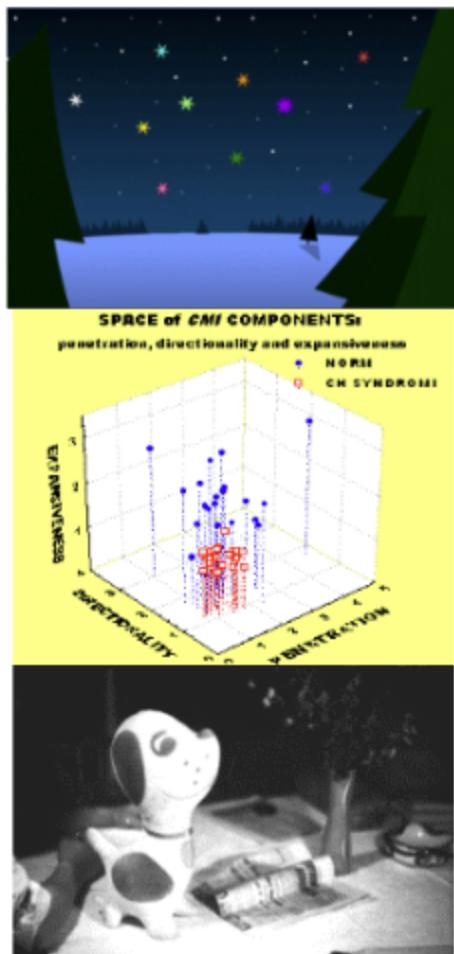
Obraz analogowy i cyfrowy

Obraz jako odwzorowanie rzeczywistości na ograniczonej dwuwymiarowej przestrzeni; może być odwzorowany na przestrzeni ciągłej (płótno, papier fotograficzny itp.) lub na przestrzeni dyskretnej (ekran monitora komputerowego, telewizora cyfrowego, itp.)



Obrazy w komputerze

- Narysowane narzędziami grafiki komputerowej (cel informacyjny lub artystyczny)
- Wygenerowane przez oprogramowanie jak wizualizacji informacji będącej rezultatem obliczeń lub zbierania informacji (cel naukowo -informacyjny)
- Pozyskane z rzeczywistości dzięki urządzeniom akwizycji obrazów: kamery, skanery, aparaty cyfrowe, medyczne urządzenia diagnostyczne, itp.. (cel poznawczy, archiwizacyjny, użytkowy np. klasyfikacja, detekcja, itp., lub cel artystyczny)



Jak powstał obraz cyfrowy



31 czerwca 1964 o 13:09 UT (9:09 AM EDT)

Vidicon B

Rozmiar w pikselach:
1150x1150

Obraz cyfrowy to informacja podwójnie dyskretna:

- odwzorowuje 3D na **dyskretną** i ograniczoną przestrzeń 2D



Księżyc

- informacja o intensywności (skwantowana)

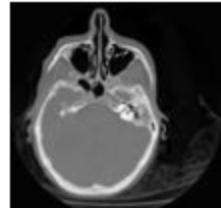
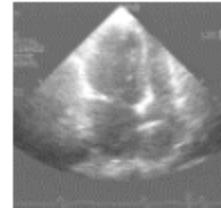


Pierwsze kolorowe zdjęcie z łazika Perseverance wysłane na Ziemię. Zostało wykonane przez jedną z kamer Hazcam. Źródło: NASA/JPL-Caltech.

Obraz cyfrowy w naukach technicznych i przyrodniczych to:

Zwarty, jednorodny i przestrzennie uporządkowany zbiór sygnałów:

- związanych z cechą/cechami pomiarowymi, na bazie których tworzymy obraz (natężenie fali elektromagnetycznej, akustycznej, wielkości nie falowe np. czas relaksacji)
- dostosowanych do materialnego nośnika obrazu (papieru, kliszy, dyskietki, pamięci dyskowej itp.)
- niosących informację o odwzorowywanej rzeczywistości



Podstawowe definicje wielkości opisujących obraz

Obraz to dyskretna dwuwymiarowa funkcja $f(x, y)$ określona na ograniczonym fragmencie płaszczyzny, której wartości f to **intensywność** (jasność, kolor) w tym punkcie (x, y) .

- Dla obrazów szaroodcieniowych wartość f to luminancja
- Dla obrazów kolorowych wartość f to wektor o trzech (lub więcej) składowych, określający np.: kolor w wybranej przestrzeni koloru $f = \{f_1, f_2, f_3\}$
- Dla obrazów wielomodalnych i multispektralnych wartość f to wielowymiarowy wektor określający różne dane pomiarowe.

$f \in [L_{min}, L_{max}]$ - skala szarości/intensywności składowej pojedynczego kanału obrazu

$L_{min} = 0$, minimalna intensywność odpowiada czerni

L_{max} = maksymalna intensywność odpowiada bieli

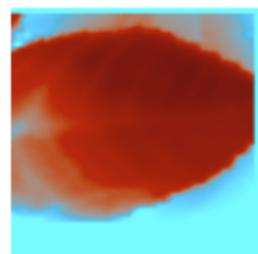
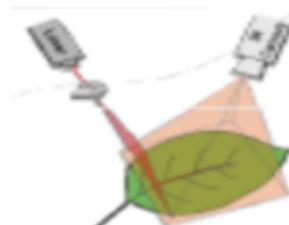
M - liczba poziomów szarości

$$M = L_{max} - L_{min} + 1 \quad M = 2^k$$

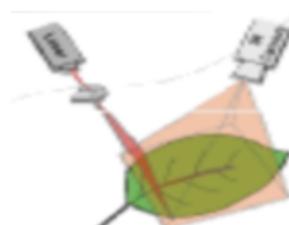
Obrazy konstruowane na podstawie wielu sygnałów

Obrazy multimodalne

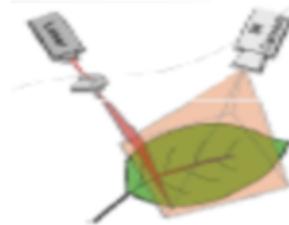
Intensywność
odbicia światła
białego



Intensywność
odbicia światła
podczerwonego



Intensywność
rozproszenia fali
akustycznej



Obrazy konstruowane na podstawie wielu sygnałów

Obrazy multispektralny



Newada

Skaner multispektralny OPS z 8 zakresami spektralnymi od 0,52 do 2,40 um oraz radar obrazujący wykorzystujący długość fali 23,5 cm (1275 MHz) stosujący polaryzację poziomą (HH) kąt padania środka wybieranego pasa to 35 stopni, szerokość obrazowanego pasa wynosi 75

Rozdzielcość zasięgu i rozdzielcość azymutalna to 25 m.

JERS -1 (Japanese Earth Resources Satellite)



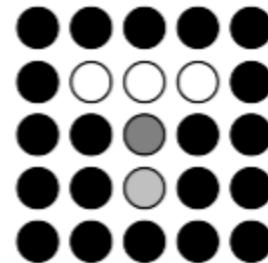
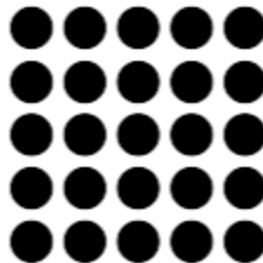
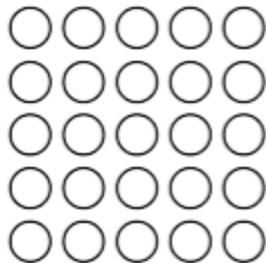
Galaktyki a520485

Zdjęcie przedstawia gromadę galaktyk „Abel 520” wykonane przez nałożenie składowych jej obrazów wykonanych w różnych długościach fal. Kosmiczny teleskop Chandra obserwował obiekt w zakresie promieniowania X (kolor czerwony); Teleskopy Kanadyjski, Francuski, wyspy Hawaii oraz teleskop Subaru w zakresie widzialnym (kolor żółty oraz pomarańczowy); Materię zabarwiono na kolor niebieski, z której to większość stanowi ciemna materia.



George Seurat "Sunday Afternoon on the Island of Grand Jatte"

Model obrazu cyfrowego



- $N_1=N_2=5$
- $M=4$ $L_{min}=0$ czerń; $L_{max}=3$ biel,
1 jasna szarość, 2 ciemna szarość

3 3 3 3 3

00000

00000

3 3 3 3 3

00000

03330

3 3 3 3 3

00000

00200

3 3 3 3 3

00000

00100

3 3 3 3 3

00000

00000

Obraz cyfrowy i piksel

Obraz cyfrowy niesie podwójną informację o:

- lokalizacji w przestrzeni obrazu wartość intensywności cechy/cech pomiarowych oraz o samej wartości tej cech
- czyli o wartości poziomu szarości, koloru w danym punkcie $f(i, j)=n$ gdzie n jest skalarem lub wektorem i $n \in \{0, 1, \dots L_{\max}\}$

Piksel to podstawowy element obrazu (*ang. Picture element*)



0,0							0,0						i				
								15	15	0	0	2					
j							j	13	13	15	0	0					
								0	0	7	14	14					

N1=5
N2=3
 $L_{\min}=0$
 $L_{\max}=15$
M=16

Rozdzielcość obrazu

- **Rozdzielcość przestrzenna** - określa stopień rozróżnialności detali; tym lepsza, im większa wartość N /na jednostkę długości. Jest wyrażana w jednostkach zwanych punktami na cal (*ang. Dot per inch*)
- **Rozdzielcość poziomów szarości** – określa ilość rozróżnianych poziomów szarości lub kolorów; tym lepsza, im większa wartość M . Jest dobierana tak, aby była potęgą liczby 2.
- Inne rozdzielcości: **całkowita**, interpolowana, urządzeń prezentacji obrazu jak monitor, drukarka, ploter, urządzeń akwizycji.

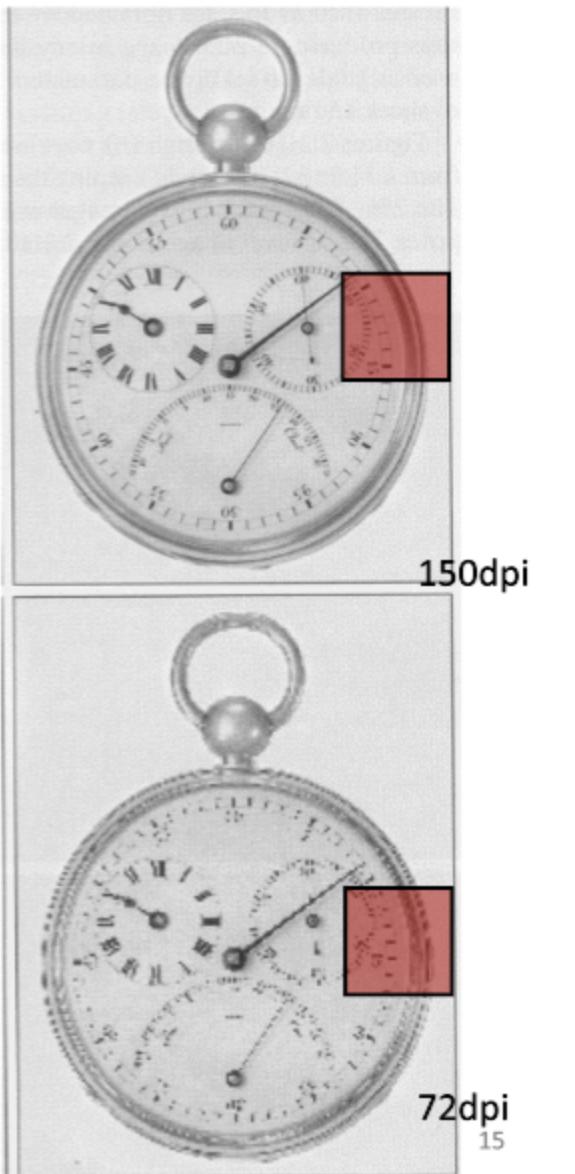
Rozdzielcość przestrzenna

Ilość szczegółów zapisanych w obrazie na jednostkę długości (najczęściej na cal)

Granica rozdzielczości to rozmiar szczegółów i obiektów, które są widoczne na obrazku.

O rozdzielczości mówimy na poziomie:

- Akwizycji (punkty na cal),
- Wyświetlania na ekranie (linie na cal, punkty),
- Drukowania (punkty na cal)



Wymiar obrazu w pikslach

Jeśli akwizycja była
przeprowadzona na matrycy
1200x1600

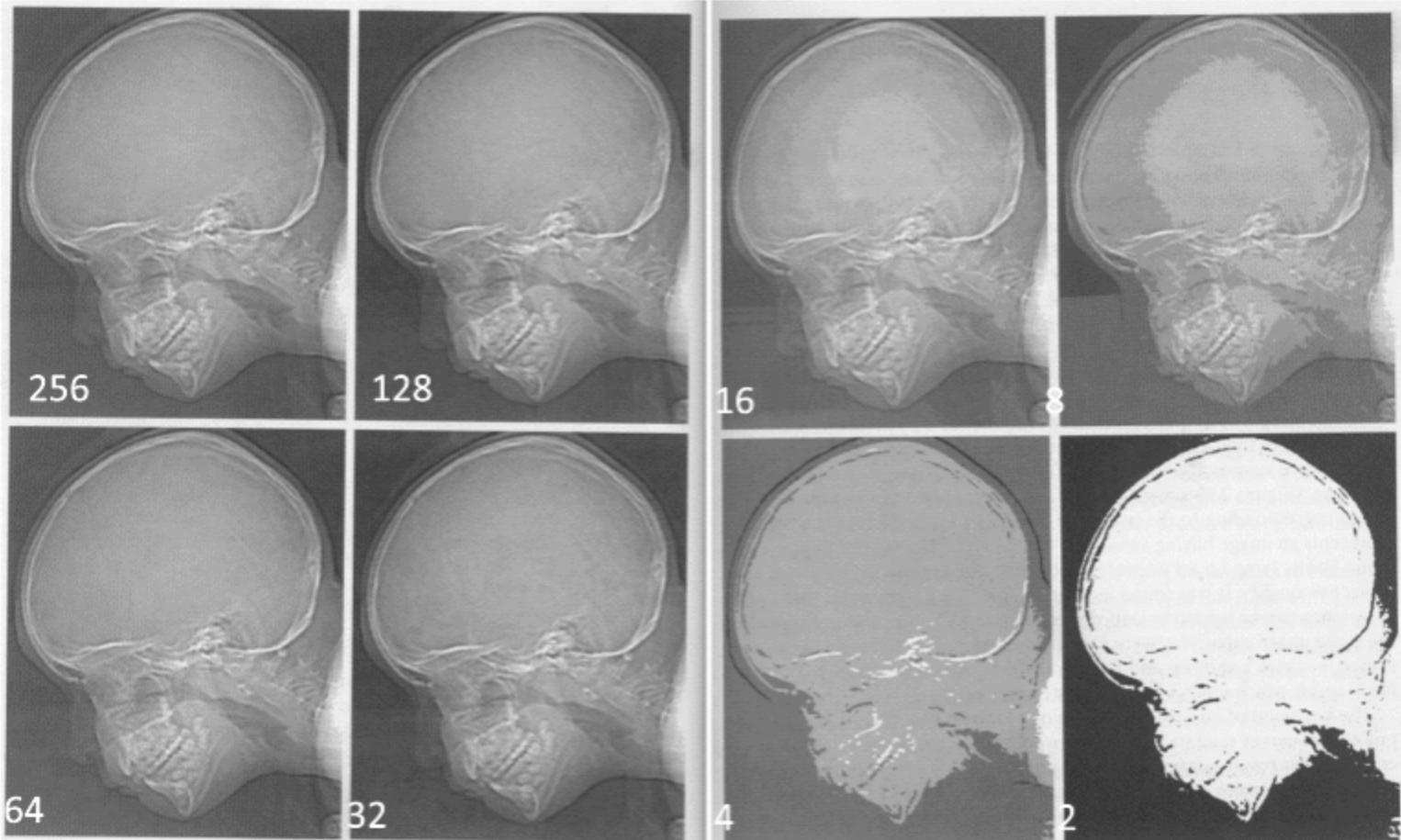
To jego rozdzielcość akwizycji
wynosi:

$1200:4,3\text{cal}=280 \text{ ppi}$

$1960:7\text{cal}=280 \text{ ppi}$

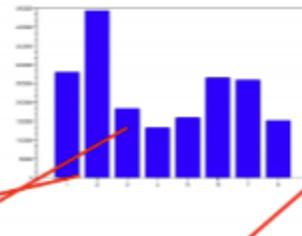


Rozdzielcość poziomów szarości



Histogram - rozkład ilości wystąpień pikseli o zadanych poziomach jasności w obrazie

obraz z 8 poziomami intensywności

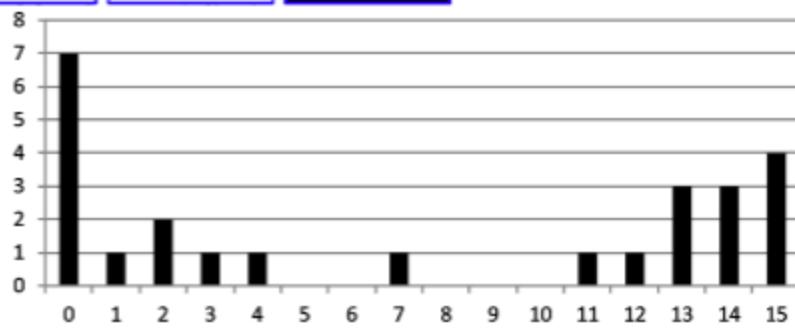


$M=8$,
 $L_{min}=0$,
 $L_{max}=7$



15	15	0	0	2
13	13	15	0	0
0	0	7	14	14
0	1	2	3	4
15	14	13	12	11

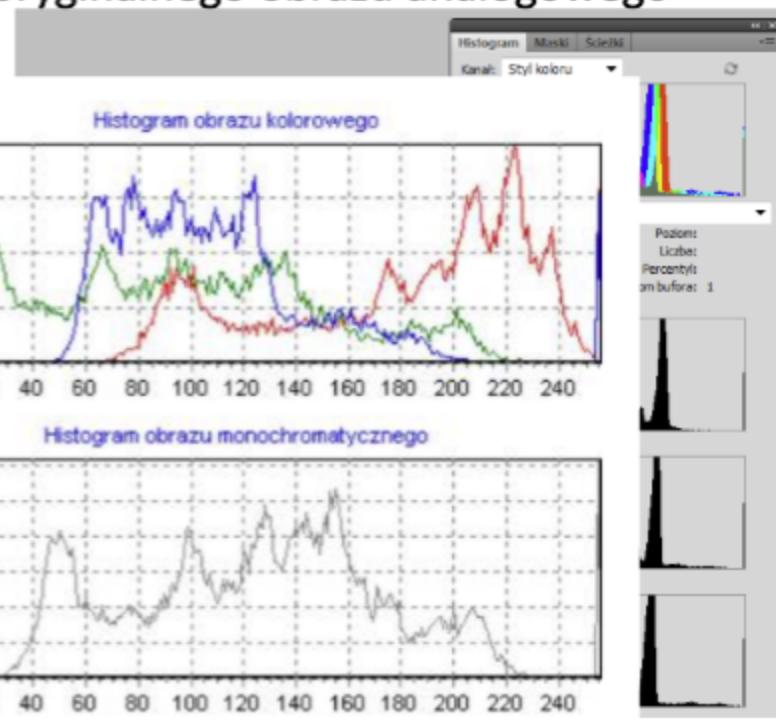
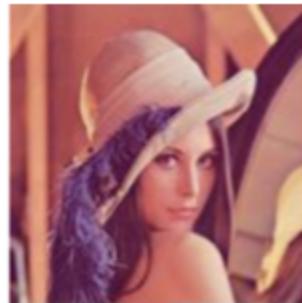
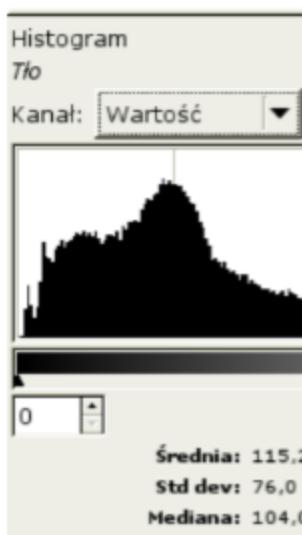
$M=16$,
 $L_{min}=0$,
 $L_{max}=15$



Histogram definicja

Histogram to wykres słupkowy przedstawiający ilość pikseli o każdej potencjalnej wartości występującej w obrazie.

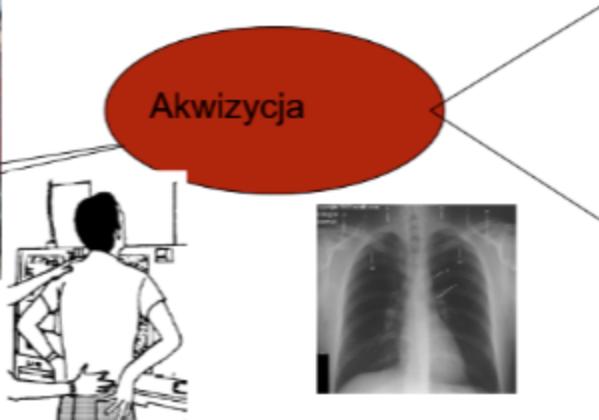
- Statystyka odzwierciedlająca rozkład jasności punktów w obrazie.
- Pewna estymata rozkładu jasności oryginalnego obrazu analogowego i rzeczywistości .



Akwizycja obrazu

Akwizycja (pozyskiwanie) obrazu cyfrowego

Akwizycja obrazu - przetworzenie **informacji o obiekcie fizycznym** do postaci zbioru danych dyskretnych (**obrazu cyfrowego**).



Akwizycja obrazu cyfrowego

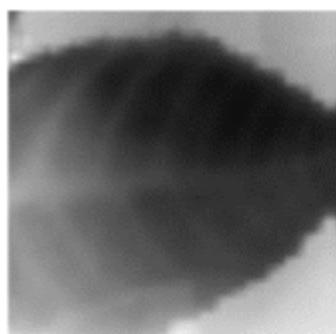
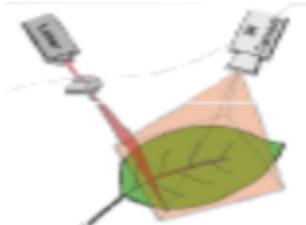
Akwizycja (pozyskiwanie, zbieranie) obrazu - przetworzenie informacji o fizycznym obiekcie lub scenie do postaci zbioru danych dyskretnych ($f(x,y)$ obraz cyfrowy) nadających się do zapisania w pamięci komputera, a następnie do wyświetlenia, drukowania i dalszego przetwarzania za pomocą odpowiedniego oprogramowania.

Elementy procesu akwizycji:

1. Oświetlenie obrazu.
2. Formowanie obrazu (optyczne).
3. Detekcja obrazu.
4. Formowanie wyjściowego sygnału z urządzenia (kamera, skaner)

Elementy procesu akwizycji

1. Formowanie obrazu/sygnału (optyczne, akustyczne, inne)
2. Detekcja sygnału przez czujniki analogowo-cyfrowe.
3. Formowanie kodu obrazu (kamera, skaner, MRI, USG).



Najważniejsze elementy procesu akwizycji (pozyskania)

- **Formowanie obrazu**

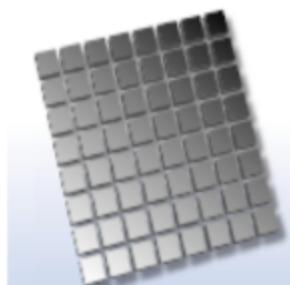
- **Dyskretyzacja obrazu**, czyli dyskretyzacja funkcji $f(x,y)$ na dwóch poziomach:
 - przestrzenna (próbkowanie dziedziny funkcji)
 - amplitudowa (kwantyzacja wartości funkcji)

Proces wiąże się z nieuniknioną i nieodwracalną utratą informacji o wartości cech pomiarowej poza węzłami siatki, i o dokładnej wartości w punktach siatki

- Przekształcenie danych surowych w dane do zapisu obrazu
- **Kodowanie obrazu** zgodne z wybranym formatem zapisu (RAW, JPEG, TIFF)

Matryce CCD jako elementy pozyskania obrazu w aparacie fotograficznym cyfrowym

Matryca CCD (charge coupled device) ma płaską periodyczną strukturę (dyskretną), której podstawowe elementy mają $10-5\mu\text{m}$ długości i szerokości, która zamienia światło na prąd (sygnał analogowy) o napięciu proporcjonalnym do jasności. Prąd ten jest próbkowany przez konwerter A/D (framegrabber).



Nagroda Nobla za sensor CCD

Fizyka 2009

Willard S. Boyle (Kanada/USA) i George E. Smith (USA)
za "wynalezienie półprzewodnikowego obwodu
obrazującego - sensora CCD"

1969 - rozpoczęcie prac

Pierwszy układ wczytujący miał zaledwie osiem pikseli ułożonych w jednym rzędzie

1973 - 100 x 100 pikseli

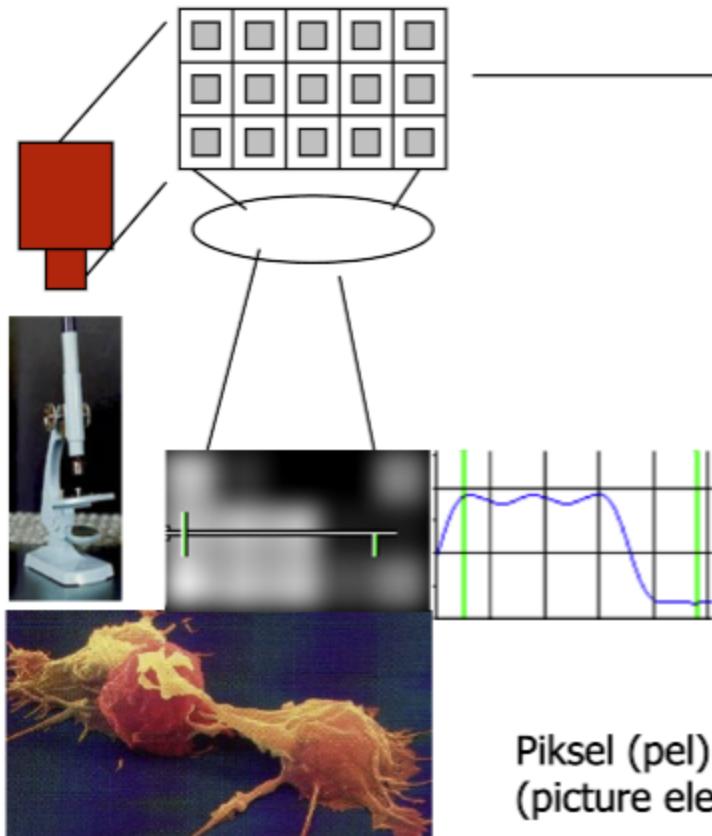


Pierwszy aparat fotograficzny wykorzystujący matrycę światłoczułą zamiast błony nazywał się MAVICA -1981

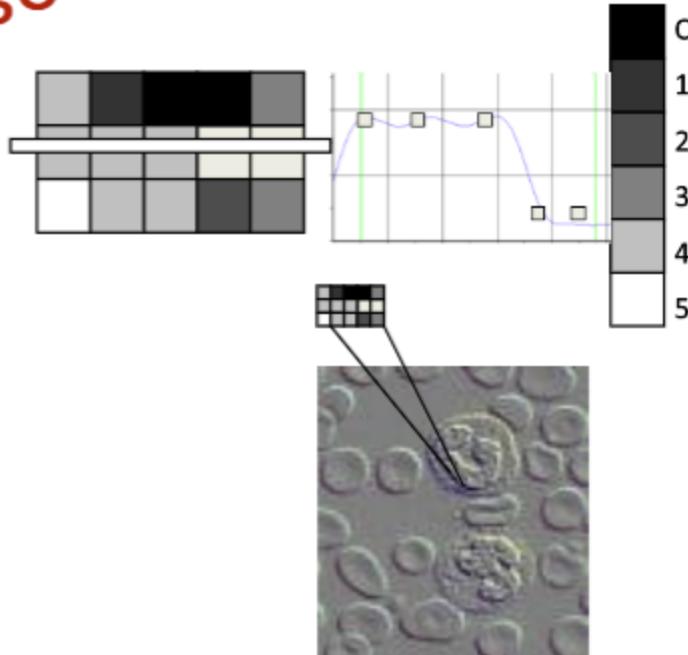
CCD sygnał zapisywany jako NTSC

570 linii i 490 pixels

Proces pozyskiwania obrazu cyfrowego



Piksel (pel) - element obrazu
(picture element)



4	2	0	0	3
4	4	4	1	1
5	4	4	2	3

Najważniejsze elementy formowanie sygnału w procesie akwizycji

Dyskretyzacja obrazu to dyskretyzacja funkcji $f(x,y)$ na dwóch poziomach:

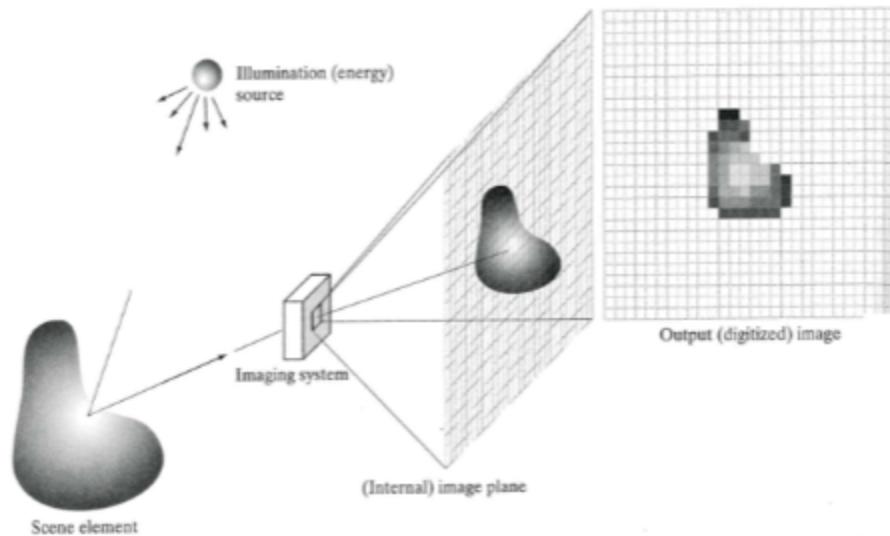
- przestrzenna (próbkowanie dziedziny funkcji)
- amplitudowa (kwantyzacja wartości funkcji)

Obraz jest więc strukturą **podwójnie dyskretną**

Próbkowanie sygnału

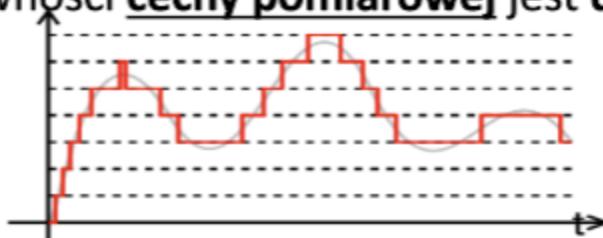
Obraz cyfrowy to funkcja $f(x, y)$ podwójnie dyskretna:

- odwzorowuje 3D na **dyskretną** i ograniczoną przestrzeń 2D



Kwantyzacja sygnału

- informacja o intensywności cechy pomiarowej jest **dyskretna** (skwantowana)



Kwantyzacja sygnału

- To proces polegający na przypisaniu wartościom analogowym do najbliższych poziomów reprezentacji cyfrowej (np.: 8-bitowego kodu)
- Niedokładności wynikające z zaokrągleń stanowią szum kwantyzacji

- W dyskretnych punktach przestrzeni dokonujemy pomiaru sygnału na podstawie, którego tworzymy obraz

0	5	6	8.5
2.1	3.3	5.2	9.0
-8	-2	1.2	3
0.5	0.75	0.8	0.92
0.6	0.66	0.76	0.95
0.1	0.4	0.56	0.65
127.5	191.1	204.0	235.8
154.2	169.5	193.8	242.2
25.5	102.0	142.8	165.7
127	191	204	235
154	169	193	242
25	102	142	165

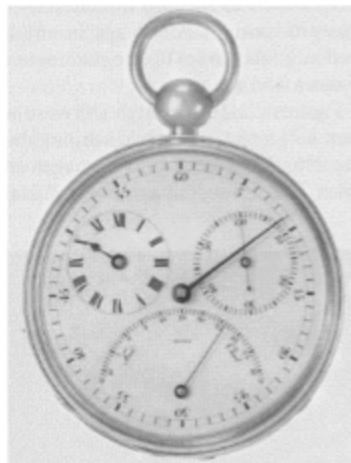
- Wyszukanie wartości minimalnej i maksymalnej lub odczytanie z parametrów urządzeń detekcji sygnału

- Unormowanie sygnału przez przeliczenie wartości pomiarowych na zakres <0,1>

- Wybór zakresu bitów kodu, czyli ilości przedziałów kwantowania i przeliczenie unormowanego sygnału na kody

- Zaokrąglenie do wartości naturalnych

Zapis obrazu cyfrowego w pamięci komputera



InBmp	Histogram	Grid	
		186 186 187 187 188 188 188 189 189 190 190	▲
		186 186 186 187 187 188 188 188 189 189 190	
		185 186 186 186 187 187 188 188 188 189 189	
		185 185 186 186 186 187 187 187 187 188 188	
		185 185 185 185 186 186 187 187 187 188 188	
		184 185 185 185 186 186 187 187 187 188 188	
		184 184 185 185 185 186 186 187 187 187 188	
		184 184 184 185 185 185 186 186 187 187 187	
		183 184 184 184 185 185 185 186 186 187 187	
		183 183 184 184 184 185 185 185 186 186 187	
		183 183 183 184 184 185 185 185 186 186 187	
		182 183 183 183 184 184 184 184 185 185 186	
		182 182 183 183 183 184 184 184 184 185 186	
		182 182 182 183 183 183 184 184 184 185 185	
		181 182 182 182 183 183 183 184 184 184 185	
		181 181 182 182 182 183 183 183 184 184 184	
		181 181 181 182 182 182 183 183 183 184 184	
		181 181 181 182 182 182 183 183 183 184 184	▼

Charakterystyczne cechy procesu akwizycji i obrazu

Inherentne cechy procesu akwizycji

- Nakładanie szumu
(dla aparatu cyfrowego – szumu kwantyzacji, czyli odpowiednika ziarna dla tradycyjnej fotografii)
- Nakładanie zniekształceń
(dla aparatu cyfrowego - zniekształcenia obiektywów szerokokątnych, dystorsje soczewek, gorące i zimne piksle w matrycy)

Urządzenia akwizycji charakteryzuje się przez podanie informacji o poziomie szumu i zakłóceń

Szum



Szum (ang. random noise) to przypadkowe, niestacjonarne zakłócenia wartości sygnału:

- w czasie;
- w przestrzeni.

Nakładanie szumu na sygnał to inherentna cecha urządzeń elektronicznych, które albo transmitują albo odbierają sygnał w postaci prądu elektrycznego

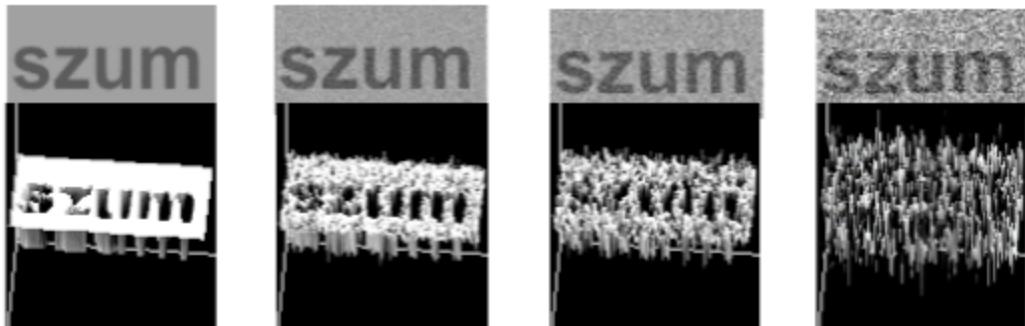
Szum powstaje na skutek

- Nałożenia termicznych ruchów elektronów w materii na mierzony sygnał, który jest zamieniany na prąd (np.: w przetwornikach zamieniających światło na prąd zgodnie ze zjawiskiem fotoelektrycznym)
- Niestabilności źródła formowania sygnału, np.: promieniowania X, fali akustycznej czy radiowej;

Zrozumienie zjawiska i jego przyczyn zwykle prowadzi do unikania zaszumienia, a nie do jego likwidacji czy choćby redukcji

Miara szumu

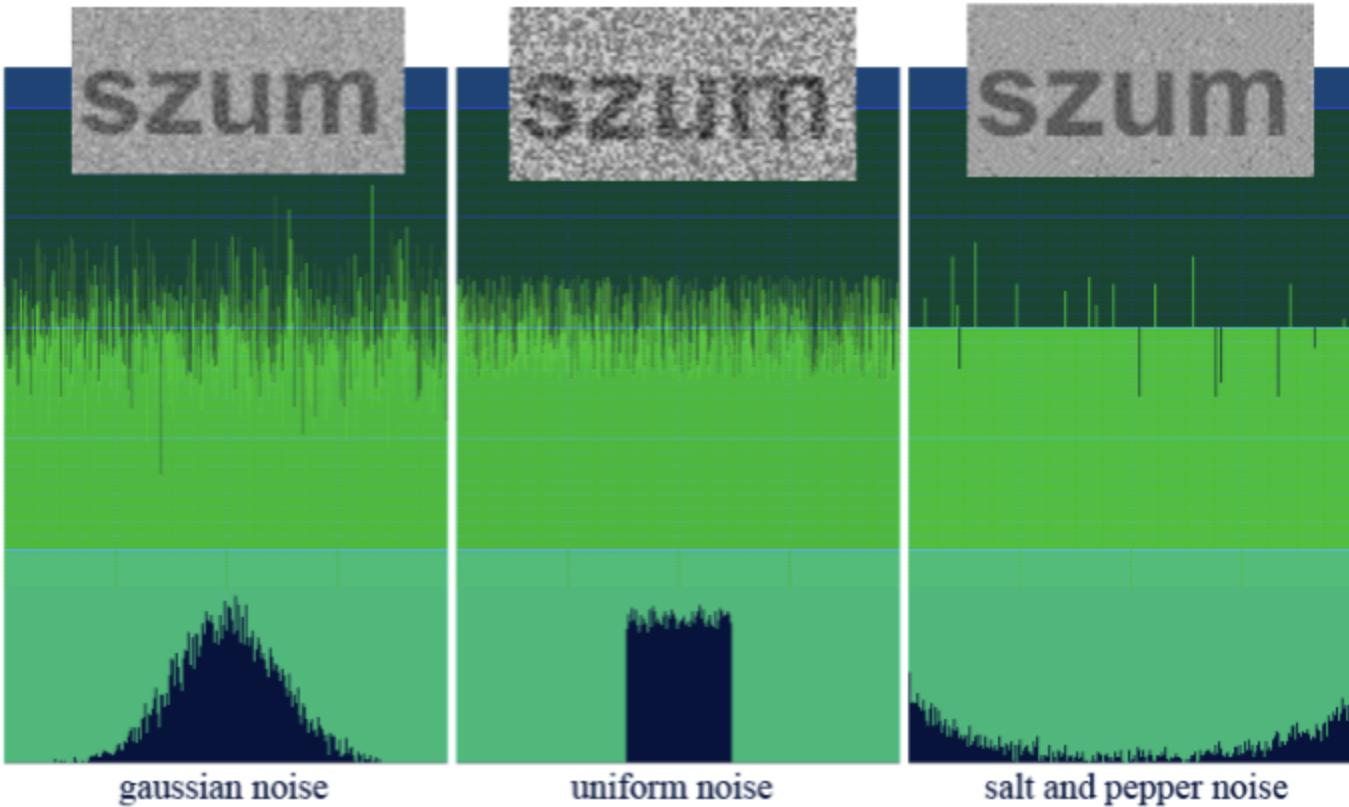
Stosunek sygnału do szumu (ang. signal to noise ratio – SNR), jednostka decybele dB.



Brak „odczuwania” szumu oznacza, że jego stosunek do sygnału jest taki, że nasze sensory (wzrokowe, słuchowe) odbierają sygnał a pomijają szum.

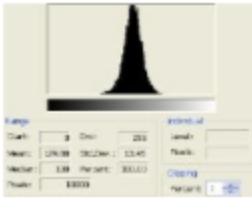
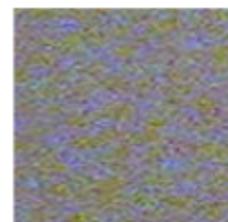
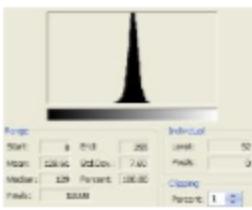
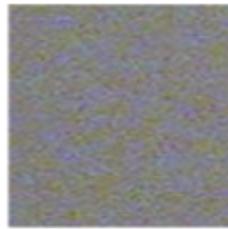
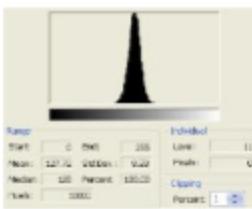
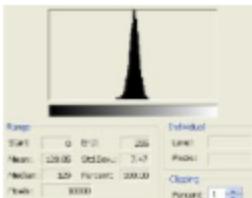
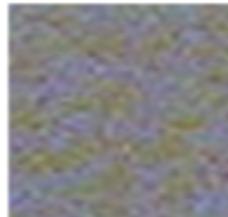
Charakterystyka szumu w obrazie

szum



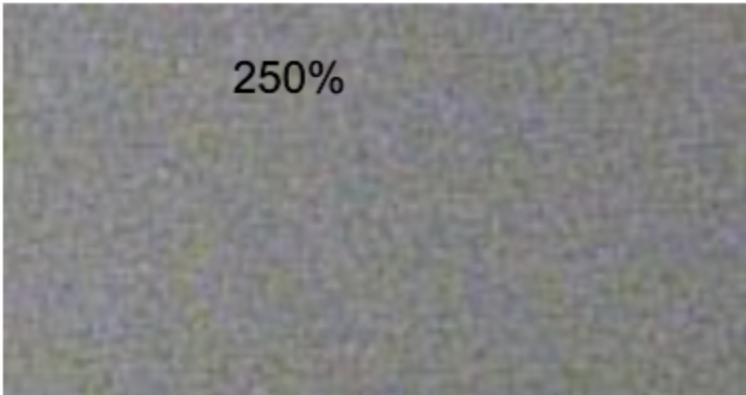
Typy szumu w obrazie

- Szum niskoczęstotliwościowy
(ang. *coarser texture* - chropowaty gruboziarnisty)
- Szum wysokoczęstotliwościowy
(ang. *fine-grained* - drobny)
- Szum o małej amplitudzie
(ang. *smoother texture* - gładki)
- Szum o dużej amplitudzie
(ang. *rougther texture* - szorstki)

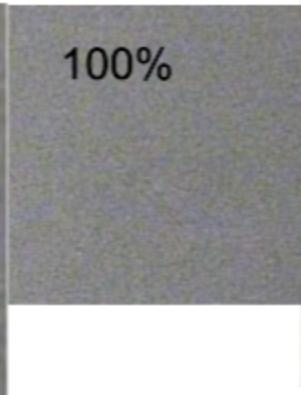


Szum w obrazie: w luminancji i w kanałach kolorów

250%



100%



Range

Start: 0 End: 255
Mean: 130.02 Std.Dev.: 7.06
Median: 131 Percent: 100.00
Pixels: 22500

Individual

Level: 101
Pixels: 0
Clipping
Percent: 1 ▲



Range

Start: 0 End: 255
Mean: 131.34 Std.Dev.: 8.36
Median: 131 Percent: 100.00
Pixels: 22500

Individual

Level:
Pixels:
Clipping
Percent: 1 ▲



Range

Start: 0 End: 255
Mean: 131.29 Std.Dev.: 7.93
Median: 131 Percent: 100.00
Pixels: 22500

Individual

Level: 14
Pixels: 0
Clipping
Percent: 1 ▲



Range

Start: 0 End: 255
Mean: 131.25 Std.Dev.: 10.14
Median: 131 Percent: 100.00
Pixels: 22500

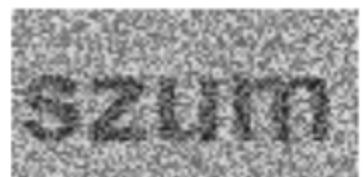
Individual

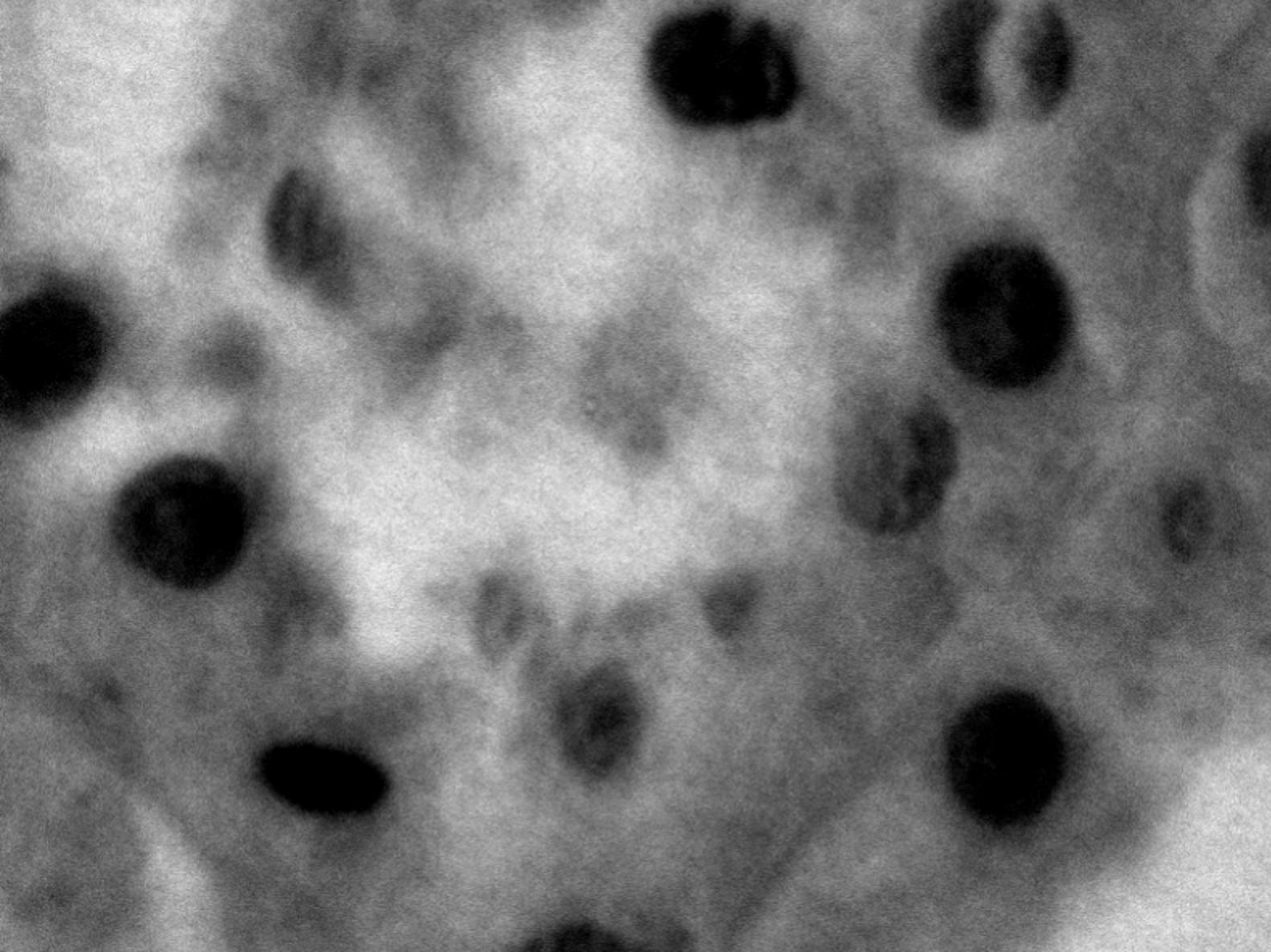
Level:
Pixels:
Clipping
Percent: 1 ▲

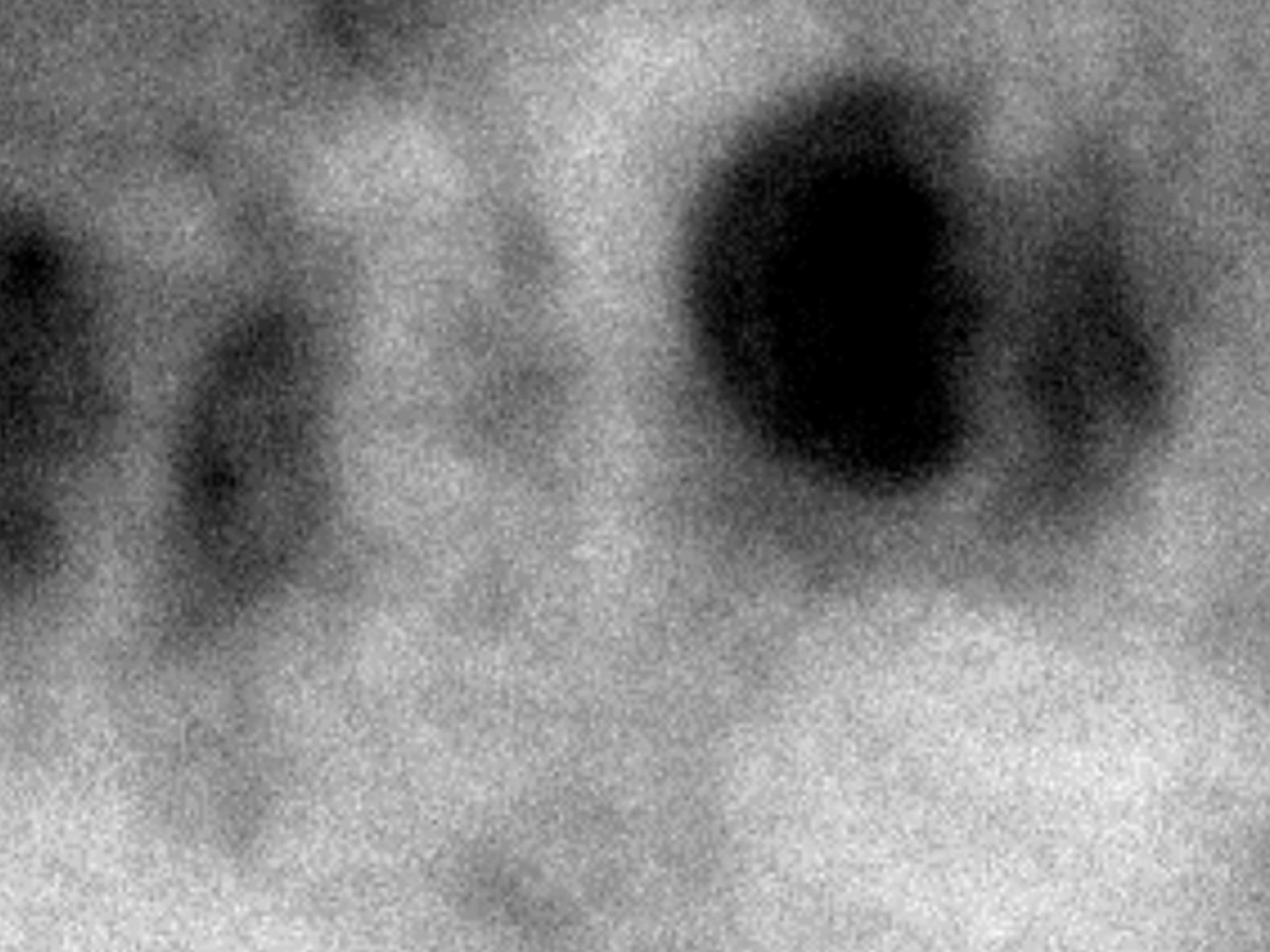
Na jakich obrazach występuje dużo szumu?

- Rentgenowskich, w mikroskopach fluorescencyjnych, ze znacznikami emitującymi wąski zakres fal elektromagnetycznych – powód: mało fotonów (charakterystyka gaussowska)
- Mikroskop elektronowy skanujący – powód: niestabilność źródła światła - długie czasy zbierania (charakterystyka niegaussowska)
- Astronomicznych - zbieranych przy pomocy kamery integrującej sygnał

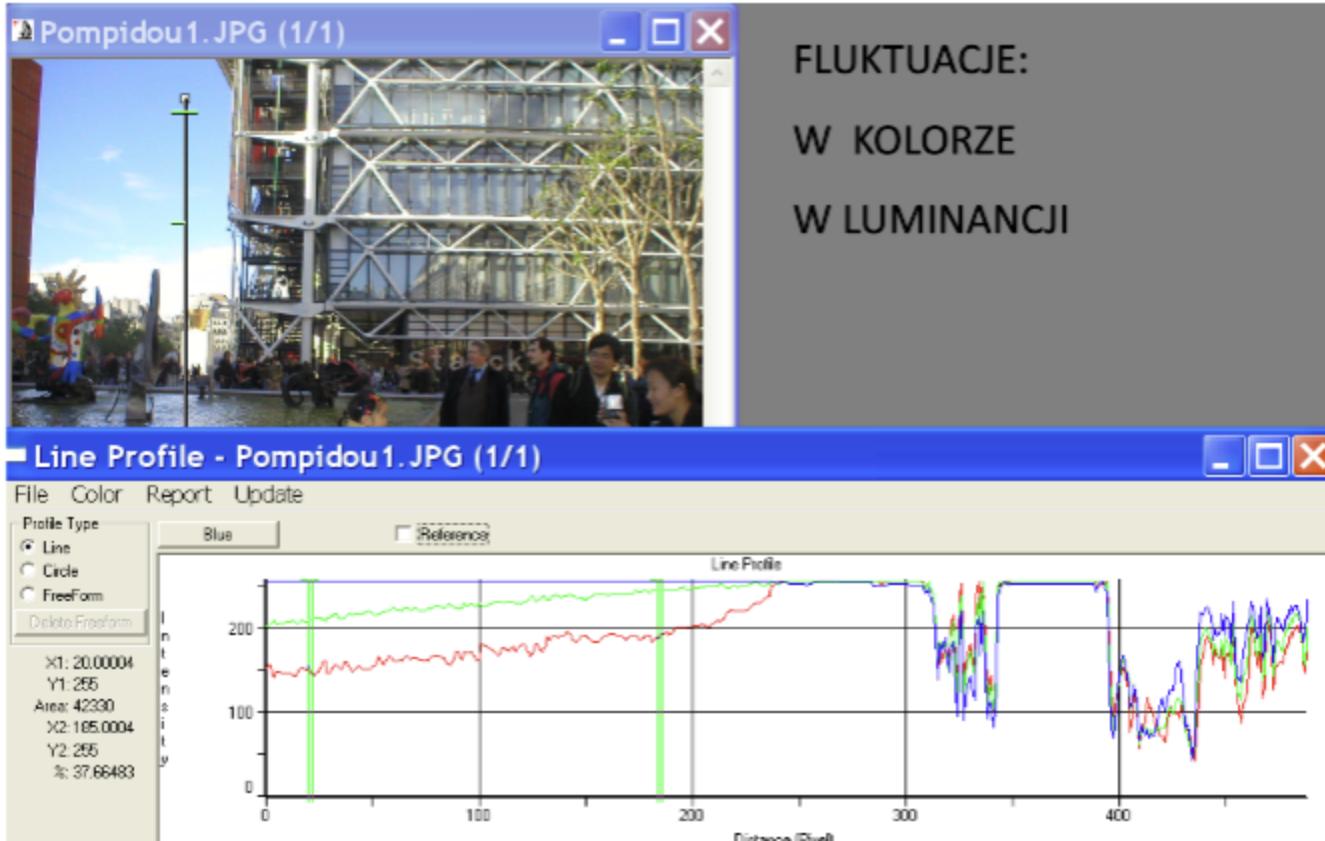
szum







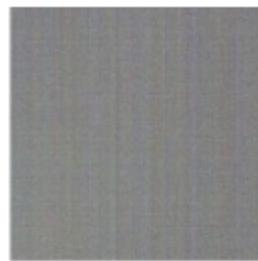
Szum nakładany na obraz przez cyfrowy aparat fotograficzny



Szum nakładany na obraz powstający w cyfrowym aparacie

wynika z:

- Parametrów technicznych matrycy fotoczułej (wielkość sensora)
- Niestabilności światła lub z jego niewielkiej ilości (nocą)
- Zjawisk towarzyszących zamianie światła na prąd (ang. *banding noise, truncated, ..*)
- Nałożenia termicznych ruchów elektronów na mierzony sygnał



Szum
periodyczny
ang. periodic
noise

Szum w obrazach cyfrowych zależny od:

- typu (egzemplarza) aparatu cyfrowego
- od ustawień przy wykonywaniu zdjęcia
(czułość ISO, czas naświetlenia)
- jasności fotografowanych obiektów i
obszarów (w cieniach szumu jest więcej niż
w tonach jasnych)
- temperatury otoczenia - im wyższa tym
silniej widać
(ang. Fixed pattern noise)

Rozłożenie szumu na obrazie



250%

250%

100%

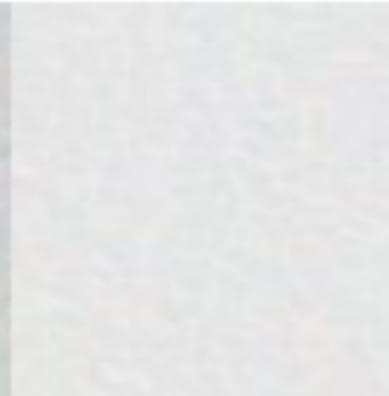
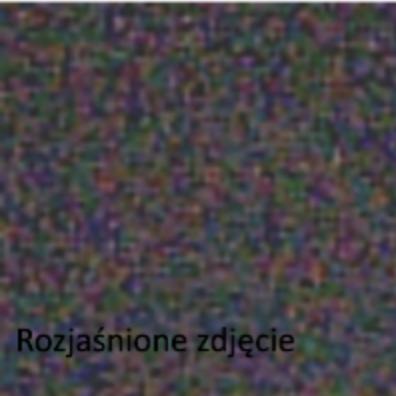
100%

100%

100%

←

250%



UWAGA! Odwrotnie w klasycznej fotografii negatywowej

Redukcja szumu

- Na poziomie akwizycji:
 - Wybór maksymalnie długiego czasu naświetlania
 - Wybór niskich czułości ISO
 - Chłodzenie matrycy
 - Wykonywanie zdjęć wielokrotnych (braketing)
 - Wykonywanie zdjęć lekko prześwietlonych (HighKey)
- Na poziomie przetwarzania (obróbki) obrazów:
 - Uśrednianie zdjęć wielokrotnych
 - Filtrowanie
- **Uwaga:** Nie redukujemy szumu przez
 - Rozjaśnianie obrazu w miejscach niedoświetlenia
 - Rozjaśnianie cieni w obrazie

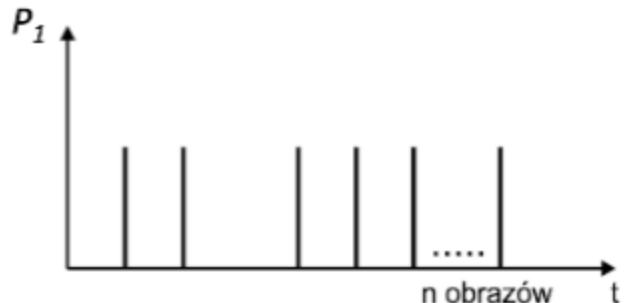
Uśrednianie czasowe (dotyczy obrazów statycznych)

$N \times N$ – liczba pikseli w obrazie.

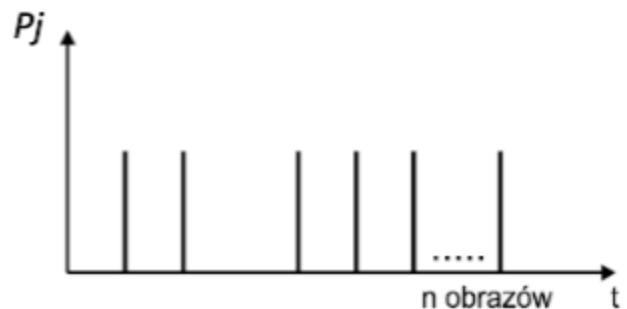
Np. dla $N=4$ liczba pikseli w obrazie wynosi
 $N \times N = 16$.

15	14	10	0
12	11	5	0
11	4	3	2
3	2	0	1

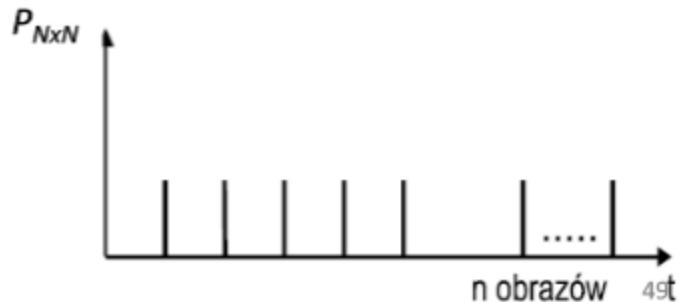
P_1 - wartość pierwszego piksela obrazu



P_j = wartość j-tego piksela obrazu



P_{NxN} - wartość ostatniego piksela



$$P_{jś} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ji}}{n}$$

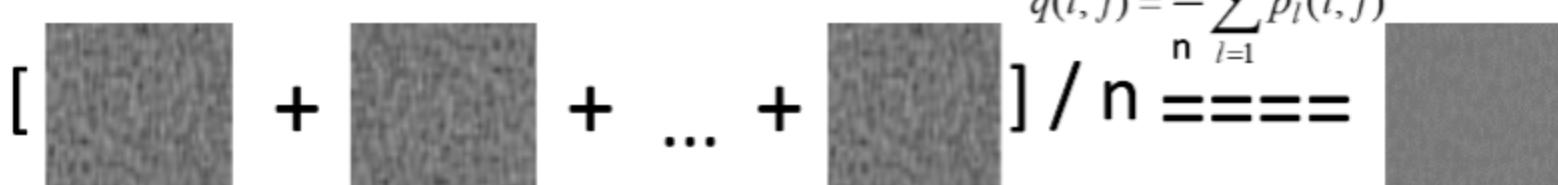
P_{ji} - wartość j-tego piksela obrazu w i -tej chwili czasowej

$P_{jś}$ - wartość średnia j -tego piksela obrazu w n chwilach czasowych

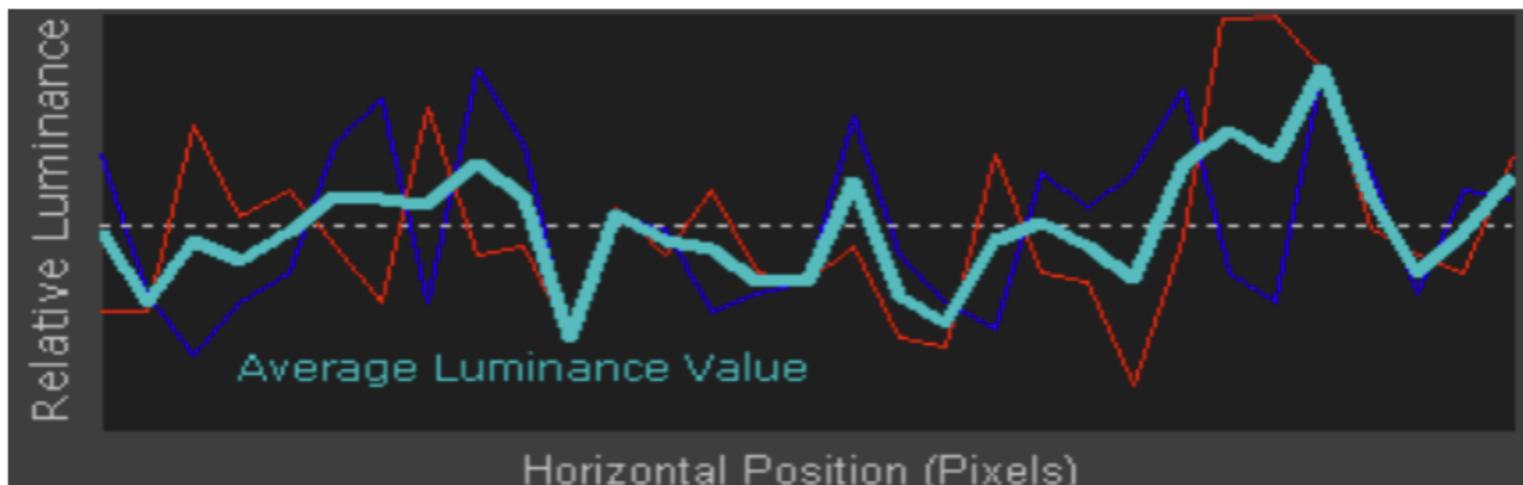
n - liczba pojawiń się obrazu $i = 1, n$

NxN – liczba pikseli w obrazie $j = 1, N \times N$

$$q(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n p_l(i, j)$$

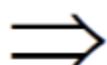


Stosowane do redukcji szumu (obrazy astronomiczne)



Uśrednianie przestrzenne (obrazy statyczne oraz zmienne w czasie)

15	13	15
14	0	15
12	12	14



15	13	15
14	12	15
12	12	14

$$P_{\text{sr}} = \frac{\sum_i^n P_i}{n}$$

$n = 9$ - otoczenie 8-spójne

	13	
14	0	15
	12	

n - liczba pikseli otoczenia
(wraz z pikselem
przetwarzanym)

$n = 5$ - otoczenie 4-spójne

MATERIAŁ DO WYKŁADU I ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH:

R. Tadeusiewicz, P. Korohoda: **Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów**, Kraków 1997. <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty2/0098/>
(także plik ..\POBD\2019-2020\Materialy\TadKoroh.pdf na UBIKu)

Wykład

Materiał podstawowy:

M. Doros, Przetwarzanie obrazów, Skrypt WSISiZ

Ćwiczenia Laboratoryjne

Materiał podstawowy:

M. Doros, A. Korzyńska, M. Przytulska, H. Goszczyńska: „Przetwarzanie Obrazów, ćwiczenia laboratoryjne”, Skrypt WSISiZ

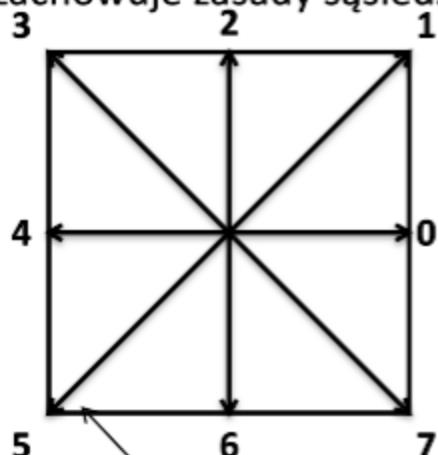
Rzadziej stosowane siatki

- Siatka prostokątna
- Siatka sześciokątna (heksagonalna)
- Siatka trójkątna

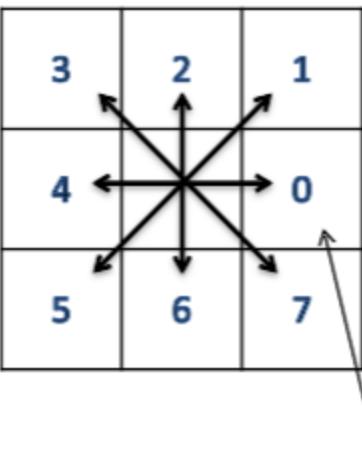
Rodzaje sąsiedztwa: np. 8-spójne, 4-spójne

Dualizm oczko - węzeł (siatka prostokątna)

zachowuje zasady sąsiedztwa np. ośmiospójnego.

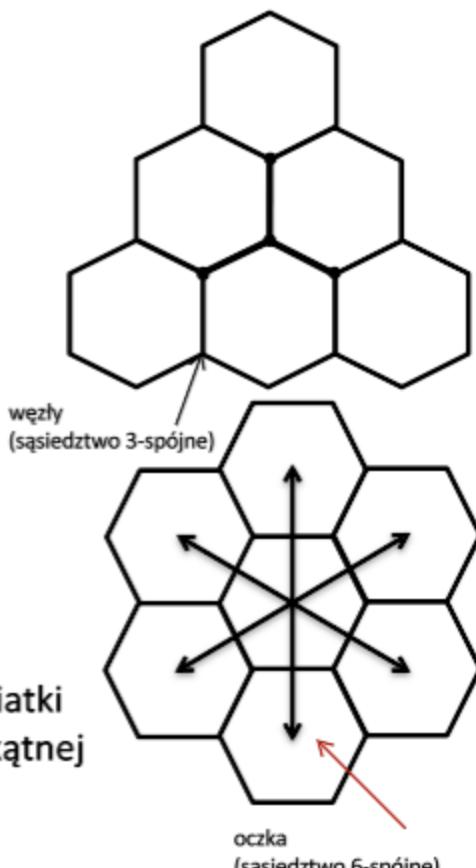


węzły siatki prostokątnej



oczka siatki prostokątnej

Piksel może być skojarzony z węzłem
lub z oczkiem siatki



Sąsiedztwo

- **Siatka dyskretna** (*discrete net*) - wzorzec według którego dokonywana jest *dyskretyzacja przestrzenna* obrazu; linie, oczka, węzły
- **Siatka prostokątna** – najczęściej stosowana: oczko siatki jest kwadratem
- **Piksel** – podstawowy element obrazu; odniesienie do oczka lub węzła siatki

Paradoks spójności

0	1	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

1 - obiekt spójny

2 - tło: spójne(?)
niespójne(?)

Przeciwdziałanie:
przypisanie różnych rodzajów
sąsiedztwa pikselom obiektu i tła