

Anna Fabijańska*, Krzysztof Strzecha*, Dominik Sankowski*

Nowe podejście do usuwania szumu na drodze filtracji medianowej

1. Wprowadzenie

W bogatej literaturze przedmiotu zdefiniowana została bardzo duża liczba algorytmów mających na celu poprawę jakości obrazu [1–4, 6]. W większości można zakwalifikować je do jednej z następujących grup [6]:

- przekształcenia punktowe,
- filtracja w dziedzinie przestrzennej (liniowa i nieliniowa),
- przekształcenia widmowe,
- operacje morfologiczne,
- przekształcenia geometryczne.

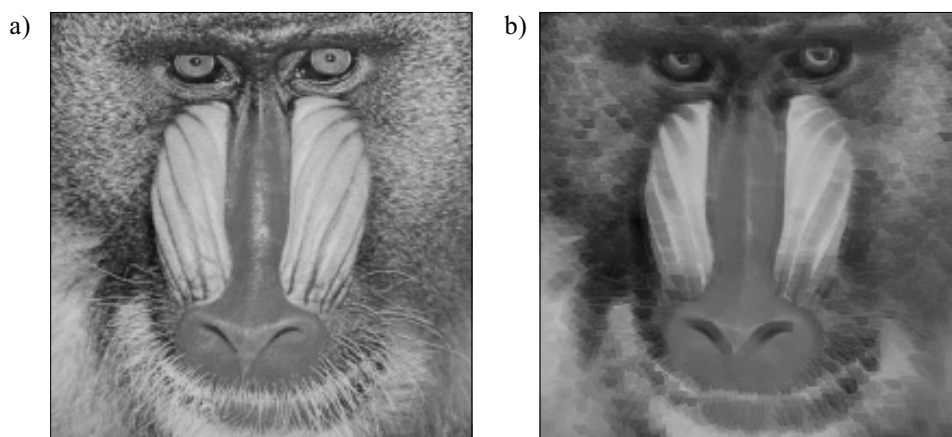
Filtracja w dziedzinie przestrzennej jest operacją kontekstową, tzn. poszczególne punkty obrazu modyfikowane są w zależności od ich otoczenia (kontekstu). Wyróżnia się dwa rodzaje filtracji przestrzennej:

- 1) liniową,
- 2) nieliniową.

W przypadku filtracji liniowej, w celu określenia nowej jasności punktu, obliczany jest splot obrazu z odpowiednio dobraną maską, przemieszczaną obraz kolejno wiersz po wierszu (lub kolumna po kolumnie). W zależności od współczynników maski, filtracja może powodować wyostrenie lub rozmycie obrazu.

Filtry nieliniowe operują również na sąsiedztwie punktu. Mechanizm przesuwania maski po obrazie jest identyczny jak w przypadku filtrów liniowych. Jednak zamiast liczenia splotu, filtry nieliniowe wybierają dla przetwarzanego punktu w obrazie wynikowym jedną z wartości z jego otoczenia w obrazie źródłowym (np. minimum, maksimum, medianę). Wielość otoczenia wyznacza maska. Najpopularniejszym filtrem nieliniowym jest filtr medianowy [1–4, 6]. Jest on powszechnie używany w procesie przetwarzania wstępnego do usuwania szumu. Efektem ubocznym stosowania filtracji medianowej może być utrata ostrości obrazu (rys. 1).

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka w Łodzi



Rys. 1. Obraz oryginalny (a) oraz wynik filtracji medianowej (b)

2. Opis algorytmu

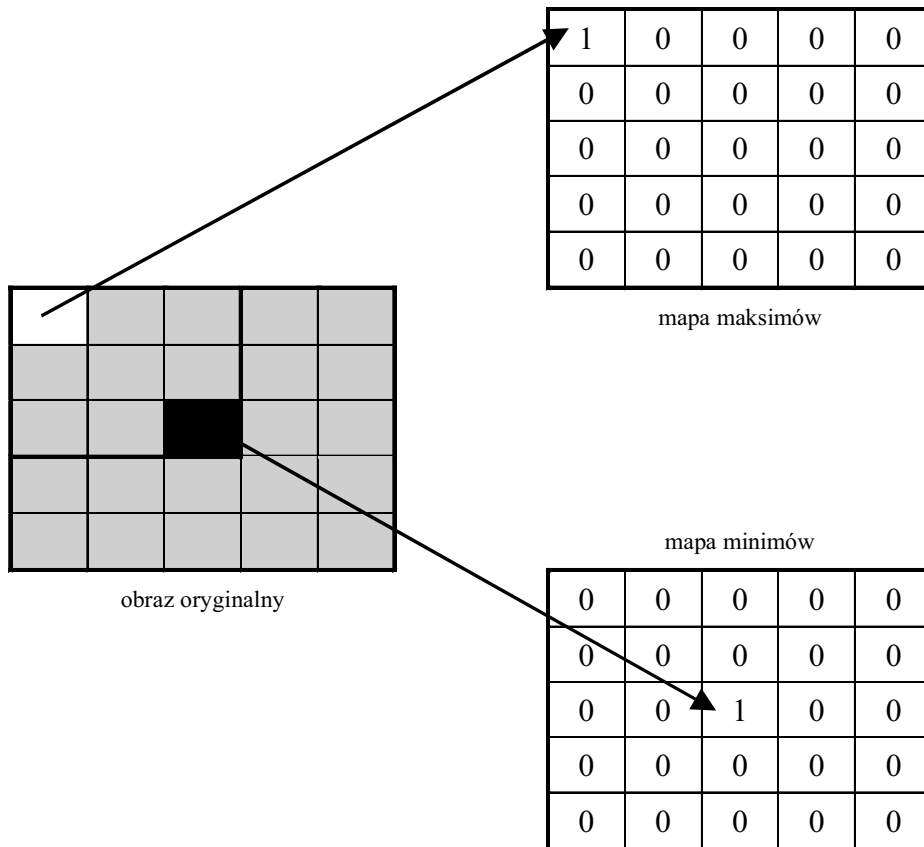
Zaproponowany algorytm usuwania szumu ostrzowego działa w dwóch podstawowych etapach: w pierwszym etapie budowane są mapy lokalnych ekstremów wskazujące na punkty, których jasność powinna zostać zmieniona w drugim etapie działania algorytmu.

Do konstrukcji map lokalnych ekstremów wykorzystany został znany z filtracji mechanizm przemiatania obrazu maską [1–4, 6]. Wśród pikseli pod obszarem maski wyszukiwane są maksymalna oraz minimalna wartość jasności, a ich położenie zaznaczane jest poprzez zwiększenie wartości odpowiadających im punktów na mapach lokalnych ekstremów. Proces konstrukcji map ekstremów z wykorzystaniem maski o rozmiarze 3×3 poglądowo przedstawia rysunek 2.

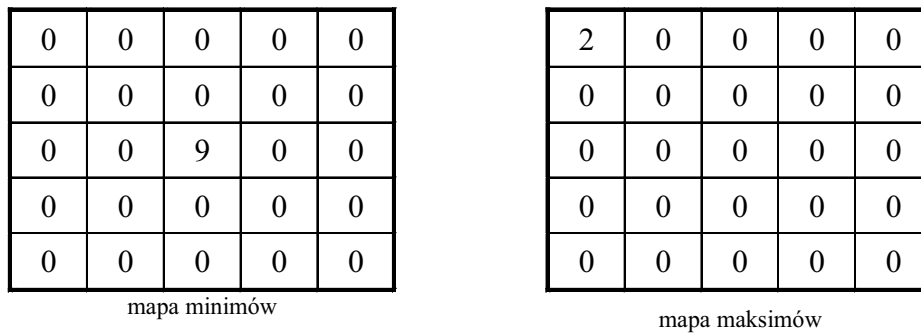
Należy zwrócić uwagę na fakt, że dla maski o rozmiarze $n \times n$ każdy z pikseli sprawdzany jest n^2 razy i w konsekwencji tyle samo razy może okazać się lokalnym ekstremum funkcji jasności. Można więc przyjąć, że wartości na zbudowanych mapach wyznaczają „moc ekstremów”. Im „silniejsze” jest ekstremum, tym jego jasność bardziej odstaje od sąsiadujących z nim pikseli. Kompletne mapy maksimów i minimów dla przykładu z rysunku 2 przedstawiono na rysunku 3.

W kolejnym etapie działania algorytmu, spośród lokalnych ekstremów wybierane są najsilniejsze, tj. takie, którym na mapie odpowiada wartość większa, niż pewien przyjęty próg dyskryminacji. Tym samym wyznaczone są piksele, których jasność powinna zostać skorygowana w ostatnim kroku działania algorytmu. Korekcja ta sprowadza się do zastąpienia ekstremum medianą jasności jego najbliższych sąsiadów (pikseli go otaczających).

Efekt usuwania szumu z wykorzystaniem maski o rozmiarze 3×3 oraz progu dyskryminacji 4 dla przykładowych obrazów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 2. Proces konstrukcji map lokalnych ekstremów.
W przykładzie wykorzystano maskę o rozmiarze 3×3



Rys. 3. Kompletnie mapy ekstremów dla przykładu z rysunku 2



Rys. 4. Wynik usuwania szumu ostrzowego z wykorzystaniem prezentowanego algorytmu.
Obraz przed korekcją (a); wynik usuwania szumu (b)

3. Wpływ parametrów algorytmu na wyniki jego działania

W celu osiągnięcia lepszego wyniku, proces redukcji szumu można powtarzać iteracyjnie. Parametrami algorytmu są więc:

- rozmiar maski;
- próg dyskryminacji (o wartości nie większej niż kwadrat rozmiaru maski);
- liczba iteracji.

W dalszej części artykułu zamieszczono szczegółową analizę wpływu powyższych parametrów na jakość usuwania szumu typu ostrzowego (*salt & pepper*) oraz szumu Gaussa. Ponadto, dokonano również porównania jakości wyników autorskiego algorytmu z popularnymi metodami usuwania szumu.

Do określenia stopnia poprawy jakości obrazu w wyniku zastosowania opisanego algorytmu wykorzystano błąd średniokwadratowy (*Mean Square Error*, MSE) oraz stosunek sygnału do szumu (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) rozumiane w sposób przedstawiony w [5].

3.1. Zależność jakości wyniku od rozmiaru maski i progu dyskryminacji

Wpływ doboru wartości progu dyskryminacji na jakość rekonstrukcji obrazu przedstawiono na rysunkach 5–8. Rysunek 5 przedstawia efekt usuwania szumu ostrzowego, natomiast rysunek 6 szumu Gaussa. Z uwagi na ograniczone możliwości prezentacji (liczba możliwych progów dyskryminacji jest równa kwadratowi rozmiaru maski), ograniczono się jedynie do maski o rozmiarze 3×3 . Zmiany wartości współczynników MSE oraz SNR w zależności od progu dyskryminacji przedstawiono na wykresach z rysunku 7 (szum ostrzowy) oraz rysunku 8 (szum Gaussa). W celu przedstawienia wyników wykorzystano obraz „Lena” celowo zniekształcony szumem. Należy jednak podkreślić, że charakter prezentowanych zależności pozostaje niezmienny niezależnie od obrazu.

Analiza rysunków 5–8 wskazuje, że niezależnie od rodzaju szumu, zastosowanie autorskiego algorytmu powoduje poprawę jakości obrazu. Objawia się to wzrostem stosunku sygnału do szumu (SNR) oraz spadkiem wartości błędu średniokwadratowego (MSE) pomiędzy obrazem oryginalnym a obrazem odtworzonym. Stopień rekonstrukcji obrazu jest jednak lepszy w przypadku szumu ostrzowego. W przypadku szumu Gaussa poprawa jakości obrazu jest również widoczna. Jest ona jednak znacznie mniejsza.







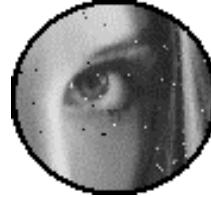





Przy stałej wartości maski, jakość rekonstrukcji obrazu z wykorzystaniem autorskiego algorytmu zależy od wyboru stopnia dyskryminacji.

Badania potwierdziły, że w przypadku szumu ostrzowego znaczna poprawa jakości obrazu następuje niezależnie od doboru stopnia dyskryminacji. Dla maski o rozmiarze 3×3 maksymalny stopień rekonstrukcji obrazu osiąga się dla progu dyskryminacji o wartościach 2–3. W prezentowanym przykładzie (rys. 5, 7) takiemu doborowi parametrów odpowiada prawie pięciokrotna poprawa wartości stosunku sygnału do szumu oraz przeszło dwudziestojednokrotny spadek wartości błędu średniokwadratowego.













Dla obrazów zniekształconych szumem Gaussa najlepszy stopień rekonstrukcji w przypadku maski o rozmiarze 3×3 uzyskiwany jest dla progu dyskryminacji równego 1. W prezentowanym przykładzie (rys. 6, 8) takiemu doborowi parametrów odpowiada ponad dwukrotny spadek wartości współczynnika MSE oraz ponad 40-procentowy wzrost wartości stosunku sygnału do szumu.

Analogiczne wykresy zależności wartości stosunku sygnału do szumu oraz błędu średniokwadratowego od progu determinacji dla maski o rozmiarze 5×5 oraz różnych rodzajów szumu przedstawiają wykresy z rysunków 9–12. Z uwagi na ograniczone możliwości prezentacji, zależności dla masek o większych rozmiarach pominięto.

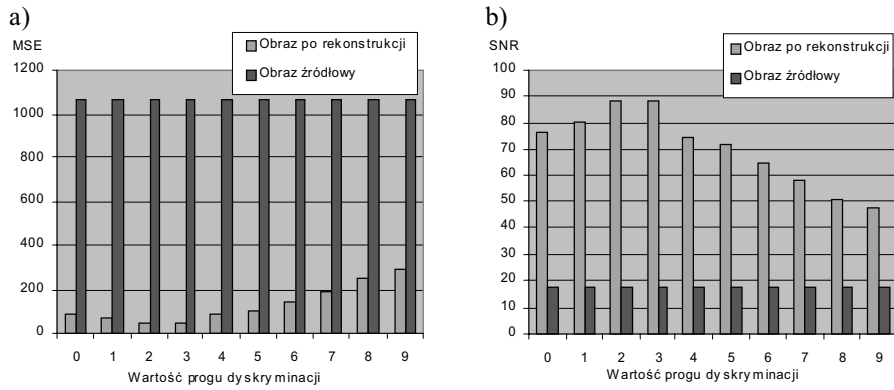
Jak wykazały testy, niezależnie od rodzaju usuwanego szumu, wzrost rozmiaru maski wpływa niekorzystnie na jakość działania algorytmu. Tabele 1 i 2 przedstawiają maksymalne osiągalne wartości współczynników SNR i MSE dla wzrastających rozmiarów maski. Tabela 1 dotyczy szumu ostrzowego, tabela 2 szumu Gaussa. Analogicznie jak poprzednio prezentowane dane uzyskano na podstawie analizy obrazów „Lena” (rys. 5 i 6). Prezentowane zależności mają jednak zbliżony charakter dla szerokiego zakresu testowanych obrazów.

 <p>Obraz oryginalny</p>	 <p>Obraz zaszumiany SNR = 17,64 dB MSE = 1064,68</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 9 SNR = 47,66 dB MSE = 289,00</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 8 SNR = 50,60 dB MSE = 254,38</p>
 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 7 SNR = 57,65 dB MSE = 187,25</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 6 SNR = 64,01 dB MSE = 142,07</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 5 SNR = 71,97 dB MSE = 100,57</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 74,69 dB MSE = 89,43</p>
 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 3 SNR = 88,27 dB MSE = 49,54</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 2 SNR = 88,38 dB MSE = 49,31</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 1 SNR = 80,38 dB MSE = 69,79</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 0 SNR = 76,44 dB MSE = 82,80</p>

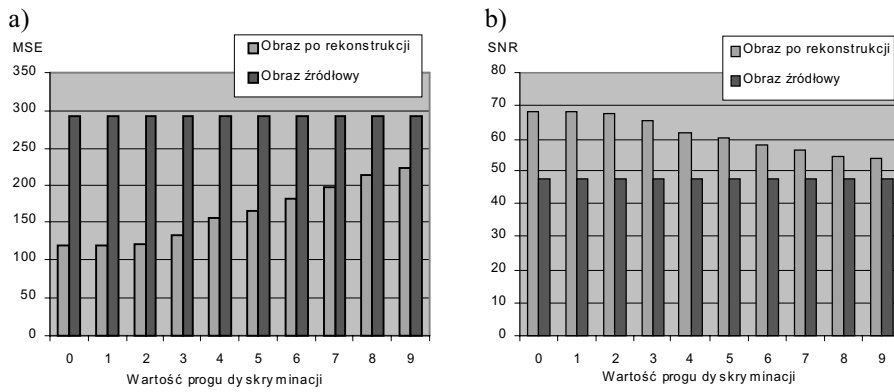
Rys. 5. Wpływ wartości progu dyskryminacji na jakość usuwania szumu ostrzowego

 <p>Obraz oryginalny</p>	 <p>Obraz zaszumiony SNR = 47,32 dB MSE = 293,29</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 9 SNR = 53.76 dB MSE = 221.82</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 8 SNR = 54.63 dB MSE = 213.50</p>
 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 7 SNR = 56.50 dB MSE = 196.93</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 6 SNR = 58.43 dB MSE = 181.06</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 5 SNR = 60.45 dB MSE = 165.80</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 62.07 dB MSE = 154.56</p>
 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 3 SNR = 65.43 dB MSE = 133.60</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 2 SNR = 67.78 dB MSE = 120.63</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 1 SNR = 68.21 dB MSE = 118.41</p>	 <p>Redukcja szumu Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 0 SNR = 67.89 dB MSE = 120.04</p>

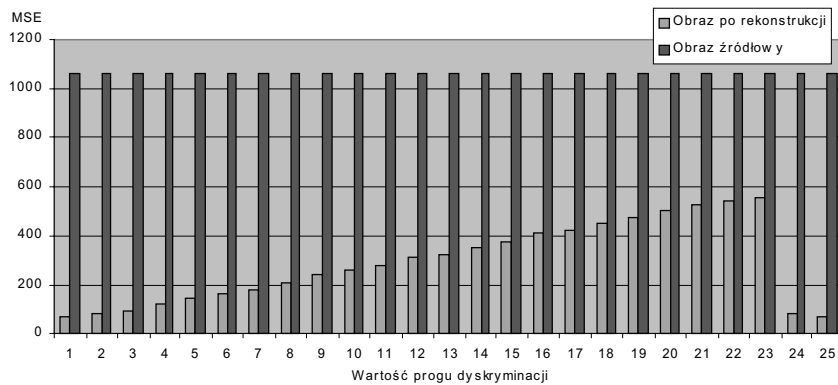
Rys. 6. Wpływ wartości progu dyskryminacji na jakość usuwania szumu Gaussa



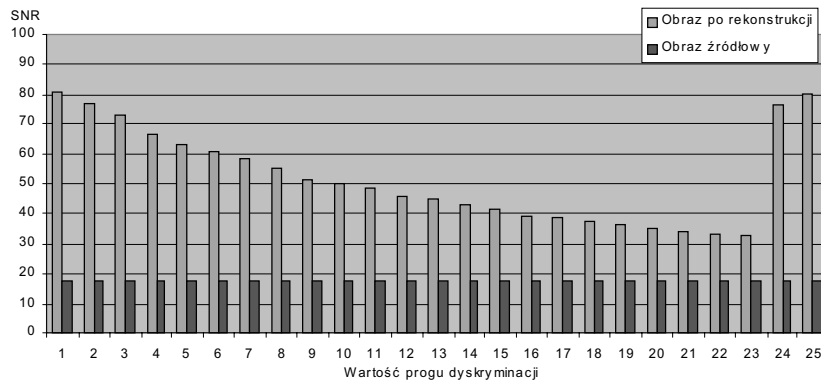
Rys. 7. Zmiana wartości współczynników MSE (a) oraz SNR (b) w zależności od wartości progu dyskryminacji dla maski 3×3 . Typ szumu: ostrzowy



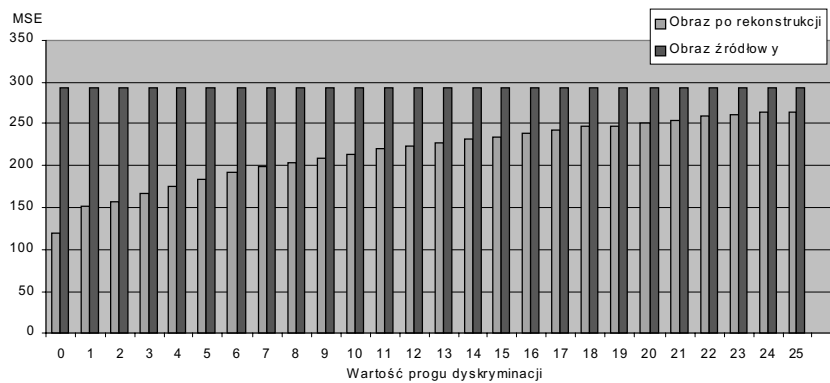
Rys. 8. Zmiana wartości współczynników MSE (a) oraz SNR (b) w zależności od wartości progu dyskryminacji dla maski 3×3 . Typ szumu: Gaussa



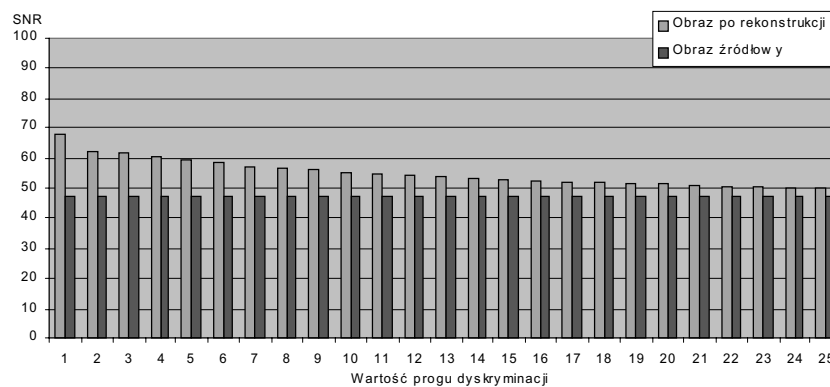
Rys. 9. Zmiana MSE w funkcji wartości progu dyskryminacji dla maski 5×5 . Typ szumu: ostrzowy



Rys. 10. Zmiana SNR w funkcji wartości progu dyskryminacji dla maski 5×5.
Typ szumu: ostrzowy



Rys. 11. Zmiana MSE w funkcji wartości progu dyskryminacji dla maski 5×5.
Typ szumu: Gaussa



Rys. 12. Zmiana SNR w funkcji wartości progu dyskryminacji dla maski 5×5.
Typ szumu: Gaussa

Tabela 1

Maksymalne osiągalne wartości współczynników MSE oraz SNR w zależności od rozmiaru maski dla obrazu oryginalnego o parametrach SNR = 17,64 dB oraz MSE = 1064,68 (szum ostrzowy)

Rozmiar maski	Próg dyskryminacji	SNR dB	MSE
3×3	2	88,38	49,31
5×5	1	80,74	68,72
7×7	37	74,53	89,99
9×9	1	60,47	165,69

Tabela 2









Maksymalne osiągalne wartości współczynników MSE oraz SNR w zależności od rozmiaru maski dla obrazu oryginalnego o parametrach SNR = 47,32 dB oraz MSE = 293,29 (szum Gaussa)

Rozmiar maski	Próg dyskryminacji	SNR dB	MSE
3×3	1	68,21	118,41
5×5	0	67,89	120,04
7×7	0	67,89	120,04
9×9	0	67,89	120,04

Z danych zawartych w tabelach 1 i 2 wyraźnie wynika, że wzrost rozmiaru maski w znacznym stopniu pogarsza działanie algorytmu. W przypadku szumu Gaussa pogorszenie to oznacza głównie zwiększenie czasu wykonania algorytmu, gdyż dla masek większych niż 3×3 najlepszy osiągalny efekt pozostaje stały. W przypadku szumu ostrzowego zwiększenie rozmiaru maski dodatkowo powoduje spadek maksymalnych osiągalnych wartości współczynników SNR oraz MSE. Dlatego też, niezależnie od rodzaju usuwanego szumu algorytm daje najlepsze efekty dla maski o rozmiarze 3×3.

3.2. Wpływ liczby iteracji na jakość wyników









Prezentowany algorytm można stosować iteracyjnie, w kolejnych iteracjach powtarzając konstrukcję map lokalnych ekstremów oraz proces korekcji jasności wskazanych przez mapy pikseli. Rysunki 13 i 14 prezentują wpływ liczby iteracji na jakość rekonstrukcji obrazu odpowiednio dla szumu ostrzowego oraz szumu Gaussa. W prezentowanym przykładzie w kolejnych iteracjach wykorzystano maski o rozmiarze 3×3 oraz wartość progu dyskryminacji równą 4.

 <p>Obraz zaszumiany SNR = 17,64 MSE = 1064,68</p>	 <p>Redukcja szumu Iteracja 1 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 74.67 dB MSE = 89.44</p>	 <p>Redukcja szumu Iteracja 2 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 96.38 dB MSE = 34.83</p>	 <p>Redukcja szumu Iteracja 3 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 95.08 dB MSE = 36.85</p>
 <p>Redukcja szumu Iteracja 4 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 92.66 dB MSE = 40.95</p>	 <p>Redukcja szumu Iteracja 5 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 90.60 dB MSE = 44.77</p>	 <p>Redukcja szumu Iteracja 6 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 89.01 dB MSE = 47.98</p>	 <p>Redukcja szumu Iteracja 7 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 87.65 dB MSE = 50.90</p>

Rys. 13. Wpływ liczby iteracji oraz wartości progowej na jakość rekonstrukcji obrazu dla maski o rozmiarze 3×3 (szum ostrzowy)

Wpływ progu na jakość iteracyjnej rekonstrukcji z wykorzystaniem maski o rozmiarze 3×3 (wyrażonej wartością współczynnika SNR) dla szumu ostrzowego oraz szumu Gaussa przedstawiają wykresy odpowiednio z rysunków 15 i 16. Z uwagi na ograniczone możliwości prezentacji, zrezygnowano z przedstawienia wpływu ilości iteracji na efektywność usuwania szumu dla większych rozmiarów masek.

Charakter zależności stopnia redukcji szumu od liczby iteracji dla dużych masek jest zbliżony do zaprezentowanych. Należy jednak podkreślić, że podobnie jak w przypadku pojedynczej iteracji, możliwy do osiągnięcia stopień redukcji szumu spada wraz ze wzrostem rozmiaru maski.

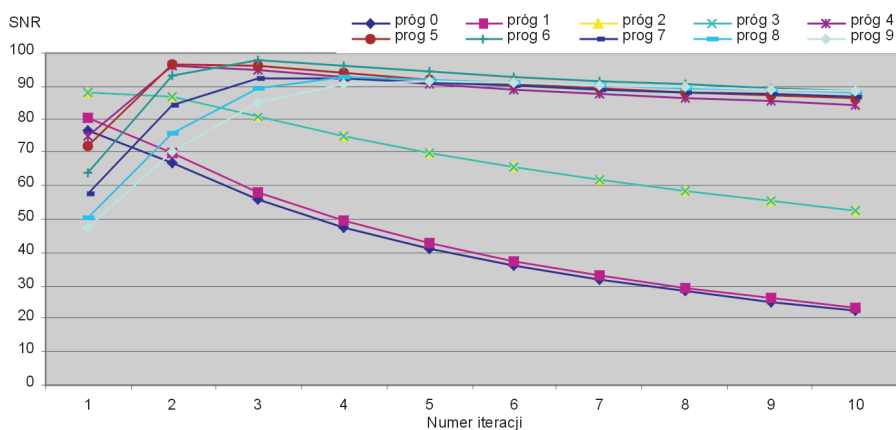
			
Obraz zaszumiany SNR = 47,32 MSE = 293,29	Redukcja szumu Iteracja 1 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 62,07 dB MSE = 154,56	Redukcja szumu Iteracja 2 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 70,30 dB MSE = 108,16	Redukcja szumu Iteracja 3 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 73,40 dB MSE = 94,50
			
Redukcja szumu Iteracja 4 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 73,86 dB MSE = 92,63	Redukcja szumu Iteracja 5 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 73,36 dB MSE = 94,67	Redukcja szumu Iteracja 6 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 72,71 dB MSE = 97,36	Redukcja szumu Iteracja 7 Maska: 3x3 Próg dyskryminacji: 4 SNR = 72,06 dB MSE = 100,17

Rys. 14. Wpływ ilości iteracji oraz wartości progowej na jakość rekonstrukcji obrazu dla maski o rozmiarze 3×3 (szum Gaussa)

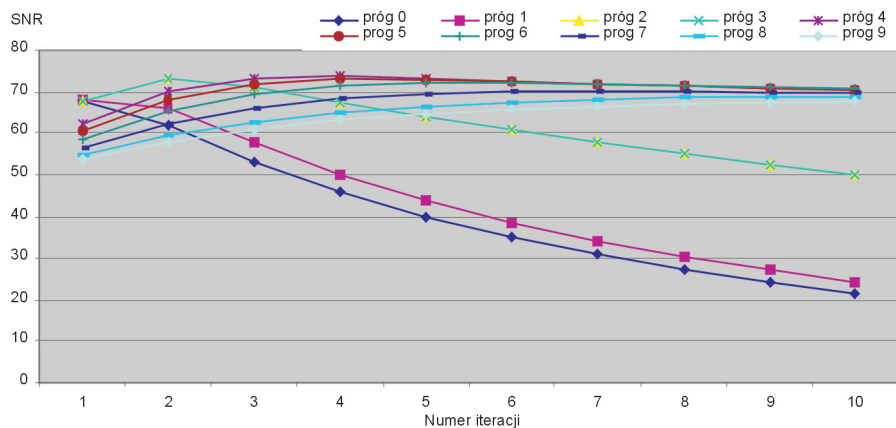
Analiza rysunków 13 i 14 wskazuje, że liczba iteracji wpływa na stopień redukcji szumu, a w konsekwencji na jakość rekonstrukcji obrazu. Wpływ ten jest widoczny zarówno w przypadku szumu ostrzowego jak również szumu Gaussa.

W przypadku odpowiednio dobranych parametrów (rozmiar maski, próg dyskryminacji) iteracyjne wykonanie algorytmu poprawia jakość obrazu. Poprawa ta objawia się wzrostem stosunku sygnału do szumu oraz zmniejszeniem wartości błędu średniokwadratowego. Taki właśnie efekt widoczny jest na rysunkach 13 i 14.

Analiza krzywych z rysunków 15 i 16 wskazuje jednak, że wzrost jakości rekonstrukcji obrazu (objawiający się wzrostem współczynnika SNR) następuje jedynie dla stosunkowo dużych wartości progu dyskryminacji (w prezentowanym przykładzie dla obu rodzajów badanych szumów dla wartości progu większej niż rozmiar maski). Ponadto, jak wykazały testy algorytmu, optymalna liczba iteracji zawiera się w przedziale 2–4. Powyżej tej wartości następuje stopniowe pogarszanie się jakości rekonstrukcji obrazu w wyniku zmniejszenia ostrości i utraty szczegółów.



Rys. 15. Wpływ liczby iteracji oraz wartości progowej na jakość rekonstrukcji obrazu dla maski o rozmiarze 3×3 (szum ostrzowy)













Rys. 16. Wpływ liczby iteracji oraz wartości progowej na jakość rekonstrukcji obrazu dla maski o rozmiarze 3×3 (szum Gaussa)

4. Porównanie wyników działania algorytmu ze znanymi metodami usuwania szumu

Porównanie wyników działania zaproponowanego algorytmu usuwania szumu z wynikami działania popularnych algorytmów przedstawione zostało na rysunku 17.

Do porównania wybrane zostały najlepsze osiągnięte wyniki (dla szumu ostrzowego: maska 3×3 , próg dyskryminacji 4, liczba iteracji 2, dla szumu Gaussa: maska 3×3 , próg dyskryminacji 4, liczba iteracji 4). Podobnie jak wcześniej, w celu prezentacji wyników wykorzystano zniekształcony szumem obraz „Lena”. Prezentowane wyniki odzwierciedlają jednak charakter zależności uzyskiwanych dla różnych klas obrazów.

	Szum ostrzowy	Szum Gaussa
Obraz zaszumiony	 SNR = 17,64 dB MSE = 1064,68	 SNR = 47,32 dB MSE = 293,29
Algorytm własny	 SNR = 96,38 dB MSE = 34,83	 SNR = 73,86 dB MSE = 92,63
Filtr medianowy (3x3)	 SNR=82.12 dB MSE =64.50	 SNR=72.05 dB MSE =100.20
Filtr uśredniający (3x3)	 SNR=68.36 dB MSE =117.64	 SNR=61.28 dB MSE =159.94
Filtr Gaussa (3x3)	 SNR=64.83 dB MSE =137.12	 SNR=71.59 dB MSE =102.22

Rys. 17. Porównanie autorskiego algorytmu z popularnymi metodami usuwania szumu

Rysunek 17 wyraźnie pokazuje, że wyniki usuwania testowanych rodzajów szumów są najlepsze w przypadku wykorzystania autorskiego algorytmu. Subiektywne wrażenia wizualne dodatkowo potwierdzają wartości współczynników SNR oraz MSE lepsze, niż te uzyskiwane w przypadku standardowych metod usuwania szumu.

5. Wnioski

Zaprezentowany autorski algorytm usuwania szumu ostrzowego oparty na filtracji medianowej pozwala uzyskać zdecydowanie lepsze wyniki rekonstrukcji obrazu w porównaniu z powszechnie stosowanymi algorytmami filtracji liniowej i nieliniowej (włącznie z filtrem medianowym). Przeprowadzone testy algorytmu wykazały także jego dużą skuteczność w usuwaniu szumu o rozkładzie Gaussa. Świadczą o tym uzyskane wartości obiektywnych miar jakości rekonstrukcji obrazu jak i ocena subiektywna.

Przedstawiony algorytm z powodzeniem może być stosowany w systemach wizyjnych wymagających wysokiej precyzji przetwarzania, szczególnie w aplikacjach ilościowej analizy obrazów (np. systemy pomiarowe). Pewnym ograniczeniem zakresu jego zastosowań jest dość wysoki koszt obliczeniowy, mogący powodować pewne trudności z implementacją algorytmu w systemach pracujących w czasie rzeczywistym

Literatura

- [1] Gonzalez R.C., Woods R.E.: *Digital Image Processing*. New Jersey, Prentice Hall 2007
- [2] Pitas I.: *Digital image processing algorithms*. London, Prentice Hall 1993
- [3] Pratt W.K.: *Digital Image Processing*. Los Altos, John Wiley & Sons 2007
- [4] Rosenfeld A., Kak A.C.: *Digital Picture Processing*. New York, Academic Press 1982
- [5] Skarbek W.: *Metody reprezentacji obrazów cyfrowych*. Warszawa, PLJ 1993
- [5] Tadeusiewicz R., Korohoda P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Kraków, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji 1997