

Ćwiczenie 3

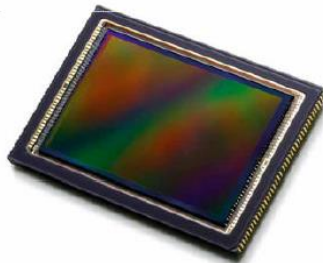
Szumy w fotografii cyfrowej.

Wprowadzenie teoretyczne

Ćwiczenie ma charakter wybitnie eksperymentalny, w związku z tym nie wymaga skomplikowanego przygotowania teoretycznego. Jego celem jest między innymi zaznajomienie studentów z techniką pomiaru, analizy i eliminacji zaszumienia sygnałów z lustrzanek cyfrowych. Umiejętności te są niezbędne w pracy doświadczalnej w laboratorium optycznym i będą konieczne przy realizacji dalszych ćwiczeń

Proces akwizycji i zapisu zdjęcia w lustrzance cyfrowej.

Matryca CCD w aparacie cyfrowym służy do przetwarzania sygnału świetlnego (fotonów) w ładunek elektryczny gromadzony w macierzy kondensatorów, z których jest on następnie odczytywany do postaci analogowego sygnału elektronicznego. W wyniku konwersji analogowo-cyfrowej sygnał jest przetwarzany na ciąg cyfr określających wartość ładunku zgromadzonego w poszczególnych sensorach macierzy, co można liniowo przełożyć na ilość fotonów, które dostały się do danego detektora.



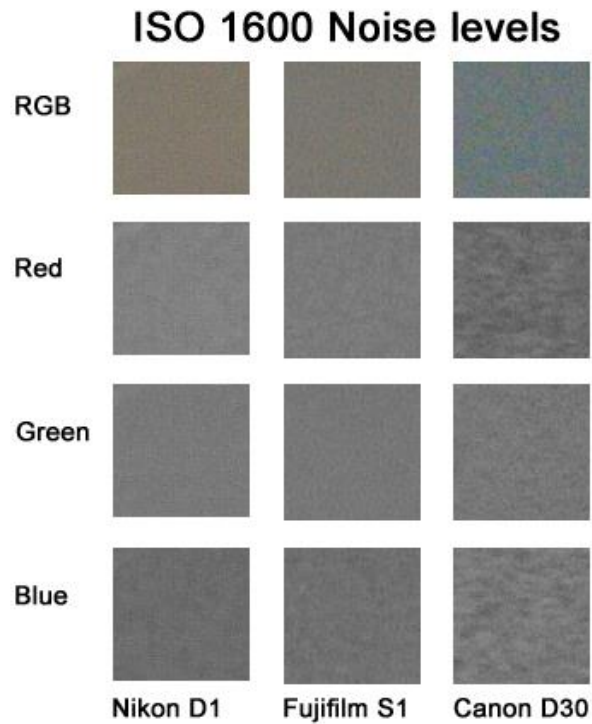
W powyższym procesie istnieje kilka procesów prowadzących do pojawienia się szumów.

Opcjonalna redukcja szumów jest procedurą programową wbudowaną w firmware aparatów cyfrowych, która usuwa część informacji z sygnału ale pozwala uzyskać bardziej wygładzony obraz w typowych sytuacjach fotograficznych. Niemniej w praktyce naukowej i w tym ćwiczeniu należy te funkcje wyłączyć, gdyż zależy nam na zapisie rzeczywistych wartości fizycznych bez ingerencji nie udokumentowanych algorytmów.

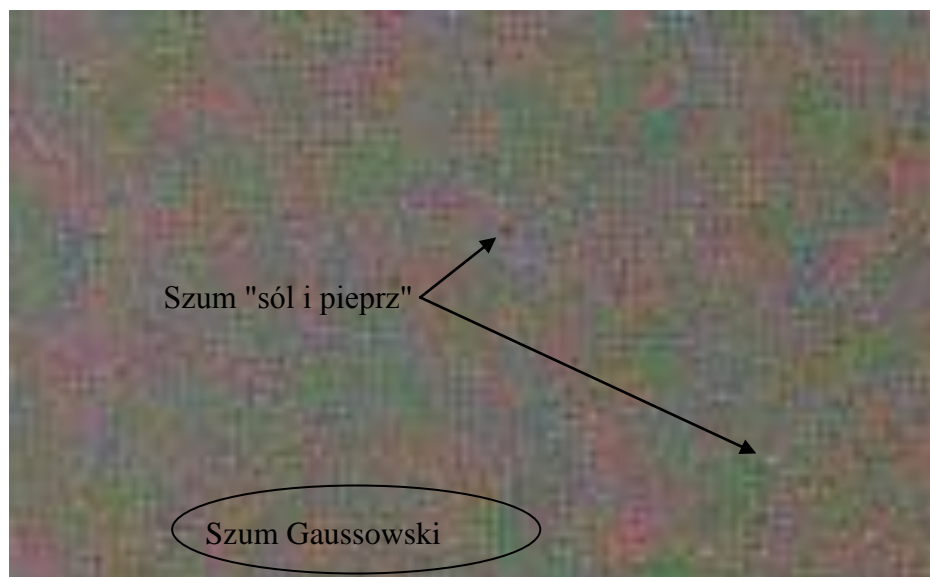
Rodzaje szumów w fotografii cyfrowej.

Wyróżnić można kilka rodzajów szumu w zdjęciu cyfrowym, przy czym zwykle wszystkie one współistnieją w różnych proporcjach. Tutaj zajmiemy się dwoma dominującymi.

a) Szum Gaussowski. Szum związany ze wzmacnianiem sygnału przy zbyt małej ilości światła lub/oraz z temperaturą sensora CMOS/CCD. Ma charakter losowy i w każdej klatce inny rozkład przestrzenny. Nie ma prostej możliwości usunięcia, jedynie można go uśrednić np. filtracją dolnoprzepustową, tracąc część informacji. Drugą możliwością (acz ograniczoną do statycznych ujęć) jest wykonanie serii zdjęć i ich uśrednienie. Szum ten w znacznej mierze zależy on od rozmiaru pojedynczego detektora macierzy oraz zastosowanych udoskonaleń, np. mikro-soczewek. Poniższa ilustracja pokazuje znaczne różnice w zaszumieniu macierzy różnych producentów na wczesnym etapie wprowadzania lustrzanek cyfrowych.



b) Szum typu "sól i pieprz". Wyraźnie widoczne czarne i maksymalnie jasne piksele związane z uszkodzeniami macierzy (gorące/martwe piksele), błędami transmisji, błędami konwersji analogowo-cyfrowej. Ma charakter systematyczny (prawie nie zmieniają się od klatki do klatki), w związku z czym można go eliminować poprzez odejmowanie tzw. ciemnej klatki.



Procedura usuwania szumu systematycznego.

Szum systematyczny ("sól i pieprz"), który zachowuje swój rozkład przestrzenny w różnych ekspozycjach można usunąć poprzez odjęcie od testowej klatki tzw. ciemnej klatki. Jest to zdjęcie wykonane przy nałożonej osłonie obiektywu (tzn. przy całkowicie zamkniętym dopływie światła do obiektywu). Ciemną klatkę należy wykonać dla danego aparatu przy każdej badanej czułości, najlepiej w niedługim czasie po/przed wykonaniem zdjęcia, które będzie korygowane.

Oba zdjęcia należy odjąć w programie GIMP, w którym należy wczytać je jako 2 warstwy, po czym w warstwie wierzchniej należy wybrać tryb "odejmowanie".

Poniższy rysunek przedstawia fragment zdjęcia przed i po odjęciu ciemnej klatki.



Uwaga! Zdjęcia poddawane procedurze odejmowania muszą być spójcjonowane, tzn. w obu musi być wzięty dokładnie taki sam wycinek kadru.

Procedura analizy zaszumienia zdjęcia.

1. Akwizycja obrazu testowego.

Zdjęcie pozwalające na ocenę zaszumienia macierzy CCD/CMOS przy danej czułości musi spełniać szereg warunków.

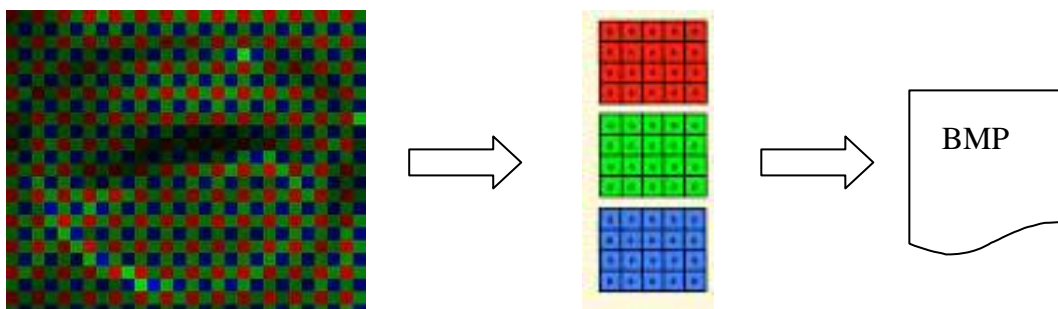
- a. Musi przedstawiać równomiernie oświetlony obszar testowy pokrywający przynajmniej 25% kadru. Analizy statystycznej zaszumienia można dokonać jedynie na równomiernym tle. Zmienne natężenie w obszarze testowym zwiększyłoby wartość odchylenia standardowego jasności punktów obrazu, przez co wartość zaszumienia byłaby sztucznie zawyżona. Poniższe przykładowe zdjęcie zawiera cztery obszary nadające się do analizy szumów ze względu na równomierne natężenie światła.



- b. Jasność obszar testowego musi zawierać się w środkowych przedziałach zakresu dynamiki aparatu (tzw. półtony). Zarówno w skrajnie ciemnych jak i w skrajnie jasnych partiach zdjęcia następuje efekt nasycenia (prześwietlenia) lub niedoświetlenia konkretnych punktów obrazu. Takie wartości wykraczające poza zakres dynamiki aparat obcina do wartości minimalnej (tj. zero) lub maksymalnej. W ten sposób ponownie gubiona jest informacja o rzeczywistej wartości natężenia. Ten negatywny efekt nie występuje w obszarach o średniej jasności. Z tego powodu na powyższym zdjęciu powinien zostać wybrany obszar nr 2.
- c. Zdjęcie musi być wykonane w bezstratnym trybie RAW umożliwiającym określenie jasności wszystkich punktów (pikseli) obrazu. Kompresja JPG z założenia odcina wysokie częstotliwości, przez co stanowi filtr dolnoprzepustowy wygładzający obraz. W ten sposób gubiona jest część informacji krytyczna dla oceny zaszumienia.
- d. Zdjęcie może być rozogniskowane (nieostre) aby wyeliminować wpływ faktury ekranu testowego na pomiar zaszumienia.

2. Konwersja z formatu RAW do BMP.

Plik RAW zawiera surową informację o ilości fotonów zarejestrowanych w konkretnych punktach macierzy światłoczułej. Na podstawie tych danych oraz biorąc pod uwagę kształt i pozycjonowanie pikseli macierzy względem macierzy Bayera (patrz ilustracja poniżej) odpowiednie oprogramowanie może stworzyć wynikowy plik w formacie TIFF lub BMP.



Format pliku BMP zakłada przechowywanie najczęściej 3x8 bitów informacji na jeden piksel (plus 8 bit tzw. kanał alfa - informacja o przezroczystości). Każda składowa barwna (czerwona, zielona, niebieska) zapisywana jest w postaci 8-bitowej liczby o wartościach z przedziału 0-255 (0-czarny, 255-maksymalna jasność). Kombinacja tak wyrażonych trzech składowych barwnych daje reprezentację koloru w trybie *true color* (16,7 miliona unikalnych barw).

W niniejszym ćwiczeniu konwersję RAW->TIFF wykonamy przy użyciu dedykowanego oprogramowania firmy Canon (Digital Photo Professional). Z kolei konwersję TIFF->BMP można wykonać np. programem GIMP lub IrfanView.

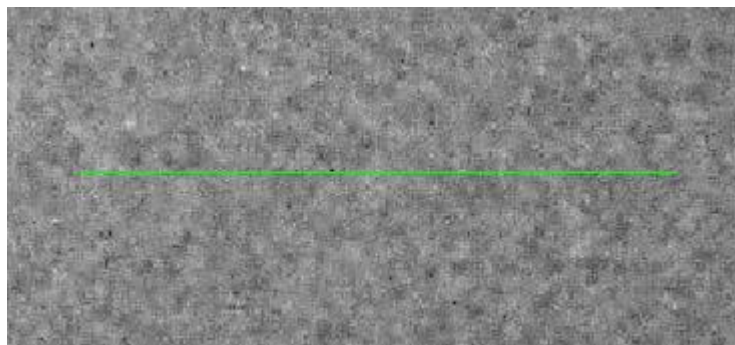
3. Analiza statystyczna zdjęć.

Najczęściej używaną miarą zaszumienia zdjęć cyfrowych jest odchylenie standardowe jasności pikseli w obszarze testowym. Jest to wielkość wyrażona poniższym wzorem i określająca średnie odstępstwo jasności pixeli od globalnej wartości średniej:

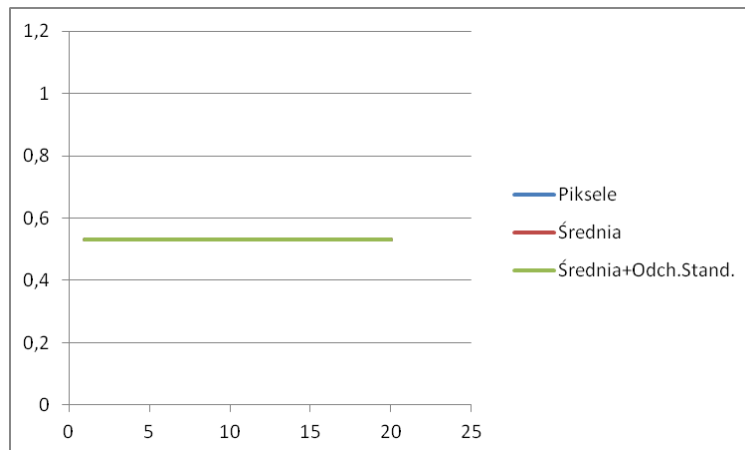
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}},$$

gdzie x to wartości jasności kolejnych pikseli, \bar{x} to średnia jasność w całym obszarze testowym, N to ilość wszystkich zbadanych pikseli w obszarze testowym.

Oznacza to, że w przypadku bardzo zaszumionym jasność przeciętnego piksela będzie mocno odbiegała od wartości średniej (czyli realnej jasności sfotografowanego obszaru testowego). Poniższa ilustracja pokazuje taki przypadek (jasność minimalna=0; maksymalna=1; wartość średnia=0,53; odchylenie standardowe=0,27).



Z drugiej strony w przypadku idealnym (tj. w zdjęciu pozbawionym szumu) w obszarze testowym wszystkie piksele będą miały tę samą jasność a odchylenie standardowe będzie wynosiło 0 (patrz poniższa ilustracja).



W rzeczywistych zdjęciach wartość odchylenia standardowego jest zależna od czułości macierzy (ISO w zakresie od 100 do 64000) oraz od rozmiaru i konstrukcji pikseli.

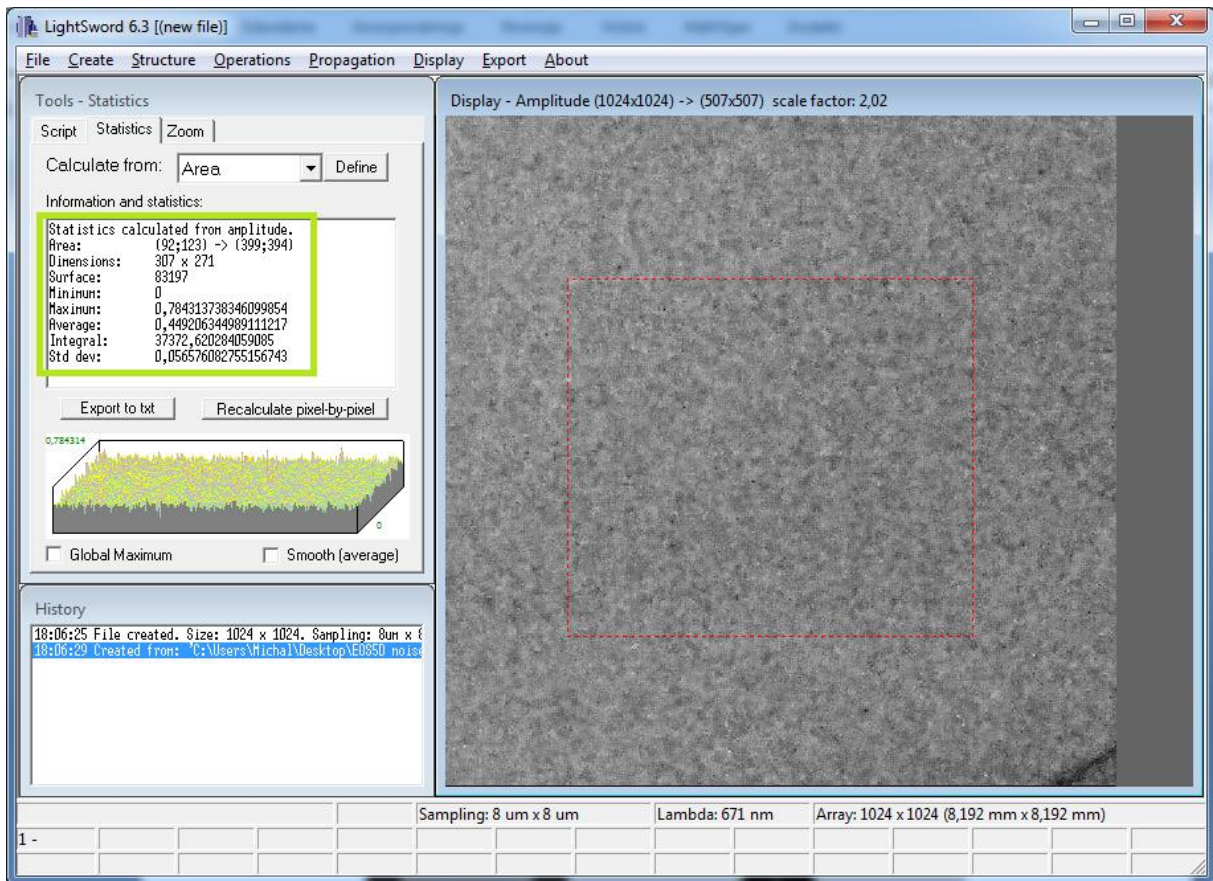
Przeważnie wynosi od 0,02 do 0,06 przy wartości średniej wynoszącej 0,5. Aby uniezależnić wynik od wartości średniej (zależnej od ekspozycji zdjęcia) jako miarę zaszumienia stosuje się iloraz odchylenia standardowego i wartości średniej, który będziemy nazywać poziomem szumu:

$$N = \frac{\sigma}{x}$$

Wyróżnimy tu dwie metody ekstrakcji wartości odchylenia standardowego ze zdjęcia testowego: metoda bezpośredniego liczenia statystyk piksel po pikselu oraz metoda histogramowa.

a) Obliczanie wartości σ w programie LightSword6.

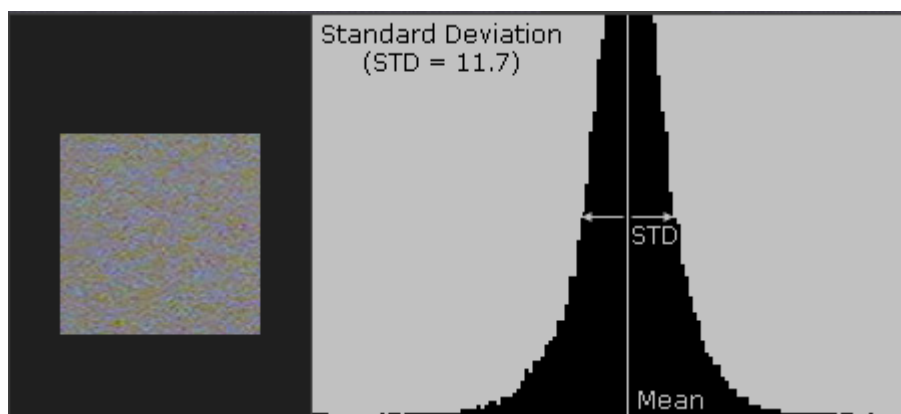
Program LightSword umożliwia import kolorowych plików BMP (z wybranego kanału barwnego) oraz wykonanie na wybranym fragmencie analizy statystycznej. Poniższy zrzut ekranowy pokazuje wykonaną analizę fragmentu zdjęcia (wyniki zaznaczono na zielono).

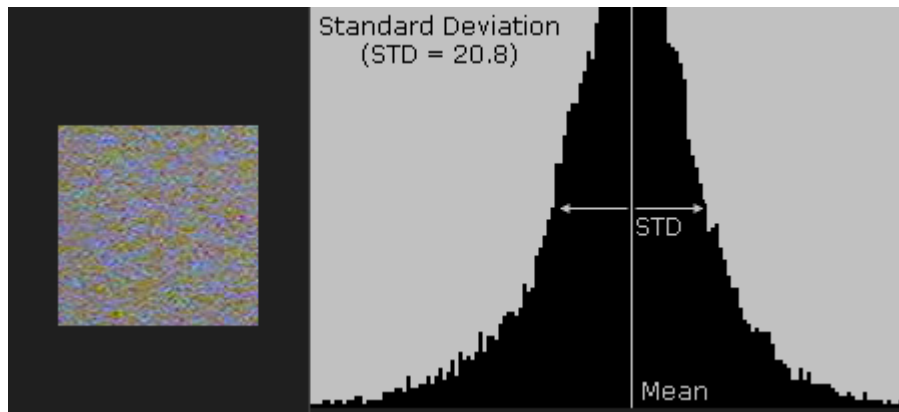


W celu utworzenia nowego pliku roboczego należy wybrać pozycję menu File->New oraz wybrać rozmiar 1024x1024 piksele. Następnie należy zaimportować wybrany plik BMP poprzez menu Create->Import from BMP (zostawiamy wartości domyślne w formularzu importu, wybieramy kanał barwny do importu). Wybieramy tryb wyświetlania w LightSword na "Amplitude" (menu Display->Amplitude). Analizę przeprowadzamy poprzez wybór zakładki *Statistics* po lewej stronie programu (należy myszką zaznaczyć obszar testowy oraz kliknąć "Recalculate pixel by pixel").

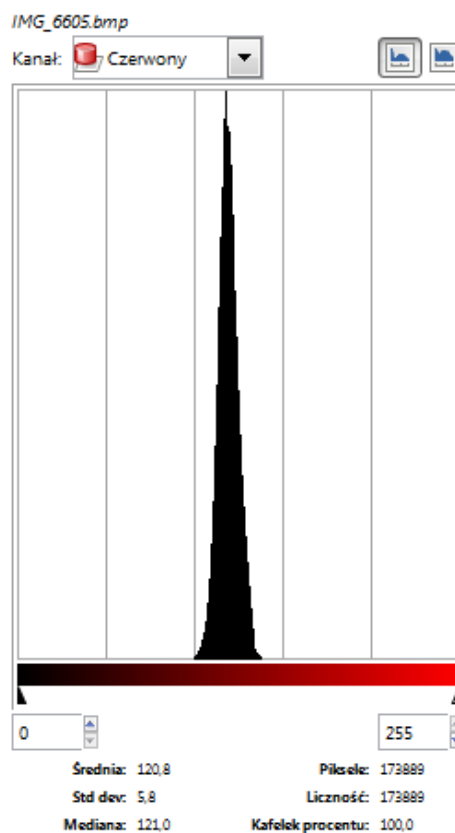
b) Obliczanie wartości σ przez analizę histogramu.

Wartość odchylenia standardowego możemy odczytać bezpośrednio z histogramu jako jego szerokość w połowie wysokości. Poniższa ilustracja pokazuje szerokość histogramu dla mniej i bardziej zaszumionego fragmentu zdjęcia.





Analizę taką warto przeprowadzić w programie GIMP (poniżej zrzut ekranu z wartościami statystycznymi analizy histogramu).



Istotnym ułatwieniem programu jest możliwość analizy dla wybranej składowej barwnej lub dla wszystkich składowych na raz.

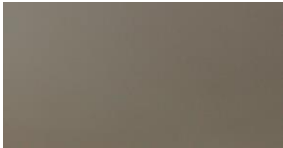
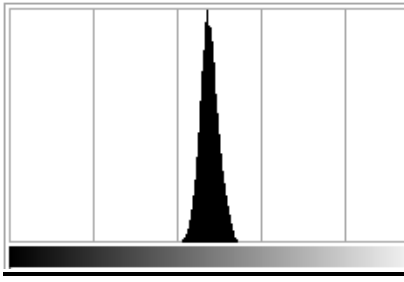
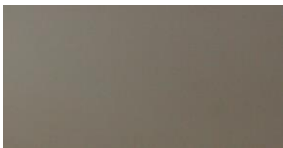
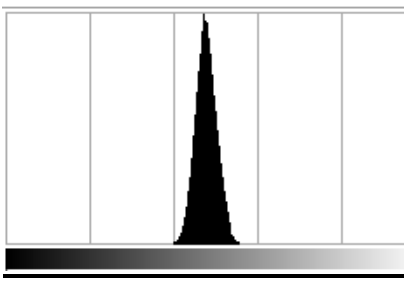
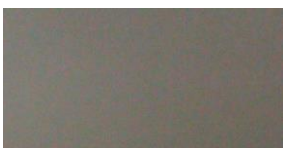
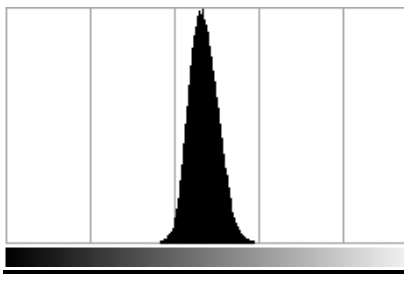

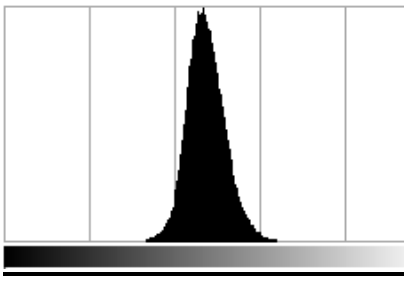
Procedura zdejmowania charakterystyki zaszumienia aparatu

Obserwuje się, że zaszumienie zdjęć rośnie wraz ze wzrostem czułości macierzy (czyli silniejszym wzmocnieniem elektronicznym sygnału) oraz ze spadkiem pola powierzchni czynnej pikseli. Ten drugi czynnik ma szczególne znaczenie w dobie miniaturyzacji, gdyż dalsze zmniejszanie macierzy detektorów powoduje coraz mniejsze prawdopodobieństwo przedostania się fotonu na fotokatodę, co zmniejsza ilość informacji dla przetwornika analogowo-cyfrowego. Z tego samego powodu zielona składowa zdjęcia zawsze jest najmniej zaszumiona: łączna powierzchnia pikseli z filtrem zielonym jest dwukrotnie większa, niż z

filtrem niebieskim i czerwonym (patrz zdjęcie z macierzą Bayera). Przyjmuje się, że ze względu na rozmiar macierzy kompaktowe aparaty cyfrowe generują tyle samo szumu przy ISO100, co lustrzanki przy ISO400. Z kolei lustrzanki pełnoklatkowe mają takie zaszumienie przy ISO3200 jak lustrzanki z sensorem 4/3 przy ISO800.

Aby poznać charakterystykę zaszumienia danego aparatu należy sporządzić wykres poziomu szumu dla tego samego ujęcia testowego w funkcji czułości ISO oraz koloru (R, G, B).

Poniższy rysunek przedstawia przykładowy wykres uzyskany dla lustrzanki Canon EOS 5Dmk2. Widoczne poszerzenie histogramu dla wyższych czułości.

ISO	Zdjęcie	Histogram	Średnia	Odch. stand.	Szum N
100			119	5,3	4,4%
200			121	6,4	5,3%
3200			119	8,8	7,4%
6400			119	11,6	9,7%

Uwaga! Aby poznać rzeczywiste wartości należy bezwzględnie wyłączyć w aparacie wszelkie funkcje wygładzające szumy (ang. *Noise Removal*).

Przebieg ćwiczenia

1. Wykonanie zdjęć testowych i zgranie na komputer stacjonarny.
 - a. Zestawienie ujęcia testowego (ekran szary). Rozogniskowanie obiektywu.
 - b. Wykonanie serii zdjęć dla wszystkich ustawień czułości ISO.
 - c. Wykonanie serii 10 zdjęć przy maksymalnej czułości ISO.
 - d. Wykonanie serii "ciemnych klatek" dla wszystkich ustawień ISO i dla czasów ekspozycji 1/20s, 1s i 20s.
 - e. Powtórzenie punktów b i c dla 2 innych aparatów o innym rozmiarze sensora (Canon EOS 350D, 450D i 500D).
2. Wykonanie analizy statystycznej zaszumienia.
 - a. Pomiar wartości średniej i odchylenia standardowego przy pomocy programu LightSword.
 - b. Pomiar wartości średniej i odchylenia standardowego przy pomocy analizy histogramu.
 - c. Stworzenie arkusza kalkulacyjnego z wartościami statystycznymi (wartość średnia, wartość odchylenia standardowego) osobno dla 3 składowych barwnych i osobno dla obu metod pomiarowych.
 - d. Stworzenie wykresów:
 - i. Poziom szumu w funkcji czułości z rozbiciem na składowe barwne dla każdego aparatu (3 wykresy z 3 krzywymi). Sformułowanie wniosków co do przyczyn rozbieżności pomiędzy kolorami.
 - ii. Porównanie poziomu szumu trzech aparatów w funkcji czułości (1 wykres, 3 krzywe).
 - iii. Poziom szumu dla wybranych 3 czułości (ISO100, ISO800 i ISO1600) w funkcji wielkości sensora macierzy (1 wykres, 3 krzywe).
3. Wykonanie i udokumentowanie procedury usunięcia szumu systematycznego przez subtrakcję (odejmowanie) "ciemnej klatki".
 - a. Dobór odpowiedniej pary zdjęć, ew. kadrowanie.
 - b. Wykonanie odejmowania w GIMP.
 - c. Wskazanie partii zdjęcia, która uległa poprawie oraz takiej, która się nie zmieniła.
 - d. Wykonanie analizy zaszumienia przed i po odejmowaniu.
4. Wykonanie i udokumentowanie procedury uśrednienia szumów losowych (gaussowskich) z serii 10 zdjęć przy dużej czułości (dla wybranego aparatu).
 - a. Uśrednienia należy dokonać w programie GIMP poprzez stworzenie 10 warstw z odpowiednim procentem krycia (1/10, 1/9, 1/8, ... , 1/1; tryb przekrywania warstw "normalny")..
 - b. Wykonanie analizy zaszumienia przed i po uśrednianiu.
 - c. Sformułowanie wniosków co do usunięcia szumu losowego i systematycznego.