

WYKORZYSTANIE ANALIZY FALKOWEJ W PROCESIE FILTRACJI OBRAZÓW CYFROWYCH

***Streszczenie.** Referat przedstawia podstawy teoretyczne i możliwości wykorzystania analizy falkowej we współczesnej fotogrametrii cyfrowej. Wykorzystując analizę falkową i jej właściwości możemy przefiltrować obrazy cyfrowe w sposób efektywniejszy niż przy klasycznym podejściu. W opracowaniach, w których materiał wyjściowy (zdjęcia lotnicze) są obarczone szumem lub nie nadają się do wykorzystania w procesie cyfrowej korelacji obrazów analiza falkowa może przynieść rozwiązanie problemów. W artykule omówiono zagadnienie usuwania szumów oraz „wydobycia” krawędzi z reprezentacji cyfrowej obrazu.*

1. Wstęp

Analiza falkowa (wavelet analysis) jest młodą dziedziną nauki, która rozwinęła się w ostatnich 20 latach. Jej możliwości nie zostały jeszcze w pełni wykorzystane w fotogrametrii cyfrowej. Dotychczas znana jest środowisku fotogrametrycznemu tylko z wykorzystania jej przy kompresji obrazu. A przecież analiza falkowa może być wykorzystana do wyszukiwania punktów homologicznych na zdjęciu czy zastosowana, w procesie filtracji zdjęć lotniczych i satelitarnych.

We współczesnej fotogrametrii cyfrowej dużą rolę odgrywa proces korelacji obrazów, który jest wykorzystywany w podstawowych czynnościach na fotogrametrycznej stacji cyfrowej. Jeśli dostarczamy do obróbki potocznie mówiąc zdjęcia „słabe”, to proces korelacji obrazów wykorzystywany w automatycznej aerotriangulacji czy też w generowaniu Numerycznego Modelu Terenu, będzie przeprowadzony na niskim stopniu ufności lub wygeneruje błędne wyniki. W zależności od sposobu przetwarzania zdjęć lotniczych (rodzaju korelacji obrazów) można wyróżnić dwa sposoby wykorzystania falek w procesie filtracji. Pierwszy z nich to detekcja krawędzi występujących w strukturze obrazu, drugi to możliwość usuwania szumów z obrazów cyfrowych.

Analiza falkowa wykorzystuje funkcje aproksymujące, które są zlokalizowane w dziedzinie czasu (położenia) i częstotliwości. Falki są to funkcje, które pozwalają podzielić dane wejściowe na składniki różnej częstotliwości i przeanalizować każdy element z dokładnością odpowiadającą skali próbki. W praktyce celem analizy falkowej jest znalezienie falki macierzystej i sposobu ich uzyskania za pomocą metod numerycznych. Każde zadanie wykorzystujące szybką transformację Fouriera (FFT) może zostać sformułowane za pomocą falek, dając przy tym więcej informacji przestrzennej o miejscu położenia jak i częstotliwościowej.

2. Wykorzystanie analizy falkowej do wykrywania krawędzi

Wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z metodą Feature Based Matching cyfrowej korelacji obrazów, możemy uzyskać większy poziom ufności i mniejsze błędy wynikające z niedokładności korelacji wykorzystując analizę falkową. Poprzez wzmocnienie detekcji grupy pikseli charakteryzujących się dużą zmiennością gęstości optycznej, w porównaniu do pikseli sąsiednich, przy pomocy dodania do obrazu oryginalnego, obrazu z wykrytymi krawędziami. Wykryte krawędzie będą jako maksima modułów połączone na płaszczyźnie położenie-skala.

Dowolny punkt (u_0, s_0) taki, że $|Wf(u, s)|$ osiąga lokalną wartość maksymalną dla $u=u_0$, w tym punkcie będzie maksimum modułu:

$$\left. \frac{\partial Wf(u, s_0)}{\partial u} \right|_{u=u_0} = 0$$

Biorąc pod uwagę, że falka ψ ma dokładnie n zerowych momentów i zwarty nośnik, istnieje funkcja $\theta(x)$ o zwartym nośniku, taka że $\psi = (-1)^n \theta^n$, przy czym

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x) dx \neq 0$$

Więc transformata falkowa wygląda tak:

$$Wf(u, s) = s^n \frac{d^n}{du^n} (f * \bar{\theta}_s)(u)$$

a mając tylko jeden moment zerowy maksima modułu falki są maksimami pierwszej pochodnej funkcji f wygładzonej przez funkcję $\bar{\theta}_s$ będącą odpowiedzią impulsową filtru dolnoprzepustowego.

Więc jeśli istnieje ciąg punktów (u_n, s_n) , odpowiadających maksimum $|Wf(u, s)|$, zbieżny do γ dla małych skal to znaczy:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n = \gamma \quad \text{oraz} \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} s_n = 0$$

Możemy wykryć wszystkie osobliwości, posuwając się wzdłuż wszystkich linii maksimów w płaszczyźnie położenie-skala w kierunku malejącej skali.

Zgodnie z definicją krawędzi, amplituda pochodnych cząstkowych f osiąga lokalne maksimum w punkcie (x_0, y_0) ; zatem możemy stwierdzić, że punkty tworzące krawędź są punktami przegięcia funkcji f .

Definiując dwie falki jako pochodne cząstkowe θ :

$$\psi^1 = -\frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \text{i} \quad \psi^2 = -\frac{\partial \theta}{\partial y}$$

i ograniczając liczbę obliczeń i pamięć potrzebną do przechowywania wyników obliczeń, ograniczamy zmienność skali do elementów zbioru diadycznego $\{2^j\}_{j \in \mathbb{Z}}$.

Po przekształceniach możemy otrzymać moduł wektora gradientu, który jest proporcjonalny do modułu transformaty falkowej:

$$Mf(u, v, 2^j) = \sqrt{|W^1 f(u, v, 2^j)|^2 + |W^2 f(u, v, 2^j)|^2},$$

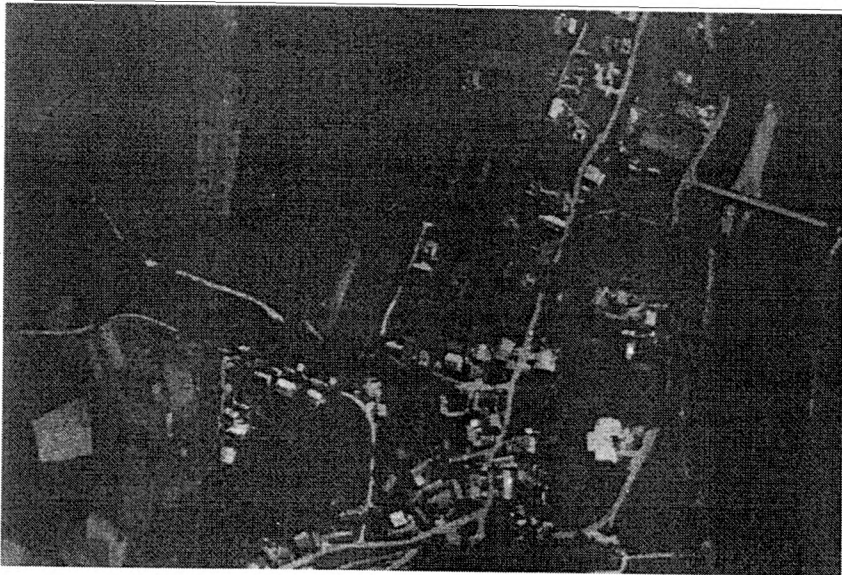
jak również wyznaczyć kąt wektora gradientu, który jest równy kątowi $Af(u, v, 2^j)$ wektora transformaty falkowej w płaszczyźnie (x, y) :

$$\alpha = \arctan \frac{W^2 f(u, v, 2^j)}{W^1 f(u, v, 2^j)}.$$

Krawędzie są zbiorami punktów (u_0, v_0) , w których $MF(u, v, 2^j)$ przyjmuje lokalną wartość maksymalną w jednowymiarowym otoczeniu punktu, w kierunku wyznaczonym przez kąt $AF(u_0, v_0, 2^j)$. Punkty te są lokalnymi maksimumami modułu transformaty falkowej i w płaszczyźnie obrazu układają się wzdłuż krzywych wyznaczających kontury struktur obrazu. W celu otrzymania krawędzi łączymy poszczególne maksima modułu transformaty falkowej.

Wykorzystując powyższy algorytm analizy falkowej otrzymujemy obraz zawierający wyłącznie krawędzie obiektów. Poprzez algebraiczne dodanie otrzymanego obrazu z krawędziami do obrazu oryginalnego uzyskujemy obraz, w którym elementy wykorzystywane w procesie korelacji obrazu metodą Feature Based Matching są znacznie wzmocnione. Wskutek tego wzmocnienia, błędy procesów wykorzystujących cyfrową korelację obrazów (FBM) będą znacząco mniejsze.

Poniżej przedstawiony jest fragment zdjęcia wykorzystanego jako materiał testowy oraz obraz z „wydobytymi” krawędziami przy pomocy analizy falkowej.

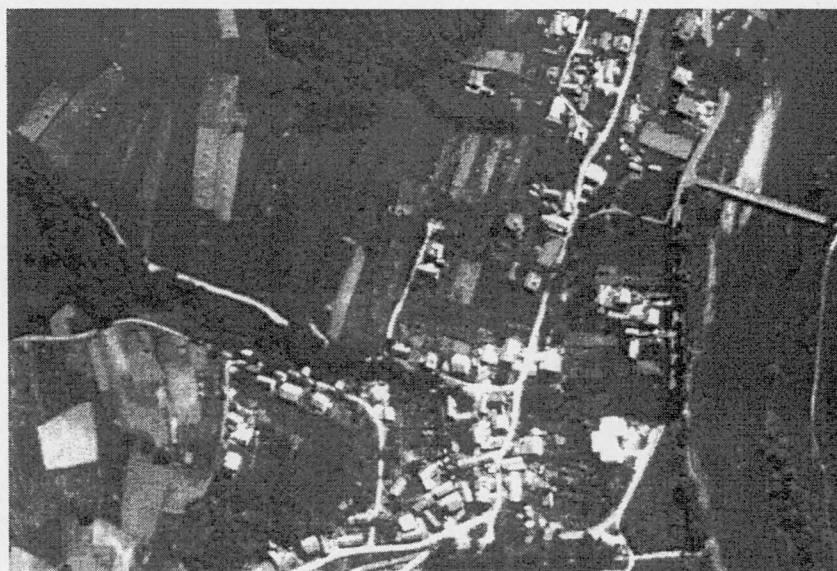


Rys.1. Fragment zdjęcia lotniczego oryginalnego.



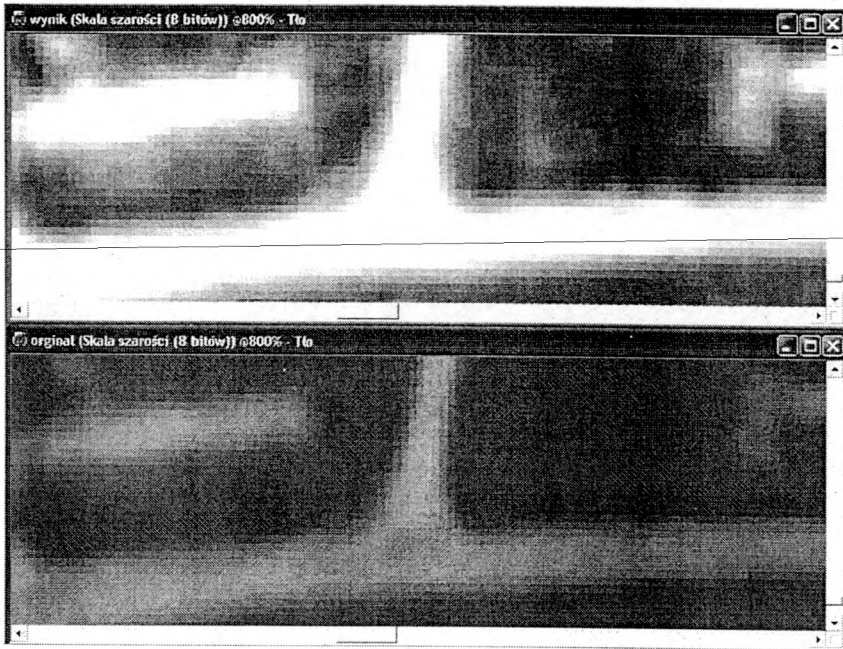
Rys.2 Krawędzie „wydobyte” ze zdjęcia.

Przedstawiony poniżej fragment zdjęcia jest wynikiem dodania dwóch powyżej prezentowanych obrazów. Bezpośrednia ocena jakości obrazu jest już korzystniejsza w porównaniu do oryginału, a jego krawędzie nawet w takiej skali wydają się być bardziej charakterystyczne.



Rys. 3. Wynik dodania zdjęcia oryginalnego ze zdjęciem przefiltrowanym.

Tak wygląda zbliżenie na szczegół terenowy (krawędź) obrazu oryginalnego i wynikowego.



Rys. 4. Porównanie szczegółów obrazu wynikowego (na górze) i oryginalnego (na dole).

3. Wykorzystanie analizy falkowej do usuwania szumów z obrazów cyfrowych

Wykorzystanie obrazów cyfrowych z nieusuniętym zaszumieniem do modułów obróbki fotogrametrycznej, wykorzystującej korelację obrazów metodą Area Based Matching, będzie prowadziło do zafałszowania wyników. Dlatego też, przed przystąpieniem do przetwarzania obrazów jeśli istnieje taka potrzeba powinniśmy usunąć występujący szum na cyfrowej reprezentacji obrazu. Stosując analizę falkową możemy wyodrębnić i usunąć zaszumienie z obrazu cyfrowego. Idea odszumienia bez straty istotnych szczegółów polega na rozłożeniu obrazu za pomocą falek, wykorzystując filtr uśredniający i filtr tworzący szczegóły.

Równanie w zagadnieniach tłumienia szumu w obrazach cyfrowych wygląda tak:

$$Z[n] = f[n] + S[n],$$

w którym sygnał f jest wektorem deterministycznym o N elementach, reprezentowanych przez dane pomiarowe $Z[n]$ obarczone szumem addytywnym $S[n]$.

Dekomponując Z względem bazy ortogonalnej $\{g_m\}$ $0 \leq m < N$, zachodzi równość

$$(Z, g_m) = (f, g_m) + (S, g_m)$$

Zakładając, że szum $S[n]$ ma zerową wartość średnią i wariancję σ^2 oraz iloczyny skalarne (S, g_m) są niezależnymi zmiennymi losowymi, możemy zdefiniować estymator nieliniowy

$$\tilde{Y} = \sum_{m=0}^{N-1} (Z, g_m) \theta[m] g_m$$

Przy czym stałe $\theta[m]$ należy $\{0, 1\}$ i zależy od każdej realizacji f procesu Y i minimalizują błąd średniokwadratowy.

Uwzględniając wprowadzone ograniczenia mamy:

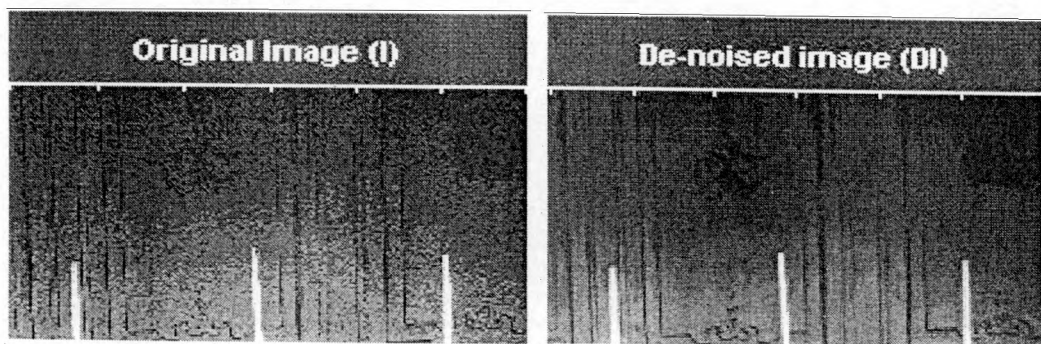
$$\theta[m] = \begin{cases} 1 & \text{dla } |(f, g_m)|^2 \geq \sigma^2 \\ 0 & \text{dla } |(f, g_m)|^2 < \sigma^2 \end{cases}$$

Więc współczynnikiem rozwinięcia będącym poniżej poziomu szumu przyporządkowuje się wartość zero. W tym przypadku współczynnik $\theta[m]$ zależy od sygnału f , którego nie znamy. Wykorzystując estymator progowy, który tłumi każdy z obciążonych szumem współczynników (Z, g_m) za pomocą pewnej funkcji nieliniowej $\theta[x]$, okazuje się, że błąd średniokwadratowy wzrasta w tym przypadku nie więcej niż $2 \ln N + 1$ razy w stosunku do minimalnego błędu średniokwadratowego.

Progowa estymacja falkowa jest estymacją z wygładzeniem dostosowanym lokalnie do regularności sygnału.

Zastępowanie współczynników falkowych obciążonej szumem reprezentacji $Z[n]$ sygnału $S[n]$ wartościami funkcji progowej θ , możemy interpretować jako wygładzanie adaptacyjne. W wyniku tej operacji wartość zero nadajemy wszystkim współczynnikom o wartościach bezwzględnych poniżej progu $T = \sigma \sqrt{2 \ln N}$. Jest to więc wygładzanie adaptacyjne, zależne od amplitudy $|(Z, \psi_{j,m})|$. Jeśli $|(Z, \psi_{j,m})| \geq T$, to $|(f, \psi_{j,m})|$ jest z dużym prawdopodobieństwem stosunkowo duże i występuje przy małych skalach w otoczeniu ostrych zmian sygnału f . Przez ich zachowanie unikamy wygładzenia ostrych zmian sygnału.

Oto przykład obrazu oryginalnego i odszumionego:



Rys. 5. Fragmenty zdjęcia naziemnego oryginalnego oraz odszumionego przy wykorzystaniu falki Daubechies.

4. Podsumowanie

Nie zostały przedstawione w artykule analizy dokładnościowe przefiltrowanych obrazów cyfrowych i wykorzystanie ich w automatycznej aerotriangulacji cyfrowej i w generowaniu Numerycznego Modelu Terenu, gdyż są one tematem dalszych badań i analiz. Problem przy obecnym zaawansowaniu oprogramowania fotogrametrycznego jest jednak duży i możliwość wykorzystania analizy falkowej przy opracowaniach fotogrametrycznych jest jednak zależny od producentów oprogramowania. Analiza falkowa jest dziedziną, która na pewno zostanie wykorzystana w fotogrametrii cyfrowej, a nastąpi to niestety dopiero wtedy gdy programy wykorzystywane przez fotogrametrów będą miały takie możliwości. Wszędzie tam gdzie filtracja w dziedzinie częstotliwościowej nie wystarczy, analiza falkowa zastąpi analizę Fourrierowską.

Literatura:

- Białasiewicz J. r. wyd. 2000 „Falki i aproksymacje”, WNT Warszawa
 Chui C. r. wyd. 1992 „An Introduction to Wavelets”, AP INC San Diego
 Daubechies I. r. wyd. 1992 „Wavelets”, SIAM Publ. Philadelphia
 Kwiatkowski W. r. wyd. 1999 „Podstawy Systemów Multimedialnych”, WAT Warszawa

Recenzował: dr inż. Ryszard Preuss